

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

João Marcos Carnieletto Nicolodi

Análise financeira de medidas de eficiência energética e previsão do impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma edificação educacional de nível superior

Florianópolis
2020

João Marcos Carnieletto Nicolodi

Análise financeira de medidas de eficiência energética e previsão do impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma edificação educacional de nível superior

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientadora: Prof^a. Ana Paula Melo, Dra.

Florianópolis

2020

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

Nicolodi, João Marcos Carnieletto

Análise financeira de medidas de eficiência energética e previsão do impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma edificação educacional de nível superior / João Marcos Carnieletto Nicolodi ; orientadora, Ana Paula Melo , 2020.

113 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Eficiência Energética em Edificações. 3. Simulação Computacional. 4. Mudanças Climáticas. I. , Ana Paula Melo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

João Marcos Carnieletto Nicolodi

Análise financeira de medidas de eficiência energética e previsão do impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma edificação educacional de nível superior

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil

Florianópolis, 03 de Dezembro de 2020.

Prof^a. Luciana Rohde, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof^a. Ana Paula Melo, Dra.
Orientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Fagner Leonardo Zancanaro
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda a sociedade brasileira, por reconhecer a importância de um ensino superior público de qualidade, e por permitir e financiar esse curso de graduação em Engenharia Civil.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por concentrar as melhores oportunidades e estruturas tanto para a qualificação pessoal e profissional dos estudantes quanto para desenvolver as pessoas e o futuro das pessoas que passam pela instituição.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Civil, que constroem esse curso, e em especial aos professores Roberto Lamberts e Enedir Ghisi, por me apresentarem à área de pesquisa que guiou toda minha graduação e culminou neste trabalho, e por sua liderança e importância mundiais no tema.

À professora Ana Paula Melo, pela orientação atenciosa, cuidadosa e dedicada deste trabalho, pelas dicas e ensinamentos, e por suas sempre presentes serenidade e simpatia.

Ao Fagner e à equipe da Petinelli pela amizade e apoio intelectual e técnico necessários para o desenvolvimento desta pesquisa.

Às amigas de dentro e fora da UFSC, que contribuíram para me tornar quem sou hoje e para tornar mais leves e alegres todos os momentos da vida, e das quais o isolamento social me traz enormes saudades.

Finalmente, à minha família, por todo o apoio ao longo desse percurso. Aos meus pais, Tânia e Marcos, pela paciência durante 7 longos anos de graduação, pelo incentivo inabalável e pelos esforços para que esse caminho fosse possível de ser trilhado. À minha irmã, Maria, pelas risadas, carinho e compreensão. À minha namorada, Luiza, pela paciência durante o desenvolvimento deste trabalho e por compartilhar aprendizados, crescimentos, planos, ideias e ideais. Amo vocês.

*“Pour ce qui est de l’avenir, il
ne s’agit pas de le prévoir, mais
de le rendre possible.”*

Antoine de Saint-Exupéry

*“It’s a difficult business, creating
a new, alternative civilization.”*

David Graeber

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de analisar uma edificação educacional de ensino superior noturno localizada na região metropolitana de Florianópolis – SC e possíveis medidas de eficiência energética quanto ao desempenho termoenergético atual e sua resiliência em relação às mudanças climáticas. O estudo inclui a calibração do modelo computacional da edificação, proposição de intervenções na envoltória para reduzir o consumo do sistema de climatização, análise de viabilidade financeira das medidas e análise dos impactos do aquecimento esperado da temperatura global no consumo energético da edificação e das MEEs. A calibração foi realizada com base em faturas de energia e dados medidos do consumo dos condicionadores de ar, que comprovaram a importância do procedimento pelas diferenças significativas para o consumo simulado inicial, não calibrado. Através de simulações no programa *EnergyPlus*, foram analisados os impactos da redução da absorvância de paredes e coberturas, adição de isolamento em paredes, coberturas e janelas, redução do fator solar de vidros e adição de *brises* sobre as janelas. Os resultados mostram que a reflexão da radiação solar, pela melhoria dos vidros e pintura de paredes e telhado na cor branca, resulta na economia de energia, enquanto a aplicação de isolamento piora o desempenho. O *retrofit* energético da edificação para aplicação das medidas propostas não possui viabilidade econômica, embora o menor custo de instalação na fase de projeto viabilize algumas delas para novas edificações da tipologia estudada. A análise dos impactos das mudanças climáticas na região, em cenário de pouca coordenação global para combater problemas socioambientais, estima a duplicação do consumo de energia na climatização da edificação e mostra a resiliência das MEEs, com aumentos na economia de energia para todas as medidas. Os resultados indicam, também, mudanças de estratégia de economia de energia, com melhora no desempenho de medidas de isolamento térmico. Apesar de somente a pintura das fachadas ser economicamente viável para edificações existentes, boa parte das medidas se tornam viáveis em novas construções, ressaltando a importância da integração da eficiência energética nas etapas de projeto.

Palavras-chave: Eficiência Energética em Edificações. Simulação Computacional. Mudanças Climáticas.

ABSTRACT

This project aims to analyze a nighttime higher-education building, located in southern Brazil's humid subtropical climate, and possible Energy Conservation Measures (ECM) for their current thermal-energetic performances and resiliency in face of climate change. The study includes the calibration of the building's digital model, the development and financial analysis of ECMs for the building envelope, and the verification of climate change impacts on building energy consumption and ECM driven energy savings. Model calibration was performed based on energy bills and air-conditioning units submetering, whose differences to the uncalibrated simulation results prove the importance of such procedures. Through *EnergyPlus* simulations, the energy savings related to the ECMs were studied, which includes external walls and roofing absorptance reduction; walls, roofing and windows thermal insulation; glass solar heat gain coefficient (SHGF) reduction; and the installation of external window shading. Results show that solar radiation reflection strategies, as improved SHGF and brighter external colors, are related to the most energy savings between the ECMs, while insulation worsens the building performance. Building energetic retrofit to apply the proposed measures is not economically feasible, even if some of them are profitable in a new construction scenario for the same typology. The climate change impacts analysis, assuming little to no global coordinated effort to address socio-environmental problems, estimates a doubling of the energy consumption for building climatization and shows the resiliency of the ECMs, with a predicted increase in energy savings for each measure. Results also show a swift in energy saving strategies, with significant improvement in the performance related to thermal insulation measures, and show that even if only the façade color change will be economically feasible for a retrofit in 2050's climate, many of them are profitable for new constructions, which shows the importance of energy efficiency integration in building conception phase.

Keywords: Building Energy Efficiency. Simulation. Climate Change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Decomposição da evolução no consumo energético de equipamentos entre 2005 e 2018 (GWh).....	21
Figura 2: Comparação entre performance energética esperada e medida para 62 edificações certificadas LEED New Construction.....	30
Figura 3: Esquematização da malha tridimensional de um GCM.....	41
Figura 4: Cenários de emissões de gases e de evolução climática	42
Figura 5: Comparação da evolução da concentração de carbono na atmosfera para cada cenário de emissão.	43
Figura 6: Complexo universitário do estudo, com ginásio à frente e edificação acadêmica aos fundos	49
Figura 7: Fachada leste do Bloco 2 da edificação, com Bloco 1 aos fundos.....	50
Figura 8: Caminho solar no projeto	51
Figura 9: Detalhe do sistema de climatização de uma sala de aula.....	53
Figura 10: Modelo geométrico da edificação.....	55
Figura 11: Entornos da edificação	58
Figura 12: Detalhe do equipamento de medição.....	59
Figura 13: Sombreamentos dos <i>brises</i> propostos nas fachadas leste e oeste	66
Figura 14: Sombreamentos gerados pelos <i>brises</i> propostos para a fachada norte ..	67
Figura 15: Comparação entre o consumo simulado não calibrado e o medido.....	74
Figura 16: Comparação entre o consumo medido de ar condicionado e os resultados da primeira simulação	75
Figura 17: <i>Schedule</i> calibrado de uma sala de aula típica	76
Figura 18: Ocupação calibrada de uma sala de aula típica.....	77
Figura 19: Comparação dos dados medidos com os consumos simulados calibrados.	77
Figura 20: Consumo de energia da edificação por uso final	80
Figura 21: Transferências térmicas da edificação, ao longo do ano	81
Figura 22: Comparação das temperaturas médias mensais entre os arquivos climáticos e os dados medidos no ano do estudo	88
Figura 23: Evolução da Carta Psicrométrica local com as mudanças climáticas.	89
Figura 24: Carta bioclimática brasileira.	90

Figura 25: Consumo de energia da edificação por uso final em cenário futuro.....	91
Figura 28: Transferências térmicas anuais em clima atual e futuro.	91
Figura 27: Comparação entre consumo simulado para climatização atual e futura ..	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados importantes para análise da edificação existente.....	27
Tabela 2: Propriedades térmicas dos materiais usados no modelo	50
Tabela 3: Lista das máquinas de ar condicionado presentes na edificação.....	52
Tabela 4: Lista de equipamentos de uso geral.....	53
Tabela 5: <i>Schedules</i> por tipologia de ambiente.....	54
Tabela 6: Medidas de eficiência para a vedação externa da edificação	63
Tabela 7: Medidas de eficiência para a cobertura da edificação.....	64
Tabela 8: Medidas de eficiência para as janelas da edificação.....	65
Tabela 9: Valores das tarifas não tributadas de energia	69
Tabela 10: Valores das tarifas tributadas de energia	69
Tabela 11: Consumo simulado das máquinas medidas	75
Tabela 12: Comparação entre consumos simulados e medidos do sistema de climatização e da edificação como um todo.....	78
Tabela 13: Variação do uso de energia do modelo pela aplicação das medidas de eficiência, com arquivo climático histórico.....	82
Tabela 14: Variação do uso de energia do modelo pela aplicação do conjunto das melhores medidas de eficiência energética, com arquivo climático histórico.....	84
Tabela 15: Custos e benefícios presentes relacionados às MEEs estudadas.	86
Tabela 16: Resultados da análise financeira presente para as MEEs estudadas.	87
Tabela 17: Comparação entre os usos de energia atual e futuro da edificação base.....	93
Tabela 18: Comparação da variação do consumo simulado de energia atual e futuro com a aplicação das MEEs	93
Tabela 19: Comparação da variação da demanda simulada de energia atual e futura com a aplicação das MEEs	95
Tabela 20: Análise de viabilidade financeira das MEEs em cenário climático futuro.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira De Normas Técnicas

AR4: Quarto Relatório de Avaliação, do IPCC

AR5: Quinto Relatório de Avaliação, do IPCC

ASHRAE: *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

CAPEX: Custos relacionados ao investimento inicial de um projeto

CEE: Coeficiente de Eficiência Energética

CELESC: Centrais Elétricas de Santa Catarina

COFINS: Contribuição para o Financiamento de Seguridade Social

COP: Coeficiente de Desempenho

ECBS: *Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*

EPS: Poliestireno Expandido

EPW: *EnergyPlus Weather File*

EUI: Intensidade de Uso de Energia

GCM: Modelo de Circulação Global

HadCM3: 3ª Versão do GCM do Centro Hadley para Mudanças Climáticas do Escritório de Meteorologia do Reino Unido

ICMS: Imposto sobre Circulação de Mercadoria e Prestação de Serviços

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPCC DDC: Centro de Distribuição de Dados do IPCC

IPCC: Painel Intergovernamental para as Mudanças Climáticas

LED: Diodo Emissor de Luz

MEE: Medidas de Eficiência Energética

MME: Ministério de Minas e Energia

ONU: Organização das Nações Unidas

OPEX: Custos ou benefícios recorrentes, relacionados à operação de um projeto

PBE: Programa Brasileiro de Etiquetagem

PE: Poliestireno

PIS: Programa de Integração Social

Procel: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PTHP: *Packaged Terminal Heat Pump*

RCM: Modelo de Circulação Regional

RCP: *Representative Concentration Pathways*

Selic: Sistema Especial de Liquidação e Custódia

SINAPI: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil

SRES: Relatório Especial para Cenários de Emissões, do IPCC

TAR: Terceiro Relatório de Avaliação, do IPCC

TE: Tarifa de Energia

TIR: Taxa Interna de Retorno

TMA: Taxa Mínima de Atratividade

TMY: *Typical Meteorological Year*

TRY: *Typical Reference Year*

TUSD: Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

VPL: Valor Presente Líquido

VRF: Fluxo de Refrigerante Variável

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Ângulo de altitude solar do *brise*

γ – Ângulo da projeção lateral do *brise*

FS – Fator Solar

U – Transmitância Térmica

Ct – Capacidade Térmica

α_{Cob} – Absortância solar da cobertura

α_{Par} – Absortância solar da fachada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo Principal	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES	24
2.1.1	Simulação Computacional.....	29
2.1.2	Medidas de Eficiência Energética	33
2.2	ANÁLISE FINANCEIRA.....	36
2.3	MUDANÇAS CLIMÁTICAS	38
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
3	MÉTODO.....	48
3.1	OBJETO DE ESTUDO	48
3.2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	54
3.2.1	Calibração do Modelo	58
3.3	MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	62
3.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	68
3.5	ANÁLISE CLIMÁTICA	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	CALIBRAÇÃO	74
4.2	MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	79
4.3	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	85
4.4	IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	88
5	CONCLUSÃO	98

5.1	LIMITAÇÕES E DIFICULDADES	99
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	102

1 INTRODUÇÃO

A partir do século XVIII, a revolução industrial modificou os padrões de vida e de consumo das sociedades. A mudança no processo de confecção de bens tornou o uso de energia repentinamente intensivo. A grande oferta de bens de consumo e de alimentação levaram, por sua vez, a uma gradual melhoria na qualidade de vida e a uma explosão populacional que aumentou ainda mais os impactos nos ecossistemas.

A partir da Conferência de Estocolmo em 1972, a alteração na composição atmosférica causada pela queima de combustíveis fósseis e os impactos da rápida alteração no uso do solo começaram a ser abordados em arenas importantes da política internacional (VAN BELLEN, 2004). Nos anos seguintes, segundo Brüseke (1994), foram estabelecidos os termos “ecodesenvolvimento” e “desenvolvimento sustentável”, que inseriram a dimensão ambiental em um conceito outrora estritamente econômico e culminaram na primeira de uma série de conferências intergovernamentais promovidas pela Organização das Nações Unidas (ONU), a Rio 1992. No século XXI, enfim, a sustentabilidade e a redução dos impactos ambientais passaram a fazer parte dos principais acordos internacionais, adquirindo um papel importante dentre objetivos e metas de melhoria de qualidade de vida ratificados entre os países da ONU (ONU, 2000; ONU, 2015).

Os impactos ambientais relacionados à geração e ao consumo de energia estão, ao lado daqueles causados pelo uso não sustentável da terra, entre as principais preocupações de especialistas que estudam as tendências e padrões do processo global de mudança climática (IPCC, 2018). Mesmo com uma tendência de baixa em indicadores importantes, como o Fator de Carbono da energia (massa de CO₂ emitida para a geração de quantidade determinada de energia) e a Intensidade de Energia da economia (relação entre a energia total consumida e o Produto Interno Bruto dos países), indicando a descarbonização das principais economias mundiais, o consumo mundial de energia e a decorrente emissão de gás carbônico continuam em crescimento, com aumento em 2,1% e 1,7%, respectivamente, no ano de 2018 (ENERDATA, 2019). No Brasil, estudos de tendência estimam variação positiva no consumo de energia elétrica na faixa de 3,8% ao ano, e uma crescente participação da matriz elétrica no total de energia consumida no país (EPE, 2019a).

Dentre as soluções para o desafio, destaca-se a transição energética para energia gerada a partir de fontes não poluentes. Essa transição, porém, tem ocorrido de maneira mais lenta que o calculado como necessário para manter os impactos ambientais em níveis controlados (ENERDATA, 2019; PNUMA, 2019). Projeções de EPE (2019a) indicam que, no Brasil, a participação das fontes térmicas de energia aumentará de 14% em 2020 para 18% em 2029 mesmo com as fontes renováveis, com destaque para as energias fotovoltaica e eólica, passando de 22% para 33% no mesmo período. O mencionado crescimento no consumo de energia elétrica deve elevar o consumo de 552 TWh em 2019 para 802 TWh em 2029, acompanhado por um aumento de apenas 25 TWh na autoprodução distribuída de energia.

1.1 JUSTIFICATIVA

A construção civil é um alvo importante dos esforços para um desenvolvimento mais sustentável. A partir do mesmo processo de industrialização e globalização que desenvolveu tecnologias largamente replicáveis, o setor da construção abandonou práticas e materiais adaptados às condições locais e passou a priorizar uma indústria uniformizada de larga escala, com soluções semelhantes para condições culturais e ambientais totalmente distintas (BRASIL, 2011). Ainda segundo o MME, materiais de construção de base cerâmica e cimentícia, cujo processo industrial é intensivo no consumo de combustíveis fósseis como carvão e lenha (EPE, 2019b), e soluções artificiais para conforto térmico e lumínico vêm se tornando padrão. O resultado foi um setor que, mundialmente, somando construção e operação, consome, aproximadamente, 36% de toda energia gerada (elétrica ou não) e é responsável por quase 40% das emissões de gás carbônico, principal agente das mudanças climáticas globais (IEA, 2018).

O 4º Relatório do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) identificou que o setor das edificações possui, entre todos os setores analisados, a melhor perspectiva de redução de impactos ambientais em uma relação entre custos de investimento e redução de emissões de gás carbônico.

Nesse contexto, passou a ser desenvolvido o conceito de construção sustentável, que se destaca por uma análise do ciclo de vida da edificação para, a partir de mudanças no paradigma dos projetos, priorizar materiais e técnicas com

menor impacto ambiental e permitir o uso racional de recursos naturais como água e energia em sua fase de operação (LAMBERTS et al., 2008).

Adalberth (1997) encontrou que cerca de 85% do total de energia consumida durante o ciclo de vida de uma edificação residencial, que inclui construção, uso e demolição, se dá justamente na etapa de uso. A operação de edificações residenciais, comerciais e públicas é responsável pelo consumo de 51% do total de energia elétrica utilizada no Brasil (EPE, 2019a) e aproximadamente 25% do consumo de energia primária a nível mundial (GONÇALVEZ; BODE, 2015). A redução do consumo de energia e a geração de energia por fontes locais e alternativas, portanto, se torna essencial para a mitigação dos danos ambientais relacionados à geração energética.

Kuramochi *et al.* (2018) mostra que as perspectivas de limitar o aquecimento global médio ao 1,5 °C recomendado pelo IPCC (2018) dependem de uma redução de 80 a 90% das emissões diretas de gases do efeito estufa na operação de edificações. Segundo o autor, isso dependeria de que as taxas anuais de renovação atingissem entre 3 e 5% dos edifícios já existentes e de que todas as novas edificações atingissem o nível de zero-carbono a partir de 2020 em países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), e a partir de 2025 para o restante do mundo.

A eficiência no uso final da energia, conhecida como eficiência energética, visa controlar a demanda de energia sem deixar de atender às diferentes necessidades da sociedade em relação a serviços energéticos fundamentais que, no setor da operação de edificações, abrangem a iluminação e o aquecimento/resfriamento de ambientes e água (BRASIL, 2011). Ainda, segundo a EPE (2020), as práticas, que incluem evitar desperdícios e realizar mais funções com a mesma quantidade de energia, são fundamentais para a segurança energética, garantindo maior produtividade e competitividade, e reduzindo os danos sobre o meio ambiente.

Sabendo da oportunidade, os esforços para a redução do consumo de energia no Brasil se iniciaram ainda na década de 80, em um cenário de crises globais e instabilidade no preço do petróleo, com a criação do PBE (Programa Brasileiro de Etiquetagem) em 1984 para incentivar os níveis de eficiência energética de aparelhos consumidores. No ano de 1985, foi oficializado o Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia), coordenado pelo Ministério de Minas e Energias e executado pela Eletrobrás, com o intuito de "(...) integrar as ações visando a

conservação de energia elétrica no País, dentro de uma visão abrangente e coordenada (...)” (BRASIL, 1985). O Procel foi responsável, em 1993, pela implantação do Selo Procel, que trabalha de maneira análoga e complementar ao PBE e atesta melhores índices de desempenho energético de equipamentos e eletrodomésticos e, segundo Brasil (2015), permitiu a economia de 80,6 TWh até 2014.

O ano de 2001 apresentou uma grande crise energética no país, decorrente da falta de chuvas em uma matriz extremamente dependente da energia hidrelétrica, do aumento recente no consumo de energia e da falta de investimento no setor (FOSSATI *et al.*, 2016). Esse cenário desfavorável levou à promulgação da Lei nº 10.295 de 17 de outubro de 2001, conhecida como Lei da Eficiência Energética, que determinou a criação de padrões de mínima eficiência e máximo consumo para os diversos aparelhos consumidores de energia e direcionou esforços para políticas de eficiência energética para edificações (BRASIL, 2001).

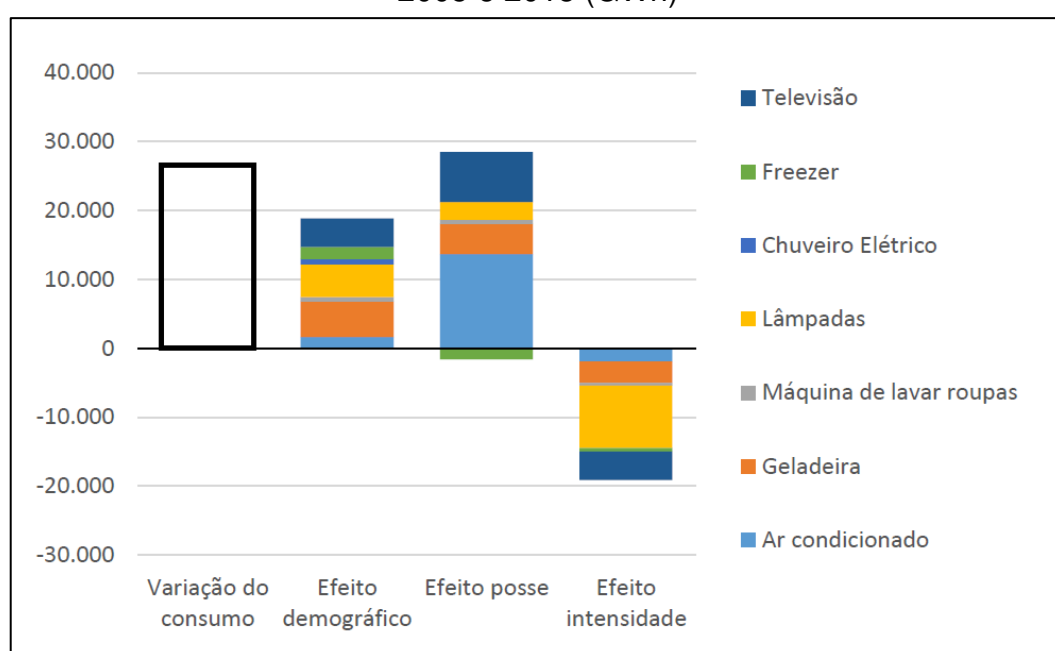
A partir da Lei 10.295 e do Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, foi estabelecido o Grupo Técnico para Melhoria da Eficiência Energética nas Edificações no País – GT Edificações, com a função de estudar e regular procedimentos de avaliação de eficiência energética no Brasil. Esse é considerado o marco inicial das construções energeticamente sustentáveis no país, quando Brasil (2002) reconheceu a importância de um projeto integrado de edificações para promover sua sustentabilidade, ressaltou a oportunidade de melhorar significativamente a eficiência energética de edificações existentes através de técnicas de restauração e modificações (“*retrofit*”), e passou a promover a regulamentação das iniciativas no setor.

Diversos obstáculos ainda atrasam o desenvolvimento de políticas e tecnologias que melhoram o desempenho de equipamentos e edificações. A ausência de dados de consumo, que dificulta o monitoramento e a análise da eficácia de estratégias de eficiência energética, e a falta de informação sobre as sinergias entre eficiência e o bom funcionamento de sistemas, que leva a uma percepção de maiores riscos em investimentos no setor, são alguns dos pontos que dificultam o crescimento do mercado da eficiência energética. No setor público e privado, a dificuldade em priorizar investimentos na área, seja pela concorrência que obriga investimentos com retorno mais rápido ou pela carência de recursos para áreas aparentemente mais

urgentes como saúde, serviços sociais e proteção ambiental, também dificultam a visibilidade do setor energético (ODYSEE-MURE, 2016).

Mesmo assim, EPE (2020) identificou, conforme representado na Figura 1, que a redução da intensidade no uso de energia, relacionado à melhora na eficiência energética de equipamentos, contrabalanceou o aumento populacional (efeito demográfico) e de poder de compra (efeito posse) para limitar em aproximadamente 40% o crescimento do consumo de equipamentos no país entre 2005 e 2018.

Figura 1: Decomposição da evolução no consumo energético de equipamentos entre 2005 e 2018 (GWh)



Fonte: EPE (2020)

Observa-se que a Figura 1 não aborda a melhoria no desempenho de edificações para a redução do consumo energético de aparelhos de ar condicionado e lâmpadas. Percebe-se, entretanto, uma oportunidade de atingir níveis superiores de economia através de projetos e edificações com estratégias passivas de condicionamento ambiental e iluminação. Introduzida pela EPE (2019a), a melhora do desempenho energético de edificações e equipamentos possui previsão de reduzir em 7% o consumo de energia elétrica em edificações brasileiras no ano de 2029. A economia por meio de eficiência energética será, portanto, uma das responsáveis pelo suprimento da demanda energética do país, à frente de fontes sustentáveis como

biomassa (6,7% da matriz elétrica), solar fotovoltaica (4%) e pequenas centrais hidrelétricas – PCHs (3,7%).

1.2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.2.1 Objetivo Principal

Este trabalho possui o objetivo de analisar a viabilidade financeira de medidas de eficiência energética e estimar o impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico de uma edificação educacional de nível superior.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse estudo são:

1. Calibrar o modelo termoenergético da edificação educacional através de dados de submedição de consumo do sistema de climatização e dados de consumo geral das faturas de energia elétrica;
2. Analisar o comportamento do consumo energético da edificação após a aplicação de medidas de eficiência energética na envoltória;
3. Analisar a viabilidade econômica das medidas de eficiência energética adotadas;
4. Estimar os impactos das mudanças climáticas no consumo de energia da edificação e nas medidas de eficiência propostas em um cenário futuro.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo do trabalho, é feita a introdução do tema da eficiência energética nas edificações e a justificativa, motivação e relevância de seu estudo, seguido dos objetivos a serem alcançados nesta pesquisa. A seguir, o segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica necessária para compreensão do tema e

dos métodos e abordagens aplicados. Esses, por sua vez, são detalhados no capítulo 3, com a descrição da metodologia utilizada para atingir os objetivos de calibração de modelo, análise de viabilidade de medidas de eficiência energética e influência das mudanças climáticas no desempenho da edificação. O capítulo 4 traz os resultados decorrentes da aplicação do método descrito, bem como discussões a respeito do seu significado. Por fim, o capítulo 5 apresenta a conclusão deste trabalho, com discorrimento dos aprendizados obtidos e correlação com os objetivos iniciais, das limitações do escopo da pesquisa e sugestões de trabalhos futuros. Por último, são exibidas as referências consultadas para a fundamentação teórica da pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão dos assuntos necessários para compreensão do método aplicado de diagnóstico energético. Dividiu-se o procedimento de revisão em três partes principais. A primeira parte relaciona-se a critérios de consumo energético em edificações, incluindo o processo de captação de dados, estimativas de consumo e intervenções visando melhor eficiência energética. O segundo passo é relacionado ao setor financeiro, com o procedimento de verificação de viabilidade econômica das medidas possíveis. Por fim, a terceira parte visa abordar os prejuízos em projetar edificações tendo em vista o clima presente e procedimentos para tratar das incertezas e variações climáticas previstas para a vida útil da edificação.

