



Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Artes
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Anderson Azevedo Fraga

**Potencial de Adoção do Conceito Zero Energy para Edifícios
Comerciais em Vitória-ES**

Vitória
2020



Universidade Federal do Espírito Santo
Centro de Artes
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Anderson Azevedo Fraga

**Potencial de Adoção do Conceito Zero Energy para Edifícios
Comerciais em Vitória-ES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na área de concentração de Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cristina Engel de Alvarez

Vitória
2020

ANDERSON AZEVEDO FRAGA

"POTENCIAL DE ADOÇÃO DO CONCEITO ZERO ENERGY PARA
EDIFICAÇÕES COMERCIAIS DE VITÓRIA-ES"

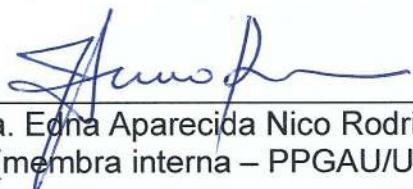
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em 09 de março de 2020.

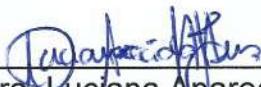
Comissão Examinadora



Profa. Dra. Cristina Engel de Alvarez
(orientadora – PPGAU/UFES)



Profa. Dra. Edna Aparecida Nico Rodrigues
(membra interna – PPGAU/UFES)



Profa. Dra. Luciana Aparecida Netto de Jesus
(membra externa – UFES)

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

Fraga, Anderson Azevedo, 1989-
F811p Potencial de adoção do conceito Zero Energy para edificações
comerciais em Vitória - ES / Anderson Azevedo Fraga. - 2020.
 164 f. : il.

Orientadora: Cristina Engel de Alvarez.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Artes.

1. Edifícios comerciais. 2. Balanço energético. 3. Energia
elétrica - Consumo. 4. Energia elétrica - Produção. I. Alvarez,
Cristina Engel de. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro de Artes. III. Título.

CDU: 72

A inteligência é o farol que nos guia, mas é a vontade que nos faz caminhar.
Érico Veríssimo

Agradecimentos

À minha mãe, Marilene, e meu pai, Nilson, por todo o suporte até aqui, principalmente emocional. Dedico essa conquista a vocês especialmente, que não tiveram a mesma oportunidade que tive e, mesmo assim, fizeram o possível e o impossível para garantir minha educação. Amo vocês.

À Úrsula, por me aguentar durante toda esta difícil caminhada e suportar todas as encrenças e momentos em que o mestrado me fez perder a cabeça. Sempre esteve comigo e eu a agradeço de todo o meu coração. Te amo.

À Cris, por me proporcionar a oportunidade de evoluir intelectualmente e como ser humano. Terminei esta etapa e devo a ela o voto de confiança depositado em mim. Serei eternamente grato a você, Cris, e espero não a ter decepcionado. Conte comigo sempre.

À Jéssica, Lohane, Bruna, Nayara, por todo o suporte acadêmico e pela amizade ímpar que desenvolvemos. Pelos cafezinhos e risadas gostosas durante os momentos mais angustiantes da dissertação. Um grande beijo e estarei aqui sempre que precisarem.

Ao Filipe e Lucas, grandes amigos que levarei pra sempre comigo. Sempre tínhamos alguma piada para fazer nas horas mais oportunas, e sempre estávamos dispostos a ajudar uns aos outros.

À Júlia e a Lara por me auxiliarem no desenvolvimento das partes braçais. Emprestaram-me a paciência, suas mãos e suas amizades em um momento bastante importante para mim. Grandes amigas, agradeço imensamente a ajuda que tive de vocês neste trabalho. Muito obrigado!

À Edna, por todas as orientações, ensinamentos e por todas as contribuições valorosas; à Luciana pela disponibilidade em participar da avaliação do meu trabalho. Espero que tenham gostado.

A todos os meus amigos do LPP e professores, vocês moram no meu coração e se precisarem de alguma coisa, é só chamar. A todos os amigos que não foram citados aqui, mas que de alguma forma foram igualmente importantes nesta trajetória, me ajudaram a construir este projeto e hoje sou grato a todos vocês.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) agradeço a bolsa concedida, o que viabilizou a realização desta pesquisa.

Muito obrigado a todos.

Resumo

O consumo de energia no uso de edificações vem crescendo gradativamente ao longo das últimas décadas, fruto do desenvolvimento industrial e da revolução tecnológica que vem acompanhando este movimento. A emissão de gases poluentes e a modificação do clima são consequências desse cenário de desenvolvimento e consumo. Aliado a esses fatores, as edificações contribuem para o agravamento desse cenário, uma vez que o uso destas acarreta em impactos negativos significativos ao meio ambiente. Em contraponto, edificações energeticamente eficientes vêm se tornando pré-requisito para o planejamento de novos ambientes construídos, modificando a forma como a comunidade percebe a relação entre a edificação e o consumo de energia. Este trabalho tem como objetivo estudar o potencial de aplicação do conceito Zero Energy para edificações comerciais, com o intuito de verificar a validade do método para o cenário construtivo brasileiro adotando como estudo de caso uma edificação em Vitória (ES). Metodologicamente, este estudo foi desenvolvido com base em três grandes etapas, onde a primeira consistiu em realizar o levantamento das edificações dentro de um recorte territorial pré-estabelecido, selecionar as características construtivas e arquitetônicas mais frequentes entre elas e construir modelos representativos do cenário observado; a segunda consistiu em submeter os modelos representativos à simulações computacionais para avaliar o desempenho energético, as possíveis formas de eficientização e de produção de energia; e por fim, a terceira etapa, na qual foi realizada avaliação dos resultados e da viabilidade econômica de implantação do sistema de produção de energia. Os resultados mostraram que as estratégias de implementação de sistemas de condicionamento de ar, de equipamentos e iluminação mais eficientes são muito importantes para a economia de energia. É perceptível que a proposição de soluções construtivas e arquitetônicas mais eficientes em relação ao desempenho energético associado a técnicas de obtenção de energia podem resultar em uma edificação com o balanço energético nulo ou próximo ao nulo. Esses resultados indicam que a adoção desse conceito para novas edificações é factível e cada vez mais acessível à comunidade.

Palavras-chave: zero energy buildings; balanço energético nulo; edifício de escritório.

Abstract

The energy consumption in using a building is growing in constant pace in the last decades, coming from the industrial development and technological revolution which comes together with this movement. The emission of Greenhouse Gas and climate change are consequences of these scenario of development and consumption. Allied to these factors, buildings contribute to the worsening of this scenario, since the use of these constructions mean negative impacts on the environment. In contrast, energy efficient buildings have become a must-do for planning new built environments, changing the way the community perceives the relationship between the building and energy consumption. This work aims to study the potential application of the Zero Energy concept for commercial buildings in Vitória, in order to verify the validity of the method for the Brazilian construction scenario and contribute to the dissemination of this form of building planning. Therefore, this study was developed based on three major stages, as the first consisted of surveying the buildings within a pre-established territorial outline, selecting the most frequent construction and architectural characteristics among them and build representative models of the observed scenario; the second stage consisted of subjecting the representative models to computer simulations to show the energy performance of the buildings surveyed, ways to optimize and, thus, reduce the energy consumption of the models and forms of solar energy production applied to the reference buildings; and finally, the third stage, in which the results were evaluated and the economic feasibility of implementing the energy production system were done. The results showed that the strategies for implementing more efficient air conditioning systems, equipment and lighting are very important for energy savings. The combination of construction and architectural modifications for materials with higher energy performance provide the environment to achieve zero energy or near zero energy states. These results indicate that the adoption of this way of thinking about building is feasible and increasingly accessible to the community.

Keywords: Zero Energy Buildings; near Zero Energy Buildings; office buildings.

Lista de Abreviaturas

ABVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANAEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

ARSP – Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers

ASPE – Agência de Serviços Públicos de Energia do Espírito Santo

CB3E – Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações

CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável

CNI – Confederação Nacional da Industria

DOE – Department of Energy of United States of America

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – International Energy Agency

INCAPER – Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PMV – Prefeitura Municipal de Vitória

SIN – Sistema Interligado Nacional

SINDUSCON – Sindicato da Indústria da Construção Civil do Espírito Santo

UNDP – United Nations Development Programme

Lista de Figuras

1	Diagrama de interação entre a edificação e as variáveis externas.	16
2	Gráfico de relação entre demanda energética e créditos para edificação NZEB.	17
3	Evolução da geração de energia elétrica por fonte renovável e não-renovável no Espírito Santo.	20
4	Consumo de energia elétrica no Espírito Santo por classe.	21
5	Rendimento solar anual brasileiro.	57
6	Mapa do total anual de irradiação solar direta normal.	58
7	Radiação solar no plano inclinado do ES.	59
8	Esquema de geração de energia por célula fotovoltaica.	60
9	Componentes fotovoltaicos integrados a fachada do edifício Boulder Commons, localizado em Boulder, Colorado (EUA).	61
10	Esquema simplificado da metodologia criada.	61
11	Consumo energético em edificações de escritório brasileiras.	62
12	Fatores utilizados como parâmetros de configuração volumétrica dos modelos genéricos.	62
13	Estrutura arquitetônica dos modelos genéricos.	62
14	Conformação do pavimento térreo e estacionamentos.	63

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil (a) e a participação setorial de consumo de eletricidade (b).

Gráfico 2

Gráfico 3

Gráfico 4

Gráfico 5

Gráfico 6

Gráfico 7

Gráfico 8

Gráfico 9

Gráfico 10

Lista de Tabelas

1	- Tecnologias de células fotovoltaicas.	24
2	Características climáticas de Vitória.	33
3	Parâmetros arquitetônicos a serem analisados	35
4	Características observadas em campo e em pesquisas anteriores.	37
5	Padrões de uso e ocupação	40
6	Densidades de Potência de Iluminação definidas pelo INI-C e as Classes de Eficiência Energética.	44
7	Parâmetros arquitetônicos dos modelos genéricos.	47

Sumário

1	Introdução	9
1.1	Questionamentos	11
1.2	Objetivos	12
2	Referencial Teórico	12
2.1	Introdução ao conceito <i>Zero Energy</i>	13
2.1.1	<i>Near Zero Energy</i>	14
2.1.2	Métrica para balanço energético nulo	15
2.2	Cenários energéticos e a matriz elétrica brasileira	16
2.2.1	Potencial de geração de energia solar no Brasil e no Espírito Santo	21
2.2.2	Energia solar fotovoltaica	22
2.2.3	Legislação para a eficiência energética	24
2.3	Conceitos para a avaliação termoenergética	25
2.3.1	Parâmetros de conforto térmico	26
2.3.2	Estratégias passivas	27
2.3.3	Estratégias ativas	29
2.4	Caracterização climática e socioeconômica da cidade de Vitória	31
2.5	Caracterização da tipologia de referência	33
3	Metodologia	35
3.1	Levantamento das características dos edifícios de escritório de Vitória	36
3.1.1	Consumo de energia elétrica das edificações	38
3.1.2	Padrões de uso e ocupação em edifícios de escritório	39
3.2	Padrões de conforto	41
3.2.1	Conforto térmico	41
3.2.2	Conforto lumínico	42
3.3	Níveis de eficiência energética	42
3.3.1	Determinação da classe de eficiência energética dos modelos genéricos	43
3.3.2	Eficiência energética do sistema de condicionamento de ar	43
3.3.3	Eficiência energética do sistema iluminação artificial e equipamentos	44
3.4	Definição dos modelos genéricos	45
3.4.1	Composição dos modelos genéricos	45

1 Introdução

A energia elétrica é um recurso essencial para o desenvolvimento econômico de um país, para a qualidade de vida da população e para a manutenção do meio ambiente por meio de seu uso eficiente (FONSECA et al., 2016). A importância do uso racional e eficiente deste recurso torna imprescindível a conservação e redução do seu desperdício para a sustentabilidade do ambiente em que se vive.

Desde a crise do petróleo, ocorrida nos anos de 1970, a eficiência energética tem a função de proporcionar condições para suprir à demanda futura de energia. Esta gestão eficiente do consumo de energia é essencial para reduzir o impacto energético de setores como o de edificações, o qual consome de 36 a 40% da energia total final global. A necessidade de expansão dos setores econômicos provoca demanda por energia elétrica. Esta busca resulta em desperdícios oriundos da falta de políticas públicas efetivas, de investimento em tecnologia e de fiscalização sobre o consumo deste insumo (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP, 2019; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2019a; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP, 2019; UNITED NATIONS, 2017).

Em contraponto à demanda e ineficiência energética, as edificações comerciais, em particular as de escritório, podem desempenhar funções estratégicas como minimizar o uso energético e produzir eletricidade, aproximando ou equalizando a zero a razão entre a produção e o consumo de energia. Estas edificações são denominadas edificações com balanço energético nulo, ou *Zero Energy Buildings – ZEB* (CRAWLEY; PLESS; TORCELLINI, 2009; TORCELLINI; PLESS; DERU et al., 2006; KURNITSKI; SAARI et al., 2011; KURNITSKI; ALLARD et al., 2011; TORCELLINI; PLESS; LEACH, 2015).

Calcula-se que a tendência de adoção desta forma de projetar edificações crescerá até 2050, haja vista que a publicação de normas e regulamentações acerca do tema vêm crescendo ao redor do mundo (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP, 2019). Com a introdução de uma ZEB, a exploração de recursos renováveis complementares como a energia solar, e a utilização de tecnologia solar fotovoltaica, surgem como opção para minimizar as consequências negativas causadas por condições climáticas, de infraestrutura e socioeconômicas adversas (PIKAS; THALFELDT; KURNITSKI, 2014; PIKAS; KURNITSKI et al., 2017).

A quantidade de radiação solar recebida no Brasil, por exemplo, alcança a ordem de 1.013 MWh, nível acima de países com grande capacidade de geração de energia solar. Este fato torna viável a adoção deste recurso como forma de reduzir o uso de fontes de energia fósseis e como economia no consumo de água. A disponibilidade de energia solar no Brasil alcança cerca de 6,5 kWh/m² ao ano e, no Espírito Santo, entre

4,8 a 5,2 kWh/m² ao ano (AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP, 2019; DIDONÉ, 2014; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2018b).

A relação entre fontes da matriz energética brasileira é composta por 45% de fontes renováveis e 55% de fontes não-renováveis de energia. Há, ainda, a previsão de que a parcela de geração de eletricidade por meio de fontes renováveis, que em 2018 era de 83,3%, atinja 87% até 2040 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2017b). No entanto, há controvérsias na classificação da fonte hidrelétrica como renovável, considerando a dependência da água, dos ciclos de chuva e dos impactos gerados na construção das usinas (LEME, 2012).

Dentro do contexto de segurança energética, a crise brasileira, ocorrida em 2001, provocou mudanças no planejamento do fornecimento de energia elétrica, com o posterior surgimento de medidas atenuantes às dificuldades de cunho ambiental e de infraestrutura da época. Em seu ápice, no ano de 1999, o país passou pelo período popularmente denominado “apagão”, o qual representou a falta de fornecimento em 70% do território nacional. O consumo de energia elétrica, entre os anos de 1990 e 2000, sofreu aumento de 49%, enquanto a capacidade instalada foi expandida em 35%, ocasionando o descompasso entre consumo e fornecimento nesta época (CONEJERO; CALIA; SAUAIA, 2016; TOLMASQUIM, 2000).

Verifica-se também que a centralização de geração de energia representa fragilidade para o modelo de comercialização utilizado no Brasil (PINTO; MARTINS; PEREIRA, 2017). Logo, as mudanças observadas sobre a incorporação e aumento da participação de fontes renováveis de energia no mix energético brasileiro, além da inserção de edificações com alto desempenho energético como as ZEB's, pode servir como uma das respostas necessárias visando a segurança energética e elevando a confiabilidade do SIN - Sistema Interligado Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2017a).

No âmbito estadual, o Espírito Santo vem apresentando redução na produção de energia limpa nos últimos 8 anos, quando comparado proporcionalmente ao consumo de fontes tradicionais. Existe ainda a parcela de geração de energia elétrica oriunda de fontes não-renováveis de energia, como usinas termelétricas, correspondendo a 65% de toda a capacidade instalada em operação do Espírito Santo, restando 35% de fontes renováveis, composta por usinas hidrelétricas, com participação de 34%, e geradores de energia solar fotovoltaica, com 1% (AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP, 2019; ENERGIAS DE PORTUGAL - EDP, 2017).

Sabe-se que as edificações comerciais no Brasil utilizam majoritariamente a eletricidade, em especial as edificações de escritório, com aproximadamente 92% do consumo total, enquanto edificações de uso não-comercial utilizam fontes de energia diversificadas.

Assim, a redução superficial de consumo de energia destas edificações nos últimos 5 anos, quando comparado com os outros setores econômicos, é da ordem de 2,74%, o que reforça a importância em proporcionar o aumento da eficiência energética para o segmento de edificações comerciais (AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP, 2018, 2019; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018).

À vista destes dados, a presente pesquisa objetivou avaliar o potencial de adoção do conceito *Zero Energy* enquanto uma das possíveis estratégias visando a redução dos problemas energéticos e ambientais relacionados às edificações de escritório, como forma de contribuir aos novos mecanismos para planejar e projetar o ambiente construído. Da mesma forma, busca-se evidenciar medidas que propiciem a redução do impacto do consumo energético vinculado ao uso destes edifícios.

1.1 Questionamentos

Considerando que:

- Existe uma parcela de energia elétrica proveniente de fontes fósseis no Estado e que este quadro pode se agravar ao longo do tempo, visto a falta de representatividade das fontes alternativas de geração de energia na matriz energética do Espírito Santo;
- A demanda energética das edificações comerciais poderia ser reduzida, se desde a fase projetual fosse considerada as potencialidades e restrições ambientais do entorno;
- A micro e mini geração de energia elétrica é uma possibilidade que deve ser incrementada no Brasil, principalmente considerando o potencial de queda de custos na implementação de fontes de geração de energia elétrica descentralizada;
- Os componentes da edificação, como envoltória e os sistemas de conforto termoenergético, são subutilizados ou mal dimensionados no âmbito do recorte territorial considerado, acarretando a baixa eficiência energética do edifício.

A pergunta foi estabelecida a partir do seguinte questionamento: considerando as características do ambiente construído no âmbito da Região Metropolitana da Grande Vitória, é possível desenvolver edificações cujos valores de demanda e produção de energia elétrica resultem em nulo ou quase nulo?

1.2 Objetivos

Diante do exposto, o objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a aplicabilidade do conceito *Zero Energy* em edificações comerciais, especificamente de escritório, com estudo de caso para o município de Vitória (ES). Este setor foi selecionado por apresentar padrões amplamente difundidos de uso e ocupação, de equipamentos e da conformação do espaço, que não só viabilizam a adoção de tecnologias de produção de energia elétrica, como também facilita a análise de desempenho termoenergético, quando comparado às edificações do setor industrial e do setor residencial.

Visando alcançar os resultados esperados, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os parâmetros aplicáveis às edificações de escritório inerentes ao conceito *Zero Energy* e *Near Zero Energy*, assim como sua viabilidade econômica;
- Mapear e diagnosticar as edificações comerciais concluídas a partir de 2003, em Vitória – ES, como recorte da pesquisa, com a caracterização da envoltória e dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar;
- Identificar métodos para a geração energética e formas de racionalização do consumo de energia, estabelecendo diretrizes para situações semelhantes.

2 Referencial Teórico

Este capítulo trata das referências utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa. O referencial teórico foi organizado, em grande parte, com base nos estudos de Didoné (2014), Didoné, Wagner e Pereira (2014), Kurnitski, Allard et al. (2011) e Torcellini, Pless, Deru et al. (2006). Estas referências tratam das definições sobre *Zero Energy Buildings*, sobre conforto ambiental por meio de estratégias passivas e ativas, a eficiência energética voltada a edificações e a produção de energia elétrica por meio de tecnologias fotovoltaicas. Estes autores foram escolhidos por serem referências recorrentes em pesquisas posteriores as publicações citadas e apresentarem metodologias e embasamentos teóricos importantes para o desenvolvimento de pesquisas sobre o tema *Zero Energy*. Da mesma forma, foram utilizados conceitos abordados pela Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – INI-C (2018) e pelas normas NBR 15.220 (2019), e *The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE Standard 55* (2017), 140 (2017) e 90.1 (2010). O contexto socioeconômico e climático de Vitória, assim como a caracterização da tipologia de referência para suporte metodológico das simulações e constituição dos modelos genéricos foram abordados neste capítulo.

2.1 Introdução ao conceito *Zero Energy*

Define-se que um edifício *Zero Energy* – ZEB, ou em português, balanço energético nulo, é uma edificação energeticamente eficiente onde, considerada a fonte energética, a energia elétrica fornecida pela concessionária é anualmente menor ou igual à quantidade de energia renovável exportada pela edificação para a rede (TORCELLINI; PLESS; DERU et al., 2006; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE, 2012, 2015b).

Domingos et al. (2014) define que o balanço energético nulo pressupõe uma arquitetura adequada ao uso de elementos construtivos e equipamentos de alta eficiência energética, aliado ao desempenho da fonte geradora de energia elétrica a partir de fontes renováveis. A redução do consumo de energia em novas edificações ou em processo de melhoria pode ser alcançada por meio de projetos integrados à tecnologias de produção de energia, com adoção de soluções energeticamente eficientes, e por programas de economia de energia (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE, 2015b).

Torcellini, Pless, Deru et al. (2006) estabelecem quatro definições acerca das formas de se atingir o ZEB em edificações de baixo consumo de energia, ou comumente denominadas *Low-Energy Buildings*. Dentre as formas estudadas estão:

- *Zero Site Energy*, ou energia local zero ou ainda energia da edificação (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE, 2015b), onde é avaliada a potencialidade de produção de energia elétrica para a edificação utilizando os recursos presentes no local, ou on-site, onde o edifício está implantado. É minimamente avaliado o consumo dos sistemas de condicionamento de ar, de aquecimento quando existente, ventilação, cargas de equipamentos e de sistema de iluminação;
- *Zero Source Energy*, ou fonte de energia zero, trata-se do conceito onde é levado em consideração toda a cadeia de produção total anual de energia utilizada pela edificação e de consumo de energia primária do edifício. Esta avaliação leva em conta a eletricidade, combustíveis utilizados em processamento e transporte de materiais e componentes para o local da edificação, entre outros aspectos;
- *Zero Energy Cost*, ou custo de energia zero, é avaliada a razão, no mínimo igual, entre a quantidade total de dinheiro que é arrecadado com a venda de energia produzida on-site à concessionaria, e a quantidade total paga pela utilização de serviços e energia consumida ao longo do ano; e
- *Zero Energy Emissions*, ou emissão zero, onde a edificação produz uma quantidade de energia renovável livre de emissão de GEE ao menos igual a quantidade de energia consumida proveniente de fontes de energia emissoras de GEE.

As definições descritas para o ZEB, que avaliam fontes de energia variadas, os custos atrelados à implantação da edificação, a avaliação do ciclo de vida dos materiais e

componentes, assim como emissões de GEE, demandam pesquisas e desenvolvimento de metodologia particular para cada meio de avaliação. Portanto, para este trabalho foi estabelecido o recorte de avaliação para as edificações utilizando recursos on-site, classificado como *Zero Site Energy*. Tal recorte justifica-se em função da exclusividade dada pela definição sobre a utilização de fontes de energia renováveis locais, disponíveis no sítio onde a edificação foi implantada, utilizada para pesquisa em detrimento das outras definições que tratam de formas de avaliação não abordadas nesta pesquisa.

Didoné (2014) e Athienitis e O'Brien (2015) definem que o planejamento de uma edificação *Zero Energy* considera a integração de estratégias energéticas e soluções passivas; de otimização da edificação em seu projeto, execução e operação; e a utilização de tecnologia de produção de energia solar fotovoltaica, entre outras formas de produção de energia, considerando a forma da edificação e soluções que aproveitem a disponibilidade de energia elétrica solar para o meio urbano, aquecimento solar e luz natural.

A International Energy Agency - IEA (2014) publicou um estudo detalhado de 30 edificações *Zero Energy* em vários países e em diversas situações climáticas. O “*Towards Net Zero Energy Solar Buildings: A review of 30 Net ZEBs case studies*” foi parâmetro para o desenvolvimento de referências para o planejamento de edificações energeticamente nulas. Este estudo concluiu que é possível atingir o balanço energético nulo para diversos usos residenciais e comerciais da realidade construtiva americana.

A respeito da nomenclatura utilizada para descrever uma edificação que atinge o equilíbrio entre consumo e produção de energia, na série de Guias Avançados de Projeto Energético – AEDG (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al., 2019) há a utilização do termo *Zero Energy* em oposição aos termos *Net Zero Energy* e *Zero Net Energy* em consonância com os termos utilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, da mesma forma para as políticas federais e municipais de desempenho energético em vigor. O Departamento de Energia dos Estados Unidos também utiliza o termo *Zero Energy* justificando que a inserção de “*Net*” não adiciona significado substancial a expressão (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE, 2015a). Este trabalho utilizou a nomenclatura em consonância com a AEDG da norma americana ASHRAE e demais artigos científicos que adotam *Zero Energy* como balanço energético nulo.