2.1 DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO DAS EDIFICAÇÕES

A performance energética de uma edificação é a avaliação da qualidade do ambiente construído em relação ao consumo de energia (POEL; VAN CRUCHTEN; BALARAS, 2007), que reflete a quantidade de energia necessária para atender a todas as demandas e expectativas durante o uso do edifício. De acordo com Borgstein, Lamberts e Hensen (2018), três indícios demonstram desempenho falho: o não atendimento a parâmetros fundamentais da qualidade do ambiente interior, uso de energia ou custos operacionais desnecessariamente elevados, e baixos níveis de satisfação e produtividade dos usuários.

Uma vez garantido o atendimento às qualidades esperadas no ambiente interior, o que não ocorre em 85% dos casos estudados pelos autores, pode-se padronizar medidas para comparações entre edificações similares. A performance pode ser medida quantitativamente em relação à eficiência energética, uso de energia ou consumo de energia, e expressa através de indicadores de desempenho energético (ABNT, 2014). Os mais conhecidos dentre eles são relacionados ao consumo, como a intensidade de uso energético – EUI [kWh/m²] –, e aos impactos ambientais através de emissões de carbono, mas podem ser compostos por quaisquer parâmetros de interesse e até separados por sistema.

Segundo o Programa de Energia em Edificações e Comunidades da Agência de Energia Internacional – IEA (2016), o desempenho energético é influenciado, na prática, por seis fatores principais, sendo três deles físicos e fixos (clima, envoltória da edificação e os serviços e sistemas energéticos da edificação), e outros três relacionados aos usuários (operação e manutenção, atividades e comportamentos dos ocupantes e condições ambientais interiores).

Para Yoshino, Hong e Nord (2017), além disso, é necessária uma análise conjunta e detalhada de todos os seis quesitos introduzidos por IEA (2016) para a compreensão dos dados de consumo, levando simultaneamente em conta a performance da construção e os hábitos de uso de energia. Hong *et al.* (2016), por sua vez, definem que a investigação deve abranger a presença e movimento dos ocupantes, conforto térmico, janelas e entrada de luz natural, e iluminação e equipamentos elétricos em geral.

Segundo Wang, Yan e Xiao (2012), o processo de quantificação do uso de energia nas dependências de uma edificação e de verificação de sua performance energética é denominado de avaliação energética. Esse método pode ser empregado tanto para a classificação da construção através de certificações, etiquetagens e *benchmarking*, quanto para o desenvolvimento de um diagnóstico energético com a função de detectar quaisquer ineficiências nos sistemas e instalações, identificar suas causas e propor soluções.

A ABNT (2014) normatiza o termo em português orientando ao uso de “Diagnóstico Energético” como tradução do termo em inglês “*Energy Audits*”, que, conforme definido pelo Comitê Europeu de Normatização (CEN, 2012), consiste em um procedimento sistemático para obter conhecimento adequado sobre o perfil de consumo energético existente de uma edificação, além de identificar e quantificar oportunidades de bom custo-benefício para economia de energia e relatar as descobertas. Em Alajmi (2012), se trata de um processo para detectar problemas operacionais, melhorar o conforto dos ocupantes e otimizar o uso de energia de edificações existentes.

O valor de um procedimento como esse, para Dall’O, Speccher e Bruni (2012), é o de simplificar o processo de análise de eficiência energética de uma edificação por garantir ao proprietário o conhecimento de sua situação do consumo de energia, passando pela avaliação de estratégias que melhorem a performance energética e a

definição de um processo racional, em aspectos técnicos e econômicos, de implementação das melhorias.

A ASHRAE (2011) dividiu os diversos procedimentos de auditoria energética em 3 categorias, de acordo com o nível de energia empregado no processo determinado por restrições de tempo, orçamento, escopo ou pelo nível de complexidade do edifício (ALAJMI, 2012). Além de uma análise preliminar dos históricos e custos do consumo de energia através de dados disponibilizados e indicadores de performance, os três níveis mencionados são os seguintes, conforme tradução de CBCS (2016):

1. *Walk-through*, com um levantamento breve da edificação e definição de medidas de redução de consumo de baixo custo. Nível mínimo de detalhamento que pode ser classificado como diagnóstico energético (ABNT, 2014)
2. Análise energética, com a análise do consumo discriminada por uso final de energia, verificação das condições de operação e manutenção dos sistemas através de entrevistas e medições para determinar oportunidades de economia.
3. Análise detalhada de medidas de alto custo de investimento, a partir de um maior detalhamento das medições de qualidade interna e consumo de energia e modelagem computacional precisa das medidas propostas para calcular a viabilidade através da Análise de Custo de Ciclo de Vida.

A ABNT (2014), em uma análise comparativa dos três níveis, ou tipos, de diagnósticos energéticos, determina alguns detalhes que os diferenciam. Para tal, introduz alguns conceitos fundamentais do procedimento de diagnóstico, dividindo o processo geral em 5 partes:

1. Levantamento de dados de equipamentos, sistemas e processos consumidores de energia e seus respectivos horários e procedimentos de utilização;
2. Análise e organização dos dados, desenvolvimento de balanço energético para identificação dos usos de energia significativos, revisão

de curvas e tendências de consumo e comparação com *benchmarks* e dados referência;

3. Identificação de oportunidades de efficientização de equipamentos e sistemas, com o levantamento das medidas de eficiência plausíveis e quantificação de medidas de baixo custo;
4. Avaliação de oportunidades no quesito econômico através de cálculos financeiros;
5. Determinação dos resultados obtidos no processo.

A IEA (2017a) ressalta que dados energéticos robustos são críticos para uma projeção precisa dos potenciais de redução de energia, e desenvolve um catálogo com 12 informações principais que devem ser investigadas, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Dados importantes para análise da edificação existente

Tipo de Informação	Descrição/Exemplo
Dados de Uso da Edificação	Cronogramas de uso e operação da edificação existente, com número de ocupantes, períodos de ocupação e níveis de atividade desempenhadas
Custos referência de Ciclo de Vida para a edificação	Custos de energia (através de faturas de energia e notas fiscais), de operação, manutenção e investimentos.
Consumo de energia global e específico por uso final	Garantir uma estrutura de sub-medição que forneça dados consistentes do consumo energético global e discriminado na edificação.
Uso ajustado de energia	Ajuste do consumo de energia no período de referência de acordo com condições climáticas registradas com dados de <i>Heating e Cooling Degree Days</i>
Dados de operação e performance atuais da edificação	Informações coletadas através de entrevistas, revisão de documentação e medições
Perfis de consumo	Avaliação das curvas de carga e consumo para identificar oportunidade de economia e redução de picos de demanda
Condições ambientais internas	Registro de dados de temperatura, taxas de ventilação e umidade no interior da edificação

Tabela 1. Continuação

Tipo de Informação	Descrição/Exemplo
Projetos executivos e <i>as-built</i>	Projetos com características bioclimáticas como orientação e elevação da edificação, aberturas e envidraçamento, materiais de construção e seus parâmetros
Sistemas de condicionamento ambiental (aquecimento, resfriamento e ventilação)	Inventário do sistema atual de condicionamento com parâmetros de operação como temperaturas de acionamento e cargas de funcionamento
Cargas gerais	Tipo, quantidade e potência das principais cargas pontuais como iluminação e equipamentos de uso geral
Descriminação de áreas	Descriminação das áreas da edificação por tipo de uso final, com sequências de operação e sub-medição de equipamentos e processos individualmente
Simulação/cálculo	Calibração do modelo energético da edificação atual com os dados dos sistemas e instalações

Adaptado de IEA (2017a)

A ASHRAE (2011), em seu guia de melhores práticas para diagnósticos energéticos, introduz as visitas à edificação estudadas como parte fundamental do processo que devem incluir, entre outros procedimentos, entrevistas com os responsáveis sobre as condições de uso, manutenção e operação dos sistemas e uma inspeção detalhada para coletar dados e especificações de equipamentos existentes.

Diversas dificuldades estão ligadas a essa metodologia, porém, devido aos grandes esforços necessários ao processo de revisão dos parâmetros e às incertezas apresentadas nas estimativas. Royapoor e Roskilly (2015) identificaram que, dentre os parâmetros de simulação, as incertezas são causadas principalmente pela existência de elementos de natureza dinâmica, como a eficiência inerente a equipamentos e sistemas, estocástica, com os padrões de uso e ocupação, e probabilística, com os arquivos e projeções climáticos. Tian *et al.* (2018), por sua vez, separam as incertezas em dois tipos: incertezas aleatórias e incertezas epistêmicas. Estas estão relacionadas à falta de conhecimento dos parâmetros e podem ser solucionadas com maiores investigações principalmente no sistema de climatização e na envoltória. Aquelas, porém, ocorrem devido à variabilidade inerente aos sistemas e são de baixa previsibilidade, como no caso das questões climáticas e comportamentais.

2.1.1 Simulação Computacional

A complexidade de avaliar o desempenho da edificação é ampliada pela influência de diversas características climáticas, suas interações e os diferentes efeitos por elas causados, e devido à necessidade de verificações mais complexas como os efeitos da inércia e atraso térmico da envoltória e da ventilação natural. A modelagem energética e simulação computacional, portanto, assumem papéis importantes para previsão de consumo para cada edificação e para cada solução específica (SADINENI; MADALA; BOEHM, 2011).

As incertezas climáticas estão relacionadas à análise de arquivos climáticos históricos para identificar o desempenho em climas futuros ao qual a edificação estará exposta (TIAN *et al.*, 2018). Os autores ainda tratam da oportunidade de utilização de projeções climáticas que levem em conta as variações naturais e não-naturais do clima, que facilitam a análise de risco através da definição de diferentes cenários de evolução, mas que ainda são baseados em projeções probabilísticas e incertas para um sistema complexo.

Nas últimas quatro décadas, a simulação computacional de edificações para verificação de seu desempenho termoenergético ganhou força e superou o mundo acadêmico para se tornar prática comum na indústria da construção civil (EGUARAS-MARTÍNEZ; VIDAURRE-ARBIZU; MARTÍN-GÓMEZ, 2014), a ponto de ser considerada há pelo menos duas décadas como “melhores práticas” do mercado (SOEBARTO; WILLIAMSON, 2001).

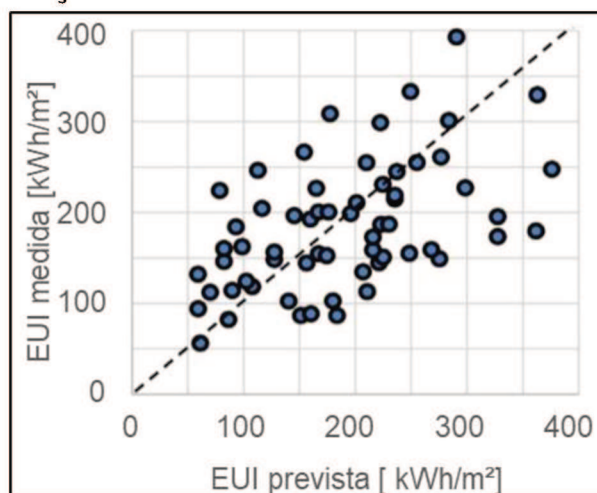
Programas de simulação como o *EnergyPlus*, DOE-2, ESP-r, IDA ICE, IES-VE e TRNSYS permitem, através de cálculos matemáticos considerando parâmetros geométricos, construtivos, climáticos e de ocupação da edificação e seus entornos, estimar o consumo energético da edificação, e identificar a melhora obtida no desempenho através de medidas de eficiência energética a partir de uma edificação de base (EUA, 2020). Mesmo que não forneçam sugestões ou comparações com soluções aplicadas em outras edificações de mesma tipologia e nem informem até quais níveis se atingiu o limite de efficientização do edifício (SOEBARTO; WILLIAMSON, 2001), as simulações permitem maior precisão nas estimativas de variáveis significativas para o mercado da construção, como economia de energia e retorno sobre o investimento aplicado (PAN; YIN; HUANG, 2008; ZUHAIB;

HAJDUKIEWICZ; GOGGINS, 2019). Possui, portanto, o valor de embasar soluções adotadas por permitir a comparação de eficácia entre diferentes possibilidades.

Vários autores concluíram, porém, que a ocupação e os hábitos comportamentais dos usuários são os principais responsáveis, ao mesmo tempo, pelo consumo de energia e pela incerteza gerada em qualquer tipo de previsão de consumo (HONG et al., 2016, 2017; TIAN et al., 2018; YAN et al., 2015; YOUNG et al., 2015), e estudos apresentam evidências medidas de grandes dispersões em dados de consumo de energia para cada tipologia de edificação (YOSHINO; HONG; NORD, 2017).

Segundo Eguaras-Martínez, Vidaurre-Arbizu e Martín-Gómez (2014) o comportamento dos ocupantes de uma edificação pode afetar em até 30% o consumo de seu sistema de climatização quando comparado às previsões simuladas, e leva até mesmo à variabilidade no consumo da edificação ao longo do tempo (TIAN *et al.*, 2018). Bahaj e James (2007) identificaram variações de até 300% no consumo de energia elétrica em seu estudo com nove edificações residenciais idênticas. Turner e Frankel (2008) analisaram 121 edificações de diversas tipologias e verificaram discrepâncias entre o consumo energético real e o previsto em 62 edificações. Como se observa na Figura 2, as variações podem ser tanto positivas quanto negativas, sendo que em alguns casos atinge a mesma magnitude de 300%, encontrada no estudo de Bahaj e James (2007), entre edificações de mesma intensidade energética esperada.

Figura 2: Comparação entre performance energética esperada e medida para 62 edificações certificadas LEED New Construction.



Fonte: Adaptado de Yan *et al.* (2015).

Na pesquisa realizada por De Wilde (2014), observou-se as causas disponíveis na literatura para erros em modelos termoenergéticos e descobriu-se que, embora seja relatado que falhas na construção e na instalação dos diferentes sistemas aumentam a imprevisibilidade do consumo energético, os procedimentos de operação são os principais responsáveis por essa lacuna entre previsão e consumo. Através de um processo de auditoria energética e pesquisas de satisfação em estudo com 33 edificações de escritório em diferentes climas brasileiros, Borgstein, Lamberts e Hensen (2018) identificaram algum grau de falha de performance energética em todas, com destaque para problemas nos sistemas de climatização e iluminação, e problemas de operação da edificação. A má operação, segundo os autores, prejudica tanto o conforto dos ocupantes quanto a performance energética da edificação, e a dificuldade de uma modelagem da ocupação estabelece incertezas nas simulações computacionais.

Como uma estimativa de consumo energético envolve premissas a respeito do comportamento dos usuários e da operação da edificação, esse é um dos principais desafios que os métodos de simulação computacional encontram. Quantificações a partir de cálculos computacionais e modelagem energética são a melhor ferramenta de previsão para novas edificações, mas, inevitavelmente, os cálculos apresentam discrepâncias em relação ao consumo real da edificação (WANG; YAN; XIAO, 2012). É recomendável, portanto, que a quantificação seja realizada com base em dados reais de consumo, que aumentam o nível de confiabilidade dos resultados e ainda permitem uma análise da performance dos sistemas dentro da edificação, integrando as dimensões de manutenção e operação no diagnóstico energético (LEE; YIK; BURNETT, 2007).

Existem algumas metodologias consolidadas para quantificar o consumo individualizado dos sistemas a partir de dados levantados em campo. Wang, Yan e Xiao (2012) recomendam, por exemplo, a aplicação de métodos de desagregação das faturas de energia para estimar o consumo dos sistemas individuais de maneira acessível e com qualidade. Desta forma, os consumos individualizados calculados dos sistemas podem ser somados para comparação com o consumo total da edificação e podem ser realizados ajustes nos principais parâmetros de utilização dos sistemas como fator de carga, padrões e fatores de uso.

O uso de dados globais de consumo da edificação agregados em intervalos grandes de tempo, porém, como faturas mensais de energia, torna imperceptíveis os erros de cálculo em que determinados ambientes ou usos-finais o consumo de energia seja subestimado e, em outros, superestimado (RAFTERY; KEANE; COSTA, 2011).

Recomenda-se, portanto, o ajuste da simulação através de verificações pós ocupação, com revisão dos padrões de uso e submedição individualizada de consumo dos diferentes tipos de usos-finais encontrados na edificação (JI; XU, 2015; PEDRINI; WESTPHAL; LAMBERTS, 2002). Autores também recomendam o uso de arquivo climático do período analisado (RAFTERY; KEANE; COSTA, 2011), e Paliouras et al. (2015) atingiram bons resultados na calibração através de dados medidos de condições ambientais interiores, como temperatura, umidade e iluminância.

A quantificação energética a partir de dados de submedição de consumo vem sendo implementado desde a década de 1980, quando o Laboratório do Pacífico Noroeste, órgão consignado ao Departamento de Energia dos Estados Unidos, desenvolveu um banco de dados dos usos finais de energia com dados de submedição. Justificou-se esse método por ser uma alternativa que, mesmo que a custos mais altos, permite verificar a confiabilidade dos métodos computacionais e apresenta maior precisão e detalhamento nos resultados (MAZZUCCHI; REILLY, 1985).

A calibração de modelos termoenergéticos, por sua vez, data ainda do final da década de 1970 (AGAMI REDDY, 2006). Coakley, Raftery e Keane (2014) dividiram os procedimentos de simulação entre manual, que depende de intervenções pragmáticas do modelador, e automatizado, baseado em técnicas de otimização ou técnicas alternativas como redes neurais artificiais e meta-modelos. Pan, Huang e Wu (2007), introduzem três abordagens para a metodologia de calibração manual: a primeira ocorre com a comparação entre o consumo previsto para o modelo e a fatura mensal de energia; a segunda, em adição à comparação com a fatura de energia, introduz comparação entre consumo previsto para subsistemas da edificação e dados horários de consumo medidos; a terceira, pela comparação entre consumo previsto e fatura de consumo de energia horária, quando disponível.

Publicada em 2002 e revista em 2014, a norma Guideline 14 (ASHRAE, 2014) determina limites de aceitabilidade para erros entre dados simulados e medidos, tendo

se tornado a maior referência internacional em metodologia de calibração, seguida por diversos autores (JI; XU, 2015; KIM et al., 2017; ROYAPOOR; ROSKILLY, 2015)

2.1.2 Medidas de Eficiência Energética

O uso racional dos recursos naturais e a qualidade ambiental interna das edificações são duas prioridades em se tratando de projetos de construções sustentáveis (LAMBERTS et al., 2008). As principais oportunidades para um uso racional da energia, segundo os autores, são as de reduzir o consumo na iluminação, condicionamento ambiental e aquecimento de água, através de uma combinação de equipamentos mais eficientes e melhorias nos processos.

Segundo o IEA (2017a), a aplicação de medidas de eficiência energética permite, com bom custo-benefício, a redução de até 50% do consumo de energia das edificações e um aumento proporcional no conforto ambiental para a maioria das tipologias climáticas, no que se chamou de “Renovação Energética Profunda” (“*Deep Energy Retrofit*”).

Para obter um grau elevado de sucesso, porém, é necessário avaliar as sinergias existentes entre as diversas medidas possíveis e, através de seu agrupamento (*bundle*), eficientizar os sistemas de modo que nenhuma medida isolada poderia (IEA, 2017b). Zhivov et al. (2016) dividiram em 3 “agrupamentos” as tecnologias fundamentais para eficiência energética em uma edificação: envoltória do edifício; sistemas elétrico e de iluminação; e o sistema de climatização.

A IEA (2017b) reconhece que, em climas quentes com alta demanda de resfriamento ambiental, essa tarefa é mais complexa e tende a apresentar retornos menos significativos sobre o investimento. Mesmo assim, a partir desta metodologia, foi possível atingir reduções de consumo da ordem de 70% em climas classificados como quentes ou muito quentes e úmidos pela ASHRAE (2013), mais que dobrando as taxas de 30% de redução em abordagens clássicas das medidas de eficiência energética (ZHIVOV et al., 2016).

Uma das oportunidades de atingir reduções no consumo de energia é através de melhorias no sistema de iluminação das edificações, que representam em média entre 25% e 32% do seu consumo de energia (IEA 2017b; DEB; LEE; SANTAMOURIS, 2018). Avanços tecnológicos das lâmpadas permitem reduções de consumo significativas com manutenção dos níveis de iluminância com a instalação

de lâmpadas LED, que economizam até 80% e 45% em relação às as tecnologias incandescente e fluorescente, respectivamente. A IEA (2014) ainda introduz outras técnicas para amplificar as economias de energia, incluindo a integração de iluminação natural na edificação, melhorias no projeto luminotécnico de modo a entregar apenas a iluminância necessária em cada superfície do projeto e sistemas de controle e automação que apaguem (sensores de presença) ou reduzam a potência (dimerização) do sistema de iluminação.

Os sistemas de condicionamento ambiental, através de equipamentos de ventilação, resfriamento, aquecimento e renovação de ar apresentam significativo consumo de energia, sendo responsáveis por 30% a 60% do consumo total (LAM; LI; CHEUNG, 2003), atingindo tipicamente 45% do consumo de edificações de escritório em regiões mais quentes (DEB; LEE; SANTAMOURIS, 2018). De maneira análoga, evoluções tecnológicas permitem grandes reduções de consumo, com economias encontradas de entre 20% e 44% com a troca de máquinas convencionais do tipo *on-off* por máquinas com tecnologia *inverter*, que permite a modulação da velocidade do compressor (RECH, 2018).

Outro sistema analisado para medidas de eficiência energética é a envoltória da edificação, que consiste, de acordo com Sadineni, Madala e Boehm (2011), em elementos que separam os meios internos dos meios externos, sendo fundamental para a preservação da qualidade dos ambientes interiores a despeito da variabilidade das condições exteriores. O impacto da envoltória das edificações no desempenho térmico dos ambientes é significativo, influenciando diretamente as cargas térmicas e consumo energético destinado para o condicionamento ambiental, mas seu papel é muito mais complexo no funcionamento da edificação (IEA, 2003). A envoltória, portanto, deve ser abordada de forma ampla e holística, sendo a principal forma de expressão arquitetônica de uma edificação com o exterior, mas também desempenhando as funções fundamentais de permitir a iluminação e ventilação naturais, e manter o conforto acústico e térmico.

Nas áreas de desempenho térmico e visual, que são relacionadas diretamente ao consumo energético das edificações, destacam-se alguns elementos principais que devem ser analisados. Segundo a IEA (2003), as dimensões da envoltória que mais influenciam no desempenho térmico dos ambientes são a grandeza de isolamento e inércia térmicos, a formação de pontes térmicas e a estanqueidade ao ar e umidade.

No quesito de qualidade visual, a transmitância dos elementos transparentes e a proporção entre elementos opacos e não-opacos são os principais fatores.

A IEA (2014) define, por sua vez, que as características da envoltória que devem ser analisadas para o bom desempenho de uma edificação são as propriedades térmicas de suas paredes, cobertura e piso, as características das janelas e vidros, e o desempenho geral da envoltória quanto à infiltração de ar e umidade. Esse conjunto de elementos interfere diretamente na eficiência dos sistemas de iluminação e climatização, os principais consumidores de eletricidade nas edificações.

Diversos autores estudaram os efeitos de medidas de conservação de energia no consumo de edificações do setor educacional de ensino superior localizadas em climas amenos a quentes. Alajmi (2012) verificou o comportamento de uma edificação universitária de dois andares e encontrou que a mudança na temperatura de operação do sistema de climatização para 24 °C é capaz de reduzir em 23,2% seu consumo de energia, e que o *payback* simples para a instalação de iluminação LED e o aumento do isolamento da cobertura é de 1,2 e 3,9 anos, respectivamente.

El-Darwish e Gomaa (2017) analisaram três salas de aula de ensino superior diurno localizadas no norte do Egito, de clima quente e seco, com orientações diversas e uso de climatização somente para resfriamento. Identificaram reduções de 23% no consumo com a adição de sombreamento solar externo com *brises* horizontais cobrindo toda a fachada, e 8% de redução com o uso de vidro duplo de baixa emissividade e isolamento de argônio entre as folhas. Por outro lado, identificaram que a melhora na estanqueidade (redução de infiltração de ar) e o isolamento das paredes externas apresentam efeitos marginais para a redução de consumo. Também no Egito, Aboulnaga e Moustafa (2016) verificaram a economia de energia relacionada à implantação de um pacote de medidas de eficiência em uma edificação universitária de 7 andares. Os resultados mostram que a instalação de janelas com vidros duplos de baixa emissividade preenchida com argônio, isolamento nas paredes e cobertura verde reduzem em mais de 15% o consumo de energia da edificação, com destaque para o telhado verde, já que o consumo do 7º pavimento foi reduzido em quase 30%.

Em um estudo desenvolvido no Brasil, Ocampo Batlle *et al.* (2020) identificaram oportunidade de redução de quase 10% no consumo de energia de um

campus universitário através de uma série de medidas relacionadas aos sistemas de climatização e iluminação e mudanças operacionais.

2.2 ANÁLISE FINANCEIRA

A atratividade de um projeto de renovação para efficientização energética, do ponto de vista dos investidores, está direta e primariamente relacionada com a efetividade em termos de retorno e benefícios sobre o investimento a ser realizado. A análise econômica deve, portanto, fazer parte da determinação de viabilidade de projetos ou medidas de eficiência energética. Para Hochheim (2015), além disso, a análise deve ser realizada de forma iterativa e desde etapas iniciais de projeto, de modo a guiar decisões norteadoras de investimento, reduzir os custos de mudanças e melhorar os retornos financeiros.

Intervenções e medidas de eficiência energética, por serem investimentos de elevados custos e incertezas, devem ter análise econômica complexa, levando em conta os custos diretos e indiretos de implementação e contando com análises de sensibilidade para características materiais e de uso mais passíveis de mudança (CIBSE, 2012). A análise financeira do ciclo de vida das intervenções, levando em conta os custos de investimento e os custos operacionais da edificação, é o método padrão utilizado para verificar sua viabilidade, onde os diferentes cenários possíveis de renovação são comparados entre si e com o caso base (IEA 2017b). É importante, além disso, quantificar e levar em conta os benefícios indiretos obtidos com as renovações, por meio de melhorias no controle e gestão, nos serviços prestados e no conforto ambiental, e mesmo pelos benefícios comerciais em atingir níveis mais restritivos de sustentabilidade ambiental (CIBSE, 2012)

Diversos são os indicadores que podem ser utilizados para esse fim, se destacando entre eles o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *Payback* Corrigido (HOCCHEIM, 2015; IEA 2017a; CIBSE, 2012). Todos esses seguem o princípio de análise de ciclo de vida do investimento, balanceando, através de verificações de fluxo de caixa e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) determinada para o escopo do projeto, os custos executivos e os custos operacionais. O VPL calcula a viabilidade do investimento através da soma de todos os valores de fluxo de caixa, trazidos para a o momento inicial de investimento com o desconto da TMA, e

indica bons investimentos com valores positivos. A TIR permite a comparação entre diversos investimentos identificado como viáveis pelo VPL, e pode ser descrita como a taxa anualizada dos retornos sobre o investimento realizado. O *Payback* Corrigido, por sua vez, mede o tempo necessário para que o capital investido seja recuperado, descontando a passagem do tempo pela TMA.

A literatura oferece ampla base para a aplicação de indicadores financeiros para a determinação de viabilidade de projetos de eficiência energética. Melo (2005), por exemplo, analisou diferentes escopos de medidas de eficiência para um hotel de 11 pavimentos em Florianópolis. Sua proposta de eficiência para o sistema de iluminação, com a redução da potência das lâmpadas e substituição de reatores e luminárias por modelos mais eficientes foi considerada viável com redução de consumo mensal em 10,65% e *payback* corrigido de menos de 1 ano. A hipótese, porém, de substituição do sistema de climatização descentralizado com condicionadores ambientais do tipo *split* por um sistema central de água gelada, foi descartada por possuir TIR (3,92% a.a.) inferior à TMA (12,00% a.a.) apesar das reduções na fatura de energia atingirem 18,61%.