2.1.1 *Near Zero Energy*

Baseado na norma europeia EN 15603:2008, a definição sobre o conceito proposta por Kurnitski, Allard et al. (2011) para edificações *Near Net Zero Energy*, nZEB, e em português, próximo ao balanço energético nulo, se apoia na premissa do aproveitamento

máximo de recursos para produção de energia, implementando mecanismos à edificação de forma que este aproveitamento aconteça, e a utilização à nível ótimo da energia primária, para um consumo maior que 0 kWh/m² ao ano. Segundo os autores, são pontos importantes para atender a definição do conceito:

- O custo otimizado e considerável aproveitamento técnico do uso da energia primária; e
- A porcentagem de energia primária coberta pela geração de energia proveniente de fontes renováveis.

A nomenclatura adotada, tal qual para *Zero Energy*, foi *Near Zero Energy*, em concordância com a nomenclatura encontrada nos estudos consultados e com o termo *Zero Energy* adotado anteriormente (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al., 2019). Esta variação do conceito de balanço energético nulo é adotada como parâmetro de avaliação para a presente pesquisa, uma vez que se adequa ao cenário energético e tecnológico do recorte territorial estabelecido, ou seja, a Região Metropolitana da Grande Vitória, no Espírito Santo.

2.1.2 Métrica para balanço energético nulo

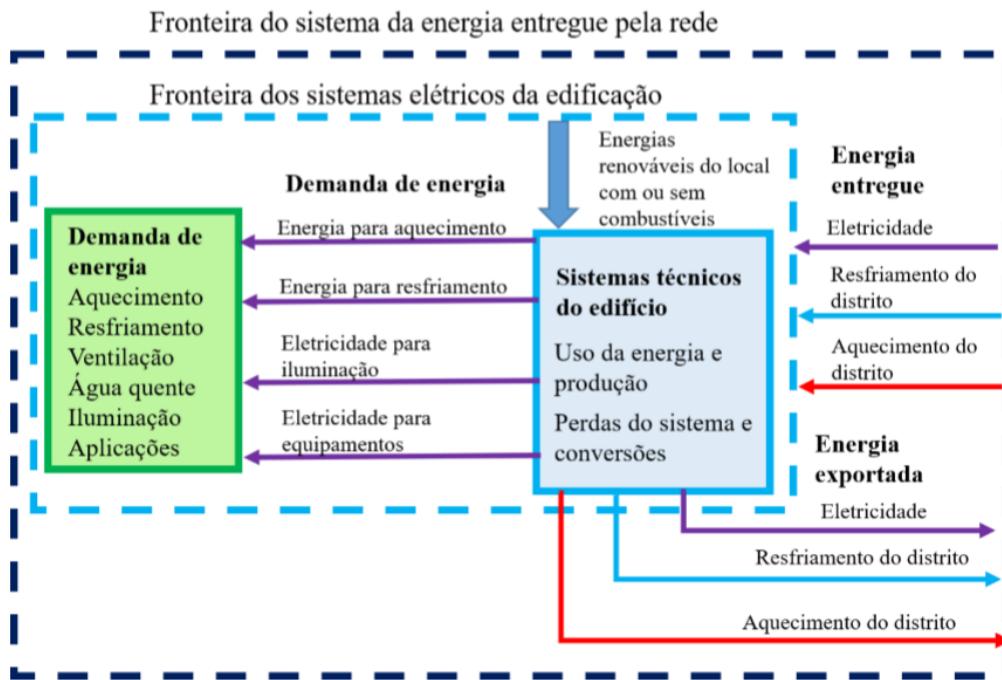
Um edifício energeticamente balanceado produz, consome e, eventualmente, exporta energia para a concessionária quando as condições climáticas e energéticas são favoráveis para este cenário. A avaliação depende de definição do espaço utilizado para geração de energia, *on-site* ou *off-site*, e do tempo avaliado deste processo, horário, mensal ou, mais comumente, anual (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al., 2019).

Métodos de avaliação foram desenvolvidas para contemplar as variações de se atingir o balanço energético nulo como demanda/geração de energia e exportação/importação de energia. O primeiro método é direcionado ao *Zero Site Energy*, o que permite avaliar anualmente as opções de produção de energia elétrica *on-site* e a demanda de energia calculada. O segundo método é normalmente aplicado ao *Zero Source Energy*, onde são balanceadas as fontes de energia, carga de energia e interação com a rede da concessionária (DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014).

Para tal, é determinada a interação energética entre a concessionária e a edificação, como observado na Figura 1.

Foram desconsideradas as medidas que envolviam sistema de aquecimento, por não condizer com a realidade observada no recorte territorial e por ser uma medida de

Figura 1: Diagrama de interação entre a edificação e as variáveis externas.



Fonte: adaptado de Kurnitski et al. (2011, tradução nossa)

inclusão facultativa em regulamentações nacionais (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO, 2018b,a). De forma a estabelecer a métrica necessária para a avaliação do balanço energético da edificação, devem ser conhecidos os componentes de uso final de energia, a energia primária total utilizada pela edificação, os custos com o consumo de energia elétrica, e a quantidade de energia exportada à concessionária. Da mesma forma, devem ser definidos o período de balanço a ser analisado e eventuais créditos provenientes de fornecimento de energia à concessionária. Esta relação é ilustrada na Figura 2.

2.2 Cenários energéticos e a matriz elétrica brasileira

O cenário energético mundial vem apresentando progressos quanto ao desenvolvimento da eficiência energética e da busca de fontes limpas e renováveis de energia. A criação de políticas de redução de consumo energético, assim como a promoção de congressos, eventos e demais incentivos à pesquisa e desenvolvimento acadêmico apontam melhorias neste âmbito da energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2014).

Estudo desenvolvido pela United Nations (2017) aponta que 103 países definiram a eficiência energética e uso de energias renováveis como parte importante do seu planejamento estratégico, e destes, 79 são países emergentes e em desenvolvimento. Constatou-se, ainda, que o consumo de energia poderia ter sido 12% maior em 2017 caso

Figura 2: Gráfico de relação entre demanda energética e créditos para edificação NZEB.



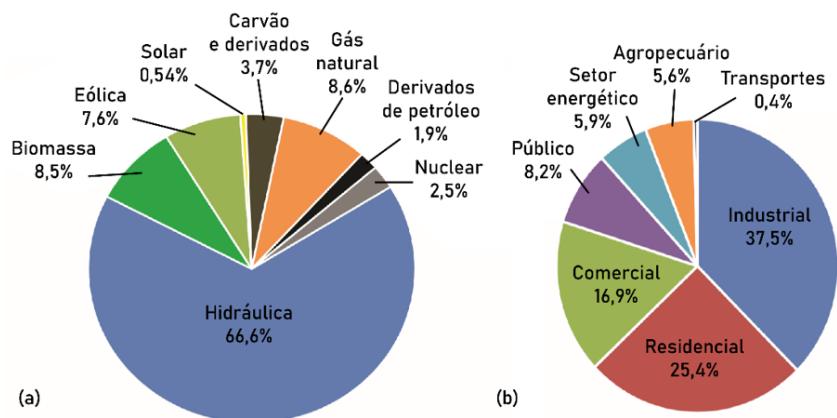
Fonte: adaptado de Kurnitski et al. (2011, tradução nossa)

as políticas públicas mencionadas anteriormente não tivessem sido implementadas desde o ano 2000 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2019b).

Entre os países emergentes e em desenvolvimento, nota-se que há um esforço para redução de consumo de energia, o que reflete em fatores como o aumento da segurança energética, aumento na competitividade industrial, redução de emissão de poluentes e da degradação ambiental, expansão ao acesso de energia, além da indução ao crescimento econômico (BANCO MUNDIAL, 2018). Entretanto, de acordo com Abramovay (2010, 2014), a matriz energética mundial ainda será predominantemente composta por fontes fósseis de energia até meados do século XXI.

No Brasil, a taxa de consumo energético, assim como em outros países, é definida pelo aquecimento econômico e cenários estabelecidos para o desenvolvimento esperado para o país. Nesse sentido, espera-se que o Brasil, até 2026, apresente crescimento econômico e, concomitantemente, consuma energia de forma modesta. Projeta-se que este crescimento seja da ordem de 1,9% ao ano até a metade da década analisada, com variações que definem o crescimento do consumo em 2,3% anuais, indicando otimismo para o setor de energia brasileiro (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2017b,a).

Gráfico 1 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil (a) e a participação setorial de consumo de eletricidade (b).



Fonte: adaptado de EPE (2019).

Em 2018, a geração hídrica respondeu por 66,6% da oferta interna entre as fontes de produção de energia elétrica no Brasil, seguido do gás natural, com 8,6%, da biomassa, com 8,5% e de outras fontes, 16,3%, como mostrado no Gráfico 1. Deste modo, as centrais hidráulicas de serviço público e de autoprodução contribuíram para expansão da capacidade total instalada de geração de energia elétrica, com acréscimo de 3.864 MW dos 5.728 MW, ou 67,5% do total adicionado (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2019a).

Esta contribuição para a expansão energética, além da representação na oferta interna de energia elétrica, demonstra a importância da fonte para o país. Entretanto, fontes renováveis de energia elétrica, como a solar e a eólica, representam uma alternativa a momentos de condição desfavorável para oferta hídrica, como registrado em 2017, quando foi verificada queda de 3,4% da energia hidráulica disponibilizada em relação ao ano anterior (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2018).

A representatividade nacional da fonte solar na geração de energia elétrica aumentou em 316,1% entre os anos de 2017 e 2018, crescendo de 832 GWh para 3.431 GWh. A potência instalada solar fotovoltaica atingiu 1.798 MW em 2018, 47,99% potência a mais disponível em relação ao ano anterior, com 935MW (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2019a,b).

Vale ressaltar o avanço na oferta de energia elétrica proveniente de micro e mini geração distribuída, saltando de 359 GW, em 2017, para 828 GW, em 2018, resultando em um aumento de 131%. A contribuição para este crescimento se deu majoritariamente pela energia solar, com 63,5%, enquanto as fontes hídrica, gás natural, eólica e outras fontes renováveis contribuíram, respectivamente, em 19,1%, 1,8%, 1,7% e 13,9% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2019a).

O entendimento sobre a matriz elétrica nacional e a disponibilidade de fontes de geração de energia elétrica serve como importante base para a definição de medidas de produção de energia, assim como para o balanço energético das edificações. Este mapeamento de fontes energéticas indica a potencialidade de geração de energia descentralizada, reforçado pelo crescimento no número de geradoras de energia solar fotovoltaica no país e pelo avanço da oferta de energia elétrica oriunda de micro e mini geração distribuída (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2019a,b; PEREIRA et al., 2017).

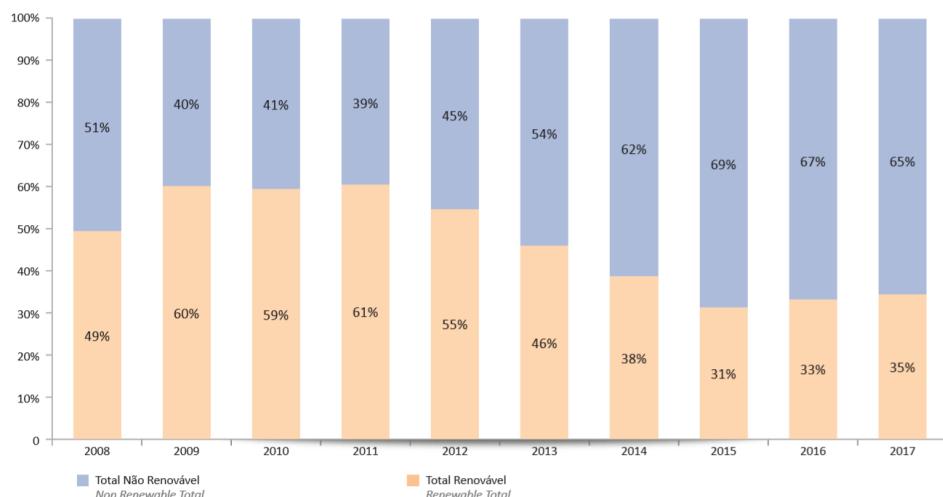
Assim, a utilização de fontes renováveis de energia representa um aspecto importante para as edificações Zero Energy aplicadas ao cenário brasileiro. Visto que é significativo o potencial de uso da energia solar como fonte de produção de energia renovável, este recurso pode resultar em reduções importantes no consumo de energia para uma parcela de consumidores dos setores industrial, residencial e comercial, com quase

79,8% de participação no consumo de energia elétrica, como apresentado no **Gráfico 1b** (CRONEMBERGER; CAAMAÑO-MARTÍN; SÁNCHEZ, 2012; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2019a; SORGATO; SCHNEIDER; RÜTHER, 2018; SUDHAKAR; WINDERL; PRIYA, 2019).

A composição da matriz elétrica do Espírito Santo mostra que a predominância da geração de energia elétrica por fonte é termelétrica, ou térmica de gases de processo, em 2018, com 35,10%, enquanto a parcela de participação da fonte hidrelétrica é de 24,72% (AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP, 2018).

A evolução na geração de energia elétrica aponta que as fontes renováveis de energia estão regredindo em participação, como mostrado no **Gráfico 2** que entre os anos de 2009 a 2012, compunham mais da metade da geração de energia, e atualmente estão em um patamar de 35%.

Figura 3: Evolução da geração de energia elétrica por fonte renovável e não-renovável no Espírito Santo.



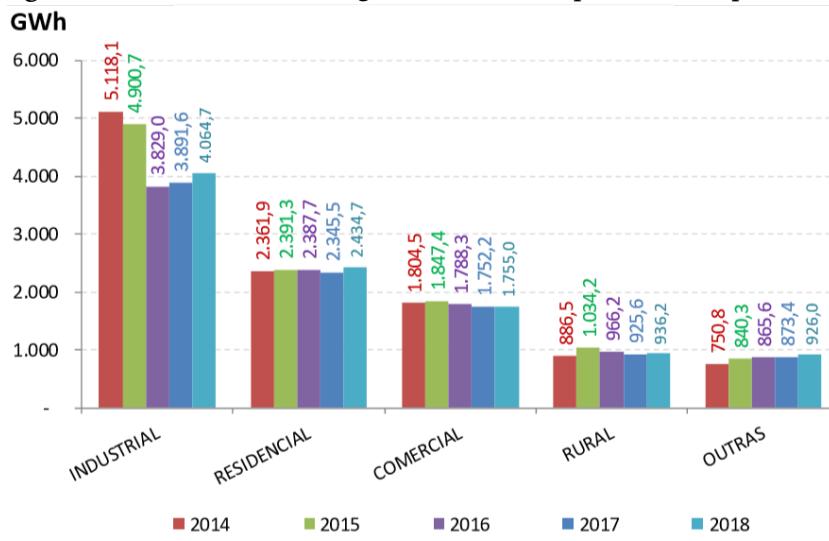
Fonte: adaptado de ARSP (2018).

O Espírito Santo conta ainda com uma parcela geradora solar fotovoltaica, inaugurada em 2016 com capacidade de 1GW, de 2.820 usinas fotovoltaicas, configurando 28,8 MW de potência instalada e geração de 8 GW (AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP, 2018).

Observa-se que houve uma sensível variação no consumo de energia elétrica no Espírito Santo entre os anos de 2016 e 2018. Houve o aumento de consumo das classes residencial e industrial, compensado pela redução das classes comercial e rural, como observado no **Gráfico 3**. O consumo de energia elétrica no Estado, em 2018, foi predominantemente da classe industrial, perfazendo 40,2%, seguido pela classe residencial, com 24,1%,

comercial, consumindo 17,3%, rural, com 9,3% e outros consumidores, com 9,1% (AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP, 2019).

Figura 4: Consumo de energia elétrica no Espírito Santo por classe.



Fonte: adaptado de ARSP (2019).

2.2.1 Potencial de geração de energia solar no Brasil e no Espírito Santo

A avaliação do potencial de geração de energia estritamente solar se justifica, principalmente, pela natural abundância do recurso disponível em território nacional (PEREIRA et al., 2017). Além da disponibilidade de energia solar, a versatilidade da tecnologia fotovoltaica para adaptar-se ao meio urbano e a redução de custo de instalação e manutenção são fatores importantes que tornam a tecnologia acessível em detrimento de outras formas de geração de energia provenientes de fontes renováveis, tais como a eólica, a geotérmica, a maremotriz, a biomassa, entre outras (AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP, 2019; DIDONÉ, 2014; DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2019b; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP, 2019).

A oferta de energia solar no país varia de acordo com a região analisada, dada as dimensões continentais do país. Segundo Pereira et al. (2017), a região Nordeste apresentou a menor variabilidade interanual de energia solar, indicando maior estabilidade na produção de energia solar, com valores entre 5,39 e 5,59 kWh/m². Já a região Sudeste apresentou a maior variabilidade interanual, com médias entre 4,97 e 5,11 kWh/m² entre os anos de 2005 e 2015. A abrangência deste rendimento energético anual pode ser observada na Figura 5. Os resultados de Crönemberger, Caamaño-Martín e Sánchez (2012), após a conclusão do estudo em 78 cidades brasileiras, apontaram que o Brasil é caracterizado como um

país em baixa latitude e com alta disponibilidade e uniformidade de radiação solar. Esta conclusão apontou a potencialidade das cidades brasileiras para a geração de energia solar, tanto em superfícies planas como nas coberturas quanto em superfícies verticais como as fachadas.

Pereira et al. (2017) complementam acerca do potencial brasileiro em gerar energia solar. Os autores mencionam que mesmo nos locais menos ensolarados do Brasil, como as regiões Sul e Norte, apresentadas na Figura 6, é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha, país com maior parque solar do mundo. As regiões Sul e Norte brasileiras recebem menos irradiação solar por apresentarem as latitudes mais altas e, assim, com maiores diferenças entre a duração do dia; e nebulosidade frequente, reduzindo a irradiância solar na superfície receptora. Isto indica a característica do país para a produção de energia solar.

Outro ponto importante no estudo de Pereira et al. (2017) foi a constatação de que a geração máxima nos estados da região Sudeste, nos meses de verão, coincide com os máximos de demanda registrados pelo Operador Nacional do Sistema – ONS, para a mesma região. Esta coincidência entre gerações máximas de energia elétrica pode aliviar os períodos de pico de demanda de energia elétrica no país.

O Espírito Santo gerou cerca de 8 GW de energia elétrica proveniente de energia solar em 2018. Esta geração foi realizada por empreendimentos particulares, visto que o estado não abriga usinas solares cadastradas junto ao SIN (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2019b). O estado também apresenta variação no nível de radiação menor do que em estados com maior produção de energia solar como a Bahia, com variação de 6,5 kWh/m²/dia (AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO - ASPE, 2013).

A Região Metropolitana da Grande Vitória – RGMV, em particular Vitória, apresenta variação baixa, entre 5,39 a 5,48 kWh/m²/dia, como exposto na Figura 7. Esta variação indica que a geração de energia elétrica pode ser melhor aproveitada em comparação a outros estados com maior potência instalada (AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO - ASPE, 2013).

2.2.2 Energia solar fotovoltaica

As tecnologias de geração de energia fotovoltaica vêm evoluindo ao longo dos últimos anos. Este segmento está em pleno crescimento quando observado o acesso técnico e econômico ao sistema de geração de energia à população (PEREIRA et al., 2017). Equipamentos fotovoltaicos são fonte promissora de diversidade em produção de energia, dada a versatilidade de aplicação e integração entre sistemas para a envoltória da edificação (SORGATO; SCHNEIDER; RÜTHER, 2018).

A geração de energia elétrica por meio de células fotovoltaicas ocorre pela conversão

de radiação incidente sobre a área da célula em uma diferença de potencial entre suas extremidades. Esta célula é constituída por duas camadas de elementos semicondutores dopados positiva e negativamente, normalmente silício, o que propicia o ordenamento da corrente de elétrons, como exemplificado na Figura 8. Desde 1883, quando a primeira célula fotovoltaica foi constituída, a eficiência de conversão das células avançou, partindo de 1% a uma taxa de 19% para os módulos comercializados atualmente. Além da eficiência, o custo desta tecnologia foi barateado, aumentando o potencial de acesso pela população. Os custos para a implementação da tecnologia saíram de US\$ 100/Wp, no início da década de 1970, até US\$ 0,39/Wp, em 2016 (AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO - ASPE, 2013; PEREIRA et al., 2017).

Uma vantagem atribuída à aplicação de tecnologias fotovoltaicas na envoltória é a relação direta entre quantidade de área de fachada exposta à radiação solar e a quantidade em potencial de produção de energia solar fotovoltaica (VELOSO, 2017). Outro fato importante é a verificação da viabilidade econômica em climas tropicais como as cidades brasileiras apresentam (DIDONÉ, 2014; SORGATO; SCHNEIDER; RÜTHER, 2018).

A versatilidade alcançada pela tecnologia é verificada pela facilidade de adaptação das células fotovoltaicas para envoltória das edificações. Os componentes fotovoltaicos integrados ao edifício, ou *Building Integrated Photovoltaic* – BIPV, e os componentes fotovoltaicos adicionados/anexados a edificação, ou *Building Added/Attached Photovoltaic* – BAPV, são formas de introdução das células para aproveitar a área disponível de fachada para produção de energia elétrica (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al., 2019), como apresentado pela Figura 9. As edificações recebem a radiação solar de acordo com a latitude e a orientação solar onde estão situadas. Estas características influenciam diretamente na produção de energia fotovoltaica de um painel, onde a inserção dos painéis depende da orientação das superfícies das células fotovoltaicas voltadas para a posição perpendicular em relação a latitude do local. Este posicionamento tende a maximizar a incidência de radiação sobre as células e, assim, a produção de energia. Regiões com diferentes latitudes tendem a apresentar variabilidades de fotoperíodo, onde as baixas latitudes geram menos energia com os painéis posicionados verticalmente e mais energia para os posicionados horizontalmente, sendo que o inverso aplica-se às regiões com altas latitudes (PEREIRA et al., 2017).

No exemplo da Figura 7, o edifício comercial *Boulder Commons*, localizado em Boulder, Colorado, exemplifica a utilização de um sistema BIPV para geração de energia solar fotovoltaica em uma região de alta latitude, com a utilização de painéis posicionados horizontal e verticalmente (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHI-

TECTS - AIA et al., 2019; PEREIRA et al., 2017). Dentre as tecnologias de células fotovoltaicas disponíveis no mercado, destacam-se as tecnologias de silício cristalino e filmes finos. As características gerais desses componentes são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: - Tecnologias de células fotovoltaicas.

Tecnologia	Média anual total	Área/kWp
Silício cristalino		
Monocristalino	20,67	8m ²
Policristalino	29,00	7m ²
Filmes finos		
Silício amorfo (a-SI)	76,92%	15m ²
Telureto de cadmio (Cd-Te)	181,04	10m ²
Disseleno de cobre-índio-gálio (CIGS)	2,05	10m ²

Fonte: ARSP (2013).

2.2.3 Legislação para a eficiência energética

As políticas adotadas internacionalmente demonstram a urgência na busca de soluções relacionadas à mitigação do consumo de energia e redução de emissão de GEE, além de buscar, também, a redução dos impactos ambientais indiretamente relacionados ao ambiente construído (INTERNATIONAL MONETARY FUND - IMF, 2018; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2018a).

A Diretiva Europeia EPDB/31 (2010) estabeleceu como meta o balanço energético próximo a zero para novas edificações até dezembro de 2020. Nos Estados Unidos, o *U.S. Department of Energy - USDOE (2015b)* apresentou medidas e programas para balanço energético nulo para as edificações comerciais e residenciais. O Departamento definiu como meta alcançar o balanço energético nulo em edificações residenciais até 2020 e edificações comerciais até 2025. Novas edificações comerciais, a partir de 2015, deveriam apresentar um plano de redução de energia desde sua concepção.

No Brasil, desde outubro de 2003 o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações – PROCEL EDIFICA (BRASIL, 2001a,b) atua de forma conjunta com o poder público, privado e a comunidade acadêmica para promover o uso racional da energia elétrica e recursos naturais em edificações. Nesta pesquisa, este marco legal foi utilizado como critério temporal de seleção para as edificações em Vitória concluídas após o início do programa, sendo então estabelecido o recorte temporal de estudos para edificações construídas após 2003.

Outro marco legal importante para o contexto desta pesquisa foi a Resolução Normativa nº 687 de 2015, substituindo a resolução precedente nº 482 de 2012, que trata sobre

micro e mini geração de energia elétrica. Este conceito consiste em uma central geradora de energia elétrica que utilize fontes renováveis, com potência instalada superior a 75 kW e/ou capacidade instalada menor que 3 MW, classificado como mini geração; e potência instalada menor ou igual a 75 kW, classificado como micro geração (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2015).

Com a regulamentação de micro e mini geração em território nacional, foi viabilizada a geração de energia descentralizada, característica importante para a coprodução de energia para uma edificação com balanço energético nulo.

Posteriormente, a Instrução Normativa nº 02 de 2014 institui a obrigatoriedade de submeter as edificações públicas ao Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE EDIFICA. Da mesma forma, foram criadas regulamentações relacionadas à eficiência energética e à certificações de edifícios de uso comercial e residencial, denominados Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas,INI-C, e Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais,INI-R (DALBEM et al., 2017; INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO, 2018b).