Silva (2019) fez uma análise de três diferentes medidas de eficiência energética para uma edificação histórica de dois pavimentos na cidade de Florianópolis. A substituição de lâmpadas fluorescentes por lâmpadas LED, com análise abrangente que inclui reduções na carga térmica da edificação pela menor densidade de iluminação, obteve uma TIR calculada de 163,5% e *payback* corrigido inferior a 1 ano. Duas outras soluções analisadas, a substituição dos vidros por modelos com menor fator solar e a instalação de isolamento térmico na cobertura, por outro lado, foram consideradas inviáveis, já que seu VPL se provou negativo para a vida útil determinada de 10 anos, apesar de reduções significativas do consumo energético.

Antoniolli (2012), analisando o mercado da geração distribuída de energia fotovoltaica, calculou a viabilidade financeira da instalação de painéis fotovoltaicos para reduzir a fatura de energia para a taxa mínima cobrada pela concessionária em 20 edificações residenciais unifamiliares distribuídas por 9 cidades do estado de Santa Catarina. Estipulando 3 cenários de investimento inicial entre o pessimista e o otimista, considerou a instalação viável para todas as residências mesmo no cenário mais

pessimista, já que os com *paybacks* corrigidos encontrados variaram entre 7 e 14 anos para o cenário esperado, dentro da vida útil de 25 anos de um sistema fotovoltaico.

2.3 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Evidências medidas tornam inequívocas as conclusões de que o sistema climático terrestre está em aquecimento, com aumentos de temperatura do ar e dos oceanos, a redução das coberturas de gelo e neve, e a elevação mundial do nível do mar (IPCC, 2007), devido ao aumento da concentração dos diversos gases responsáveis pela retenção de calor na atmosfera terrestre através do efeito estufa.

Estimativas de 2007 consideram possíveis, embora pessimistas, cenários de aumento médio da temperatura global de 4 °C para o ano de 2100 em relação aos níveis pré-industriais, dependendo dos padrões de emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera (IPCC, 2007). Estima-se que, em 2017, pode ter sido atingida a marca de 1 °C de aquecimento médio global causada pela atividade humana em relação aos números da década de 1850, e estabelece-se como meta importante para garantir a estabilidade do ecossistema terrestre limitar esse aquecimento a 1,5 °C (IPCC, 2018). A tarefa, porém, é imponente, já que considera-se apenas “provável”, e não certo, que se todas as emissões antropogênicas fossem interrompidas imediatamente, seria possível manter a temperatura menos de 1,5 °C acima daquela encontrada há 2 séculos (IPCC, 2018), requerendo, portanto, mudanças estruturais e mundiais nos padrões de consumo de combustíveis fósseis.

Além do aquecimento da temperatura, as mudanças climáticas incluem a desregulação das dinâmicas climáticas, afetando a circulação das massas de ar atmosféricas e as correntes marítimas, mudando e aumentando a imprevisibilidade dos regimes de chuva e fortalecendo eventos extremos. A métrica de aumento médio da temperatura não identifica eventos específicos geográficos e temporais, e existe alta confiabilidade de que efeitos do aquecimento médio de 1,5 °C incluem o aumento de 3 °C na temperatura dos dias de calor extremo, o aumento de 4.5 °C na temperatura dos dias de frio extremo e o aumento do número de dias considerados quentes (IPCC, 2018).

Tendo em vista a previsão de aquecimento progressivo e acelerado da superfície terrestre e o longo tempo de vida útil das edificações, conclui-se que não

somente novos projetos, mas também construções atualmente em operação, poderão sentir os impactos das mudanças climáticas. Somando-se às já existentes incertezas probabilísticas de previsões climáticas, percebe-se que médias estatísticas simples a partir de bases históricas não refletem as condições reais às quais um prédio é submetido ao longo de sua vida útil. O aquecimento global esperado deve influenciar as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento das edificações e impactar em aumentos significativos do consumo energético em zonas mais quentes (RAMON; ALLACKER, 2019; WANG; CHEN, 2014; WILLIAMS et al., 2012; YANG; NIK, 2020; CRAWLEY, 2003).

Diversos estudos identificam essa tendência. Através do uso de projeções climáticas em simulações termoenergéticas, Crawley (2008) estima aumento da demanda de energia da ordem de 20% nos meses de verão para edifícios comerciais de clima tropical. Montes (2016) identificou um aumento médio no consumo de energia para refrigeração de aproximadamente 50% entre 2020 e 2050 para diversas configurações de residenciais unifamiliares na cidade de São Paulo. Em um estudo que envolveu simulações com 9 tipologias diferentes de edificação em 15 cidades estadunidenses, Wang e Chen (2014) obtiveram um aumento médio de consumo para resfriamento de ambientes da ordem de 150% para clima marinho, 90% para clima ameno e úmido e 50% para clima quente e úmido em um cenário de emissões intermediárias.

Wang, Chen e Ren (2010) estudaram os impactos das mudanças climáticas em edificações de diferentes cidades na Austrália, e perceberam que o consumo de energia tende a crescer mesmo em locais de clima ameno que requer o uso de aquecimento em partes do inverno, como em Sidney, a maior cidade do país, onde é previsto o aumento de consumo de climatização em até 101% em edificações residenciais de padrão médio até 2050. Além disso, os resultados mostram que as residências com envoltórias com maior qualidade térmica perdem parte de seu desempenho com o aumento nas temperaturas médias, indicando que medidas de eficiência energética tendem a perder sua efetividade. Resultados de múltiplos trabalhos vão em encontro a essa expectativa, concluindo que a variação do clima levará a mudanças no desempenho de medidas de eficiência energética com a progressão do clima, obrigando o desenvolvimento de edificações resilientes e

preparadas para climas futuros (CIBSE, 2014; TATEOKA; DUARTE, 2017; MONTES, 2018; TUMMINIA et al., 2020).

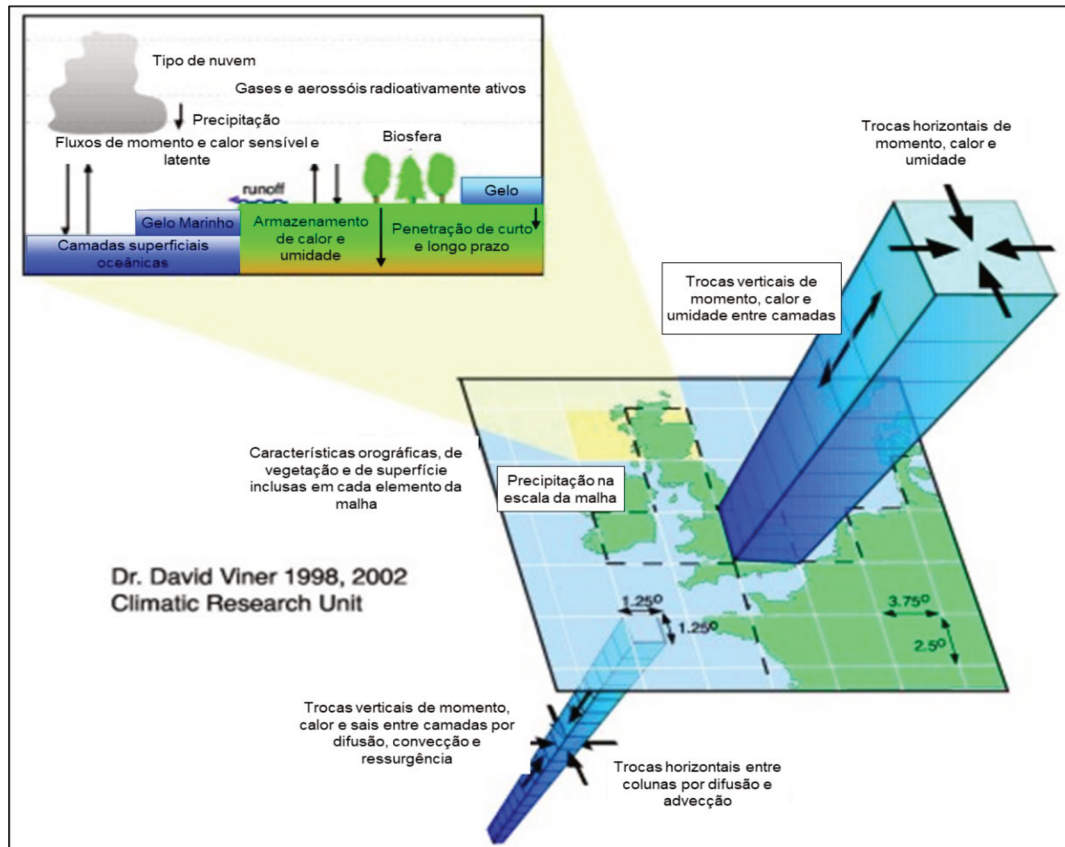
Existem diversas metodologias consolidadas em literatura para considerar as projeções climáticas em simulações termoenergéticas de uma edificação, divididas em três abordagens principais (IPCC, 2001). A primeira abordagem se dá através de cenários incrementais ou sintéticos, com variações plausíveis, mas arbitrárias, das variáveis climáticas, como temperatura e umidade, que é aplicada apenas em estudos de sensibilidade do desempenho das edificações por não ter a função de projeção e previsão.

A segunda abordagem é a dos cenários análogos, uma metodologia que se destaca por apresentar os resultados de forma visível e didática, identificando regimes climáticos registrados e reais que podem ser considerados equivalentes a um cenário futuro na região estudada. Na literatura, os cenários análogos se dividem em espaciais e temporais. Os primeiros, mais difundidos, utilizam dados climáticos de regiões cujo clima atual pode representar o clima futuro do local de estudo, normalmente em latitudes menores que este. A principal inconsistência no método é a de que o clima é resultado de uma combinação de fatores de larga escala, incluindo radiação solar, topografia e interações entre o continente e o oceano, que são dificilmente transportadas entre regiões diferentes (ARNELL, 1990; IPCC, 2001; BELCHER; HACKER; POWELL, 2005). O segundo tipo de cenário é o análogo temporal, com a reconstrução de climas passados através de evidências paleológicas, notadamente de épocas mais quentes da história, como o Holoceno médio, de 8 mil a 4 mil anos atrás, ou o Eemiano, o período interglacial registrado há entre 130 mil e 115 mil anos. Apesar de possuírem consistência e plausibilidade, resolvendo o problema do análogo espacial de transportar características entre regiões distintas do globo, os análogos temporais são criticados pois as causas históricas das mudanças climáticas são atreladas a ciclos naturais e distintas das causas do aquecimento atual, e há grandes probabilidades de que os efeitos sejam significativamente diferentes (CROWLEY, 1990; IPCC, 2001).

A terceira abordagem utiliza dados simulados a partir de experimentos com os GCM, Modelos de Circulação Global ou Modelos de Circulação Geral, que consistem em modelos numéricos representando processos físicos na atmosfera, oceano, criosfera (massas de gelo) e superfície terrestre, como representa a Figura 3.

O uso dos GCMs acoplado a projeções da emissão de poluentes para a atmosfera pela atividade humana é considerada a metodologia mais adequada para previsão e projeção das mudanças climáticas (IPCC, 2001; MOAZAMI et al., 2019).

Figura 3: Esquematisação da malha tridimensional de um GCM.



Fonte: Adaptado de DDC (2020)

O IPCC tem, ao longo dos anos, publicado e revisado cenários projetados de emissões para uso em GCMs. Em 1992, o grupo publicou o documento 1992 *Supplementary Report*, que oficializou 6 cenários distintos de desenvolvimento socioeconômico de acordo com previsões de especialistas e organizações internacionais. No ano 2000, foi publicado o Relatório Especial para Cenários de Emissões (IPCC, 2000), em que foram realizadas novas projeções e determinados os 40 cenários mais prováveis de desenvolvimento socioeconômico para o século XXI, e as emissões de gases do efeito estufa associadas. O relatório, validado e utilizado pelo grupo nos relatórios TAR e AR4, suas avaliações seguintes das mudanças climáticas (IPCC, 2001; IPCC, 2007), identificou as 4 seguintes famílias principais de desenvolvimento:

A1 – Se caracteriza pelo crescimento econômico acelerado e igualitário, com desenvolvimento e melhoria expressiva no padrão de vida nos países mais pobres que leva à estagnação do crescimento populacional a partir da metade do século. Representa uma perspectiva de progresso através do comprometimento ao mercado, tecnologia e inovação.

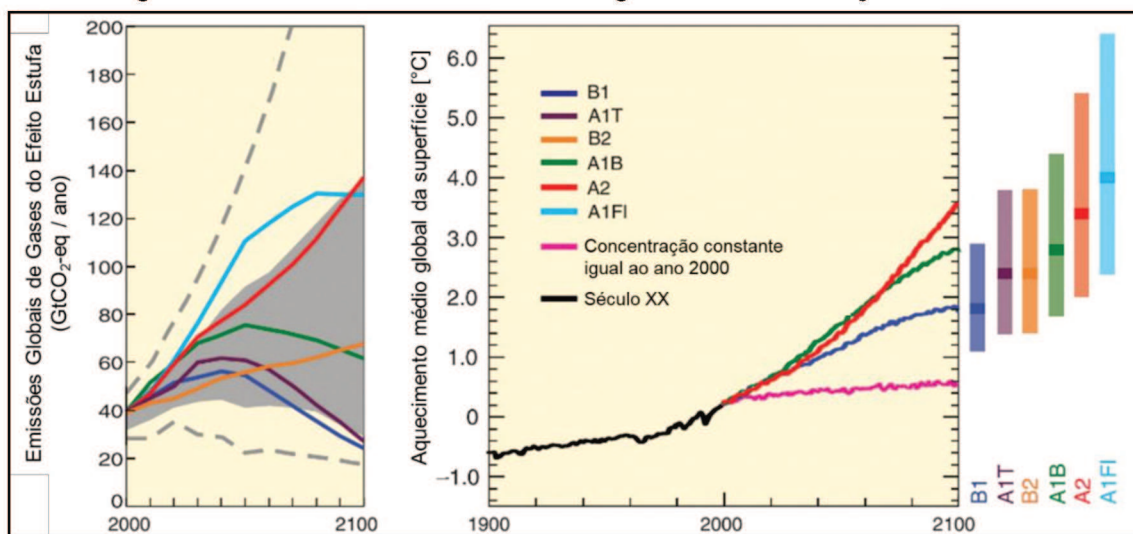
A2 – Este cenário considera um desenvolvimento inferior dos países pobres, com a manutenção das desigualdades internas e externas. Conduz a um mundo mais populoso, e com menor preocupação com fatores ambientais.

B1 – Representado por maior consciência social e ambiental, com um esforço coordenado e global por um desenvolvimento sustentável. O crescimento econômico neste cenário, assim como no A1, é bem distribuído e rápido, mas, desta vez, focado em eficiência no uso de recursos e proteções ambientais.

B2 – Neste cenário existe uma conscientização ambiental bem desenvolvida na sociedade, mas os esforços para implementação de estratégias sustentáveis de desenvolvimento ficam a cargo de governos locais, sem muita coordenação global. O crescimento populacional e econômico é moderado, e o desenvolvimento de tecnologias mais lento.

A Figura 4 mostra estimativa de emissões anuais de gases de efeito estufa para cada cenário desenvolvido e a evolução modelada da temperatura média da superfície terrestre de acordo com os impactos ambientais gerados.

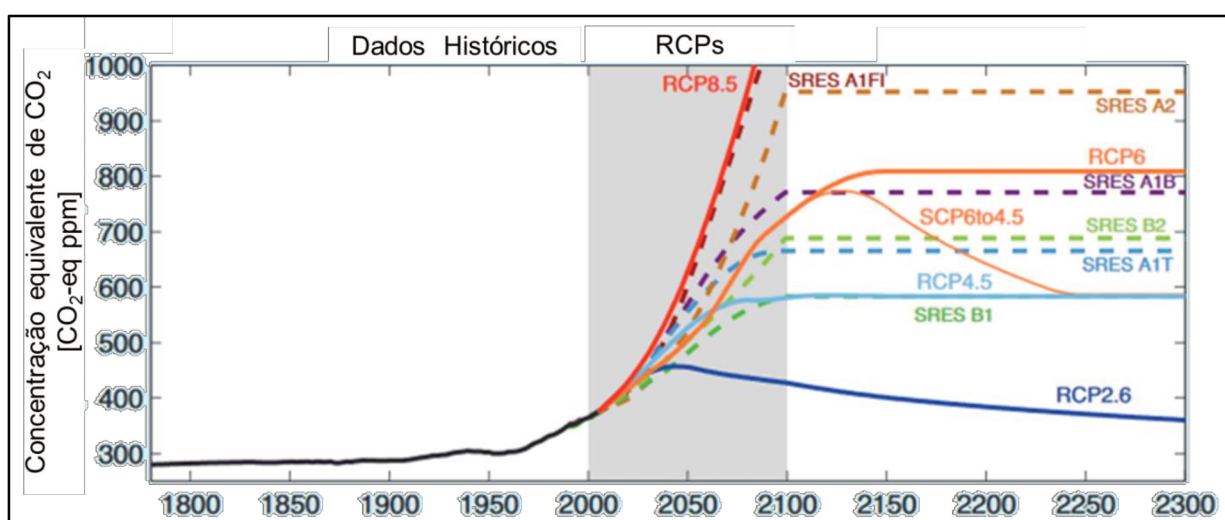
Figura 4: Cenários de emissões de gases e de evolução climática



Fonte: Adaptado de IPCC, 2007

No 5^o relatório do IPCC, o AR5, publicado em 2013, foi ratificado um novo conjunto de cenários de emissão, chamados de *Representative Concentration Pathways* (RCPs), e que, ao contrário dos anteriores, não foi desenvolvido pelo painel, mas analisado e aprovado por ele. Esses 4 novos modelos globais, o RCP2.6, RCP4.5, RCP 6 e RCP8.5, abrangem uma gama maior de possibilidades que os cenários estimados pelo SRES, no AR4 (Figura 5), e são mais refinados, tratando com mais fidelidade o comportamento de gases do efeito estufa de menor estabilidade e as alterações no uso da terra.

Figura 5: Comparação da evolução da concentração de carbono na atmosfera para cada cenário de emissão.



Fonte: Adaptado de IPCC (2013)

Apesar de sua complexidade, o método de projeção por meio dos GCMs e dos cenários de emissões possui limitações técnicas, como a dificuldade em distinguir mudanças antropogênicas da variabilidade natural interna do modelo, diferenças de sensibilidade entre modelos e a baixa resolução temporal e espacial. A resolução dos modelos é considerada uma limitação, pois tipicamente fornecem dados climáticos diários para malhas de até 300 km x 300 km, impedindo a representação de processos físicos de menor escala, como a formação de nuvens, (DDC, 2020). Ficam muito aquém, portanto, do arquivo climático horário e local necessário para simulação de edificações (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005), e demandam pós-processamento.

A metodologia de *morphing* destaca-se dentre as técnicas para adaptar os resultados das simulações dos GCMs em arquivos climáticos para simulações termoenergéticas, tendo sido utilizada por diversos autores (TROUP; ECKELMAN; FANNON, 2019; MONTES, 2016; WANG; CHEN, 2014; WANG; CHEN; REN, 2010). O método, proposto por Belcher, Hacker e Powell (2005), faz uma adaptação de um arquivo climático completo e atual do local do projeto baseado nas projeções mensais de tendências e variações da simulação do GCM no cenário desejado. O algoritmo aplica 3 operações básicas no arquivo climático para sua adequação, que são as mudanças (*shift*), esticamento (*stretch*) e a combinação entre eles (*shift and stretch*), apresentados a seguir:

O *shift* é um procedimento aditivo, que soma às variáveis horárias do arquivo climático um valor absoluto de variação média mensal de acordo com a projeção do GCM, de acordo com a Equação 1. *Stretch* é um procedimento multiplicativo, que multiplica as variáveis horárias do arquivo climático por um fator de variação proporcional médio mensal de acordo com a projeção do GCM, de acordo com a Equação 2. Nesse processo, o desvio padrão das variáveis também é alterado para o mês em questão (Equação 3). Por fim, resultado do procedimento se dá pela combinação de *shift* e *stretch*, obtido pela Equação 4.

$$x = x_0 + \Delta x_m, \quad \text{Equação 1}$$

$$x = x_0 \times \alpha_m, \quad \text{Equação 2}$$

$$\sigma_m^2 = \sigma_0^2 \times \alpha_m^2, \quad \text{Equação 3}$$

$$x = \langle x_0 \rangle_m + \Delta x_m + (1 + \alpha_m) \times (x_0 - \langle x_0 \rangle_m), \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

x : Variável analisada;

x_0 : Valor da variável no arquivo climático original;

Δx_m : Variação média mensal da variável x no mês m .

α_m : Fator de variação da média mensal no mês m ;

σ_m^2 : Desvio padrão das variáveis analisada no mês m ;

σ_0^2 : Desvio padrão original para a variável no mês m ;

α_m^2 : Fator de variação da do desvio padrão mensal no mês m ;

$\langle x_0 \rangle_m$: Média mensal da variável original no mês m .

Essa metodologia tem a vantagem de usar uma base climática real, confiável e local, e, mesmo tendo dificuldades em inserir extremos climáticos em suas considerações, fornece um banco de dados climáticos consistentes com os cenários futuros e os modelos utilizados.

Algumas ferramentas, denominadas de geradores climáticos, foram desenvolvidas a partir da metodologia de *morphing* para expandir ao público o uso de dados climáticos futuros. Atualmente, a *WeatherShift*, uma ferramenta baseada em navegador desenvolvida pelo Arup North America Ltd. em parceria com Argos Analytics LLC, e o *CCWorldWeatherGen*, ferramenta baseada no Microsoft Excel lançada pelo Grupo de Pesquisa em Energia Sustentável da Universidade de Southampton, são as mais difundidas (TROUP; ECKELMAN; FANNON, 2019).

Dentre elas, o *Climate Change World Weather Generator for World-Wide Weather Data (CCWorldWeatherGen)* se mostra mais acessível, sendo o único gerador gratuito capaz de converter arquivos climáticos. Lançado em 2009, este gerador utiliza o modelo HadCM3, a terceira versão do GCM desenvolvido pelo Centro Hadley para Mudanças Climáticas do Escritório de Meteorologia do Reino Unido, e o cenário climático mais adequado a ele, o SRES A2 (2000), projeção parcialmente pessimista de uma sociedade heterogênea com alto crescimento populacional e baixo desenvolvimento econômico e de novas tecnologias (JENTSCH et al., 2013).

O modelo de circulação é dividido em uma porção atmosférica, com resolução de 2,5° de latitude e 3,75° de longitude (417 km x 278 km na Linha do Equador) e 19 camadas de altitude, e uma porção oceânica, com 20 camadas e resolução de 1,25° x 1,25°, e programado para projetar as mudanças em relação a arquivos climáticos históricos do período de 1961 a 1990 para três horizontes de tempos diferente: 2010 a 2039, representado pelo ano típico de 2020, 2040 a 2069, representado por 2050, e 2070 a 2099, representado por 2080 (MOAZAMI; CARLUCCI; GEVING, 2017). O *CCWorldWeatherGen*, portanto, transforma arquivos climáticos históricos registrados entre 1961 e 1990, em arquivos climáticos futuros do tipo *EnergyPlus Weather File (EPW)*.

A principal limitação da ferramenta é a de não utilizar os cenários de impactos climáticos mais atualizados, publicados no AR5. Apesar disso, como destaca a própria

publicação (IPCC, 2013), os novos RCPs não são necessariamente mais capazes de representar o futuro dos impactos ambientais que os antigos cenários publicados pelo SRES. Outra limitação é a de utilizar os resultados de um único GCM simulado com apenas um dos cenários de emissões, o que dificulta a estimativa de um intervalo confiável de aquecimento (JENTSCH et al., 2013). Os autores também notam que o uso de modelos globais limita a precisão do método, refletindo, de modo geral, em valores conservadores e subestimados de aquecimento. Mesmo assim, enquanto modelos regionais (RCM), de menor escala e maior precisão, não forem acessíveis mundialmente, a ferramenta se torna uma abordagem acessível e útil para avaliar o impacto das mudanças climáticas no ambiente construído.

Nesse sentido, devido às várias observações levantadas, os arquivos climáticos gerados a partir da adaptação dos dados disponibilizados pelo IPCC não devem ser empregados como projeção precisa do desempenho futuro da edificação, mas são ferramentas importantes para prever a tendência de evolução desse comportamento ao longo do tempo.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica visou construir o subsídio teórico necessário para desenvolver os temas que compõem este trabalho.

Conclui-se que a preocupação com as mudanças climáticas causadas por ações antrópicas fortaleceu a importância da eficiência no uso da energia no setor das edificações, um dos principais setores em relação ao consumo de energia elétrica. Devido à longa vida útil de uma construção, percebe-se que, além de projetar novas edificações eficientes, é importante reduzir o consumo energético das já operantes, através de reformas e medidas de eficiência energética. Encontrou-se que a simulação termoenergética de um modelo computacional da edificação é fundamental para determinar com maior precisão a redução de consumo atrelada quaisquer soluções propostas para uma edificação, permitindo uma análise mais criteriosa e maior confiança na tomada de decisão. Mesmo assim existe um elevado grau de incerteza atrelado a um modelo computacional puro, relacionado a fatores construtivos e de materiais muito variáveis e, sobretudo, às variações nas rotinas de uso e operação da edificação.

Faz-se necessário, portanto, o uso de métodos de validação e calibração desse modelo computacional, através da comparação dos consumos simulados com os valores medidos de consumo da edificação. A calibração por faturas de energia elétrica global e por submedição de sistemas elétricos instalados são algumas das opções que permitem melhorias consideráveis nas estimativas de consumo e, conseqüentemente, redução de consumo, de um modelo.

Por fim, além de ser uma das principais motivações para o desenvolvimento de soluções de eficiência energética para edificações, as mudanças climáticas interferem ativamente no seu consumo energético. Ao longo das próximas décadas, durante a vida útil de edificações já existentes, segundo consenso acadêmico, o clima deve sofrer um aquecimento médio importante. É fundamental, portanto, considerar a evolução climática em qualquer estimativa de consumo de uma edificação ao longo do tempo e, para esse fim, existem diversas previsões de cenários climáticos de médio e longo prazo, e metodologias e ferramentas que permitem adaptar o fator do aquecimento global ao arquivo climático e ao modelo termoenergético.

3 MÉTODO

Este capítulo tem a intenção de discorrer sobre os meios empregados para o desenvolvimento deste trabalho, que investigará a viabilidade econômica de intervenções na envoltória de uma edificação educacional visando a redução do seu consumo energético e a resiliência da edificação e das medidas de eficiência na perspectiva das mudanças climáticas, usando um modelo energético calibrado com base em simulação computacional.

A calibragem do modelo da edificação será realizada através do uso de dados de consumo obtidos pela submedição do sistema de climatização e nas faturas de energia da concessionária local.

Após o refino das informações de uso e ocupação dos ambientes, serão aplicadas medidas de eficiência energética para a envoltória das edificações em seu modelo termoenergético, e avaliados, através de simulação computacional, as reduções esperadas de consumo de energia. A viabilidade econômica das medidas que se mostrarem tecnicamente efetiva será analisada através de indicadores financeiros clássicos.

Por fim, será feita a análise dos impactos das mudanças climáticas esperadas até o fim da vida útil da edificação no seu consumo energético e no nível de eficiência promovido pelas diferentes medidas de eficiência energética.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O projeto escolhido para o estudo é um complexo universitário pertencente ao setor privado localizado na região metropolitana de Florianópolis, Santa Catarina, na Zona Bioclimática 3 (ABNT, 2005), com clima subtropical úmido com verão quente, segundo a classificação climática de Köppen-Trewartha (ALVARES et al., 2013). A característica principal da operação da universidade são as aulas no período noturno, com funcionamento diurno apenas das dependências universitárias, como biblioteca e laboratórios, e do setor administrativo.

O projeto, apresentado na Figura 6, é composto por duas edificações educacionais principais, de quatro pavimentos cada, interligadas por bloco de ligação

não enclausurado; uma praça de alimentação não climatizada; um ginásio, separado das edificações; e estacionamento externo.

Figura 6: Complexo universitário do estudo, com ginásio à frente e edificação acadêmica aos fundos



Fonte: Acervo próprio (2017)

O complexo passou por uma renovação energética no ano de 2017, e teve seus antigos sistemas de iluminação e climatização substituídos por sistemas mais eficientes. A envoltória das edificações, porém, não sofreu interferências durante a renovação, e segue como no projeto original.

Desde 2017, todo o complexo, incluindo os prédios de aulas, o estacionamento, o ginásio e a edificação da área de alimentação, possui iluminação em tecnologia LED de alta eficiência. Como este estudo é voltado ao desempenho térmico e ao consumo energético para climatização da edificação, e somente os prédios acadêmicos são climatizados, as construções anexas não foram incluídas no modelo, mesmo que compunham uma única Unidade Consumidora da concessionária. O estudo de sua operação, neste trabalho, se limita a estimar seu consumo de energia para subtraí-lo dos valores mensais faturados pela concessionária, de modo a isolar o consumo dos blocos de aula, foco deste estudo.

As edificações estudadas são estruturadas em concreto armado, com lajes maciças de 10 cm de espessura. A vedação vertical, tanto interna quanto externa, é

em tijolo cerâmico maciço de 10 cm, sem revestimento ou pintura. A cobertura é feita com telha de fibrocimento de 8 mm inclinada em menos de 5% sobre a laje de concreto armado. As características térmicas dos sistemas construtivos utilizados no modelo, detalhadas na Tabela 2, foram obtidas através de biblioteca de componentes construtivos desenvolvidas por Weber *et al.* (2017).

Tabela 2: Propriedades térmicas dos materiais usados no modelo

Camada	Espessura [mm]	Conductividade [W/(m.°C)]	Densidade [kg/m ³]	Calor Específico [J/(kg.°C)]
Tijolo cerâmico	100	0,90	1600	920
Concreto maciço	100	1,75	2000	920
Telha de fibrocimento	8	0,95	1900	840

Fonte: Weber et al. (2017)

Considerou-se, ainda, a resistência térmica padrão de 0,22 m².°C/W para a câmara de ar entre o telhamento e a laje de cobertura, e as absorvâncias da alvenaria e da telha foram estimadas em 0,70. As janelas são em alumínio, com vidro simples ($U = 5,894 \text{ m}^2 \cdot \text{K}$) e transparente ($FS = 0,87$) de 3 mm de espessura, com condutividade de 0,9 W/(m.°C), transmitância de 0,837 e refletância de 0,075.

Ao analisar a edificação, cuja fachada leste é apresentada na Figura 7, percebe-se que ela está orientada sobre o eixo norte-sul, com fachadas principais voltadas para o leste e para o oeste e áreas de circulação concentradas nas fachadas internas, voltadas para o pátio central.

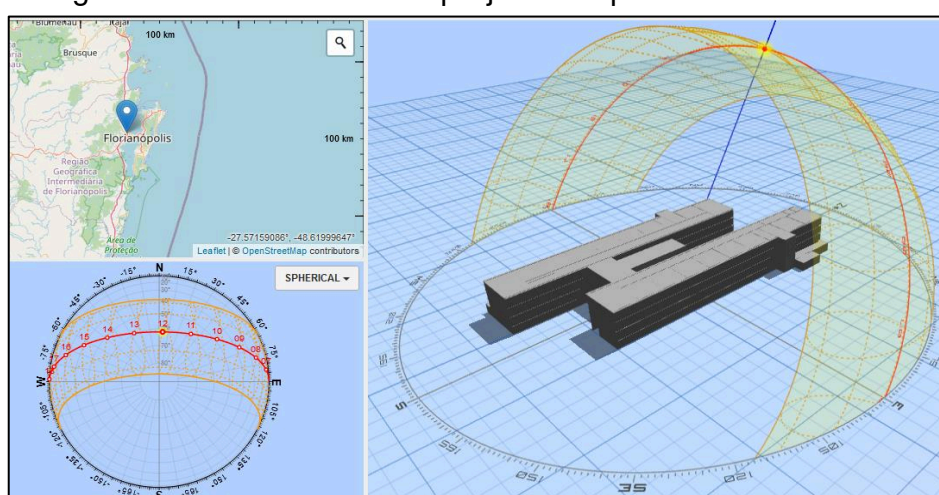
Figura 7: Fachada leste do Bloco 2 da edificação, com Bloco 1 aos fundos.



Fonte: Acervo próprio (2017)

Como perceptível na análise do movimento relativo do sol na região do projeto, exposto na Figura 8 e desenvolvido através do aplicativo para navegadores 3D *Sun-Path*, os ambientes regularmente ocupados do Bloco 1, que se concentram na fachada oeste, recebem radiação solar principalmente no período da tarde e os do Bloco 2, na fachada leste, no período da manhã. Essa condição se mantém constante ao longo do ano, apesar da variação do ângulo de incidência entre as estações. Além disso, a fachada sul é iluminada apenas em períodos específicos do dia no verão, enquanto a fachada norte recebe radiação quase o ano inteiro.

Figura 8: Caminho solar no projeto no aplicativo 3D *Sun-Path*



Fonte: Autoria própria

Além disso, ao longo de toda a fachada oeste do Bloco 1 e da fachada leste do Bloco 2, as platibandas erguidas para a alocação das unidades condensadoras dos condicionadores de ar se projetam 50 cm para fora da edificação, cumprindo papel de *brise* em momentos de altitude solar mais elevada. As fachadas norte e sul das edificações, por sua vez, não contam com nenhum tipo de proteção contra a radiação solar.

Os 7.287 m² de área construída total das edificações abrangem 124 zonas térmicas, das quais 84 são regularmente ocupadas e climatizadas, incluindo um auditório, biblioteca, sala de estudos, laboratório de informática, 50 salas de aula, e ambientes administrativos e de coordenação. As 40 zonas não climatizadas contam principalmente com áreas de circulação, banheiros e estoque de materiais.

A climatização é realizada através de aparelhos de ar condicionado convencionais, majoritariamente novos e eficientes. Dos 145 condicionadores de ar instalados, 133 são do tipo *Split Inverter*, e apenas 12 das máquinas possuem Coeficiente de Eficiência Energética (CEE) inferior a 3,24 e, portanto, não pertencem à Classe A do INMETRO, segundo a classificação vigente durante o desenvolvimento deste trabalho, em setembro de 2020 (Tabela 3). Os dados técnicos dos equipamentos de ar condicionado foram obtidos a partir do catálogo das máquinas.

Tabela 3: Lista das máquinas de ar condicionado presentes na edificação

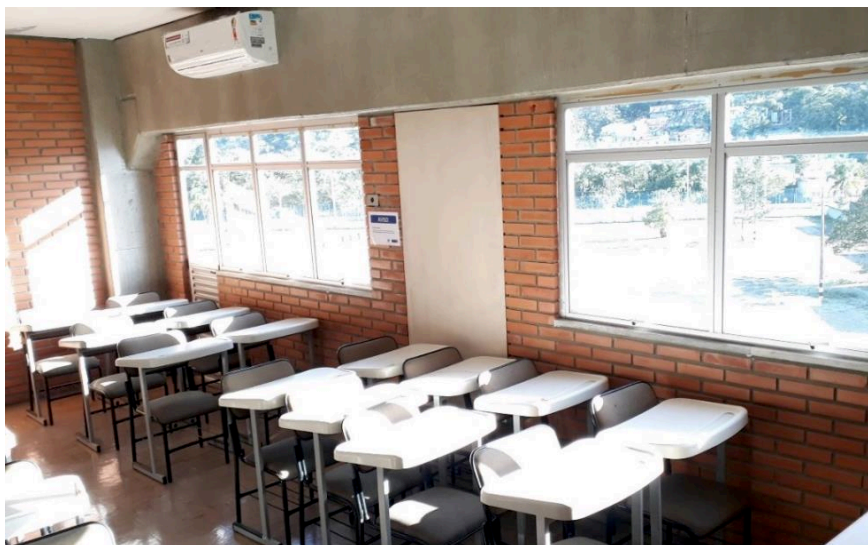
Tipo	Capacidade [BTU/h]	CEE [W/W]	Quantidade
Janeleiro	7.500	2,18	1
Split Hi Wall <i>Inverter</i>	9.000	3,24	13
Split Hi Wall <i>Inverter</i>	11.500	3,24	8
Split Hi Wall Convencional	17.500	3,23	1
Split Hi Wall <i>Inverter</i>	18.000	3,30	55
Split Hi Wall <i>Inverter</i>	22.000	3,24	57
Split Hi Wall Convencional	24.000	2,82	1
Split Piso-Teto Convencional	36.000	2,92	4
Split Piso-Teto Convencional	60.000	2,80	4
Fancolete	120.000	2,80	1
		Total	145

Fonte: Autoria Própria

A Figura 9 apresenta o sistema de climatização de uma sala de aula típica na edificação, com aparelhos Split Hi Wall Inverter e condensadoras sobre o telhado.

Por sua vez, toda a iluminação do complexo é atualmente feita com lâmpadas de tecnologia LED. Foram computadas, por todo o modelo, 1322 lâmpadas LED T8 18W de 120 cm, distribuídas em 661 luminárias com duas lâmpadas cada, e mais 23 lâmpadas LED bulbo de 10W.

Figura 9: Detalhe do sistema de climatização de uma sala de aula.



Fonte: Acervo próprio (2019)

Dentre os equipamentos consumidores de energia elétrica encontrados na edificação, destacam-se os computadores disponíveis para uso dos estudantes, retroprojetores utilizados durante as aulas e equipamentos de escritório de uso geral utilizados pelo administrativo da universidade. Existe na edificação duas salas de controle e um laboratório, com potência média estimada em 2000 W. A Tabela 4 mostra um resumo dos equipamentos de uso geral, com seu quantitativo e potência instalada.

Tabela 4: Lista de equipamentos de uso geral

Equipamento	Potência Elétrica [W]	Quantidade
Desktop	140	172
Notebook	110	50
Projeter	350	50
Impressora Comum	20	11
Impressora Profissional	50	2
Televisão	150	7

Fonte: Autoria própria

Em relação às rotinas de uso e ocupação da universidade, foram levantados os períodos de funcionamento de cada ambiente através de entrevista com os responsáveis. Também foi considerada a política de operação de cada setor em

períodos de recesso escolar que dura, de modo geral, entre a terceira semana de dezembro e a terceira semana de fevereiro, com duas semanas adicionais de paralisação das aulas no mês de agosto. Os *schedules* utilizados, durante o semestre letivo, são representados na Tabela 5.

Tabela 5: *Schedules* por tipologia de ambiente

Ambiente	Período de uso	Horas diárias
Administrativo	8:00 – 22:00	14
Biblioteca	10:00 – 22:00	12
Informática	10:00 – 22:00	12
Laboratórios	14:00 – 22:00	8
Salas de Aula	18:00 – 22:00	4
Auditório	18:00 – 19:00	1

Fonte: Autoria própria

Por fim, para calcular a ocupação foi feito um levantamento de assentos disponíveis para o uso em cada ambiente, determinando assim a lotação das salas administrativos e educacionais. Pela dificuldade em acessar um documento comprobatório da frequência dos estudantes nas aulas presenciais, foi necessário assumir a lotação total das vagas nos ambientes para, no momento da calibração do modelo, identificar taxas de ocupação mais próximas das reais.

3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O método escolhido para a estimativa do consumo de energia elétrica nas edificações foi o da simulação computacional. Para executar o procedimento optou-se por utilizar o *EnergyPlus*, um programa de simulação energética de edificações de código aberto e gratuito, lançado em 2001 pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. A versão mais recente do programa disponível no momento das simulações, que foi utilizada neste trabalho, é a versão 9.2.0, lançada em setembro de 2019.

O simulador possui algumas vantagens reconhecidas pelos profissionais em sua capacidade de estimar consumos energéticos e dimensionar sistemas de climatização de edificações. Um dos seus principais diferenciais é a capacidade de

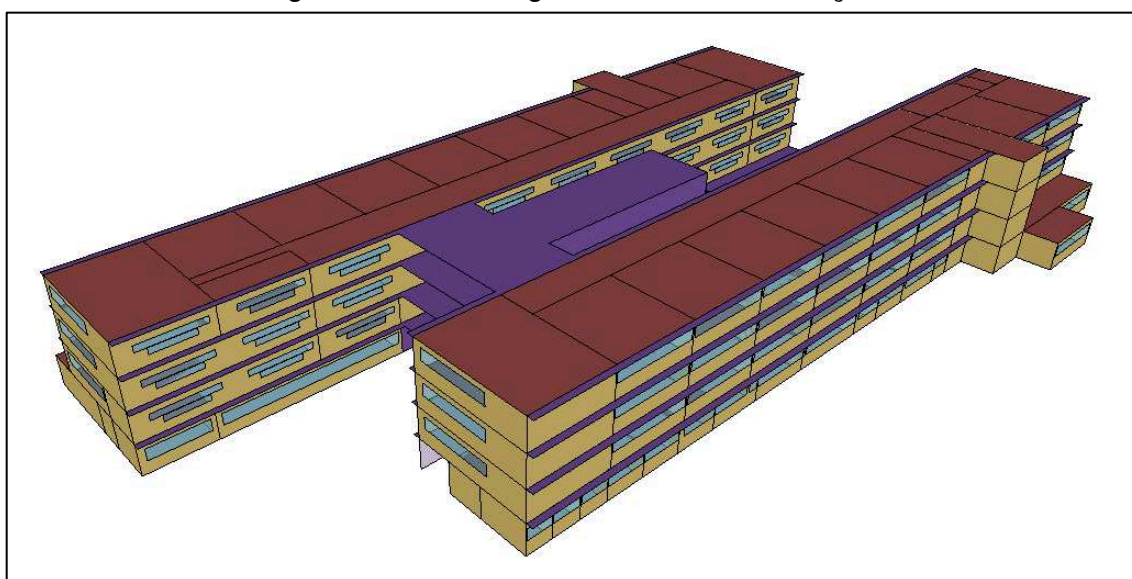
considerar o balanço térmico e a transferência de massas em seus cálculos, incluindo parâmetros complexos como infiltração de ar, atraso térmico e interação entre radiação solar e as superfícies da edificação. O *EnergyPlus* também permite a customização da frequência das interações das zonas térmicas entre si e com o ambiente externo, incluindo passos inferiores a uma hora, de modo que o projetista possa escolher entre menor tempo de simulação e maior precisão dos resultados.

O *software* foi desenvolvido em base textual sem interface gráfica, e, portanto, permite a importação de arquivos geométricos e de arquivos de dados em formatos de texto, e pode ser utilizado como motor de simulação, base para diferentes interfaces gráficas.

O modelo energético básico da edificação foi obtido junto à empresa de consultorias que prestou o serviço de diagnóstico energético para a renovação executada no ano de 2017, conforme descrito previamente. O modelo inicial inclui as especificações geométricas e construtivas do complexo, obtidas em levantamento in loco.

O modelo geométrico, exibido na Figura 10, foi construído através do software gráfico *SketchUp* e seu plug-in *OpenStudio*, específico para a criação e transferência de dados geométricos para o *EnergyPlus*. Com base nas plantas baixas fornecidas pelo proprietário corrigidas por levantamento de áreas realizado pela equipe da consultoria, foram criadas 124 zonas térmicas individuais.

Figura 10: Modelo geométrico da edificação.



Fonte: Autoria própria

Para cada zona térmica, cada uma representando um ambiente das edificações, foi inserida a respectiva taxa de ocupação máxima, potência instalada de iluminação e equipamentos gerais, e *schedule* de ocupação.

O sistema de climatização também foi inserido individualmente nos ambientes, com a respectiva capacidade de refrigeração e Coeficiente de Desempenho (COP). Para modelar os sistemas, foram utilizadas dois *templates* de condicionadores de ar diferentes. Os 12 condicionadores de ar com tecnologia de compressão convencional (liga-desliga) foram simplificados e modelados através da classe *HVAC:Template:Zone:PThp*, referente ao sistema *Packaged Terminal Heat Pump*, representando um sistema que concentra as unidades evaporadora e condensadora e possui velocidade única de acionamento.

A classe PThp, porém, não permite a simulação da modulação do funcionamento do compressor da máquina, característica típica e fundamental dos aparelhos de condicionamento com tecnologia *inverter*. Por isso, para considerar a contribuição dessa tecnologia nas 133 máquinas *split inverter*, foi utilizada a tipologia de sistema de climatização VRF – *Variable Refrigerant Fluid* (fluxo variável de fluido refrigerante).

Para isso, sabendo que em sistemas *Split Inverter* cada unidade evaporadora interna é ligada a uma única unidade condensadora externa, para cada condicionador foi criado um objeto na classe *HVACTemplate:Zone:VRF* representando a zona térmica e a unidade evaporadora e um objeto na classe *HVACTemplate:System:VRF* representando a unidade condensadora. Em cada um deles, foi entrada a capacidade de refrigeração e o COP reais dos equipamentos.

A temperatura de acionamento, ou *setpoint*, foi definida inicialmente em 23 °C para os ambientes climatizados de ocupação prolongada e em 22 °C para as salas de controle e *hardware*. Nestas últimas, foi definido um valor de infiltração de ar na faixa de 0,02 trocas de ar por hora através da classe *ZoneInfiltration:DesignFlowRate*, por serem ambientes pequenos, enclausurados, sem janelas e com porta de acesso mantida fechada em todos os momentos. Por fim, para representar a infiltração de ar e a possibilidade de abertura de janelas nas salas de aula, foi inserida uma taxa constante de ventilação natural através da classe *ZoneVentilation:DesignFlowRate*. A taxa inicial foi de 0,005 m³/(s.pessoa), valor mínimo determinado pela norma ASHRAE

62.1 (ASHRAE, 2016) para a manutenção da qualidade do ar interior em ambientes de sala de aula.

A taxa metabólica média dos ocupantes utilizada na simulação, tanto para atividades administrativas quanto para as aulas, foi determinada a partir do Handbook 2009 (ASHRAE, 2009), que fornece valores de referência para a geração de calor pelo corpo humano de acordo com a tarefa realizada. O valor utilizado, de 120 W por pessoa, foi obtido a partir de uma taxa intermediária de geração de calor em atividades leves (115 W) e moderadas (130 W) de trabalho sentado, estimadas para uma proporção igual de mulheres e homens no ambiente.

A transferência de calor nas lajes inferiores da edificação em contato com o solo foi considerada através do objeto de entrada *Ground Domain*. Optou-se por utilizar o modelo de cálculo de diferenças finitas para a análise, que determina as condições de contorno da superfície com base no próprio arquivo climático através da execução de uma simulação anual do modelo durante a inicialização até que o perfil anual de temperatura do solo atinja um comportamento periódico regular (ELI et al., 2019). Os valores de temperatura do solo encontrados são então usados para o restante da simulação.

Esse procedimento requer também a determinação de parâmetros do solo. Sem disponibilidade de dados de investigação das características do subsolo, assume-se que o solo é de uma mistura de argila e areia para não representar comportamentos muito específicos de um dos tipos. A partir de literatura de propriedades termofísicas de solos argilosos e arenosos foram adotados condutividade térmica de 0,5 W/m.°C (ABU-HAMDEH, 2001), densidade de 1300 kg/m³, e calor específico de 1000 J/kg.°C (ABU-HAMDEH, 2003). O passo da simulação do perfil de temperatura do solo foi igual ao passo da simulação térmica da edificação, de 10 minutos.

Outro parâmetro inserido no modelo foi o tipo do terreno no qual a edificação se insere. Analisando as vizinhanças da edificação, apresentada na Figura 11, fica claro que, embora o uso do solo seja bastante intenso, existe uma baixa densidade e elevação das construções nos entornos e presença de áreas verdes próximas, o que justifica a classificação da topografia local como suburbana. Para os demais parâmetros de simulação, controláveis através do *EnergyPlus*, foram utilizados os valores recomendados pelo programa de simulação

Figura 11: Entornos da edificação



Fonte: Adaptado de *GoogleMaps*.

A partir do modelo preliminar, iniciou-se o procedimento de calibração. A simulação foi feita para o ano inteiro, em todos os casos.

3.2.1 Calibração do Modelo

A calibração do modelo, processo iterativo de ajuste dos dados de entrada de maior incerteza no modelo e comparação do consumo simulado e medido, tem o objetivo de aprimorar a precisão dos resultados obtidos na simulação. Para isso, optou-se em considerar um método manual de calibração, seguindo a abordagem de análise gráfica de desagregação de dados de consumo, identificada por Coakley, Raftery e Keane (2014), pois a separação do consumo de energia entre os diferentes sistemas permite isolar erros de modelagem relacionados a sistemas específicos, e identificar mais facilmente oportunidades de intervenções de eficiência energética na edificação.

O método escolhido é mais adequado onde o sistema de climatização é o único sistema térmico da edificação e o principal afetado pela variação de temperatura entre as estações do ano por reduzir as incertezas relacionadas à transferência de calor. Por não ter presença considerável de aquecimento de água ou refrigeração, a

edificação atende à premissa, e o único sistema afetado pela temperatura ambiente é o de ar condicionado.

Para o procedimento, foram reunidos os dados de consumo de energia da edificação disponíveis, por meio de faturas mensais de energia e da medição de consumo dos condicionadores de ar, e os dados climáticos registrados para o período de medição.

3.2.1.1 Consumo histórico de energia

A medição do consumo do sistema de climatização da edificação, composto por 145 condicionadores de ar do tipo frio, foi utilizada para a calibração do modelo por consumo desagregado. Um total de 45 medidores coletaram por um período de 288 dias, entre as datas de 20 de setembro de 2018 e 05 de julho de 2019, as informações individualizadas de operação de 96 condicionadores, 66% do sistema instalado. Os medidores são do tipo trifásico Kron Konekt modelo CMC256-6, com armazenamento em memória de massa em intervalos de 5 minutos, e cada um deles foi calibrado após a aquisição por laboratório de calibração independente e certificado de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17.025:2017. A Figura 12 mostra o quadro de energia de alguns dos condicionadores ligado aos medidores utilizados.

Figura 12: Detalhe do equipamento de medição



Fonte: Acervo Próprio (2018)

A estimativa do uso total de energia pelo sistema de climatização foi realizada através da extrapolação dos valores registrado nos medidores pela comparação do consumo simulado do modelo completo com o consumo simulado apenas das máquinas medidas. Sabendo que as condições térmicas dos ambientes adjacentes interferem no funcionamento de um sistema de climatização devido à transferência de calor entre ambientes, percebe-se que a remoção das máquinas não medidas do modelo levaria a uma superestimativa do consumo das máquinas restantes, pelo aumento das perdas térmicas. Para evitar essa inconsistência, foi rodada uma simulação em que, ao invés de removidas, as máquinas não medidas foram substituídas por um sistema de climatização fictício análogo, de mesmas características técnicas, mas alimentado por gás natural, utilizando o campo *Fuel Type* do objeto *HVAC:Template: System:VRF*. Desta forma, foi possível separar os consumos energéticos dos dois grupos e identificar sua proporcionalidade.

O consumo global de energia nas edificações entre os anos de 2018 e 2019 foi obtido através das faturas de energia do complexo universitário, fornecidas sob demanda pelas Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), concessionária responsável pela distribuição de energia no estado. Como o modelo simulado não inclui a iluminação externa, ginásio e praça de alimentação, o consumo calculado para esses ambientes foram subtraídos do consumo faturado para comparação com os resultados da simulação.

3.2.1.2 Arquivo climático histórico

Para garantir maior coerência nas correlações entre consumo real do sistema de climatização e os valores simulados, será desenvolvido arquivo climático baseado em dados medidos no período analisado. Foram obtidos, através do banco de dados do Sistemas de Informações Hidro-Meteorológicas (SIM) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão parte do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, dados climáticos horários coletados entre 01 de setembro de 2018 e 31 de agosto de 2019, período para o qual o modelo será simulado. Os dados foram coletados na Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática Florianópolis-São José-A806, localizada a menos de 12 km do projeto. As informações obtidas incluem a temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, temperatura de

ponto de orvalho, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, precipitação e radiação horizontal global.

Como a interação das superfícies com as componentes direta e difusa da radiação solar é distinta, é importante que estas componentes, não medidas, sejam estimadas, e fez-se isso através de equações matemáticas. Erbs, Klein e Duffie (1982) desenvolveram um método de cálculo que permite determinar a fração da radiação global que representa a radiação difusa a partir do índice de transparência ou transmissividade da atmosfera (k_t). Esse índice é uma relação direta entre a radiação global horizontal e a radiação que atinge a região no topo da atmosfera terrestre, chamada de radiação horizontal extraterrestre (Equação 5).

$$k_t = \left[\frac{H}{H_0} \right], \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

H : Irradiação global horizontal na superfície terrestre;

H_0 : Irradiação horizontal extraterrestre.

A Equação 6 define a correlação entre k_t e a magnitude da componente difusa da radiação dentro da radiação global na superfície.

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_t; p/k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604k_t + 4,388k_t^2 - 16,638k_t^3 + 12,336k_t^4; p/0,22 < k_t \leq 0,8, \\ 0,165; p/k_t > 0,8 \end{cases} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

I_d : Irradiação horizontal difusa horária;

I : Irradiação global horizontal horária.

O valor absoluto de radiação difusa horizontal horária será determinado pela multiplicação da radiação global horizontal horária medida na estação meteorológica pela razão encontrada. O valor absoluto da radiação direta horizontal horária é o complementar da radiação difusa em relação à radiação global.

3.2.1.3 Calibração

A partir de simulação do modelo da edificação utilizando arquivo climático atualizado para o período, serão comparados os valores simulados de consumo total da edificação e do sistema de climatização com o consumo da fatura de energia e a medição dos condicionadores de ar. O objetivo das iterações é o de melhorar a confiabilidade e a acurácia do modelo termoenergético, através da redução dos erros obtidos entre os dados previstos na simulação e os dados reais de consumo. Para atingir o objetivo, serão revisadas as variáveis relacionadas à operação da edificação, de maior dificuldade de validação em campo, incluindo temperatura de operação, níveis de ventilação e taxa de ocupação dos ambientes.

3.3 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O trabalho se propôs a identificar intervenções na edificação que levem a uma redução no consumo de energia elétrica. Como a iluminação e os aparelhos de ar condicionado foram recém substituídos e possuem níveis de eficiência energética compatíveis com os mais eficientes no mercado, a análise se limitou a medidas de eficiência na envoltória, relacionada ao consumo do sistema de climatização.

Com base nas recomendações encontradas em literatura (IEA 2014; IEA 2017b), foram escolhidas uma série de medidas de eficiência energética (MEE) para aplicação na edificação. Com o intuito de reduzir a carga térmica dos ambientes, essas soluções incluem alterações nas paredes externas, na cobertura e nas janelas. No total, foram desenvolvidas 11 medidas de eficiência, inseridas no modelo termoenergético calibrado.

As propriedades térmicas dos materiais empregados nas paredes e coberturas, inseridas software de simulação, foram retiradas da biblioteca de componentes construtivos de Weber et al. (2017), enquanto as propriedades dos vidros foram retiradas de INMETRO (2017). As transmitâncias térmicas (U) e fator solar (FS) dos elementos foram retiradas dos resultados da simulação computacional, e suas capacidades térmicas (Ct) foram obtidas a partir de Projeteer (2020).

As primeiras 3 medidas, apresentadas na Tabela 6, promoveram interferências nas fachadas da edificação. A MEE 01 propõe a pintura externa da alvenaria, passando da coloração escura do tijolo cerâmico para o branco, de forma a

aumentar a refletividade e reduzir a absorção da radiação solar. A MEE 02 propõe o isolamento da parede com a adição de uma camada interna de EPS e acabamento em placa de gesso, para reduzir a transferência térmica entre o interior e o exterior e reduzir as perdas térmicas durante a operação da climatização ambiente. A MEE 03, por sua vez, visa reduzir a inércia térmica da parede com a substituição da alvenaria em tijolo maciço por paredes de *dry-wall* com duas chapas de gesso, reduzindo o atraso térmico que pode levar ao aumento da carga térmica interna no período noturno, de maior ocupação.