Os níveis de eficiência estabelecidos pelo regulamento partem do mais eficiente, classificado como “A”, para o menos eficiente, classificado como nível “E”. O regulamento classifica por meio de uma etiqueta indicativa do nível de eficiência energética da envoltória da edificação, dos sistemas de iluminação artificial e de condicionamento de ar (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO, 2018a).

Dada a abrangência de cenários do regulamento e a utilização de referências como normas nacionais e internacionais para o desenvolvimento dos parâmetros de avaliação, oINI-C foi adotado como ferramenta de qualificação da eficiência energética e otimização dos modelos genéricos apresentados na etapa de metodologia. Esta escolha foi baseada na proximidade das características construtivas e de materiais sugeridas pela Instrução Normativa à realidade brasileira, sendo este fator pouco presente ou inexistente nas normas e regulamentos avaliadas.

2.3 Conceitos para a avaliação termoenergética

A definição dos conceitos e parâmetros essenciais para a avaliação termoenergética são apresentados sucintamente neste subcapítulo. Estes conceitos serviram como apoio para o desenvolvimento das estratégias passivas e ativas, assim como para o controle

e avaliação de saída de dados das simulações computacionais. Os conceitos colocados neste capítulo serão incorporados em modelos genéricos, que reúnem as características mais frequentes observadas na amostra de edifícios reunida nesta pesquisa.

2.3.1 Parâmetros de conforto térmico

Segundo a norma americana ASHRAE Fundamentals (2017), a sensação de conforto térmico é a situação onde a temperatura do corpo é mantida dentro de um limite confortável, a umidade da pele é baixa e o esforço fisiológico para manter estas condições é minimizado. Adicionalmente, a faixa de temperatura de conforto em ambientes como um escritório transita entre temperaturas acima de 21°C e abaixo de 24°C. Com base nessas definições e para avaliar o estado de conforto térmico dos ocupantes de um edifício de escritórios, aplicam-se modelos preditivos para avaliação desta condição do ambiente.

Em se tratando de edificações condicionadas artificialmente, um dos modelos utilizados para esta avaliação é o Voto Médio Predito e Porcentagem Predita de Insatisfeitos, ou *Predicted Mean Vote – PMV*, juntamente ao *Predicted Percentage of Dissatisfied – PPD*.

Publicado em 1970 por Povl Ole Fanger, este modelo é utilizado por normas como a ISO 7730, para avaliar o conforto térmico de um ambiente por meio de um questionário aplicado aos ocupantes da edificação avaliada (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2017a). Entretanto, este modelo apresenta discrepâncias quando aplicado à realidade brasileira, além de ser um modelo inviável para cenários que utilizem ventilação natural (RUPP et al., 2016). Estes fatores tornaram sua utilização inapropriada para o presente estudo. Outra forma de avaliação do conforto térmico no local de trabalho, como o ambiente condicionado de um escritório, é o modelo de conforto adaptativo. Este modelo avalia a adaptação do usuário em diferentes campos como o fisiológico, o comportamental e o psicológico (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2017b) e pode ser expresso pela Equação 1.

$$t_c = 24,2 + 0,42 \times (t_{ext} - 22) \exp - \left(\frac{T_{ext} - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \quad (1)$$

Onde:

t_c é a temperatura de conforto; e

t_{ext} é a temperatura externa ou temperatura de bulbo seco.

A temperatura de conforto auxilia a definir o set point de acionamento do sistema de condicionamento de ar temperatura para o ambiente analisado. Dada as condições de adaptação proporcionadas pelo ambiente avaliado e os ajustes naturais feitos pelos ocupantes deste espaço, a temperatura do ar aceitável em ambientes de escritório, por

exemplo, pode variar entre 17°C a 31°C (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2017b).

Associado ao modelo de conforto adaptativo, a ventilação híbrida é uma alternativa de controle de temperatura e redução de consumo de energia ao combinar a ventilação natural com o sistema de condicionamento de ar da edificação. Esta forma de controle térmico representa uma opção para avaliar o consumo de energia (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2017a).

Contudo, a ventilação híbrida não foi observada como solução corrente entre as edificações de Vitória e, de acordo com Shaviv, Yezioro e Capeluto (2001), Zhang et al. (2014), Navarro et al. (2016), SCHULZE, GÜRLICH e EICKER (2018) e Sudhakar, Winderl e Priya (2019), dificuldades foram identificadas quanto a implementação deste sistema, dentre elas:

- A necessidade de uma ferramenta computacional a parte que simule a influência da ventilação natural sobre a edificação;
- A intermitência da ventilação, fundamental para o funcionamento do sistema; e
- A configuração, em caráter individual, de materiais e componentes que reduzam a ação da umidade dentro do ambiente construído onde a ventilação natural atuará.

Assim, conclui-se que ambos os modelos de conforto ambiental PMV/PPD e conforto adaptativo apresentados são válidos para mensurar o conforto de um ambiente, diferindo entre ambientes controlado e real. Desta forma, foi utilizado o modelo de conforto adaptativo como forma de avaliar a efetividade do condicionamento de ar, por se adequar a proposta da pesquisa ao possibilitar ajustes de conforto térmico voltados ao comportamento do usuário.

2.3.2 Estratégias passivas

As estratégias passivas são definidas pela adoção de medidas que não utilizem energia elétrica para controlar as condições de conforto e redução do consumo de energia de um ambiente construído. Estas medidas, normalmente aplicadas à envoltória, tem como função tornar o edifício o mais confortável e eficiente possível, reduzindo a necessidade de arrefecimento e iluminação artificial suplementares (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al., 2014; ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015; HENSEN; LAMBERTS, 2012; U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE, 2011).

Nesse sentido, destacam-se os elementos externos de sombreamento, o isolamento

térmico da cobertura, a adoção de vidros com baixo fator solar e o uso de materiais termicamente reflexivos para a envoltória. Além disso, considerando o contexto climático de locais com climas quentes e úmidos, é recomendado um Percentual Total de Abertura na Fachada – PAFT, entre 30% e 50% (DIDONÉ; WAGNER; PEREIRA, 2014).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2003) por meio da Norma Brasileira nº 15220, medidas que isolem a cobertura termicamente são necessárias para o aumento da eficiência energética e do desempenho térmico da edificação, principalmente para as concebidas em apenas um pavimento. Estas medidas são comumente adotadas como estratégias passivas para climas quentes, aliadas à ventilação natural e o resfriamento das massas térmicas expostas diretamente à radiação solar. Complementarmente, busca-se o controle da iluminação natural do ambiente utilizando elementos de proteção solar, com o intuito de explorar a iluminação natural e a proteção contra a radiação solar.

Didoné (2014) aborda o balanço energético nulo em edifícios de escritório do Brasil e Alemanha, parametrizando as variáveis de altura, largura e comprimento. A autora estipulou a produção de energia por meio de módulos fotovoltaicos semitransparentes localizados nas janelas, proteções solares e na cobertura, concluindo que as células fotovoltaicas utilizadas são válidas para obter a condição de *Zero Energy* nas edificações avaliadas, apesar da pouca produção dos elementos inseridos na janela e nas proteções solares. Os resultados obtidos por Didoné, Wagner e Pereira (2014) mostraram que a otimização aplicada aos edifícios de escritórios das cidades de Florianópolis e Fortaleza foi eficaz, utilizando módulos fotovoltaicos na cobertura e na fachada, tornando as edificações energeticamente balanceadas.

Segundo Noguchi (2016), para obter sucesso na implementação de estratégias passivas, é essencial aliar o conforto do ambiente ao clima da região analisada. Usufruir de soluções para o microclima da edificação e das características climáticas locais é fundamental para elevar a qualidade de vida dos habitantes e do ambiente construído. Dentre as estratégias passivas disponíveis, vale destacar as mais importantes para climas tropicais, tais como:

- Escolha de orientação solar apropriada;
- Estudo da volumetria da edificação;
- Adaptação do Percentual Total de Abertura da Fachada – PAFT;
- Escolha de materiais e componentes adequados, como vidros mais eficientes;
- Valer-se da iluminação natural como fonte luminosa complementar;
- Estudo e aplicação de proteção solar como meio de condicionamento térmico e lumínico do espaço; e

- Cobertura com isolamento térmico;

Como a escala proposta para este trabalho está restrita à edificação de escritório, estratégias passivas que fogem desta escala não foram abordadas. Pode-se mencionar como estratégias que fogem desta escala as soluções de paisagismo, vegetação e corpos d'água, tratados como microclima, e a disposição da edificação em relação ao entorno. Da mesma forma, estratégias que são direcionadas a edificações não-comerciais não foram consideradas.

2.3.3 Estratégias ativas

As estratégias ativas são medidas que irão complementar a otimização inicial proporcionada por medidas passivas e, no caso deste trabalho, os esforços foram concentrados em aplicar medidas de aumento de eficiência sobre os sistemas de condicionamento de ar, de iluminação artificial e de equipamentos. Segundo a *International Energy Agency - IEA (2014)*, as estratégias ativas importantes, considerando o contexto brasileiro, abrangem:

- O controle otimizado dos sistemas de condicionamento de ar, integrado com os sistemas passivos de refrigeração do ar;
- Sistemas integrados de geração de energia por fonte renovável, auxiliados pela iluminação natural, por sistemas fotovoltaicos e de cogeração de energia; e
- Sistemas automatizados de controle térmico, elevando a segurança e eficiência energética;

À semelhança das medidas de integração de sistemas propostas pelo IEA em relação às recomendações propostas pelo INI-C (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO, 2018b), devem ser observadas a relação de adaptação ao lugar, uma vez que ambas referências adotam conceitos e normas internacionais para a elaboração de seus estudos específicos.

As edificações de escritório brasileiras utilizam sistemas de condicionamento de ar variados, e a disponibilidade e aplicação desses sistemas tem impacto direto no desempenho energético final do edifício. Em muitos casos, a escolha adequada do tipo mais eficiente, segundo sua tecnologia e funcionamento, é fundamental para garantir melhor desempenho e menor consumo de energia (KAMAL et al., 2019; SHIN et al., 2019). Dentre os sistemas de condicionamento de ar disponíveis em território nacional, pode-se citar (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS, 2015):

- Sistema Central de Água Gelada – CAG/*Fancoil*, sistema este que contempla dois tipos de funcionamento: o sistema de condensação a água e a ar. No primeiro, o sistema a água gelada é distribuída entre os pavimentos até os fancoils, e nestes a

água resfria o ar que é insulado no ambiente. No segundo sistema, o ar é resfriado por fluido refrigerante. Há ainda a opção pela automatização e não-automatização da distribuição de ar, denominados, respectivamente, Volume de Ar Variável – VAV e Volume de Ar Constante – VAC. Este sistema foi observado como o mais recorrente entre as edificações levantadas;

- Volume Refrigerante Variável, ou *Variable Refrigerant Flow* – VRF, é o sistema que resfria o ar por meio de fluido refrigerante, distribuindo unidades condensadoras modularmente para cada pavimento da edificação. Esta forma de distribuição do sistema VRF difere do sistema *CAG/Fancoil*, que concentra esta central no pavimento técnico, próximo ao reservatório de água. As condensadoras do VRF, assim, distribuem o ar refrigerado para cada evaporadora, e esta, equipada com sensores e set point de temperatura previamente configurados, proporciona o controle de temperatura para cada zona térmica implantada. Como o sistema *CAG/Fancoil*, utiliza sistema de condensação a ar e a água;
- *Self-contained* é um sistema que concentra todo o ciclo de refrigeração do ar em uma máquina, comportando evaporadora, condensadora e compressor. É normalmente instalada na casa de máquina dos pavimentos; e
- *Split* é a classificação atribuída ao sistema de arrefecimento feito por *splits*, *multi-plits* e ar condicionado de janela – ACJ. Como a automação neste tipo de sistema é rara, limitando-se a programação de acionamento e de desligamento do sistema, foi pouco observado nos edifícios de escritório da amostra coletada, provavelmente em função do ano em que os edifícios foram projetados, quando a relação custo/benefício dessa tecnologia não era compensatória.

O sistema VRF oferece alta eficiência energética, custo-benefício e alto coeficiente de performance disponível em relação aos sistemas tradicionais disponíveis no mercado. É também utilizado como objeto de análises mais complexas, como deep learning sobre desempenho e vida útil do VRF, ou análises estatísticas para detecção de falhas no arrefecimento, demonstrando sua aplicabilidade e longevidade em relação às demais soluções apresentadas (CAO; DAI; LIU, 2016; GUO et al., 2018; LIU; HONG, 2010; TEKE; TIMUR, 2014; WANG, 2014). Este sistema é indicado para simulações com área total condicionada maior que 4000 m², por possuir maior controle de temperatura por meio do ajuste de set point para cada zona térmica (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO, 2016).