Tabela 6: Medidas de eficiência para a vedação externa da edificação

Cenário	Vedação Externa	
	Tipo	Propriedades
Base	Tijolo Cerâmico 10cm	U = 3,834 W/m ² K Ct = 157,6 kJ/m ² K $\alpha_{Par} = 0,7$
MEE 01 - Parede Branca	Tijolo Cerâmico 10cm	U = 3,834 W/m ² K Ct = 157,6 kJ/m ² K $\alpha_{Par} = 0,25$
MEE 02 - Parede Isolada	Tijolo Cerâmico 10cm Isolante EPS 4cm Placa de gesso 2cm	U = 0,829 W/m ² K Ct = 175,3 kJ/m ² K $\alpha_{Par} = 0,7$
MEE 03 - Parede Leve	Placa Cimentícia 1cm Câmara de ar 10cm Placa de gesso 2cm	U = 2,580 W/m ² K Ct = 31,7 kJ/m ² K $\alpha_{Par} = 0,7$

Fonte: Autoria própria

Em relação às coberturas, propôs-se as MEEs 04 e 05, apresentadas na Tabela 7. Do mesmo modo que proposto para a fachada, a MEE 04 visa a redução da absorção da radiação solar através do uso de telhas metálicas brancas no lugar das atuais, mais escuras. A MEE 05 propõe o isolamento do telhado com telha metálica sanduichada com PE, para reduzir a transferência térmica entre o interior e o exterior e reduzir possíveis perdas térmicas durante a operação da climatização ambiente.

Tabela 7: Medidas de eficiência para a cobertura da edificação

Cenário	Cobertura	
	Tipo	Propriedades
Base	Telha de Fibrocimento Câmara de ar 15cm Concreto 10cm	$U = 2,364 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Ct = 252,8 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\alpha_{\text{Cob}} = 0,7$
MEE 04 - Telhado Branco	Telha Metálica Branca Câmara de ar 15cm Concreto 10cm	$U = 2,412 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Ct = 243,6 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\alpha_{\text{Cob}} = 0,25$
MEE 05 - Telhado Isolado	Telha Metálica Branca Isolante PE 3cm Câmara de ar 15cm Concreto 10cm	$U = 0,707 \text{ W/m}^2\text{K}$ $Ct = 251,2 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ $\alpha_{\text{Cob}} = 0,25$

Fonte: Autoria própria

Para analisar a influência dos vidros nos ganhos térmicos da edificação, diferentes acabamentos (colorido, incolor e refletivo) e estruturas (laminado e monolítico simples e duplo) foram propostos para substituir os vidros simples atuais, o que levou ao desenvolvimento das MEEs 06 a 09, apresentadas na Tabela 8. As primeiras duas medidas consistem em vidros laminados de 8 mm, sendo um absorvente médio e outro refletor leve, e a MEE 08 se baseia na instalação de vidro monolítico colorido. O objetivo desta separação, sendo a transmitância térmica e o fator solar semelhantes nos 3 vidros, é o de verificar o desempenho de diferentes soluções arquitetônicas e de mecanismos de redução do fator solar, seja o aumento de sua absorvidade ou o aumento da refletividade. A MEE 09 propõe vidros duplos, para verificar a influência da maior capacidade de isolamento térmico das janelas no consumo de energia. Todas as janelas propostas possuem fator solar semelhante, com o intuito de identificar as estratégias, além do fator solar, que possam levar a uma maior economia. Além disso, como este trabalho não fez análises de conforto visual e iluminação natural, para garantir uma qualidade mínima das vistas externas foram evitados os vidros com transmitância à luz visível inferior a 0,5, com exceção da solução de vidros duplos, onde a transmitância visível ficou no patamar de 0,2.

Tabela 8: Medidas de eficiência para as janelas da edificação

Cenário	Vidros	
	Tipo	Propriedades
Base	Vidro Simples Incolor 3mm	FS = 0,87 U = 5,894 W/m ² K
MEE 06 - Vidro Laminado Absorvente Simples	Guardian Neutral55 Clear 8mm	FS = 0,458 U = 5,733 W/m ² K
MEE 07 - Vidro Laminado Refletivo Simples	Cebrace Reflecta 8mm	FS = 0,453 U = 5,733 W/m ² K
MEE 08 - Vidro Monolítico Colorido Simples	Guardian LightBlue52 6mm	FS = 0,459 U = 5,655 W/m ² K
MEE 09 - Vidro Monolítico Colorido Duplo	Cebrace ParsolGrey 6mm x 2 Câmara de Ar 10mm	FS = 0,438 U = 2,703 W/m ² K

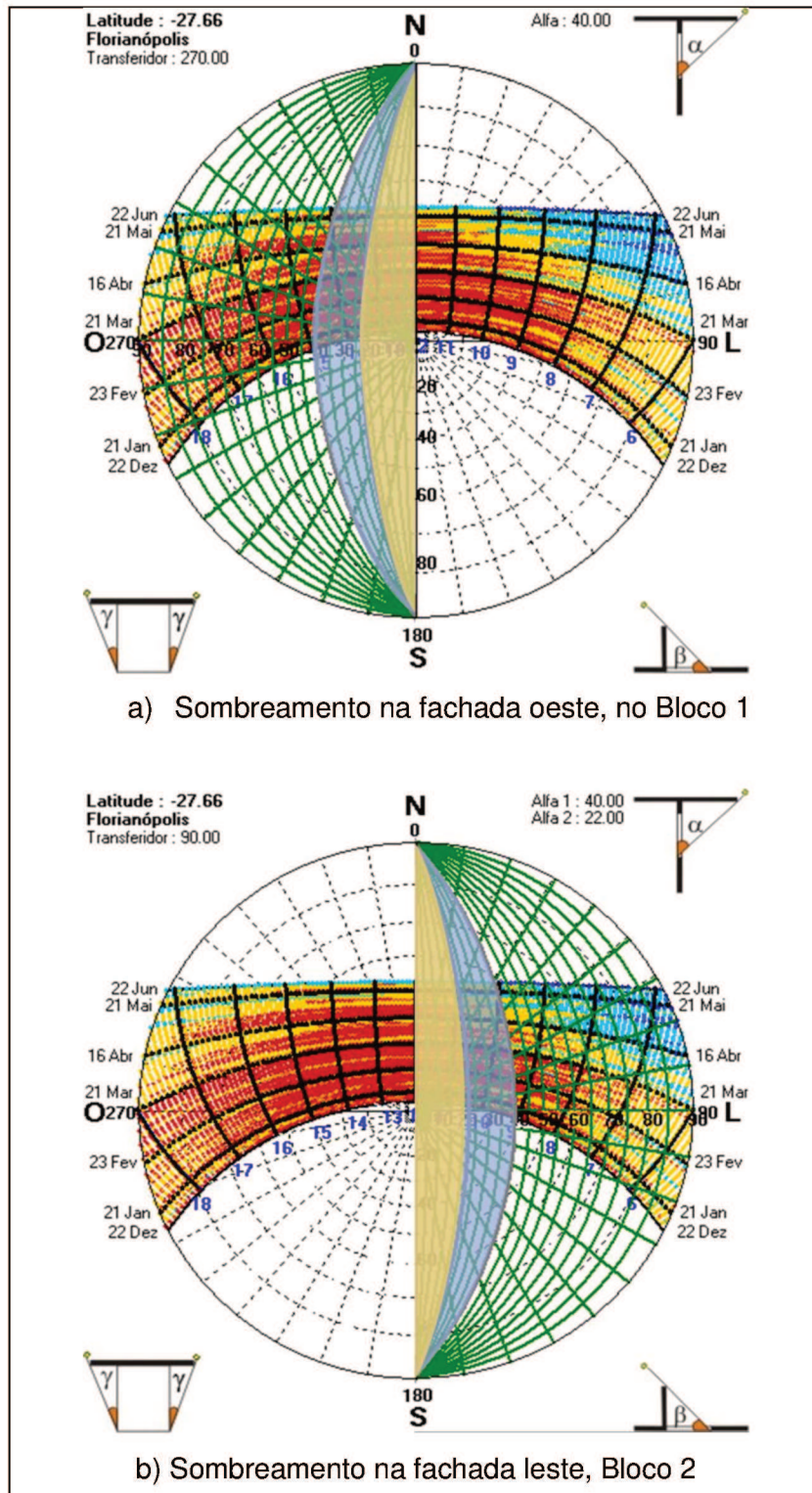
Fonte: Autoria própria

Como alternativa para reduzir a entrada de radiação solar nos ambientes, foram desenvolvidas as medidas de eficiência energética 10 e 11, em que é proposta a instalação de *brises* sobre as janelas. Todas as janelas das fachadas oeste, norte e leste, em sua maioria com 1,20 m de altura, receberam *brises* horizontais superiores através das medidas. A MEE 10 propões *brises* de 0,5 metro de projeção, que formam um ângulo de sombreamento de altitude solar de $\alpha = 22^\circ$, enquanto a MEE 11 prevê a instalação de *brises* de 1 metro de projeção, que formam um ângulo de sombreamento de altitude solar de $\alpha = 40^\circ$. Nos dois casos, cada *brise* foi modelado como um elemento contínuo para todo o pavimento da edificação, e, portanto, com exceção das janelas extremas da fachada, onde o *brise* não se projeta para além dos limites da janela ($\gamma = 0^\circ$), podem ser considerados *brises* horizontais infinitos.

A Figura 13, criada através do software Analysis SOL-AR, desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE-UFSC) na versão 6.2, mostra a máscara criada pelos *brises* na incidência solar em cada fachada, considerando a posição geográfica de uma cidade vizinha, Florianópolis. É possível perceber que a fachada leste do Bloco 2 (Figura 13b) recebe sombreamento a partir

das 9 h pela MEE 11 (máscara em azul) e das 10 h 30 min pela MEE 10 (máscara em amarelo). A fachada oeste do Bloco 1 (Figura 13a) é protegida da radiação até as 14 h pela MEE 10 (máscara em amarelo) e até as 15 h pela MEE 11 (máscara em azul).

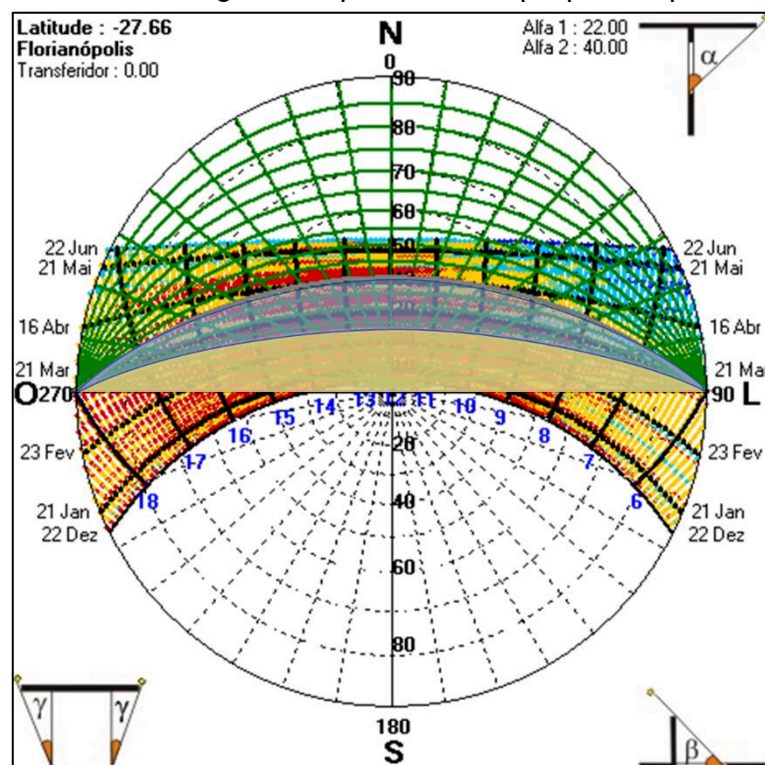
Figura 13: Sombreamentos dos *brises* propostos nas fachadas leste e oeste



Fonte: Autoria própria

O *brise* proposto para as janelas da fachada norte dos dois blocos (Figura 14), por outro lado, consegue bloquear boa parte da incidência solar diária nos meses mais quentes do ano, entre outubro e fevereiro pela MEE 10 (máscara em amarelo), e entre setembro e abril pela MEE 11 (máscara em azul).

Figura 14: Sombreamentos gerados pelos *brises* propostos para a fachada norte



Fonte: Autoria própria

A última medida de eficiência proposta, a MEE 12, resulta da tentativa de unir as medidas mais eficazes para cada um dos elementos da envoltória abrangidos por este estudo. Portanto, com base nos resultados encontrados, será desenvolvido um cenário de soma de medidas, incluindo uma para as fachadas, uma para a cobertura e uma para as janelas, para verificar se existe sinergia entre as reduções de consumo ou se as medidas não operam bem em conjunto.

A simulação do desempenho da edificação e das medidas de eficiência empregou um arquivo climático histórico da cidade de Florianópolis, SC, do tipo *Typical Meteorological Year* (TMY), que consiste em um ano referência normalizado com dados climáticos de 2014 a 2018. Embora o arquivo não seja da mesma cidade do projeto, que se localiza no município de Biguaçu, SC, as cidades são vizinhas e

apenas 21 km separam a edificação da estação meteorológica responsável pela coleta dos dados para a confecção do arquivo climático, no Aeroporto Internacional Hercílio Luz.

3.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A efetividade de cada uma das medidas de eficiência energética foi analisada em relação à sua viabilidade econômica, levando em conta retornos financeiros esperados através da economia na fatura de energia e custos atrelados à implantação das medidas. Considerando que o investimento na eficiência energética de edificações deve apresentar a previsão de rentabilidade para ser atrativa ao proprietário, a análise econômica permite que esta seja comparada, por meio de indicadores, às aplicações financeiras padrão.

Os cálculos tiveram também a função de comparar medidas de eficiência energética entre si para determinar a prioridade na alocação de recursos financeiros em um eventual *retrofit* na edificação e determinar medidas que, embora viáveis tecnicamente, não devem ser aplicadas por não se mostrarem razoáveis na questão de retorno financeiro.

Os custos de cada uma das medidas foram calculados através do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI (CAIXA, 2020), em sua versão não desonerada de agosto de 2020, que reúne para cada um dos estados brasileiros os índices de produtividade e custos unitários médios de diversos serviços relacionados à engenharia civil. Nos casos em que o insumo ou serviço não foi encontrado no catálogo, foi feita pesquisa de mercado para levantar o valor. Os quantitativos de material e serviço necessários, por sua vez, foram calculados sobre planta baixa das edificações.

Os benefícios financeiros resultantes das medidas de eficiência energética propostas, por sua vez, são relacionados aos custos evitados de consumo de energia. A economia na fatura decorrente da redução de consumo energético será calculada considerando custos da tarifa e dos impostos, de acordo com a CELESC.

A unidade consumidora do estudo se enquadra na classe principal 03 – Comercial, Serviço e na classe de consumo 8030 – Educação Superior. O fornecimento de energia é trifásico em alta tensão, com 13.200 V, e, portanto, faz parte

do subgrupo A4 de tarifação. A unidade ainda faz parte da modalidade tarifária Horária Verde, que incorre em tarifa de energia binômia, que separa os custos da energia consumida na Tarifa de Energia – TE e na Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD. A Tarifa Horária Verde ainda conta com tarifa de demanda de energia, em kW, e separa a tarifa da energia consumida de acordo com os horários de consumo, considerando Horário de Ponta o período entre 18:30 e 21:30 em dias úteis, e Horário Fora Ponta os demais períodos. A Tabela 9 resume os custos não tributados de cada componente da fatura de energia para o subgrupo A4 da Tarifa Horária Verde.

Tabela 9: Valores das tarifas não tributadas de energia

Subgrupo	Componentes	Tarifa Demanda (R\$/kW)	Tarifa Energia (R\$/kWh)		
			TUSD	TE	Total
	-	13,02	-	-	-
A4	Ponta	-	0,40227	0,8086	1,21087
	Fora Ponta	-	0,0731	0,23334	0,30644

Fonte: CELESC (2020)

Segundo a CELESC, os tributos que devem ser contabilizados para cálculo das tarifas são o Programa de Integração Social – PIS, a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social – COFINS, e o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços – ICMS, que incidem com taxas de 0,39%, 1,80% e 25%, respectivamente.

A partir desses valores, calcularam-se as tarifas de energia esperadas para o período, apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10: Valores das tarifas tributadas de energia

Subgrupo	Componentes	Demanda (R\$/kW)	Energia (R\$/kWh)
	-	17,74742	-
A4	Ponta	-	1,65052
	Fora Ponta	-	0,41770

Fonte: Autoria própria

Os indicadores financeiros que serão usados como critério de investimento serão o Valor Presente Líquido, a Taxa Interna de Retorno e o *Payback* Corrigido, os mais utilizados para esse tipo de análise.

O Valor Presente Líquido, calculado por meio da Equação 7, é um indicador baseado em análise de fluxo de caixa descontado do projeto, em que se determina uma taxa de retorno aceitável para o investidor, denominada de Taxa Mínima de Atratividade, para verificar os custos globais do investimento em valores presentes. Para investimento em obras de construção civil, costuma-se adotar como período de cálculo o cenário esperado da vida útil da edificação. Portanto, a análise deve levar em conta todos os custos iniciais relacionados ao investimento e ao mesmo tempo todos os impactos no fluxo de caixa futuro causados por ele, incluindo aumento de despesas com manutenção e redução de custos pela economia de energia.

$$VPL = Ci + \sum_{t=1}^n \left(Vt \times \left(\frac{1}{1 + TMA} \right)^t \right), \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

t: Período de cálculo

Ci: Investimento inicial para implantação das medidas

Vt: Benefícios econômicos periódicos das medidas

VPL Valor Presente Líquido

TMA Taxa Mínima de Atratividade

Taxa Interna de Retorno se caracteriza por ser uma abordagem alternativa ao VPL, e representa ao mesmo tempo a taxa de retorno do investimento e a taxa mínima de rentabilidade de um outro investimento para que ele se torne mais atrativo. Analogamente, representa a taxa de desconto para a qual se obtém $VPL = 0$, como pode ser identificado na Equação 8, e, portanto, iguala as receitas ou custos evitados futuros com o investimento inicial. Se a TIR for um valor negativo, o valor investido sofre desvalorização e não é recuperado. Uma TIR positiva indica que o investimento é recuperado através das receitas posteriores, porém o projeto só se torna atrativo para o investidor nos casos em que a TIR se mostra superior à TMA.

$$C_i + \sum_{t=0}^n \left(V_t \times \left(\frac{1}{1 + TIR} \right)^t \right) = 0, \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

t: Período de cálculo

C_i: Investimento inicial para implantação das medidas

V_t: Benefícios econômicos periódicos das medidas

TIR Taxa Interna de Retorno

O último indicador analisado é o *Payback* Descontado que, da mesma maneira, é um método de análise de fluxo de caixa de um projeto. O *Payback* é medido em anos, e representa o tempo necessário para que, com taxa de rentabilidade esperada igual à TMA, o investimento inicial seja igualado pelos retornos futuros, em valor presente. No contexto da eficiência energética, para que um investimento seja economicamente viável o *Payback* Descontado deve ser inferior ao tempo de vida útil das implementações. O indicador, porém, permite uma análise mais profunda dos riscos corridos, já que investimentos de longo prazo se submetem às variabilidades do mercado e a alterações nas premissas adotadas na análise financeira inicial.

Para definição da TMA, foi analisado o cenário de investimentos financeiros no Brasil, e adotada a Taxa Selic, a taxa básica de juros da economia brasileira e representativa de investimentos de renda fixa de alta segurança, que estava, em julho de 2020, definida em 2,25%. Adicionalmente, apesar da vida útil da edificação e das medidas de eficiência adotadas se prolongarem por mais pelo menos 30 anos, o período de retorno do investimento financeiro analisado será de 10 anos, por compreender que a incerteza no cenário energético futuro e a necessidade de retornos financeiros rápidos tornam inseguros os investimentos com retorno mais prolongado.

3.5 ANÁLISE CLIMÁTICA

Para a análise da influência das mudanças climáticas no desempenho da edificação e seus impactos na eficácia das medidas de eficiência energética propostas, o modelo base e as 12 medidas foram simulados novamente, considerando o arquivo climático projetado para o futuro.

A simulação do desempenho futuro requer a adaptação do arquivo climático histórico para as condições climáticas projetadas. Para isso, adotou-se a ferramenta *CCWorldWeatherGen* na sua versão 1.9, de maio de 2017, que, através da metodologia de *Morphing*, é capaz de realizar a conversão. Os dados de entrada requisitados pela ferramenta são resultantes das simulações do cenário de emissões A2 da SRES no modelo HadCM3 e o arquivo climático histórico real, para o período de 1961 a 1990.

Os resultados da simulação do cenário A2 no HadCM3 são disponibilizados gratuitamente pelo centro de distribuição de dados (DDC) do IPCC, compilados em um conjunto de 76 arquivos com as projeções de temperatura, irradiação, nebulosidade, precipitação, umidade relativa, pressão atmosférica e velocidade do vento. O arquivo climático histórico para a região, por sua vez, foi disponibilizado por *Climate.Onebuilding.Org*, um repositório *online* gratuito de dados climáticos para simulação computacional. Não foi encontrado um arquivo para o período base exato do modelo, e considerou-se que, dentre os arquivos climáticos disponíveis para a região, o arquivo do tipo TRY 1963 para Florianópolis foi utilizado por ser mais representativo do período base e resultar em menores erros na projeção climática que o arquivo mais atual e referenciado anteriormente, do tipo TMY 2014-2018, para a mesma cidade.

A partir das informações de entrada, o programa roda um algoritmo e gera, automaticamente, um arquivo climático futuro para o período desejado. Foi criado, portanto, um arquivo para o ano de 2050, que representa o período de 2040 a 2069, previsto como o final da vida útil da edificação.

Os 13 modelos termoenergéticos, tanto o modelo base quanto as 12 MEEs propostas, foram simuladas no EnergyPlus com o arquivo climático futuro, e os consumos de energia elétrica e benefícios financeiros da economia de energia foram comparados com os esperados para o clima atual. Desta maneira, propõe-se verificar a resiliência das medidas e a tendência de evolução do desempenho energético da edificação com os impactos das mudanças climática, bem como a influência destas na viabilidade de medidas de eficiência energética.

Os resultados das simulações devem ser considerados tendências prováveis do desempenho da edificação no futuro, e, devido à imprecisão de estimativas de avanço das mudanças climáticas e principalmente aos seus efeitos regionalizados,

não são previsões certas das condições que serão encontradas no ano de 2050. Além disso, por conta de incertezas relacionadas à inflação e aos impactos de fatores ambientais e geopolíticos no preço da energia elétrica, um estudo aprofundado da possível variação dos preços dos materiais e da energia nos próximos anos não foi incluso no trabalho. Os valores encontrados na análise financeira devem, portanto, refletir melhor as condições futuras na hipótese em que não haja distorções nas variações de preço da tarifa de energia em relação aos materiais necessários para as obras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

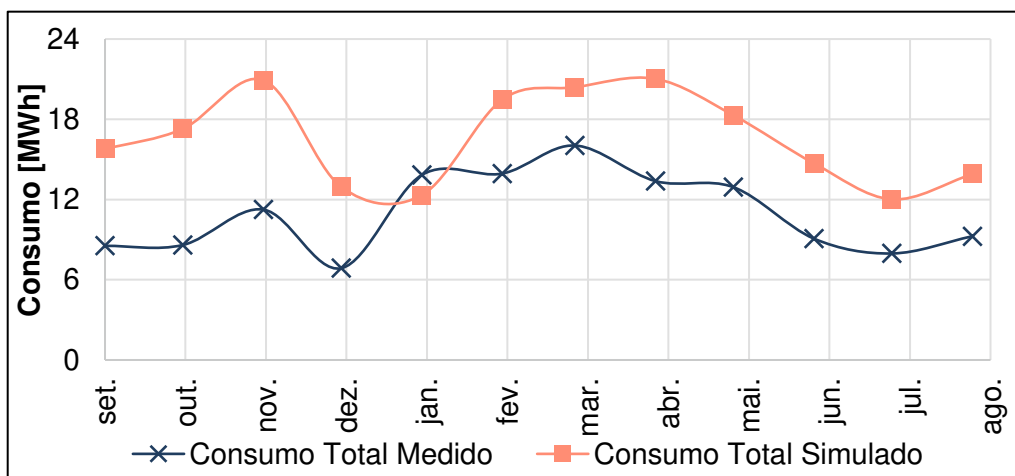
Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos no trabalho, com o aperfeiçoamento do modelo através da calibração, a análise de eficácia das medidas de eficiência energéticas e sua decorrente viabilidade financeira, e a verificação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho da edificação.

4.1 CALIBRAÇÃO

A energia elétrica total consumida na unidade foi determinada com o desconto dos consumos estimados de iluminação externa, ginásio, área de alimentação e máquinas relacionadas ao bombeamento de água dos valores faturados pela concessionária. Esses consumos foram calculados em 11 MWh para os meses de março a novembro, e 6 MWh para dezembro a fevereiro, já que apenas a iluminação externa continua operante no período de recesso.

A primeira simulação do modelo com arquivo climático ajustado para o período analisado superestimou o consumo de energia elétrica anual da edificação em 51,2%. Importante notar na Figura 15, onde é apresentada a comparação entre os perfis simulado e faturado do consumo, que o período mensal considerado para o consumo faturado (medido) é entre o 10º dia do mês e o 10º dia do mês seguinte, enquanto o período considerado para o consumo simulado é o mês do calendário.

Figura 15: Comparação entre o consumo simulado não calibrado e o medido.



Fonte: Autoria própria

Para a calibração, também foram analisados os consumos medido e simulado do sistema de climatização. A Tabela 11 apresenta os resultados das simulações realizadas para a extrapolação do consumo submedido dos aparelhos de ar condicionado para o consumo total da climatização, e percebe-se que as máquinas medidas representam 65% do consumo anual do sistema. O consumo medido mensal dos condicionadores, portanto, foi determinado com a divisão da soma das leituras dos medidores por 0,65, de modo a englobar todo o consumo do sistema.

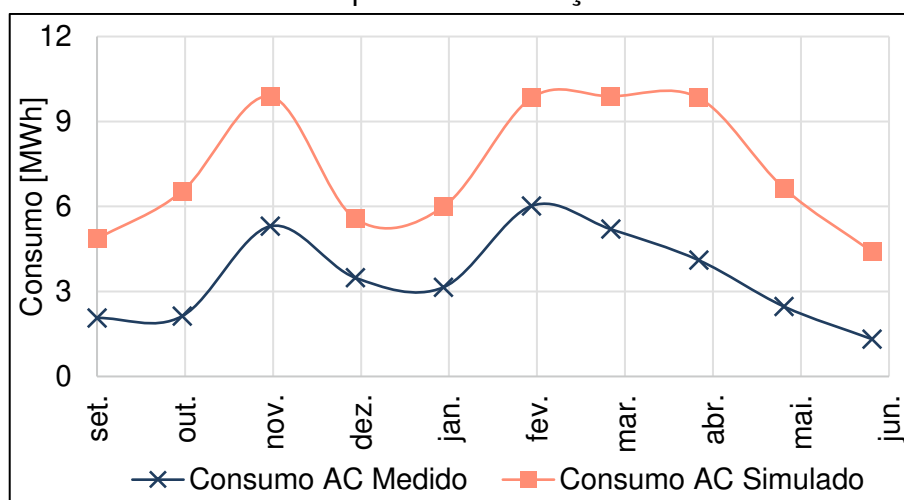
Tabela 11: Consumo simulado das máquinas medidas

Simulação	Quantidade de Máquinas	Consumo Simulado
Condicionadores medidos	96	50.032,67 kWh/ano
Condicionadores total	145	77.379,20 kWh/ano

Fonte: Autoria própria

O primeiro modelo superestimou em 108,4% o consumo do sistema de climatização quando comparado com o consumo medido extrapolado. Nesse caso, apresentado na Figura 16, tanto o consumo medido quanto o consumo simulado são considerados na base do mês de calendário.