O Guia Avançado de Planejamento Energético para Pequenos e Médios Edifícios Comerciais, ou *Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings* – AEDG, disponibilizado pela ASHRAE, propõe recomendações para a redução do consumo de energia em edificações comerciais em 30%, 50% e 100%, ou *Zero Energy*. Estas reduções

ocorrem por meio da adoção de estratégias passivas e ativas.

Ao analisar estas recomendações, verifica-se a relação entre o AEDG e o INI-C acerca da proposição de medidas de redução de consumo de energia. Esta relação de semelhança é evidenciada quando analisado aspectos como adoção de materiais energeticamente mais eficientes, de equipamentos e sistemas de condicionamento de ar e iluminação artificial com alto desempenho energético (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al., 2011, 2014, 2019).

Entre estas recomendações, destacam-se as medidas para o aumento da eficiência do sistema de iluminação e de equipamentos em 30%, no mínimo, por meio de implementação de controles de luminosidade das lâmpadas, sensores fotoelétricos controlando o acionamento do sistema de iluminação, além do correto dimensionamento dos aparelhos de iluminação para os ambientes (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al., 2019).

O INI-C propõe melhorias para os equipamentos e para o sistema de iluminação com o intuito de alcançar o nível de eficiência energética, indicado pela etiqueta “A”. Para isso, é definido que ambos os requisitos apresentem redução mínima de consumo em 30%, assim como é proposto pelo AEDG (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO, 2016). As modificações sugeridas são:

- A redução da Densidade de Potência de Iluminação Limite – DPIL, de 9,10 W/m², correspondendo a uma redução de 31,20% em relação ao DPIL de etiqueta “D”, 14,10 W/m²; e
- A sugestão de redução de consumo para equipamentos, onde a Densidade de Potência de Equipamentos – DPE, é de 9,7 W/m², acompanhando o aumento de eficiência da edificação junto à Densidade de Carga Interna – DCI, e da DPIL.

2.4 Caracterização climática e socioeconômica da cidade de Vitória

O Espírito Santo integra a região de alto desenvolvimento socioeconômico do Brasil, estando posicionado em 7º lugar, com índice de 0,740, e sua capital, Vitória, está entre os municípios com índice classificado como “muito alto” de desenvolvimento humano, com 0,845 (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP, 2019; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2019). Apresenta, entretanto, indicadores discretos quando comparados aos outros estados pertencentes à Região

Sudeste, por exemplo (CAÇADOR; GRASSI, 2013).

Apesar da condição discreta de desenvolvimento do estado, Vitória apresentou um perceptível crescimento em suas atividades econômicas e em seu porte empresarial entre os anos de 2002 a 2012 (PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA - PMV, 2012). Este crescimento pode ter sido resultado do crescimento da qualidade de vida e desenvolvimento verificado após o 2º ciclo de desenvolvimento econômico, ocorrido entre os anos de 1960 e 2000, alavancada pela produção de commodities e diversificação econômica no período (CAÇADOR; GRASSI, 2013).

Consequentemente, foi observado o aumento da produção de empreendimentos como edificações comerciais e residenciais (SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESPÍRITO SANTO - SINDUSCON, 2017). Como resultado deste aumento de volume de produção e desenvolvimento econômico da cidade, ocorreu a necessidade de expansão da oferta de energia elétrica para suplantar estes eventos, assim como o progressivo aumento no consumo energético, que cresceu a uma taxa de 5,8% ao ano (AMARANTE, 2009).

Para a caracterização do contexto climático da capital do Espírito Santo, foram coletados dados climáticos por meio de arquivo climático contendo a série de medições meteorológicas de Vitória do ano de 2018 (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2018). Estas informações são importantes dados de entrada para as simulações e análises termoenergéticas realizadas no âmbito desta pesquisa. Os dados coletados seguem apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Características climáticas de Vitória.

Dados climático	Média anual total
Temperatura de bulbo seco (°C) - média mínima mensal	20,67
Temperatura de bulbo seco (°C) - média máxima mensal	29,00
Umidade relativa do ar (%) - média diária mensal	76,92%
Direção dos ventos (graus) - média diária mensal	181,04
Velocidade do vento (m/s) - média diária mensal	2,05
Radiação horizontal global (Wh/m ²) - média diária mensal	425,62
Nebulosidade (%) - média diária mensal	69,08%
Iluminância horizontal global (lux) - média diária mensal	50019,06

Fonte: adaptado de INMET (2018).

2.5 Caracterização da tipologia de referência

Didoné (2014) utiliza um banco de dados de 1103 edificações brasileiras para determinar as propriedades construtivas e uso de energia elétrica, e desta amostra, 35 edificações foram selecionadas para análise das características energéticas e construtivas delimitadas pela autora. As principais propriedades construtivas enunciadas pela autora foram paredes externas feitas por blocos cerâmicos com argamassa em ambas as faces, cobertura composta por laje de concreto e, em alguns casos, telhas cerâmicas, e o piso de concreto.

Costa, Oliveira e Amorim (2017) destacam as principais características dos edifícios de escritório presentes em Brasília, onde estes, em sua maioria, apresentam características como forma retangular, orientação solar da fachada principal para Leste, 1 a 28 pavimentos-tipo, PAF_T entre 50% a 75% e mais de 70% das edificações levantadas não apresentavam proteção solar. Os vidros empregados não possuíam performance adequada para redução da influência térmica e luminosa da radiação solar, sendo o vidro incolor e o vidro fumê os mais empregados. No entanto, é importante ressaltar a atipicidade de Brasília, visto ser uma cidade planejada cujo Plano Piloto condiciona a forma – retangular – e orientação das edificações.

Sorgato, Schneider e Rüther (2018) definem em seu artigo uma edificação comercial de escritório genérica de pequeno porte como uma edificação com 600 m² de área de piso, 4 pavimentos-tipo, e dimensões de 30 metros de comprimento por 12 metros profundidade e 14 metros de altura. Esta edificação foi submetida às condições climáticas de 6 cidades brasileiras – Rio de Janeiro, São Paulo, Florianópolis, Curitiba, Brasília e Belém – a fim de avaliar a produção de energia solar fotovoltaica e validade do balanço energético nulo em diferentes regiões do país. O estudo apontou que todas as edificações atingiram o balanço energético nulo.

O Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - CBCS (2015), por meio do Relatório

Final de Desempenho Energético, descreve que edificações comerciais podem ser segmentadas em três tipos. O primeiro abrange todos os tipos de uso aplicados ao comércio sobre o espaço utilizado, tais como hotéis, shoppings, centros comerciais e edifícios públicos. A segunda tipologia é a edificação comercial corporativa, caracterizada por edifícios com mais de 10 pavimentos, com salas que normalmente ocupam completamente o pavimento, limitando-se a 1 ou 2 ambientes. Estas edificações são necessariamente ocupadas apenas por uma ou duas empresas ou entidades públicas. Por fim, a terceira tipologia, a edificação comercial de escritórios, é configurada com cerca de 700 m² de área de piso, com altura que varia entre 60 a 120 metros e com 10 a 20 pavimentos-tipo. Estas edificações de escritório contêm salas com usos variados e proprietários autônomos.

A maior frequência de ocorrência de número de pavimento observada por Bernabé (2012) foi de 15 pavimentos. A conclusão foi baseada no Plano Diretor Urbano – PDU, em vigor à época da pesquisa, aplicado nas regiões onde os edifícios de escritório foram selecionados. Da mesma forma, foi constatado que nas zonas onde as edificações foram construídas o gabarito praticado é livre, mesma característica observada no levantamento. Mantendo a exigência de gabarito livre para as zonas urbanas utilizadas nesta pesquisa, o último PDU de Vitória, publicado em 22 de maio de 2018, após a revisão realizada entre os anos de 2015 e 2017, restringe o gabarito em áreas próximas ao cone de aterrisagem do aeroporto, zona onde se situa apenas uma edificação da amostra desta pesquisa (PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA - PMV, 2018).

Alguns parâmetros arquitetônicos destacados por Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), Bernabé (2012), e Fonseca et al. (2016) como importantes para a avaliação do consumo de energia das edificações de escritório foram organizados na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros arquitetônicos a serem analisados

Parâmetro	Descrição
Fator Forma (FA)	Razão entre a área da envoltória e o volume total da edificação
Forma do edifício	Retangular, quadrada, circular, irregular (BERNABÉ, 2012; FONSECA et al., 2016; LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006).
Fator Altura (FA)	Razão entre a área da projeção da cobertura e a área construída (INMETRO, 2018).
Número da área do pavimento	(BERNABÉ, 2012; FONSECA et al., 2016; INMETRO, 2018; LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006).
Percentual de Abertura da Fachada (PAF)	Razão entre as áreas de abertura envidraçada, ou com fechamento transparente ou translúcido, de cada fachada e a área total da fachada da edificação (FONSECA et al., 2016; INMETRO, 2018; LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006; WERNECK et al., 2017).
Fator solar do vidro (FS)	Razão entre o ganho de calor que entra em um ambiente através de uma abertura e a radiação solar incidente nesta mesma abertura (INMETRO, 2018).
Proteção solar	Ângulos de sombreamento externo das aberturas envidraçadas / orientação solar.

Fonte: autor (2019).

As referências selecionadas contribuem para a compreensão de definições utilizadas sobre o tema do trabalho, além de dados sobre as condições energéticas e ambientais necessárias para a implementação do conceito *Zero Energy* aplicado à edificações.

3 Metodologia

Assim, neste capítulo são apresentadas as três principais etapas utilizadas na metodologia para esta pesquisa. Estas etapas podem ser descritas como:

- i. Definição dos modelos genéricos. A etapa de definição dos modelos foi elaborada em 3 partes, dentre as quais:
 - a. Coleta de dados sobre as características das edificações comerciais, especificamente de escritório, em Vitória (ES);
 - b. Levantamento e definição das variáveis sobre os padrões de uso e ocupação das salas de escritório, assim como padrões de conforto e níveis de eficiência energética dos equipamentos de condicionamento de ar e iluminação;

- c. Estabelecimento dos modelos genéricos com o intuito de evidenciar o consumo total final de energia elétrica por meio da determinação da classe de eficiência energética da edificação, proposta pela INI-C, e o potencial de otimização e produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis.
- ii. Simulações. Nesta etapa são avaliadas as características mais influentes no consumo energético da edificação de referência e o potencial de geração de energia solar. Ambas as avaliações serão feitas por meio de simulação computacional. As simulações foram fracionadas em 3 partes, dentre as quais:
 - a. Simulação dos modelos real e de referência, onde é feita a determinação da classe de desempenho energético das edificações observadas em campo;
 - b. Otimização dos modelos genéricos, representando a etapa onde são implementadas estratégias passivas e ativas visando a eficientização da edificação;

Com a aplicação da metodologia, simplificada no Fluxograma da Figura 10, busca-se identificar se há condições para o balanço energético nulo total ou parcial dos modelos analisados.

3.1 Levantamento das características dos edifícios de escritório de Vitória

As edificações de escritório de Vitória selecionadas após a definição do recorte territorial, apresentam características que foram complementadas aos atributos observados em edificações comerciais brasileiras, como suporte as informações não encontradas in loco. As características com maior frequência de ocorrência no levantamento realizado são apresentadas na Tabela 4. Todavia, a amostra coletada abrange edifícios iniciados em 2003 e concluídos até o fim do primeiro trimestre de 2018, data do início do levantamento. Este fato inviabiliza aplicar a última revisão do Plano à amostra.

Foram considerados para o levantamento atributos como gabarito, número de pavimentos-tipo, número de salas por pavimento-tipo, dimensão e forma, altura dos pavimentos-tipo. Não foram consideradas as dimensões dos lotes onde as edificações da amostra estão implantadas, já que este atributo não foi pertinente ao objetivo do trabalho. Estes parâmetros foram reunidos em consulta ao material técnico disponibilizado pelas construtoras, visitas a campo e complementação de dados utilizando a ferramenta computacional *Google Street View*.

Os trabalhos de Lamberts, Ghisi e Ramos (2006), American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE (2010), Bernabé (2012), Ramos et al. (2013), Didoné (2014), Didoné, Wagner e Pereira (2014), Conselho Brasileiro de Construção Sustentável - CBCS (2015), Fonseca et al. (2016), Werneck et al. (2017) e Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO (2018b),

foram utilizados como principais fontes de informação para a análise de envoltória e sistema de iluminação e condicionamento de ar.

Tabela 4: Características observadas em campo e em pesquisas anteriores.

Parâmetro	Descrição	Referências
Gabarito	24 a 60 m (8 a 19 pav.)	Levantamento <i>in loco</i> e referências (BERNABÉ, 2012; CBCS, 2015; FONSECA et al., 2016; LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006; RAMOS et al., 2013).
Altura do pavimento	3 m	Levantamento <i>in loco</i> .
Planta-baixa (forma)	Retangular	Levantamento <i>in loco</i> e referências (FONSECA et al., 2016; INMETRO, 2018).
Dimensão das salas por pav.-tipo	40 m ²	Foi fixado a área das salas (zonas térmicas) de acordo com a média de ofertas de salas observadas em levantamento <i>in loco</i> .
Proteção solar	Sem proteção	Levantamento <i>in loco</i> e referências (FONSECA et al., 2016; WERNECK et al., 2017).
Componentes da parede	Bloco cerâmico, 8 furos; 14x19x29 cm; argamassa de assentamento	Levantamento <i>in loco</i> .
Cobertura	Laje impermeabilizada com 20 cm de espessura	Levantamento <i>in loco</i> e referências (CB3E; ABIVIDRO, 2015).
Continua		

Conclusão		
Vidros	Laminado; Reflexivo; 8 mm; Verde	(FONSECA et al., 2016; INMETRO, 2018).
PAF _T	30%; 50%; 80%	Levantamento <i>in loco</i> e referências.
Orientação solar da fachada principal	Sul	Levantamento <i>in loco</i> e referências.
Densidade de Carga de Iluminação Limite – DCIL	14,1 W/m ²	Consulta pública do RTQ-C (INMETRO, 2018).
Densidade de Carga de Equipamentos – DCE	9,7 W/m ²	Consulta pública do RTQ-C (INMETRO, 2018).
Absortância/transmitância das paredes	0,59 (cor camurça)/3,75	Valores consultados na NBR 15220-2 e referências (ABNT, 2003; FONSECA et al., 2016; INMETRO, 2018).
Absortância/transmitância das coberturas	0,65 (concreto aparente)/2,06	Valores consultados na NBR 15220-2 e referências (ABNT, 2003; FONSECA et al., 2016; INMETRO, 2018).

Fonte: autor (2019).

As informações coletadas nos estudos e em levantamento formam a base conceitual para determinar os aspectos arquitetônicos relevantes para compor os modelos genéricos e, posteriormente, determinar os parâmetros de otimização e do consumo energético padrão aproximado para um edifício de escritório. Além disso, a quantidade de simulações necessárias para determinar o consumo de energia dos modelos genéricos é identificada por meio da organização dos dados coletados em campo e, assim, a resultante do número de variáveis.

3.1.1 Consumo de energia elétrica das edificações

O consumo de energia elétrica em edificações de escritório no Brasil é determinado principalmente por sua tipologia. As configurações predominantes no Brasil comprehendem, em sua maioria, pequenas edificações, abaixo de 8 pavimentos, a edifícios grandes, acima de 15 pavimentos (CARLO, 2008; RAMOS et al., 2013; CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS, 2015; FONSECA et al., 2016).

Correlacionado às tipologias arquitetônicas, os dados de consumo de energia, expressos em Intensidade de Uso de Energia – IUE, kWh/m²/ano, foram necessários para validação das simulações iniciais quanto ao consumo de energia esperado dos modelos. Visto que a calibração dos modelos genéricos não foi possível, pois eles não dispunham de memorial de massa como ferramenta de comparação ao consumo simulado computacionalmente, foram adotados como método de comparação os valores médios registrados no Relatório

Final do CBCS (2015), como mostra o Histograma na Figura 11. Foi relacionado o consumo de energia das edificações levantadas à frequência de ocorrência da quantidade de pavimentos de edificações comerciais brasileiras e suas respectivas áreas comuns. Logo, os dados de IUE adotados para a comparação e avaliação inicial do consumo energético dos modelos foram baseados nos valores máximo e mínimo estabelecidos pelo CBCS (2015). A média entre o consumo em áreas comuns e total relacionado à frequência de quantidade de pavimentos define a quantidade total de consumo de energia para cada tipologia.

Os autores do Relatório atribuem 133 kWh/m²/ano aos edifícios de pequeno porte, e 268 kWh/m²/ano às edificações de grande porte. Vale ressaltar que os dados de consumo energético, assim como a média apontada no Relatório, de 191 kWh/m²/ano, desprezam as distorções causadas por edificações com particularidades de consumo como datacenters ou erros de cálculo de área útil.

Ao estabelecer as Intensidades de Uso de Energia equivalentes a cada modelo, assim como os padrões de uso e ocupação, pode-se estimar o consumo de energia durante determinado período.

3.1.2 Padrões de uso e ocupação em edifícios de escritório

Os padrões de uso e ocupação da edificação foram baseados em normas, regulamentos, relatórios técnicos e referências acadêmicas que consideraram os níveis de atividades desenvolvidas nos ambientes, tratadas neste trabalho como zonas térmicas, como apresentado na Tabela 5.

Como o intuito do trabalho foi criar modelos genéricos que representassem minimamente o cenário encontrado na cidade de Vitória, as características de uso e ocupação escolhidas foram integradas como forma de aproximar as tipologias ao cenário observado. Dentre elas, pode-se citar:

- O nível metabólico apresentado em atividades de escritório;
- O horário de funcionamento dos escritórios, determinando os intervalos de tempo de ocupação total e parcial, onde, respectivamente, a capacidade máxima e parcial de ocupação das zonas térmicas é atingida;
- A densidade de pessoas por metro quadrado para cada zona térmica;
- A temperatura de conforto em cada zona térmica, de acordo com as normas de conforto térmico consultadas; e
- A umidade relativa do ar nos ambientes de escritório.

A obtenção dos dados acerca da atividade desempenhada nas edificações de escritório, além do horário de funcionamento e densidade de ocupação serão utilizados para estimar o consumo de energia elétrica do espaço utilizado por meio de simulação computacional.

Tabela 5: Padrões de uso e ocupação

Parâmetro	Descrição	Referências
Atividades		As salas de escritório da cidade são utilizadas, em sua maioria, para atividades especializadas de âmbito jurídico, relacionadas à construção civil, a saúde e atividades financeiras.
Horário de funcionamento		Segundo normas e pesquisas sobre o horário de funcionamento de escritórios, o início da ocupação se dá às 6h e pode se estender até às 24h. Entretanto, visando a aproximação às condições praticadas no mercado brasileiro, adota-se a redução de ocupação durante o horário de almoço, denominada ocupação parcial.
Continua		

		Conclusão
Densidade de ocupação	0,14 pessoas/m ²	(CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS, 2015; LAMBERTS; GHISI; RAMOS, 2006; MORAES; PEREIRA, 2014).
Temperatura de controle	24°C	Temperatura limite de acionamento do sistema de condicionamento de ar (ASHRAE, 2010, 2017a; INMETRO, 2010a).
Nível de iluminância de referência	500 lux	Iluminância mínima (entorno de trabalho) para atividades visuais (ASHRAE, 2010; ABNT, 2013).
Umidade Relativa Interna	40%-60%	Faixa recomendada pela ASHRAE 55 (2017a).

Fonte: autor (2019).

3.2 Padrões de conforto

O conforto térmico e de iluminação natural são parâmetros essenciais para a avaliação da qualidade do ambiente em que se vive. Não obstante, é necessário estabelecer padrões de conforto para a simulação de desempenho termoenergético do modelo genérico. Os próximos subitens tratam dos parâmetros adotados para a posterior inserção de dados e informações nos processos de simulação.

3.2.1 Conforto térmico

Utilizando os conceitos de conforto adaptativo, foi calculada a temperatura de conforto (t_c) descrita pela American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE (2017a), e assim estipulada a faixa de temperaturas de conforto e set point para controle de temperatura dos ambientes dos modelos genéricos. Este modelo avalia a adaptação do usuário em diferentes campos como o fisiológico, o comportamental e o psicológico (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE, 2017b) e pode ser expresso pela Equação 1 tratada no Referencial Teórico.

Foram utilizadas as temperaturas de bulbo seco máximas e mínimas como valores representantes da temperatura externa da edificação (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2018). Estes dados de temperatura serão fundamentais para a caracterização do meio em que o modelo genérico será simulado, influenciando no desempenho simulado da envoltória e dos sistemas de condicionamento de ar e iluminação.

3.2.2 Conforto lumínico

A norma NBR/ISO CIE 8995-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2013) determina que a condição de conforto visual em ambientes de escritório requer valor igual ou maior que 500 lux de iluminância de entorno imediato da tarefa a ser desempenhada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2013; RAMOS et al., 2013). Assegurar a iluminância é uma condição importante para garantir o conforto, desempenho e segurança visual aos usuários, seja por fonte luminosa artificial ou natural.

Para que a iluminação interna se mantenha dentro do padrão estabelecido por norma, foi necessário calcular o Fator de Luz Diurna – FDL, como forma de verificar se a adoção iluminância proposta pela norma seria adequada as condições empregadas aos modelos de referência. Este fator, uma vez incorporado nas rotinas de simulação computacional, influencia diretamente nas condições de iluminação no ambiente, indicando se estão adequadas para a realização de tarefas que exigem um determinado volume de iluminação.

Considerando a ocupação anual parcial dos ambientes, foi possível estabelecer a relação entre a iluminância interna desejada, 500 lux, e a mediana da iluminância difusa horizontal externa, dado retirado do arquivo climático de Vitória (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO, 2018b), de 50019,16 lux. Assim, o FLD necessário para manter a iluminância interna das salas de escritório durante o período de ocupação levantado pode ser expresso pela Equação 2.

$$FLD = \frac{E_{interna}}{E_{externa}} * 100 \quad (2)$$

Onde:

FLD é o Fluxo de Luz Diurna, em porcentagem;

$E_{interna}$ é a iluminância interior em um ponto de um plano, em lux; e

$E_{externa}$ é a iluminância externa simultânea em um plano horizontal, em lux.

Concluída a caracterização dos padrões de conforto a serem avaliados, são definidos os parâmetros para os níveis de eficiência energética esperados dos equipamentos de condicionamento de ar e iluminação artificial presentes no modelo genérico. A partir desta definição embasada em regulamentos como o INI-C, é possível estimar a otimização de consumo energético da edificação proposta.

3.3 Níveis de eficiência energética

Os níveis de eficiência dos aparelhos utilizados na manutenção do conforto da edificação exercem importante papel quando há a necessidade de racionamento do consumo

energético. Para tal, estes aparelhos são avaliados segundo critérios de desempenho energético e, ao final dessa avaliação, é atribuído um índice representativo da eficiência energética alcançada. Os índices de desempenho apresentados neste trabalho foram baseados na Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – INI-C.

3.3.1 Determinação da classe de eficiência energética dos modelos genéricos

As primeiras simulações energéticas servem como meio de ajuste e verificação de erros entre os dados de saída de consumo energético e intensidade de uso de energia. Os resultados das simulações iniciais foram comparados às análises feitas de Determinação de Classe de Desempenho Energético, baseado na metodologia do INI-C, e nos resultados apresentados pelo Relatório Final de Desempenho Energético do CBCS. A partir da discrepância dos valores obtidos entre as simulações iniciais e as referências selecionadas, foram realizados ajustes a fim de adequar o modelo computacional à tolerância estabelecida.

Os modelos genéricos foram avaliados segundo a definição da Instrução Normativa, onde é definido que o Modelo Real representa a edificação a ser classificada, enquanto o Modelo de Referencia representa a edificação com baixo desempenho energético. Desta forma, os edifícios propostos são comparados com um modelo de baixa performance, evidenciando, assim, seu desempenho energético. As variáveis analisadas para a comparação com o Modelo de Referência foram o consumo de energia térmica, elétrica e primaria dos modelos.

A partir do diagnóstico de desempenho energético dos modelos genéricos, foram implementadas as otimizações e medidas de produção de energia em contraponto ao consumo energético constatado em simulação.

3.3.2 Eficiência energética do sistema de condicionamento de ar

Os sistemas de condicionamento de ar presentes em edifícios de escritório são compostos basicamente por dois tipos de equipamentos: ar-condicionado Split e o Sistema Central de Água Gelada – CAG (CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS, 2015).

Segundo o Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO (2018b), esses equipamentos são classificados segundo a capacidade de resfriamento e a potência absorvida pelos motores em pleno funcionamento. Esta relação é representada pelo Coeficiente de Performance – COP, expresso em W/W. O COP para equipamentos de ar condicionado é categorizado segundo uma Classe de Eficiência

Energética – CEE, como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6: Densidades de Potência de Iluminação definidas pelo INI-C e as Classes de Eficiência Energética.

Classes	Densidade de Potência de Iluminação (DPI – W/m²)
A	8,50
B	10,40
C	12,20
D	14,10

Fonte: adaptado de INMETRO (2018).

Esta classificação atribuída ao sistema de ar condicionado dos modelos genéricos, juntamente ao nível de eficiência energética do sistema de iluminação, é essencial para a etapa de simulação e identificação do consumo final de energia dos modelos genéricos, representantes do cenário observado dentro do recorte territorial.