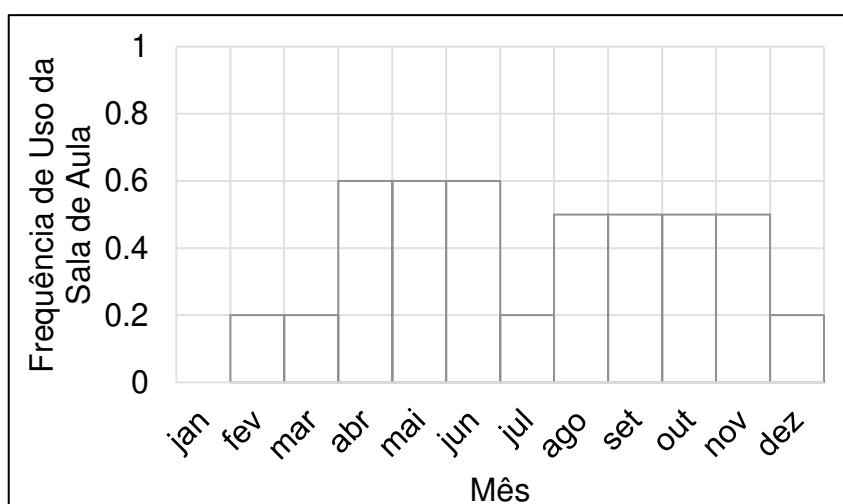
Figura 16: Comparação entre o consumo medido de ar condicionado e os resultados da primeira simulação



Fonte: Autoria própria

A partir de análise das medições de consumo dos condicionadores de ar, foi possível identificar algumas tendências na ocupação dos ambientes. Com base em banco de dados meteorológico do INMET, fez-se um cruzamento entre a temperatura externa máxima e o consumo de cada aparelho de climatização e foi identificada a tendência de que, enquanto os ambientes administrativos acionem a climatização diariamente, as salas de aula só sejam ocupadas 3 dias por semana. Os *schedules* inseridos foram atualizados com essa diretriz, reduzindo o tempo de uso do sistema de iluminação, ar condicionado e equipamentos. A Figura 17 apresenta a rotina de uso das salas ao longo do ano, onde a frequência máxima representa aulas diárias.

Figura 17: *Schedule* calibrado de uma sala de aula típica

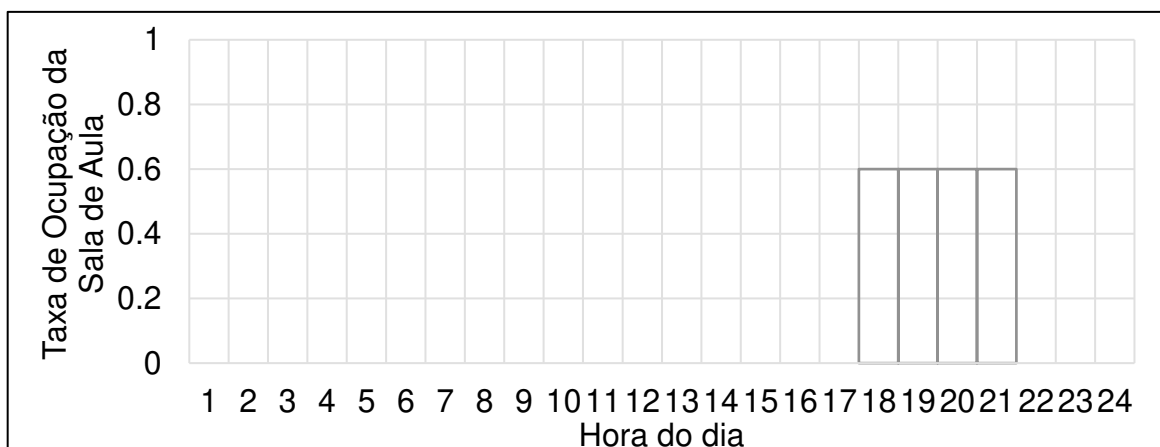


Fonte: Autoria própria

A calibração ainda levou à redução da taxa de ocupação das salas de aula em relação à lotação, com a conclusão de que parte do consumo simulado excedente de ar condicionado era causado pelas cargas térmicas superestimadas. A Figura 18 apresenta a ocupação estimada das salas, em que a ocupação máxima é sua lotação.

Foi identificado um melhor resultado relacionado a uma temperatura de *setpoint* da climatização de ambientes ocupados de 24 °C. Esse valor foi embasado empiricamente, com um consumo de climatização simulado mais condizente com os valores medidos, e validado teoricamente, já que pesquisas de conforto ocupacional indicam que em salas de aula universitárias em clima quente e úmido, o conforto térmico é máximo com as temperaturas de *setpoint* de 23 e 24 °C (BUONOCORE et al., 2020).

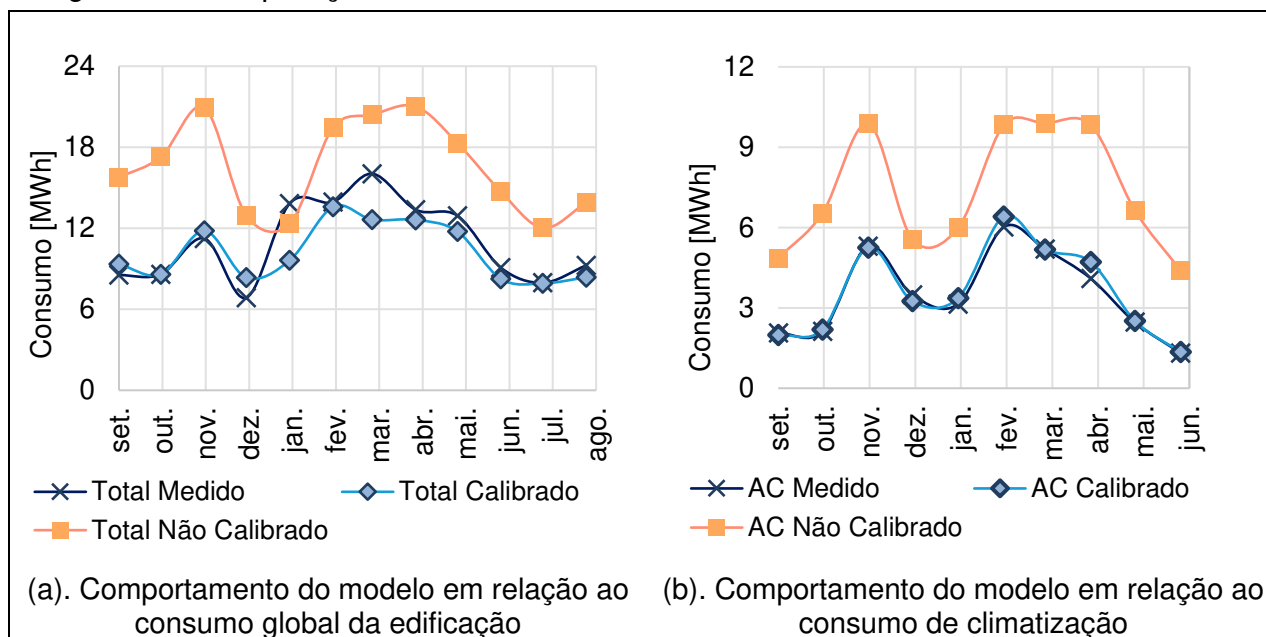
Figura 18: Ocupação calibrada de uma sala de aula típica



Fonte: Autoria própria

As adequações descritas tornaram o modelo mais representativo da edificação real, com um comportamento de consumo simulado próximo ao consumo medido e tarifado. Com base na Figura 19, que apresenta gráficos comparativos dos consumos medido e simulado da edificação como um todo e do sistema de climatização em particular, percebe-se que foi possível representar com grande fidelidade o perfil de uso do sistema de climatização ao longo do ano.

Figura 19: Comparação dos dados medidos com os consumos simulados calibrados.



Fonte: Autoria própria

A Tabela 12 apresenta um resumo das relações entre o consumo simulado e o real, onde comprova-se a melhoria nas previsões do comportamento do modelo, com a previsão de consumo total 5,4% abaixo do valor faturado anual e a de consumo da climatização 2,9% acima do real no período da medição.

Tabela 12: Comparação entre consumos simulados e medidos do sistema de climatização e da edificação como um todo.

Mês	Variação do Consumo Global	Variação do Consumo da Climatização
Setembro	11.8%	-3.8%
Outubro	2.1%	3.1%
Novembro	8.7%	-1.0%
Dezembro	21.6%	-6.5%
Janeiro	-30.4%	6.9%
Fevereiro	-2.5%	6.6%
Março	-20.3%	-0.4%
Abril	-4.3%	15.1%
Maio	-7.8%	2.0%
Junho	-7.3%	2.8%
Julho	1.7%	-
Agosto	-7.8%	-
Total	-5.4%	2.9%

Fonte: Autoria própria

Foi comprovada também a expectativa de que o consumo simulado de dezembro fosse maior e o de janeiro fosse menor que o faturado, devido às diferenças no período considerado para cada mês. O período faturado de dezembro, entre 10/12/2018 e 10/01/2019, foi quase inteiramente de recesso escolar, apesar de computar duas semanas de atividades no mês do calendário, considerado para a simulação. A fatura de janeiro, por sua vez, é calculada entre 10/01/2019 e 10/02/2019, já incluindo as atividades do começo de fevereiro, enquanto na prática as atividades do mês de janeiro se limitem às administrativas.

Além disso, nota-se que, para a maioria dos meses a variação de consumo global foi em torno de 10%; entretanto, o consumo faturado no mês de março foi significativamente superior ao simulado. Na análise, durante a calibração, não foi possível descobrir um padrão de uso que explicasse tal diferença, já que o aumento do consumo total não é acompanhado pelo aumento do consumo de climatização e,

portanto, não está relacionado à maior intensidade de uso das salas de aula ou administrativos. Por limitações técnicas, não foi buscado contato com a administração do local para compreender as variações, e suspeita-se que elas estejam relacionadas a eventos não acadêmicos, como feiras e campeonatos esportivos.

A simulação do sistema de climatização alcançou uma precisão ainda maior, com apenas um mês superando 7% de variação. O mês em questão, abril, consumiu aproximadamente 15% a menos do que o esperado em simulação. Não foi possível, porém, justificar tal variação, e estima-se que ela esteja relacionada a um padrão incomum de utilização que não se repetiu nos outros meses.

4.2 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

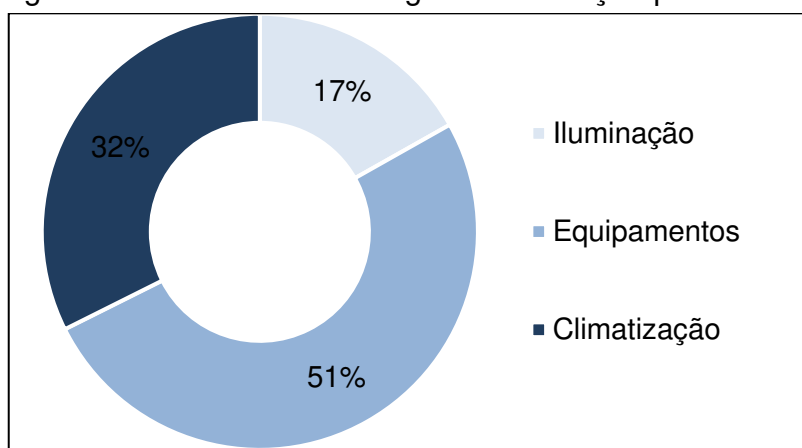
O primeiro passo para a proposição de medidas de eficiência energética para a edificação foi simular o modelo calibrado com um arquivo climático normalizado. A confecção dos arquivos do tipo TMY, utilizado nesse trabalho, conta com vários anos de medições climáticas para evitar a consideração de eventos extremos ou anormais que podem ser encontrados em medições de um ano isolado. O arquivo, com dados de 2014 a 2018, representa melhor, portanto, o consumo energético esperado da edificação em um ano típico.

Os resultados desta simulação permitem a melhor compreensão do comportamento térmico e de consumo do modelo. A separação do consumo de acordo com seu uso final, separando equipamentos, iluminação e climatização, apresentado na Figura 20, mostrou que, para a edificação universitária, medidas de eficiência focadas no consumo dos condicionadores podem apresentar economia significativa de energia elétrica, já que esse uso representa um terço do consumo total do projeto.

A análise do perfil de consumo da edificação permitiu identificar, também, as principais oportunidades de intervenções que melhorem a eficiência energética da edificação. Conforme observado na Figura 21, o saldo das transferências térmicas por condução nas superfícies opacas, como a cobertura e as paredes externas, e nas superfícies transparentes da envoltória é negativo, como uma forma de resfriamento passivo do ambiente. Nota-se, inclusive, que, devido à baixa frequência de ocupação das salas, a carga térmica removida pelo sistema de climatização é significativamente inferior à dissipada pela envoltória, o que ocorre principalmente durante a noite,

quando o ambiente externo está mais frio que o interior da edificação. Como a edificação educacional é ocupada principalmente nesse período noturno, supõe-se que a dissipação térmica para o ambiente através da envoltória seja importante para atenuar o pico de uso da climatização nas salas de aula, e que o aumento do isolamento térmico das paredes, cobertura e janelas não seja um modo eficaz de reduzir o consumo de energia elétrica.

Figura 20: Consumo de energia da edificação por uso final

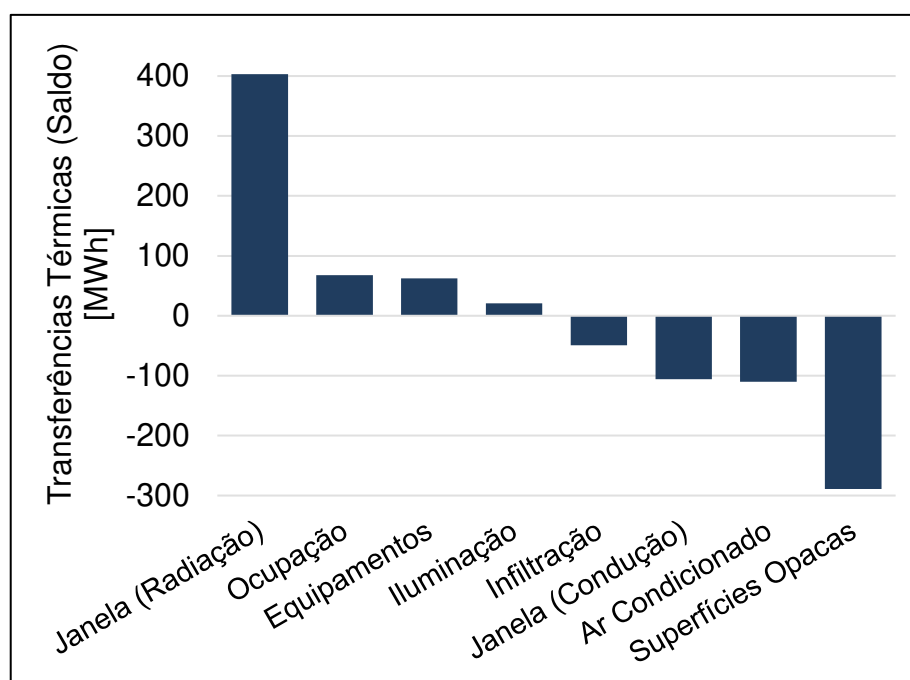


Fonte: Autoria própria

Apesar disso, a incidência solar nas superfícies opacas externas conduz necessariamente à transmissão de calor ao interior da edificação. Identifica-se, com esta constatação, uma oportunidade de reduzir o fluxo de calor para o interior através da alteração da absorvância solar das superfícies externas, com a aplicação de pintura em cores claras. Além disso, analisando os ganhos térmicos ao longo do ano na edificação (Figura 21), percebe-se que radiação solar nas janelas é sua principal fonte de calor, o que indica que a redução do fator solar dos vidros e o sombreamento através de *brises* podem reduzir a carga térmica e o consumo de energia da edificação.

A partir destas análises, foram propostas as medidas de eficiência energética, e realizadas as devidas alterações no modelo para representá-las. Foram analisadas 11 medidas, simuladas com o mesmo arquivo climático para o ano inteiro.

Figura 21: Transferências térmicas da edificação, ao longo do ano



Fonte: Autoria própria

A Tabela 13 apresenta as comparações dos resultados simulados de consumo e demanda de energia elétrica após a implementação de cada MEE com os resultados da simulação do modelo base calibrado, representando a edificação existente. Nesta tabela, a coluna 2 e 3 identificam a variação absoluta e percentual da demanda máxima de energia; a coluna 4 apresenta a variação de consumo de energia em valores absolutos; a coluna 5, o quanto a variação encontrada representa em relação ao consumo total; e a coluna 6, a variação em relação ao consumo do sistema de climatização.

A instalação de vidros laminados de boa qualidade térmica nas MEEs 06 e 07, que levou à redução do fator solar de 0,87 para 0,458 e 0,453, respectivamente, foi a medida mais impactante, com redução de quase 20% no consumo da climatização. A semelhança na economia dos dois casos também mostra que, para a edificação estudada, vidros refletores e absorventes de FS semelhante apresentam desempenhos térmicos comparáveis. A instalação de vidro monolítico colorido simples (MEE 08) e duplo (MEE 09) também proporcionou reduções de consumo elevadas, que superam 15%.

Tabela 13: Variação do uso de energia do modelo pela aplicação das medidas de eficiência, com arquivo climático histórico.

Medida	Variação Demanda		Variação Consumo		
	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa (Total)	Relativa (AC)
MEE 01	-17,0 kW	-11,1%	-5.852 kWh	-4,8%	-14,7%
MEE 02	2,5 kW	+1,7%	6.216 kWh	+5,1%	+15,7%
MEE 03	3,8 kW	+2,5%	2.896 kWh	+2,4%	+7,3%
MEE 04	-14,9 kW	-9,8%	-3.348 kWh	-2,7%	-8,4%
MEE 05	-13,3 kW	-8,7%	-1.553 kWh	-1,3%	-3,9%
MEE 06	-24,2 kW	-15,9%	-7.605 kWh	-6,2%	-19,2%
MEE 07	-24,4 kW	-16,0%	-7.573 kWh	-6,2%	-19,1%
MEE 08	-23,4 kW	-15,4%	-7.096 kWh	-5,8%	-17,9%
MEE 09	-23,5 kW	-15,4%	-6.180 kWh	-5,0%	-15,6%
MEE 10	-9,7 kW	-6,4%	-3.568 kWh	-2,9%	-9,0%
MEE 11	-21,6 kW	-14,2%	-6.582 kWh	-5,4%	-16,6%
Média		-9,9%		-3,0%	-9,2%

Fonte: Autoria própria

A instalação de vidros laminados de boa qualidade térmica nas MEEs 06 e 07, que levou à redução do fator solar de 0,87 para 0,458 e 0,453, respectivamente, foi a medida mais impactante, com redução de quase 20% no consumo da climatização. A semelhança na economia dos dois casos também mostra que, para a edificação estudada, vidros refletor e absorventes de FS semelhante apresentam desempenhos térmicos comparáveis. A instalação de vidro monolítico colorido simples (MEE 08) e duplo (MEE 09) também proporcionou reduções de consumo elevadas, que superam 15%.

Em relação aos *brises*, a orientação sobre o eixo norte-sul da edificação em conjunto com a escolha de instalar somente *brise* horizontal superior à janela, evitando a redução da visibilidade, fizeram com que a radiação solar continuasse incidindo sobre as janelas em períodos importantes do dia, principalmente nas fachadas leste e oeste. Mesmo assim, as reduções de consumo foram significativas; o *brise* de 0,5 m (MEE 10), com máscara de sombreamento formando um ângulo de $\alpha = 22^\circ$ nas janelas das salas de aula, levou à redução de 9% no consumo dos condicionadores

de ar. O *brise* de 1 m (MEE 11), com ângulo de altitude solar chegando a $\alpha = 40^\circ$, aumentou a redução para mais de 16%.

De maneira análoga, percebe-se que a redução da absorptância solar das faces externas da envoltória, através da mudança da sua coloração, leva à redução da transmissão de calor através das superfícies opacas. A estratégia, adotada na fachada através da MEE 01 e na cobertura com a MEE 04, se mostrou uma oportunidade importante de eficiência energética, e garantiu a redução de consumo em 14,7% e 8,4% e a redução da carga térmica anual da edificação em 45 MWh e 38 MWh, respectivamente.

Por outro lado, fica claro que a redução da transmitância térmica, através de isolamento nas paredes e cobertura, não é uma estratégia adequada para reduzir a carga térmica nesta tipologia de edificação e leva, pelo contrário, a um aumento de consumo para climatização. Isso se verifica diretamente na aplicação de lã de rocha sobre as paredes atuais (MEE 02), que levou a aumento de 15% no consumo através da redução da transmitância térmica de 3,65 W/(m²K) para 0,80 W/(m²K) (PROJETEEE, 2020). O mesmo acontece com a instalação de telhas com camada de poliestireno isolante (MEE 05), que, embora não tenha aumentado o consumo em relação ao baseline, aumentou em quase 5% quando comparado com os resultados da MEE 04, que utiliza a mesma telha branca, mas sem isolamento. Nas janelas, o efeito é semelhante. Nota-se que, embora possua o menor fator solar dentre todos os tipos de janela propostos, a MEE 09, que propôs o uso de vidros duplos que reduziram pela metade a transmitância térmica, é a que aportou menor redução de consumo. Ainda assim, é importante notar que, em todos os casos mencionados, o isolamento foi aplicado em somente um elemento da envoltória em cada MEE, não impedindo a transferência de calor pelos outros elementos. Embora não analisada neste trabalho, a situação de isolamento perfeita deveria contar com, ao mesmo tempo, paredes, lajes e cobertura com isolamento, vidros reforçados do tipo duplo ou triplo, e esquadrias com boa vedação e barreira térmica.

As paredes leves da MEE 03 apresentam, também pelo aumento da capacidade de isolamento, um efeito negativo no consumo. Esta medida, que possui o intuito de reduzir a capacidade térmica da parede, visa a redução do atraso térmico, de modo a evitar que uma quantia muito grande de energia térmica armazenada nas fachadas ao longo do dia seja transferida para o interior somente durante a noite, no

período de ocupação. Esse princípio é atendido, com a redução do atraso pela metade de 3,6 h para 1,8 h (PROJETEEE, 2020). O sistema proposto, porém, conta com uma câmara de ar separando as duas chapas de gesso, o que garante a redução da transmitância térmica do sistema, de 3,65 W/(m²K) para 1,26 W/(m²K) (INMETRO, 2017). A simulação mostra que essa característica, que já se constatou ser negativa para o consumo, se sobressaiu à redução do atraso térmico, aumentando o consumo de climatização dos ambientes.

Por fim, foi desenvolvido um cenário com as medidas de eficiência mais vantajosas para cada elemento da envoltória. De acordo com os resultados analisados, conclui-se que essas medidas são a pintura das paredes externas na cor branca; a substituição das telhas escuras de fibrocimento por telhas metálicas brancas; e a substituição dos vidros simples de 3 mm das janelas por vidros laminados incolores.

Os resultados da simulação da MEE 12 - Parede Branca + Telhado Branco + Vidro Laminado, expostos na Tabela 14, mostram que sua aplicação conjunta permite a redução do consumo de ar condicionado em 41,3% na edificação, e demonstram uma forte sinergia nas estratégias de economia, que, em grupo, atingiram os mesmos patamares de eficiência que a soma delas individualmente. Uma das causas dessa sinergia é a de que as três medidas estão relacionadas ao mesmo princípio, o de evitar o ganho térmico relacionado à incidência dos raios solares na edificação, e que, sendo aplicadas em elementos diferentes da envoltória, não interferem umas nas outras.

Tabela 14: Variação do uso de energia do modelo pela aplicação do conjunto das melhores medidas de eficiência energética, com arquivo climático histórico.

Medida	Variação Demanda		Variação Consumo		
	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa (Total)	Relativa (AC)
MEE 12	-52,4 kW	-34,4%	-16.418 kWh	-13,4%	-41,3%

Fonte: Autoria própria

As medidas de eficiência energética simuladas permitiram uma redução de potência máxima utilizada, chamada de demanda de energia, em ordem ainda superior à redução do consumo energético total da edificação. A média de redução, de 9,9% para as 11 medidas propostas (Tabela 13) e de 34,4% no cenário da MEE

12, com a aplicação conjunta das 3 melhores MEEs (Tabela 14), mostra uma atenuação do pico de consumo da edificação que indica que as medidas são especialmente eficazes para o consumo em momentos de maior demanda, como o início das aulas noturnas às 18h30min. Isso mostra que as medidas conseguem, de forma eficaz, reduzir ganhos térmicos externos ao longo do dia, de forma que as salas de aula, vazias durante o dia, apresentem menos energia térmica armazenada, evitando a sobrecarga do sistema de climatização no momento inicial de ocupação.

4.3 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

Como as medidas propostas que não reduzem o consumo de energia da edificação não trazem benefícios financeiros após sua implementação, as MEEs 02, 03, 06 e 07, automaticamente, se mostram inviáveis. A MEE 05 foi considerada inviável pois demonstra que a aplicação de camada isolante de poliestireno nas telhas piora o desempenho do telhado, perceptível na comparação com o consumo da MEE 04. O mesmo critério se aplicou às janelas de vidro duplo da MEE 09 que, apesar de apresentar redução de mais de 15% do consumo de climatização, mostrou um uso maior de energia quando comparado com a MEE 08, onde é empregado o mesmo tipo de vidro mas em janelas simples.

Descartadas as medidas energeticamente inconsistentes, foram analisadas em termos de viabilidade econômica as 7 medidas de eficiência energética que, isoladas, apresentaram reduções do consumo simulado, e o cenário das 3 melhores medidas agrupadas. Para a análise, foram considerados dois cenários: para o primeiro, específico para a edificação estudada, investigaram-se os custos de reforma para adequação da construção atual às medidas propostas; para o segundo, verificou-se a diferença na viabilidade das medidas caso estas sejam implementadas ainda durante o processo de construção.

A tabela de preços do SINAPI forneceu todos os custos dos serviços necessários para a determinação dos valores que devem ser investidos para a implementação das MEEs, além dos custos dos materiais necessários para as MEEs 1 e 4. Para determinação dos preços dos vidros das janelas e dos *brises*, foi necessário realizar orçamentos junto aos fornecedores.

A Tabela 15 apresenta a relação de investimentos (CAPEX) de cada medida para os dois cenários estudados, em caso de reforma da edificação operante e em caso de nova edificação. A tabela também inclui os benefícios financeiros anuais (OPEX) relacionados ao custo evitado de consumo de energia na edificação pelo aumento da eficiência energética. Por dificuldades administrativas, não foi incluso na análise a possibilidade de redução da demanda contratada pela edificação pela redução da potência máxima demandada no pico de utilização.

Tabela 15: Custos e benefícios presentes relacionados às MEEs estudadas.

Medida	CAPEX		OPEX
	Reforma	Nova Obra	
MEE 01	-R\$ 43.397,33	-R\$ 43.397,33	R\$ 4.826,18
MEE 04	-R\$ 99.734,00	-R\$ 27.899,20	R\$ 3.468,02
MEE 06	-R\$ 195.219,32	-R\$ 63.745,84	R\$ 6.768,64
MEE 07	-R\$ 262.169,12	-R\$ 130.695,64	R\$ 6.757,94
MEE 08	-R\$ 171.522,98	-R\$ 40.049,50	R\$ 6.588,63
MEE 10	-R\$ 72.771,39	-R\$ 72.771,39	R\$ 2.986,22
MEE 11	-R\$ 144.542,77	-R\$ 144.542,77	R\$ 5.650,80
MEE 12	-R\$ 338.350,65	-R\$ 135.042,37	R\$ 15.010,54

Fonte: Autoria própria

Com base nesses valores, na TMA (2,25%) e no tempo esperado de retorno (10 anos) previamente definidos, foi desenvolvida a análise financeira das medidas. Os resultados, apresentados na Tabela 16, se mostram significativamente negativos: nenhuma das medidas se apresenta viabilidade econômica que justifique o investimento na reforma da edificação. Com isso, é possível perceber que a edificação, localizada em clima ameno, com poucas noites quentes, de tipologia educacional e uso noturno, não apresenta potencial de redução do uso de energia para climatização através de *retrofit* da envoltória.

A descoberta se justifica pelo fato de que a ocupação noturna, período em que não há impactos da radiação solar na edificação e a temperatura externa é reduzida, faz com que os principais benefícios das MEEs, voltadas principalmente a estratégias que impeçam o aquecimento solar, não sejam sentidos pelo sistema de climatização. Destaca-se o Bloco 2, cuja fachada principal, a leste, recebe insolação só no período da manhã, e passa a ser sombreada ao menos 6 horas antes de sua

ocupação. Com isso, boa parte da energia térmica adquirida é dissipada para o ambiente antes do uso, reduzindo os benefícios das medidas relacionados à carga térmica a ser removida pelo sistema de climatização. No Bloco 1, espera-se uma redução da temperatura ambiente no início da ocupação. Mesmo assim, como a temperatura externa durante o período de uso é, em média, mais baixa que a temperatura de acionamento do ar condicionado, a dissipação de calor através da envoltória implica na redução do uso do sistema de climatização.

Tabela 16: Resultados da análise financeira presente para as MEEs estudadas.

Medida	Reforma			Nova Construção		
	TIR	Payback	VPL	TIR	Payback	VPL
MEE 01	2,0%	10,16	-R\$ 593,97	2,0%	10,16	-R\$ 593,97
MEE 04	-15,7%	> 20	-R\$ 67.467,79	4,2%	8,97	R\$ 2.786,29
MEE 06	-15,7%	> 20	-R\$ 132.231,90	1,1%	10,70	-R\$ 3.651,48
MEE 07	-19,2%	> 20	-R\$ 197.801,25	-10,5%	> 20	-R\$ 69.220,83
MEE 08	-14,4%	> 20	-R\$ 110.617,90	10,3%	6,61	R\$ 17.962,52
MEE 10	-13,6%	> 20	-R\$ 45.276,17	-13,6%	> 20	-R\$ 45.276,17
MEE 11	-14,2%	> 20	-R\$ 92.363,38	-14,2%	> 20	-R\$ 92.363,38
MEE 12	-12,6%	> 20	-R\$ 200.747,15	2,0%	10,17	-R\$ 1.912,65

Fonte: Autoria própria

A eficácia das MEEs é maior nos ambientes administrativos e nas dependências da universidade, que são regularmente ocupados ao longo do dia e em períodos em que existem ganhos de calor através da envoltória. Como esse tipo de ambiente é minoritário na universidade, porém, eles não influenciam suficientemente na viabilidade das medidas.

Por outro lado, existe uma melhora na viabilidade em um cenário de nova construção, e a redução dos custos de implementação das estratégias através de sua integração na edificação ainda na fase de projeto se revela como uma oportunidade de viabilização da eficiência energética em novas construções. As medidas com menor custo de implementação, a instalação de telhas metálicas brancas (MEE 04) no lugar das telhas comuns de fibrocimento e a substituição dos vidros simples por vidros monolíticos tingidos (MEE 08) resultam em retornos financeiros adequados, comprovado pelos 3 indicadores utilizados: $VPL > 0$, $TIR > TMA$ e *Payback* descontado < 10 anos. Outros incrementos de baixo custo, como a pintura externa

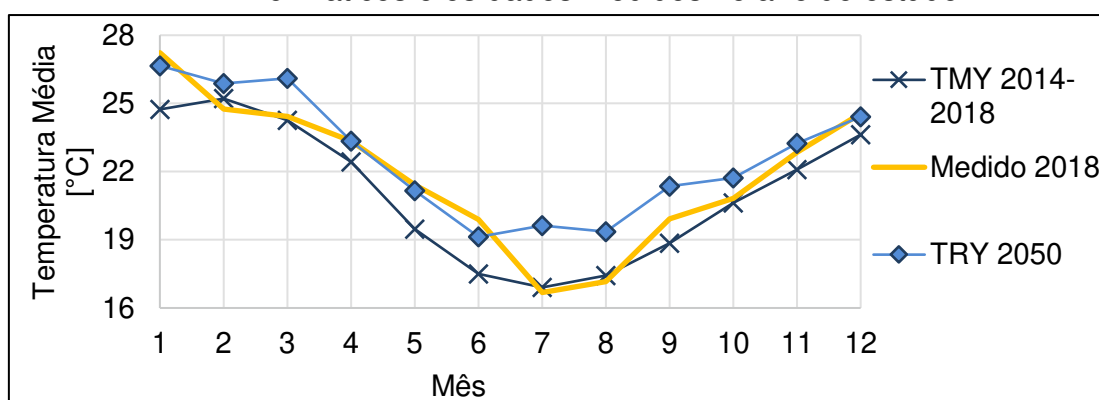
(MEE 01) e o uso de vidros laminados simples (MEE 06) também passam a ter retornos positivos sobre o investimento, embora ainda não superiores a taxa mínima de atratividade determinada para este trabalho. A MEE 12, com gastos evitados em energia de mais de 15 mil reais anuais, também fica um pouco aquém da viabilidade, como mostra o VPL de menos de 2 mil reais negativos.

É importante notar, também, que, apesar de não considerada neste estudo, as já apresentadas reduções dos picos de consumo permitem a redução da demanda contratada, parte integrante da fatura no regime de Tarifa Horária Verde, junto à concessionária de energia, e a melhoria nos retornos financeiros das medidas de eficiência propostas.

4.4 IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O arquivo climático adaptado através do *CCWorldWeatherGen* para o ano de 2050 de acordo com as projeções do cenário SRES A2 no modelo HadCM3 prevê o aumento de 1,6 °C na temperatura média anual para a região (Figura 22). A diferença é ainda mais acentuada no inverno, período no qual a temperatura média prevista subiu em 2,3 °C, não só aumentando a carga térmica global da edificação, mas também aumentando o período em que o uso de climatização é regularmente necessário.

Figura 22: Comparação das temperaturas médias mensais entre os arquivos climáticos e os dados medidos no ano do estudo



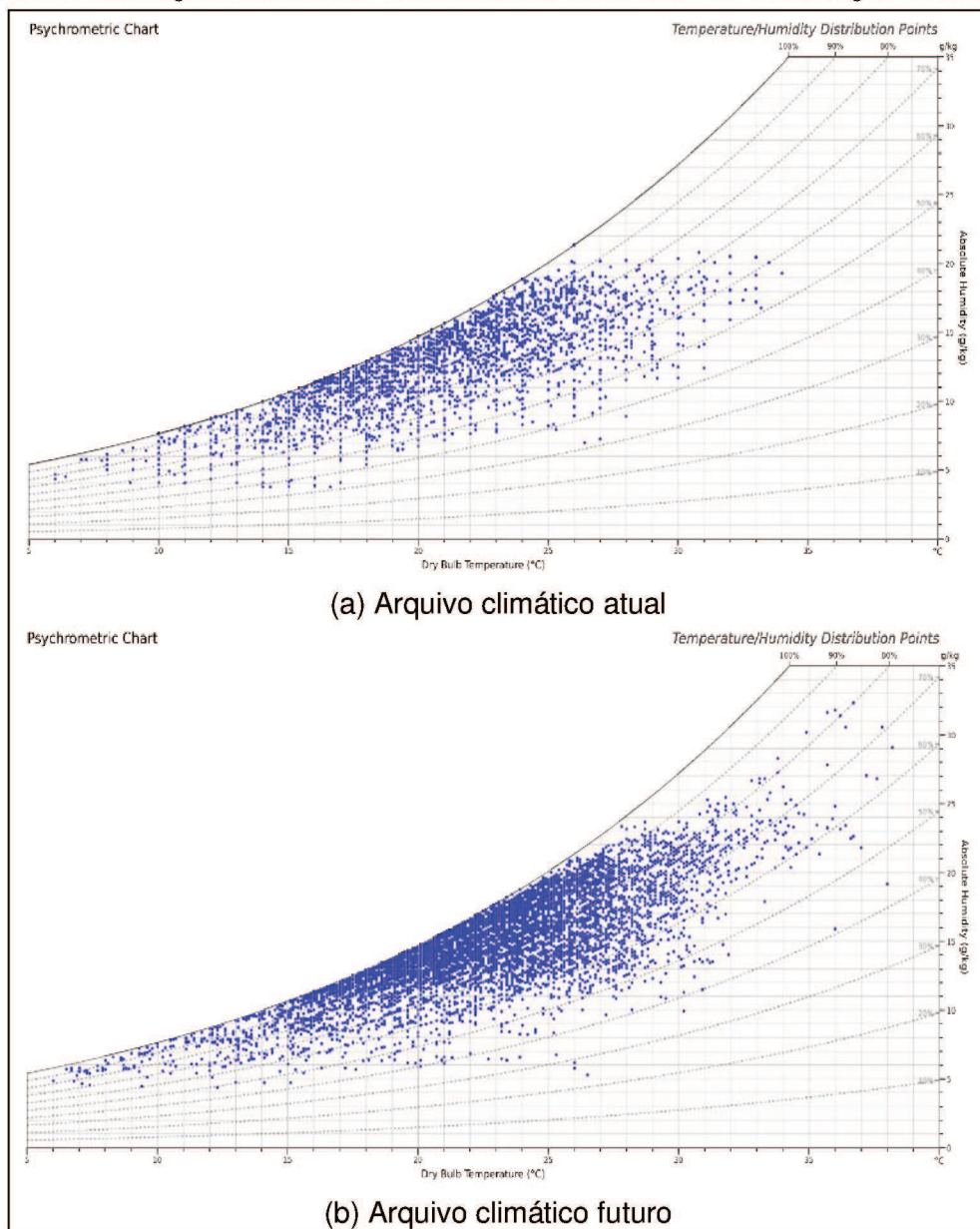
Fonte: Autoria própria

É interessante notar, também, que a temperatura medida para os anos 2018 e 2019 é, em média, superior à esperada para o período, se revelando um ano

excepcionalmente quente na região. Com a projeção climática, porém, as temperaturas mais altas se tornam padrão, e até 2050 a temperatura média de um ano típico deve ser 0,65 °C superior à registrada em 2018. A umidade relativa também tende a aumentar na região, principalmente no verão, para o qual são previstos valores de umidade relativa 4,6% superiores aos atualmente típicos.

O aumento da umidade e temperatura é evidente na comparação das cartas psicrométricas para clima histórico e futuro (Figura 23), geradas no aplicativo para navegador *Psychrometric Chart*, de AndrewMarsh.com.

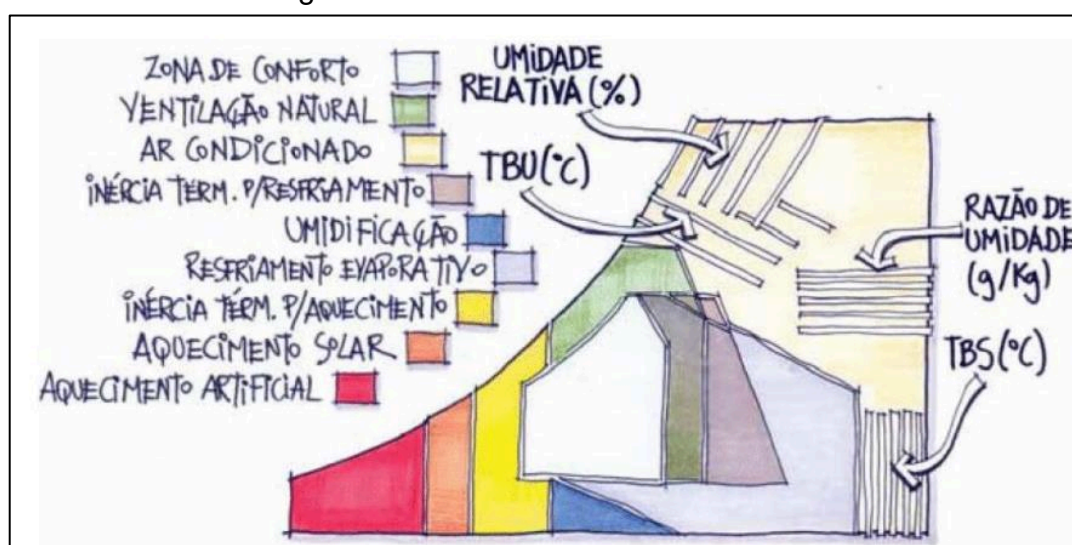
Figura 23: Evolução da Carta Psicrométrica local com as mudanças climáticas.



Fonte: Autoria própria

As cartas psicrométricas são um recurso gráfico para analisar diversas condições climáticas de forma simultânea, como a temperatura de bulbo úmido e a umidade relativa, a partir da temperatura de bulbo seco (eixo horizontal) e da razão de umidade (eixo vertical). Percebe-se, nas cartas, um deslocamento médio dos pontos, que representam dados climáticos horários, para o canto superior direito, região do gráfico que indica que não mais é possível obter condições de conforto térmico sem o uso da climatização artificial (Figura 24).

Figura 24: Carta bioclimática brasileira.



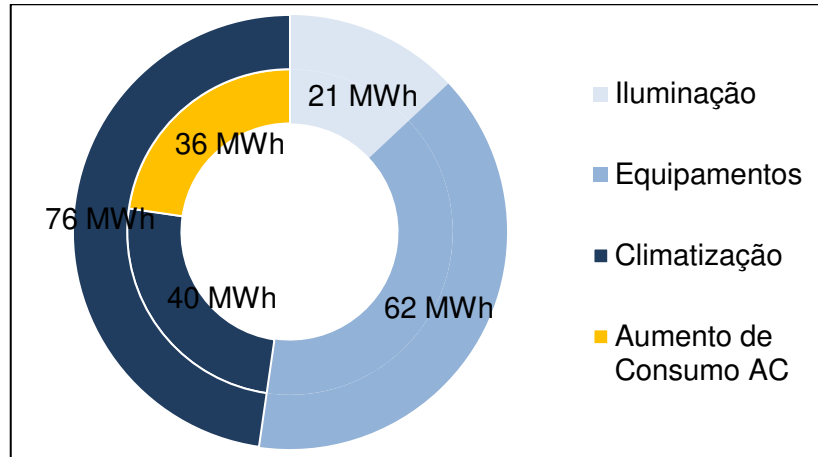
Fonte: Lamberts et al. (2016)

Esse arquivo climático futuro foi então utilizado para a segunda rodada de simulações, com o intuito de verificar o comportamento da edificação e das medidas de eficiência energética propostas em um cenário futuro projetado e possível ainda dentro da vida útil do empreendimento. O primeiro modelo simulado foi o modelo calibrado da edificação existente, para verificação dos impactos esperados das mudanças climáticas no perfil de consumo da edificação.

Os resultados mostram aumento importante do consumo energético dos aparelhos de ar condicionado. Como padrão de uso de equipamentos de escritório e iluminação não é relacionado ao clima, esses se mantiveram basicamente constantes. Por outro lado, os 95% de aumento no consumo da climatização foram suficientes para aumentar sua participação para quase 50% do total empregado na edificação. A Figura 25 apresenta comparação das divisões de consumo de energia por tipo de uso entre o clima atual (anel interno) e o futuro (anel externo). Percebe-se que o consumo

em iluminação e equipamentos se manteve constante, com todo o aumento do consumo, em amarelo, ocorrendo no sistema de climatização.

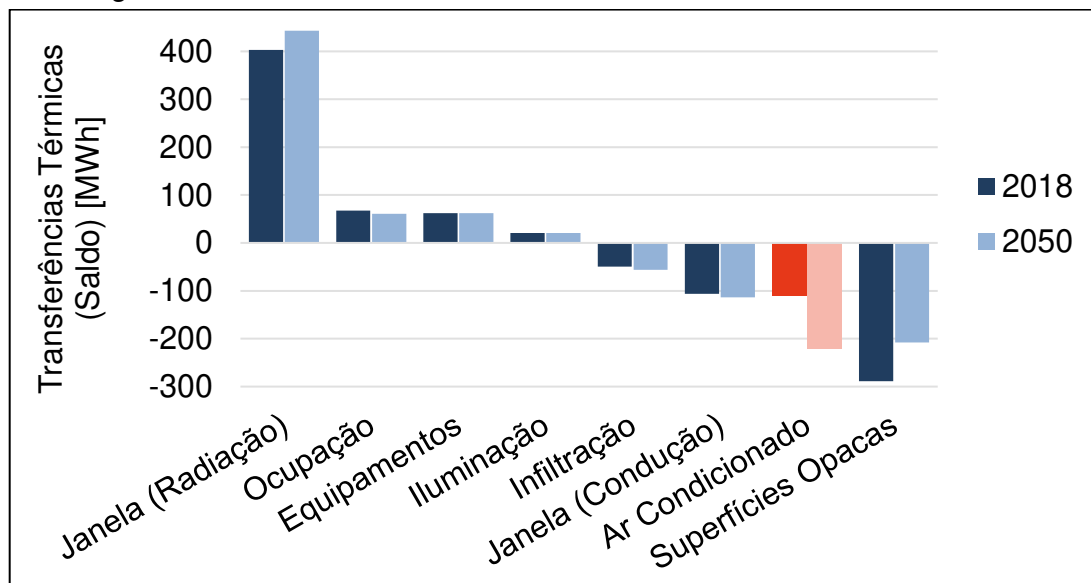
Figura 25: Consumo de energia da edificação por uso final em cenário futuro



Fonte: Autoria própria

Além disso, o aumento da temperatura do ar externo diminui a capacidade de dissipação de calor através das superfícies opacas, e aumenta a participação do sistema de climatização na remoção da carga térmica da edificação (Figura 26). Essa condição reduz a capacidade de condicionamento passivo e aumenta a dependência da energia elétrica para o resfriamento dos ambientes, indicando a possibilidade de uso de isolamento nas paredes e cobertura da edificação.

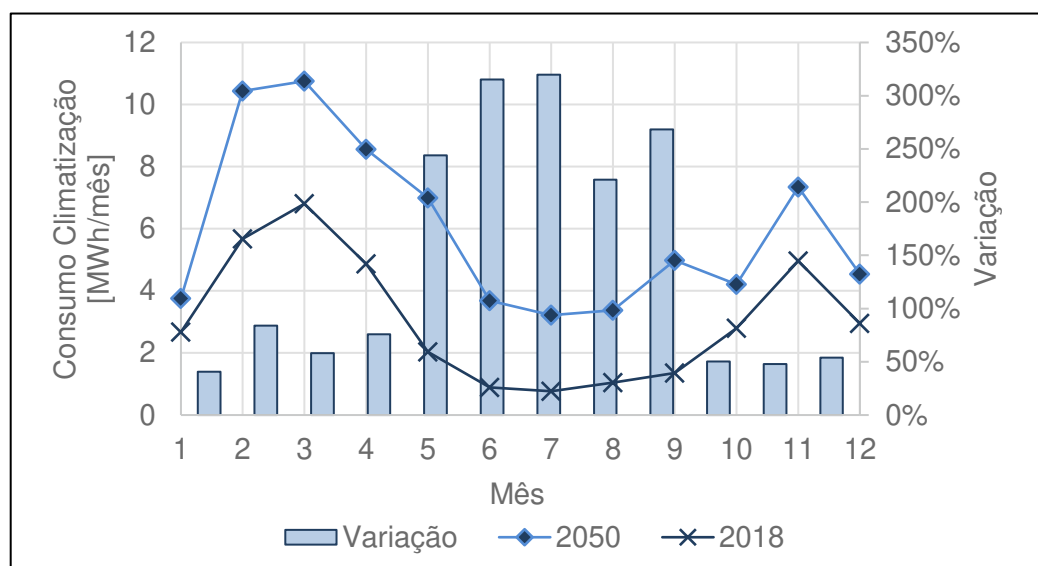
Figura 26: Transferências térmicas anuais em clima atual e futuro.



Fonte: Autoria própria

Conforme o indicado pelas análises anteriores, o consumo de ar condicionado foi, significativamente, superior no cenário climático futuro. Esse cenário foi identificado em todos os meses do ano, mas ainda mais expressivo no período de temperaturas mais baixas, superando 200% de crescimento em cada mês entre maio e setembro (Figura 27). Isso comprova que, além de aumentar a carga térmica e sobrecarregar o sistema de climatização, o aquecimento climático modificou o modo de utilização da edificação, tornando seu uso mais regular mesmo durante o inverno e aumentando o tempo em que as máquinas são acionadas.

Figura 27: Comparação entre consumo simulado para climatização atual e futura



Fonte: Autoria própria

Esse crescimento no consumo do sistema de climatização resultou em aumentos da ordem de 30% no consumo global e de 45% na demanda de energia da edificação (Tabela 17). Além disso, os resultados mostram que o aumento foi ainda mais significativo nas horas consideradas de ponta pela concessionária de energia, entre as 18h e as 21h, passando de 50% do consumo. Essa diferença está relacionada à distribuição do uso de energia ao longo do dia: enquanto o consumo do setor administrativo está mais atrelado ao uso de equipamentos e iluminação, o consumo nas salas de aula é relacionado à climatização.

Tabela 17: Comparação entre os usos de energia atual e futuro da edificação base.

Cenário	Demanda	Consumo Hora Ponta (18:30 – 21:30)	Consumo Hora Fora Ponta	Consumo Total
Atual	152 kW	31.594 kWh	91.047 kWh	122.641 kWh
Futuro	221 kW	48.244 kWh	110.377 kWh	158.621 kWh
Variação	+45%	+53%	+21%	+29%

Fonte: Autoria própria

A seguir, foram simuladas, com o mesmo arquivo climático futuro, cada uma das 11 medidas de eficiência propostas, além do cenário que engloba a melhor MEE para cada elemento da envoltória. Os resultados comparativos com o desempenho das mesmas medidas de eficiência para o clima estão dispostos na Tabela 18.

Tabela 18: Comparação da variação do consumo simulado de energia atual e futuro com a aplicação das MEEs

Medida	Variação Consumo Clima Atual			Variação Consumo Clima Futuro		
	Absoluta	Relativa (Total)	Relativa (AC)	Absoluta	Relativa (Total)	Relativa (AC)
MEE 01	-5.852 kWh	-4,8%	-14,7%	-11.876 kWh	-7,5%	-15,7%
MEE 02	6.216 kWh	5,1%	15,7%	2.895 kWh	1,8%	3,8%
MEE 03	2.896 kWh	2,4%	7,3%	2.120 kWh	1,3%	2,8%
MEE 04	-3.348 kWh	-2,7%	-8,4%	-6.106 kWh	-3,8%	-8,1%
MEE 05	-1.553 kWh	-1,3%	-3,9%	-3.812 kWh	-2,4%	-5,0%
MEE 06	-7.605 kWh	-6,2%	-19,2%	-10.842 kWh	-6,8%	-14,3%
MEE 07	-7.573 kWh	-6,2%	-19,1%	-10.829 kWh	-6,8%	-14,3%
MEE 08	-7.096 kWh	-5,8%	-17,9%	-8.986 kWh	-5,7%	-11,9%
MEE 09	-6.180 kWh	-5,0%	-15,6%	-8.579 kWh	-5,4%	-11,3%
MEE 10	-3.568 kWh	-2,9%	-9,0%	-5.466 kWh	-3,4%	-7,2%
MEE 11	-6.582 kWh	-5,4%	-16,6%	-10.597 kWh	-6,7%	-14,0%
MEE 12	-16.418 kWh	-13,4%	-41,3%	-27.626 kWh	-17,4%	-36,5%
Média¹	-3.659 kWh	-3,0%	-9,2%	-6.553 kWh	-4,1%	-8,7%

Fonte: Autoria própria

¹ Excluindo a MEE 12.

Primeiramente, é interessante perceber que, embora, na média, a redução percentual de consumo do sistema de climatização prevista para 2050 seja quase igual à esperada para o clima atual, existe uma tendência de mudança nas estratégias de economia de energia. A maior parte das medidas relacionadas à proteção da edificação contra a incidência direta do sol, que incluem os *brises* (MEEs 10 e 11), vidros de menor fator solar (MEEs 06 a 09) e cores externas mais claras (MEEs 01 e 04), tem sua eficiência reduzida.

Por outro lado, estratégias de isolamento e inércia térmica da envoltória, embora que de modo geral ainda não reflitam na redução do consumo da edificação, têm seus impactos negativos significativamente reduzidos e tendem a, com projeções climáticas mais longas, se tornarem medidas de eficiência energética possíveis, mesmo para ocupação noturna, em ambientes climatizados artificialmente. Quando comparado com telhas metálicas brancas não isoladas (MEE 04), o uso de isolamento na cobertura (MEE 05) terá os efeitos negativos reduzidos de 4,5% para 3,1% do consumo de ar condicionado, e os efeitos do uso de vidros duplos (MEE 09), serão reduzidos de 2,3% para 0,6% em comparação com vidro simples de fator solar semelhante (MEE 08). O aumento do consumo relacionado ao isolamento das paredes (MEEs 02 e 03), por fim, também é reduzido significativamente, em mais de 50% no primeiro caso e em mais de 25% no segundo.

Esses fenômenos se justificam, pois, com o aumento da temperatura do ar externo, os fatores de transmissão térmica por condução do ar para a envoltória e por infiltração ganham importância em relação à absorção da radiação solar, que tem menor variação com as mudanças climáticas. Além disso, a análise das temperaturas do arquivo climático convertido mostra que nos momentos de maior utilização do sistema de climatização, previsto para as 18h30min, a temperatura externa é semelhante à temperatura externa das 16h30min no clima atual, o que dificulta o resfriamento passivo da edificação através da dissipação térmica para o ambiente pela envoltória.

Essa hipótese também pode ser verificada com a análise dos efeitos das MEEs na demanda de energia da edificação, apresentados na Tabela 19, onde se constata que a redução da potência máxima utilizada, mesmo com melhoras na redução de consumo global da edificação, deve cair mais de 50%. Portanto, o atraso do resfriamento do ar faz com que, no pico de consumo de energia, a climatização

artificial seja o meio principal de remoção de energia térmica da edificação, induzindo ao maior acionamento dos aparelhos de ar condicionado.

Tabela 19: Comparação da variação da demanda simulada de energia atual e futura com a aplicação das MEEs

Medida	Variação Demanda Clima Atual		Variação Demanda Clima Futuro	
	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa
MEE 01	-17,0 kW	-11,1%	-12,6 kW	-5,7%
MEE 02	2,5 kW	1,7%	-6,2 kW	-2,8%
MEE 03	3,8 kW	2,5%	0,4 kW	0,2%
MEE 04	-14,9 kW	-9,8%	-6,6 kW	-3,0%
MEE 05	-13,3 kW	-8,7%	-7,1 kW	-3,2%
MEE 06	-24,2 kW	-15,9%	-14,4 kW	-6,5%
MEE 07	-24,4 kW	-16,0%	-14,4 kW	-6,5%
MEE 08	-23,4 kW	-15,4%	-12,8 kW	-5,8%
MEE 09	-23,5 kW	-15,4%	-14,1 kW	-6,4%
MEE 10	-9,7 kW	-6,4%	-6,8 kW	-3,1%
MEE 11	-21,6 kW	-14,2%	-12,6 kW	-5,7%
MEE 12	-52,4 kW	-34,4%	-51,6 kW	-23,3%
Média²		-9,9%		-4,4%

Fonte: Autoria própria

A simulação do grupo das três medidas de eficiência energéticas mais eficazes mostra que, apesar disso, a estratégia de redução da absorção de radiação solar também é extremamente resiliente. Observa-se, na Tabela 18, que a energia absoluta economizada anualmente com a implementação do conjunto de medidas deve quase dobrar até o ano de 2050, quando elas deverão reduzir em 17,4% o consumo global de energia da edificação, contra 13,4% atuais.

A Tabela 18 também apresenta a redução de consumo absoluta, em que se percebe que todas as MEEs propostas tendem a aumentar seus benefícios em termos de economia de energia. A redução relativa ao consumo energético global da edificação também crescerá, até pelo menos 2050, em 10 das 11 medidas. Isso

² Excluindo a MEE 12.

mostra que, devido principalmente ao aumento considerável previsto para o consumo de energia elétrica para a climatização das edificações, medidas de eficiência energética para a envoltória da edificação são, em geral, intervenções resilientes, que não perderão seus efeitos com o tempo e as mudanças climáticas.

Ao serem aplicadas as análises econômicas para as medidas de eficiência no cenário futuro, percebe-se uma clara melhora nos indicadores em relação aos encontrados com as MEEs no clima atual. A Tabela 20 expõe os novos valores anuais economizados com a redução de consumo de energia (OPEX) e os resultados dos índices financeiros, que indicam o aumento médio de mais de R\$ 36 mil no VPL das medidas.

Tabela 20: Análise de viabilidade financeira das MEEs em cenário climático futuro.

Medida	OPEX	Reforma			Nova Construção		
		TIR	Payback	VPL	TIR	Payback	VPL
MEE 01	R\$ 10.405,33	20,2%	4,43	R\$ 47.783,42	20,2%	4,43	R\$ 47.783,42
MEE 04	R\$ 6.671,46	-6,7%	18,43	-R\$ 39.690,34	20,1%	4,44	R\$ 30.563,74
MEE 06	R\$ 9.913,22	-10,7%	> 20	-R\$ 104.964,84	9,0%	7,02	R\$ 23.615,58
MEE 07	R\$ 9.963,43	-14,6%	> 20	-R\$ 170.006,04	-4,7%	15,72	-R\$ 41.425,62
MEE 08	R\$ 8.677,29	-10,8%	> 20	-R\$ 92.506,83	17,3%	4,93	R\$ 36.073,59
MEE 10	R\$ 4.617,51	-7,5%	19,68	-R\$ 31.131,12	-7,5%	19,68	-R\$ 31.131,12
MEE 11	R\$ 9.064,57	-7,7%	19,97	-R\$ 62.762,20	-7,7%	19,97	-R\$ 62.762,20
MEE 12	R\$ 26.456,56	-4,2%	15,25	-R\$ 101.497,41	14,6%	5,49	R\$ 97.337,10

Fonte: Autoria própria

Mesmo assim, não foi possível justificar economicamente uma reforma para implementação da maioria das MEEs propostas. Somente a pintura externa da edificação em cor branca (MEE 01) passa a ser economicamente viável neste caso de adequação de construção existente. Desta análise, é possível concluir que edificações educacionais de uso noturno localizadas em clima ameno tendem a oferecer menos oportunidades e menor viabilidade econômica para a implementação de medidas de eficiência energética, mesmo considerando projeções climáticas futuras.

Por outro lado, para novas construções as opções de medidas de eficiência se tornam amplas. O emprego de telhas brancas (MEE 04) e vidros (MEE 06 e 08) de

maior qualidade se mostra fundamental para a redução do consumo de energia e se provam um investimento financeiramente viável, com taxas de rentabilidade que superam significativamente a TMA e curto tempo de retorno sobre o investimento. Os *brises* analisados (MEE 10 e 11), que apresentaram menores reduções de consumo e custo de implementação elevado, não tendem a se tornar viáveis economicamente, mesmo sendo considerados estratégias importantes de conforto visual e conforto térmico localizado. Os vidros laminados refletivos (MEE 07), também devido ao maior custo em relação às alternativas, não são de interesse financeiro.

Torna-se viável, porém, a aplicação do pacote de medidas com o potencial de promover a maior redução de consumo (MEE 12). Com uma taxa de retorno de 14,6% e mais de R\$ 26 mil anuais em economia de energia prevista, a medida comprova que, dentro de um curto espaço de tempo, a implementação de estratégias bioclimáticas se tornará imprescindível mesmo para edificações com uso noturno e pouco intensivo.

Como já mencionado, é importante notar que o cenário climático futuro é diretamente dependente de decisões políticas, econômicas e sociais futuras, e a projeção utilizada por este trabalho representa uma das possíveis trajetórias de evolução das dinâmicas climáticas. Por isso, estes estudos e resultados devem ser interpretados como tendências prováveis de desempenho futuro, e não como estimativas fidedignas das condições que serão encontradas no ano de 2050.

Mesmo assim, percebe-se que a eficiência energética da envoltória da edificação, visando a redução do consumo do sistema de climatização, tende a ganhar ainda mais relevância em cenários de aquecimento global, devido ao aumento bruto e proporcional da participação do resfriamento ambiental no uso da energia das edificações, e a decorrente melhoria na viabilidade econômica.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho consistiu na análise financeira de medidas de eficiência energética e na previsão dos impactos das mudanças no desempenho de edificação universitária de período noturno localizada em clima quente e úmido na região metropolitana de Florianópolis, Santa Catarina.

O trabalho foi desenvolvido através de simulações computacionais de modelo termoenergético calibrado, em um processo que envolveu a busca de dados medidos de consumo de energia elétrica na edificação, com as faturas de energia fornecida pela concessionária local e com a submedição de uma parte significativa do sistema de climatização. A partir desses dados, foi possível comparar os resultados simulados de consumo da edificação para o mesmo período, em ajustes iterativos que levaram ao refinamento de diversos parâmetros de entrada do modelo termoenergético. Nesse processo, verificou-se a importância da medição do consumo de energia e da calibração do modelo para que o diagnóstico se torne mais robusto: os erros de estimativa, pela simulação inicial, do consumo dos aparelhos de ar condicionado superaram os 100%. Modelos não calibrados, portanto, podem não refletir as condições reais às quais uma edificação está submetida, principalmente no tangente ao uso, ocupação e operação.

Uma análise dos resultados da simulação calibrada mostrou que a radiação direta do sol através de janelas e sobre a envoltória é a principal fonte de calor da edificação, assim como a dissipação de calor pelas paredes e cobertura é importante para a redução da temperatura interna. Com base nessas informações, foram desenvolvidas 11 intervenções na envoltória da edificação para melhorar a eficiência no uso da climatização.

Através da simulação das medidas propostas, se comprovou que o aumento da capacidade de isolamento e inércia térmica de elementos da envoltória influenciam negativamente na carga térmica e no consumo de energia. Por outro lado, as medidas mais eficazes são aquelas que reduzem a absorção da radiação solar na edificação, como pinturas externas em cores claras e vidro de fator solar baixo. Essas características são determinadas pelo clima local, quente e úmido, mas com noites e inverno ameno, e tipologia da edificação, educacional noturno.

Para fundamentar a possibilidade de implementação das medidas de eficiência energética propostas, foi analisada sua viabilidade econômica através da determinação de custos e benefícios aportados. Os indicadores financeiros utilizados para a análise indicaram que, embora alguns valores de economia na fatura de energia sejam expressivos, não se justifica a aplicação das medidas de eficiência propostas em uma reforma da edificação existente. A redução dos investimentos necessários para sua implantação em uma edificação nova, porém, mostra a vantagem de incluir a eficiência energética ainda no escopo de projeto, com melhoria considerável na viabilidade. Ainda assim, para a tipologia em questão, poucos são os investimentos que atualmente se justificam em uma análise financeira, mesmo em novas construções.

Por fim, para considerar os longos tempos de vida útil de uma edificação, é interessante verificar as tendências climáticas de longo prazo. Foram, com esse intuito, empregados bancos de dados e ferramentas disponíveis para projetar as características climáticas típicas que devem ser encontradas, segundo projeções, para o período de 2040 a 2069. Essa análise mostrou um aumento significativo na temperatura do ar e na umidade do local do projeto, e simulações comprovaram o aumento do uso do sistema de climatização, com a duplicação do seu consumo. As medidas de eficiência energética apresentaram reduções absolutas de consumo significativamente maior que no clima atual, mesmo se o percentual de redução do sistema de climatização seja menor.

Para a edificação estudada neste trabalho, mesmo com aumento significativo no retorno financeiro, um *retrofit* que implemente a maioria das medidas de eficiência propostas tende a seguir inviável no futuro, mas os números mostram uma grande oportunidade de investimento em novos projetos e edificações, com a integração de estudos de eficiência energética ainda na sua fase de concepção. As simulações mostraram também a crescente importância em adotar medidas que melhorem a eficiência dos mecanismos de resfriamento ambiental e conforto térmico nas edificações, e a resiliência de edificações com elementos que levem à redução de consumo de energia.

5.1 LIMITAÇÕES E DIFICULDADES

As principais limitações relacionadas ao desenvolvimento deste trabalho são as seguintes:

- Pelo grande número de variáveis envolvidas na simulação, o processo de calibração manual se mostrou oneroso e longo, e, mesmo com os bons resultados obtidos, não fica garantida a precisão das informações;
- Devido ao grande número de ambientes e à variedade de usos esperados, não foi analisada a possibilidade de implementar MEEs personalizadas para cada tipo de uso. É provável que existam combinações de MEEs, previstas de acordo com a especificidade das salas nas quais são implementadas, que superem as viabilidades encontradas em uma análise global da edificação.
- Não foi considerada a inflação dos materiais de construção nem a variação dos preços de energia para a projeção da viabilidade financeira futura das MEEs, o que pode causar distorções no retorno financeiro esperado para as medidas propostas.
- Nas simulações de cenários climáticos futuros, os arquivos usados não foram gerados com base em projeções climáticas recentes, mas sim a partir de modelo global publicado no relatório TAR do IPCC, de 2001, que já foram atualizadas em 2013 pelo relatório AR5. Além disso, não foi possível utilizar modelos regionais, mais precisos e confiáveis que os globais, na geração dos cenários. Dadas as incertezas com relação à evolução climática e aos cenários futuros, os resultados aqui apresentados devem ser tratados como tendência e direcionamento, e não como valores precisos e definidos.
- O trabalho se limitou a estudar o desempenho da edificação para o clima local, subtropical úmido com verões quentes, e não se estendeu para analisar o consumo do sistema de climatização em climas diferentes.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na mesma linha de pesquisa deste trabalho, sugere-se, para estudos futuros, as seguintes abordagens:

- Adotar, como objeto de estudo de trabalhos de diagnóstico energético, edificações de outras tipologias, com diferentes atividades e horários de ocupação;
- Integrar o consumo medido de subsistemas outros que a climatização, como é o recomendado para diagnósticos energéticos, para melhorar a confiabilidade da calibração do modelo termoenergético;
- Aplicar análise de sensibilidade dos parâmetros para melhorar o processo de calibração;
- Incluir perfil diário do consumo de ar condicionado entre as variáveis para calibração do modelo;
- Empregar, no desenvolvimento das medidas de eficiência energética, estratégias passivas de conforto visual, através da consideração da iluminação natural nos ambientes administrativos, e térmico, com o uso da ventilação natural para reduzir a dependência de energia para a climatização;
- Desenvolver análise comparativa do desempenho de edificações de acordo com diferentes arquivos climáticos produzidos a partir de outros cenários de projeção climática, para que seja possível a comparação e a determinação de um intervalo confiável para o qual pode ser esperado o comportamento da edificação.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABNT. **NBR 15.220-3**: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005. 36 p.

ABNT. **NBR ISO 50002**: Diagnósticos energéticos - Requisitos com orientação para uso. Rio de Janeiro, 2014. 30 p.

ABOULNAGA, M.; MOUSTAFA, M. Sustainability of higher educational buildings. **Renewable Energy and Environmental Sustainability**, v. 1, p. 28, 2016.

ABU-HAMDEH, N. H. Measurement of the thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single and dual probes. **Journal of Agricultural and Engineering Research**, v. 80, n. 2, p. 209–216, 2001.

ABU-HAMDEH, N. H. Thermal properties of soils as affected by density and water content. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 1, p. 97–102, 2003.

ADALBERTH, K. Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: Examples. **Building and Environment**, v. 32, n. 4, p. 321–329, 1997.

AGAMI REDDY, T. Literature review on calibration of building energy simulation programs: Uses, problems, procedure, uncertainty, and tools. **ASHRAE Transactions**, v. 112 PART 1, p. 226–240, 2006.

ALAJMI, A. Energy audit of an educational building in a hot summer climate. **Energy and Buildings**, v. 47, p. 122–130, 2012.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.

ANTONIOLLI, A.F.G. **Avaliação Técnica e Econômica da Integração de Sistemas Fotovoltaicos em Residências Unifamiliares em SC**. 2012. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/550>. Acesso em: 20 ago. 2020.

ARNELL. Institute Of Hydrology. **Impact of climatic variability and change on river flow regimes in the UK**. Oxfordshire: Institute Of Hydrology, 1990.

ASHRAE. **HANDBOOK: Fundamentals**. Atlanta, 2009.

ASHRAE. **Procedures for Commercial Building Energy Audits**. 2. ed. 2011. 162 p.

ASHRAE. **ANSI/ASHRAE 169: Climatic Data for Building Design Standards**. Atlanta, 2013.

ASHRAE. **GUIDELINE 14: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings**. Atlanta, 2014. 150 p.

ASHRAE. **62.1: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta: Ashrae, 2016. 56 p

BAHAJ, A. S.; JAMES, P. A. B. Urban energy generation: The added value of photovoltaics in social housing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 9, p. 2121–2136, 2007.

BELCHER, S. E.; HACKER, J. N.; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 26, n. 1, p. 49–61, 2005.

BORGSTEIN, E. H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J. L. M. Mapping failures in energy and environmental performance of buildings. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 476–485, 2018.

BRASIL. **Portaria Interministerial nº 1877**, de 30 de dezembro de 1985. Brasília, 30 dez. 1985.

BRASIL. Lei nº 10295, de 17 de outubro de 2001. **Dispõe Sobre A Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e Dá Outras Providências**. Brasília, 2001

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Implementação da Lei de Eficiência Energética**. Brasília: Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, 2002.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Brasília: MME, 2011

BRASIL. CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Política de Eficiência Energética no Brasil**. Brasília: Consultoria Legislativa, 2015

BRÜSEKE, Franz Josef. A Economia da Sustentabilidade: Princípios: O Problema do Desenvolvimento Sustentável. In: CAVALCANTI, Clóvis (org.). Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável. Recife: NPSO-FUNDAJ, Instituto de Pesquisas Sociais da Fundação Joaquim Nabuco, 1994. p. 29-40.

BUONOCORE, C. et al. Thermal preference and comfort assessment in air-conditioned and naturally-ventilated university classrooms under hot and humid conditions in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 211, p. 109783, 2020.

CAIXA – Caixa Econômica Federal. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI)**. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 10 setembro 2020.

CBCS. **Guia Prático para Realização de Diagnósticos Energéticos em Edificações**. São Paulo, 2016.

CELESC. Tarifas e Taxas de Energia. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia#tarifas-vigentes>. Acesso em: 1 ago. 2020

CEN. **EN 16.247-1**: Energy audits - Part 1: General requirements. 2012.

CIBSE. **GUIDE F**: Energy efficiency in buildings. Londres, 2012.

CIBSE. **TM 55**: Design for future climate: Case studies. Londres, 2014.

COAKLEY, D.; RAFTERY, P.; KEANE, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 123–141, 2014.

CRAWLEY, D.B. Impact of Climate Change on Buildings. In: CIBSE/ASHRAE INTERNATIONAL CONFERENCE, 2003, Edinburgh. **Impact of Climate Change on Buildings**. Glasgow, 2003.

CRAWLEY, D. B. Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 1, n. 2, p. 91–115, jun. 2008.

CROWLEY, T.J. Are There Any Satisfactory Geologic Analogs for a Future Greenhouse Warming? **Journal Of Climate**, College Station, v. 3, n. 1, p. 1282-1292, nov. 1990.

DALL'O, G.; SPECCHER, A.; BRUNI, E. The Green energy audit, a new procedure for the sustainable auditing of existing buildings integrated with the Leed protocols. **Sustainable Cities and Society**, v. 3, n. 1, p. 54–65, 2012.

DDC. IPCC. **What is a GCM?** Disponível em: http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html. Acesso em: 01 nov. 2020.

DE WILDE, P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. **Automation in Construction**, v. 41, p. 40–49, 2014.

DEB, C.; LEE, S. E.; SANTAMOURIS, M. Using artificial neural networks to assess HVAC related energy saving in retrofitted office buildings. **Solar Energy**, v. 163, n. August 2017, p. 32–44, 2018.

EGUARAS-MARTÍNEZ, M.; VIDAURRE-ARBIZU, M.; MARTÍN-GÓMEZ, C. Simulation and evaluation of building information modeling in a real pilot site. **Applied Energy**, v. 114, p. 475–484, 2014.

EL-DARWISH, I.; GOMAA, M. Retrofitting strategy for building envelopes to achieve energy efficiency. **Alexandria Engineering Journal**, v. 56, n. 4, p. 579–589, 2017.

ELI, L. G. et al. Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus - Versão 9.0.1. 2019.

ENERDATA. **Global Energy Trends**: a new historic high in energy consumption and co2 emissions. Grenoble: Enerdata, 2019. 46 p. Disponível em: www.enerdata.net. Acesso em: 15 abr. 2020.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2019a. 382 p. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: 25 abr. 2020.

EPE. **Balço Energético Nacional 2019**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2019b. 292 p. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: 25 abr. 2020.

EPE. **Atlas da Eficiência Energética Brasil 2019**: relatório de indicadores. Brasília: EPE, 2020. 149 p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 05 maio 2020.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, v. 28, n. 4, p. 293–302, 1982.

EUA. Department of Energy. **EnergyPlus Essentials**: EnergyPlus Version 9.3.0 Documentation, 2020. 57 p.

FOSSATI, M. et al. Building energy efficiency: An overview of the Brazilian residential labeling scheme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 1216–1231, 2016.

GONÇALVES, J.C.S.; BODE, K. (org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 592 p

HOCHHEIM, N. **Apostila de Planejamento Econômico e Financeiro**. Florianópolis, 2015.

HONG, T. et al. Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. **Energy and Buildings**, v. 116, p. 694–702, 2016.

HONG, T. et al. Ten questions concerning occupant behavior in buildings: The big picture. **Building and Environment**, v. 114, p. 518–530, 2017.

IEA. **ECBCS Annex 32**: Integral Building Envelope Performance Assessment. Birmingham, 2003. 48 p.

IEA. **ECBS Annex 46, Subtask B**: Energy Efficient Technologies & Measures for Building Renovation: Sourcebook. Birmingham, 2014. 866 p.

IEA. **EBC Annex 53**: total energy use in buildings: analysis and evaluation methods. Birmingham, 2016. 24 p.

IEA. **EBC Annex 61, Subtask B**: Deep Energy Retrofit Business Guide for Public Buildings. Birmingham, 2017a. 126 p.

IEA. **EBC Annex 61, Subtask A**: Deep Energy Retrofit: A Guide to Achieving Significant Energy Use Reduction with Major Renovation Projects. Birmingham, 2017b.

IEA. **2018 Global Status Report**: towards a zero emission, efficient and resilient buildings and construction sector. GlobalABC, 2018. 73 p. Disponível em: www.globalabc.org. Acesso em: 01 maio 2020.

INMETRO. **ANEXO DA PORTARIA INMETRO Nº 50/2013**: Anexo geral V: catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros. 2017.

IPCC. **Special Report on Emissions Scenarios**. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 608 p.

IPCC. **Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 1042 p.

IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007. 104 pp.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1585 p.

IPCC. **Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. In Press, 2018

JENTSCH, M. F. et al. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**, v. 55, p. 514–524, 2013.

JI, Y.; XU, P. A bottom-up and procedural calibration method for building energy simulation models based on hourly electricity submetering data. **Energy**, v. 93, p. 2337–2350, 2015.

KIM, Y.-S. et al. Building energy model calibration with schedules derived from electricity use data. **Applied Energy**, v. 190, p. 997–1007, mar. 2017.

KURAMOCHI, T. et al. Ten key short-term sectoral benchmarks to limit warming to 1.5°C. **Climate Policy**, v. 18, n. 3, p. 287–305, 2018.

LAM, J. C.; LI, D. H. W.; CHEUNG, S. O. An Analysis of electricity end-use in air-conditioned office buildings in Hong-Kong. **Building And Environment**, Hong Kong, v. 38, n. , p. 493-498, jan. 2003.

LAMBERTS, R. et al. **Sustentabilidade nas Edificações: Contexto internacional e algumas referências brasileiras na área**. 2008

LAMBERTS, R. et al. **Apostila de Desempenho Térmico de Edificações**. Florianópolis, 2016.

LEE, W. L.; YIK, F. W. H.; BURNETT, J. Assessing energy performance in the latest versions of Hong Kong Building Environmental Assessment Method (HK-BEAM). **Energy and Buildings**, v. 39, n. 3, p. 343–354, 2007.

MAZZUCCHI, R. P.; REILLY, R. W. Commercial Building End-Use Energy Metering Inventory. **Energy**, n. March, 1985.

MELO, A.P. **Avaliação Computacional de Estratégia para a Redução do Consumo de Energia Elétrica em um Hotel de Florianópolis**. 2005. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/182>. Acesso em: 20 ago. 2020.

MOAZAMI, A.; CARLUCCI, S.; GEVING, S. Critical Analysis of Software Tools Aimed at Generating Future Weather Files with a view to their use in Building Performance Simulation. **Energy Procedia**, v. 132, p. 640–645, 2017.

MOAZAMI, A. et al. Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions. **Applied Energy**, 2019.

MONTES, M.A. Triana. **Abordagem Integrada no Ciclo de Vida de Habitação de Interesse Social Considerando Mudanças Climáticas**. 2016. 473 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/705>. Acesso em: 20 ago. 2020.

MONTES, M.A. Triana. Mudança de Paradigmas nos Projetos de Habitação de Interesse Social: arquitetura resiliente e avaliação de ciclo de vida. **Revista Ímpeto**. Alagoas, dez. 2018. Tecnologia, p. 53-59. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/revistaimpeto/issue/view/505/showToc>. Acesso em: 10 out. 2020.

OCAMPO BATLLE, E. A. et al. A methodology to estimate baseline energy use and quantify savings in electrical energy consumption in higher education institution buildings: Case study, Federal University of Itajubá (UNIFEI). **Journal of Cleaner Production**, v. 244, n. xxxx, 2020.

ODYSEE-MURE. Horizon 2020. **Energy Efficiency and the Public Sector**. 2016. Disponível em: <http://www.odyssee-mure.eu/>. Acesso em: 04 maio 2020.

ONU. United Nations Millennium Declaration: Resolution adapted by the General Assembly. **General Assembly**, n. September, p. 9, 2000

ONU. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: Resolution adapted by the General Assembly. **General Assembly**, n. September, p. 15, 2015.

PALIOURAS, P. et al. Using measured indoor environment parameters for calibration of building simulation model - A passive house case study. **Energy Procedia**, v. 78, p. 1227–1232, 2015.

PAN, Y.; HUANG, Z.; WU, G. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 6, p. 651–657, 2007.

PAN, Y.; YIN, R.; HUANG, Z. Energy modeling of two office buildings with data center for green building design. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 7, p. 1145–1152, 2008.

PEDRINI, A.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. A methodology for building energy modelling and calibration in warm climates. **Building and Environment**, v. 37, n. 8–9, p. 903–912, 2002.

PNUMA. **Emissions Gap Report 2019**. UNEP, Nairobi. 2019

POEL, B.; VAN CRUCHTEN, G.; BALARAS, C. A. Energy performance assessment of existing dwellings. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 4, p. 393–403, 2007.

PROJETEEEE. MMA. **Componentes Construtivos**. Disponível em: <http://projeteeee.mma.gov.br/componentes-construtivos>. Acesso em: 1 nov. 2020

RAFTERY, P.; KEANE, M.; COSTA, A. Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3666–3679, 2011.

RAMON, D.; ALLACKER, K. Integrating climate change in life cycle assessment of buildings: Literature review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 323, n. 1, 2019.

RECH, L.D. **Análise do COP anual de condicionadores de ar tipo split fixo e inverter nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras**. 2018. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/7126>. Acesso em: 10 jun. 2020.

ROYAPOOR, M.; ROSKILLY, T. Building model calibration using energy and environmental data. **Energy and Buildings**, v. 94, p. 109–120, 2015.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. F. Passive building energy savings: A review of building envelope components. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3617–3631, 2011.

SILVA, M.K.P. da. **Análise econômica de medidas de eficiência energética em um prédio histórico de Florianópolis, de acordo com a nova etiquetagem comercial Procel Edifica**. 2019. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/829>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SOEBARTO, V. I.; WILLIAMSON, T. J. Multi-criteria assessment of building performance: Theory and implementation. **Building and Environment**, v. 36, n. 6, p. 681–690, 2001.

TATEOKA, S. S.; DUARTE, D. H. Adaptação às mudanças climáticas: desafios para requalificação de edifícios existentes em São Paulo. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiental Construído**, n. September, 2017.

TIAN, W. et al. A review of uncertainty analysis in building energy assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, n. May, p. 285–301, 2018.

TROUP, L.; ECKELMAN, M. J.; FANNON, D. Simulating future energy consumption in office buildings using an ensemble of morphed climate data. **Applied Energy**, v. 255, n. August, p. 113821, 2019.

TUMMINIA, G. et al. A New Approach to Model the Effect of Climate Change on the Building Sector: a Climate Models Data Fusion. **Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA**, v. 16, p. 4762–4769, 2020.

TURNER, C.; FRANKEL, M. Energy Performance of LEED ® for New Construction Buildings. **New Buildings Institute**, p. 1–46, 2008.

VAN BELLEN, H. M. Indicadores de sustentabilidade: um levantamento dos principais sistemas de avaliação. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 2, n. 1, p. 01–14, 2004.

WANG, H.; CHEN, Q. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 428–436, 2014.

WANG, S.; YAN, C.; XIAO, F. Quantitative energy performance assessment methods for existing buildings. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 873–888, 2012.

WANG, X.; CHEN, D.; REN, Z. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. **Building and Environment**, v. 45, n. 7, p. 1663–1682, 2010.

WEBER, F.S.; MELO, A.P.; MARINOSKI, D.; LAMBERTS, R. **Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: LabEEE, 2017. 52p

WILLIAMS, D. et al. Climate change influence on building lifecycle greenhouse gas emissions: Case study of a UK mixed-use development. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 112–126, 2012.

YAN, D. et al. Occupant behavior modeling for building performance simulation: Current state and future challenges. **Energy and Buildings**, v. 107, p. 264–278, 2015.

YANG, Y.; NIK, V. Assessing The Impact Of The Climate Change In German Building Stocks. **Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA**, v. 16, p. 3563–3568, 2020.

YOSHINO, H.; HONG, T.; NORD, N. IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods. **Energy and Buildings**, v. 152, n. March 2013, p. 124–136, 2017.

YOUNG, W. et al. Changing Behaviour: Successful Environmental Programmes in the Workplace. **Business Strategy and the Environment**, v. 24, n. 8, p. 689–703, 2015.

ZHIVOV, A. M. et al. Core bundles of technologies to achieve deep energy retrofit with major building renovation projects in Europe, the United States, and China. **ASHRAE Conference-Papers**, v. 122, p. 22–43, 2016.

ZUHAIB, S.; HAJDUKIEWICZ, M.; GOGGINS, J. Application of a staged automated calibration methodology to a partially-retrofitted university building energy model. **Journal of Building Engineering**, v. 26, n. December 2018, p. 100866, 2019.