Como o sistema mais frequente observado nas edificações levantadas foi o Sistema Central de Água Gelada – CAG, com volume de ar constante, e este, tomando como base os modelos mais populares do mercado brasileiro, possui COP base próximo a classe “D” por demandar muita energia à sua operação, foi utilizado o valor de COP indicado à classe “D” pela tabela da INI-C. Posterior a etapa de determinação de classe, foi feita a substituição dos aparelhos pertencentes à classe “D” – 2,60, para a classe “A” – 3,23 como forma de otimização utilizando estratégia ativa de redução de consumo de energia.

3.3.3 Eficiência energética do sistema iluminação artificial e equipamentos

A eficiência do sistema de iluminação e equipamentos de um edifício de escritório, tal qual o sistema de condicionamento de ar, representa uma parcela importante no consumo final de energia elétrica da edificação (AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al., 2019; CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS, 2015).

Dessa forma, para certificar que o sistema de iluminação artificial seja energeticamente eficiente e reduza o impacto desse sistema no consumo de energia elétrica, é avaliada a razão entre o somatório das potências das lâmpadas e reatores instalados e a área de um ambiente ou zona térmica, razão denominada como Densidade de Potência de Iluminação – DPI, expressa em W/m². O mesmo procedimento é aplicado aos equipamentos, definidos pela Densidade de Potência de Equipamentos – DPE, expressa em

W/m². A união das duas densidades é definida pela Densidade de Carga Interna – DCI.

Após a avaliação do DPI, os equipamentos de iluminação artificial são classificados segundo a classe de eficiência energética estabelecida pelo PBE/Inmetro, conforme a Tabela 6.

Assim como o sistema de condicionamento de ar, a definição da DPI possibilita classificar o sistema de iluminação artificial do modelo genérico segundo sua eficiência energética. Para a determinação da classe de eficiência energética, o procedimento é o mesmo adotado para definição do COP para a etapa de simulação, e neste caso, como os equipamentos elétricos e de iluminação não foram levantados nominalmente, partiu-se da situação requerida e indicada pelo INI-C, com DPI classe “D”, de 14,10 W/m², e equipamentos com DPE de 9,7 W/m². Desta forma, espera-se que seja evidenciada a influência do sistema de iluminação no contexto geral de otimização da edificação.

3.4 Definição dos modelos genéricos

Com base no INI-C (2018) e no levantamento das edificações de escritório de Vitória, foram propostos dois tipos de modelos genéricos como base para o estudo das modificações de otimização e de produção de energia. Estes modelos representam os dois cenários de ambiente construído mais observados na cidade de Vitória. Estes cenários são formados por edificações mais baixas, com 8 pavimentos, e as mais altas, com 19 pavimentos. As dimensões utilizadas como referência para a construção dos modelos genéricos foram resultado dos valores médios observados nas edificações que compõe o levantamento.

As características predominantes aplicadas aos modelos genéricos foram:

- Número de pavimentos;
- Forma - retangular;
- Altura - gabarito e dimensões das fachadas;
- Layout interno dos pavimento-tipo;
- Ausência de proteção solar;
- Percentual Total de Área de Abertura da Fachada.

A composição dos modelos é baseada nas características predominantes e nos dados coletados *in site*.

3.4.1 Composição dos modelos genéricos

A composição construtiva atribuída aos modelos utilizados neste trabalho mostra fundamentalmente os parâmetros necessários para a avaliação do desempenho energético

segundo o INI-C. Os atributos utilizados serviram como ponto de partida para as análises subsequentes sugeridas nas etapas metodológicas e estão dispostos no Fluxograma da Figura 12.

Apresentados na Tabela 7 e exemplificado na Figura 13, os atributos estudados foram Fator de Forma, FF, Fator Altura, FA, Percentual de Área de Abertura da Fachada Total, PAFT, Ângulo Vertical de Sombreamento, AVS, e Ângulo Horizontal de Sombreamento, AHS.

O PAFT e as propriedades do vidro utilizados para os modelos genéricos, como Fator Solar – FS, ou Solar Heat Gain Coefficient – SHGC, foram adotados considerando as médias desses atributos coletados in loco e complementados por dados extraídos do Catálogo de Propriedades Térmicas e Óticas de Vidro (CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – CB3E; ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO – ABIVIDRO, 2015; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003), da NBR 15220 (2003) e do INI-C (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO, 2018b), como forma de tornar genéricos os dados empregados, como apresentado na Tabela 7.

Segundo o INI-C (2018), a utilização do Ângulo de Obstrução Vertical – AOV, para a

Tabela 7: Parâmetros arquitetônicos dos modelos genéricos.

Parâmetro	Descrição	Referências	Dados dimensionais dos pavimentos-tipo
Número de pavimento (un)	8	19	
Proporção geométrica – pav. tipo (m – Comprimento x Largura)	33,75x16	40x12	
Altura do pavimento-tipo (m)	3	3	
Área total construída – pavimentos-tipo (m ²)	4.320	9.120	
Área de projeção da cobertura - Apcob (m ²)	843,75	640,00	
Área de projeção do edifício - Ape (m ²)*	1000	1000	
Área total construída - Atot (m ²)	7.320	12.120	
Volume Total da Edificação - Vtot (m ³)	24.360	38.760	
Área da envoltória - Aenv (m ²)	5.430,30	8.890,00	
Fator de Forma (FF)	0,222	0,229	
Fator Altura (FA)	0,125	0,052	
Fator Solar (FS)	0,44	0,44	
Transmitância do vidro (W/m ² K)	5,6	5,6	
Área de aberturas das fachadas – Aabert (m ²)	1.501,80	3.152,40	
PAF _T (%)	50%	50%	
Ângulo Vertical (AVS) e Horizontal (AHS) de Sombreamento (°)	0	0	

Fonte: autor (2019); *A Ape contempla a área de projeção do pavimento térreo e estacionamentos.

simulação de obstruções solares parciais e totais são critérios opcionais que dependem da condição real levantada. Apesar da obstrução solar lateral ter sido uma condição observada em algumas edificações de Vitória, com base na observação da frequência de ocorrência, este atributo não foi considerado para o presente trabalho dada a configuração e disposição das edificações do recorte territorial em relação ao lote, que possibilitaram utilizar cenários sem obstrução solar. Além disso, para o estudo da incidência de radiação solar sobre a edificação e como ponto de partida para a implementação das estratégias passivas aos modelos genéricos, foi definido a fachada principal com orientação Sul, de acordo com a frequência de ocorrência observada na amostragem.

O pavimento térreo e dois pavimentos de estacionamentos (Figura 14), foram centralizados na base das torres em ambos os modelos, com dimensões idênticas e de forma genérica, com o intuito de evidenciar a influência sobre o consumo energético total por meio do número de pavimentos. Contudo, o uso e ocupação destas áreas se torna de baixa relevância, uma vez que as atividades de maior permanência se dão nos ambientes

da torre.

Estes pavimentos compreendem características arquitetônicas apresentadas em todas as edificações selecionadas em levantamento. Posteriormente, na etapa de produção de energia, foi proposto o deslocamento dos pavimentos abaixo da torre para aproveitamento de área para inserção de painéis fotovoltaicos.

Referências

- TOLMASQUIM, Mauricio. As Origens da Crise Energética Brasileira. **Ambiente & Sociedade**, n. 6/7, p. 179–183, 2000.
- BRASIL, República Federativa do. **DECRETO Nº 3.789, DE 18 DE ABRIL DE 2001**. [S.l.]: República Federativa do Brasil, 2001. p. 2. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/d3789.htm.
- _____. **DECRETO Nº 4.059, DE 19 DE DEZEMBRO DE 2001**. [S.l.]: República Federativa do Brasil, 2001. p. 3. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2001/d4059.htm.
- SHAVIV, Edna; YEZIORO, Abraham; CAPELUTO, Isaac G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. **Renewable Energy**, Pergamon, v. 24, n. 3-4, p. 445–452, nov. 2001. ISSN 0960-1481. DOI: 10.1016/S0960-1481(01)00027-1. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148101000271>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2003. p. 66.
- LAMBERTS, Roberto; GHISI, Enedir; RAMOS, Greici. **Impactos da Adequação Climática Sobre a Eficiência Energética e o Conforto Térmico de Edifícios de Escritórios no Brasil**. Florianópolis, 2006. p. 56.
- TORCELLINI, P; PLESS, S; DERU, M et al. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. **ACEEE Summer Study Pacific Grove**, August, p. 15, 2006. ISSN 14710846. DOI: 10.1016/S1471-0846(02)80045-2. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>.
- CARLO, Joyce Correna. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais**. 2008. f. 215. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- AMARANTE, Odilon A. Camargo do. **Atlas eólico : Espírito Santo / Odilon A. Camargo do Amarante, Fabiano de Jesus Lima da Silva, Paulo Emiliano Piá de Andrade**. v. 1. Vitória, ES, 2009. p. 100. ISBN 978-85-67342-00-9.
- CRAWLEY, Drury; PLESS, Shanti; TORCELLINI, Shanti. Getting to Net Zero Energy Buildings. **AHSRAE Journal**, September, 2009. Disponível em: http://www.google.com/url?sa=t&source=web&dct=res&q=%Dcd=2&url=http://www.stanford.edu/group/peec/cgi-bin/docs/home/events/2009/public%5C_7Ddiscussions/presentation%5C_7DSelkowitz.pdf%5C&%7Dei=D1JGSvimPIHaNaCF3aIB%7B%5C&%7Dusg=AFQjCNGQgaTzt2zJXfRxbcdGcd21E-J6WQ.
- ABRAMOVAY, Ricardo. Desenvolvimento sustentável: Qual a estratégia para o Brasil? **Novos Estudos - CEBRAP**, n. 87, p. 97–113, 2010.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **90.1 User's Manual: ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2010 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. 5a. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and AirConditioning Engineers, Inc., 2010. p. 469.

- LIU, Xiaobing; HONG, Tianzhen. Comparison of energy efficiency between variable refrigerant flow systems and ground source heat pump systems. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 5, p. 584–589, mai. 2010. ISSN 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.10.028.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al. **Advanced Energy Design Guide for Small Office Buildings: Achieving 30% Energy Savings Toward a Net Zero Energy Building**. 3^a ed. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating e Air-Conditioning Engineers, 2011. p. 106. ISBN 9781931862554. Disponível em: www.ashrae.org.
- KURNITSKI, Jarek; ALLARD, Francis et al. **How to define nearly net zero energy buildings nZEB-REHVA proposal for uniformed national implementation of EPBD recast**. [S.l.], 2011.
- KURNITSKI, Jarek; SAARI, Arto et al. Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. **Energy and Buildings**, Elsevier B.V., v. 43, n. 11, p. 3279–3288, 2011. ISSN 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.08.033. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.033>.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE. **Achieving the 30% Goal Energy and Cost Savings Analysis of ASHRAE Standard 90-1-2010**. Washington, 2011. p. 370.
- BERNABÉ, Ana Carolina Alves. **A influência da envoltória no Consumo Energético em Edifícios Artificialmente Climatizados na Cidade de Vitória ES**. 2012. f. 132. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Espírito Santo.
- CRONEMBERGER, Joara; CAAMAÑO-MARTÍN, Estefanía; SÁNCHEZ, Sergio Vega. Assessing the solar irradiation potential for solar photovoltaic applications in buildings at low latitudes – Making the case for Brazil. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 55, p. 264–272, dez. 2012. ISSN 0378-7788. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2012.08.044. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004483>.
- HENSEN, Jan L.M.; LAMBERTS, Roberto. **Building performance simulation for design and operation**. [S.l.]: Taylor e Francis, jan. 2012. v. 9780203891612, p. 1–512. ISBN 9780203891612. DOI: 10.4324/9780203891612.
- LEME, Alessandro Andre. State and Electricity Sector in Brazil: Privatization and Reform in Perspective. **International Journal of Social Science Tomorrow**, v. 1, n. 2, p. 1–8, 2012.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA - PMV. **Evolução das Atividades Econômicas por Setor Econômico e Porte Empresarial - 2007 a 2012**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1. Disponível em: http://legado.vitoria.es.gov.br/regionais/economia%7B%5C_%7Dfinancas/ativ%7B%5C_%7Dtabelas/porto%7B%5C_%7Dempr/tab1.asp. Acesso em: 17 out. 2018.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE. **How-To Guide for Energy-Performance-Based Procurement: An Integrated Approach for Whole Building High Performance Specifications in Commercial Buildings**. Washington - DC, 2012. p. 80.

AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DE ENERGIA DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO - ASPE. **Energia Solar no Espírito Santo - Tecnologias, Aplicações e Oportunidades**. Vitória, 2013. p. 120.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho - Parte 1: Interior**. [S.l.]: ABNT, 2013. p. 54. DOI: 978-85-07-04141-2. Disponível em: www.abnt.org.br.

CAÇADOR, Savio; GRASSI, Robson. A situação da economia do Espírito Santo no início do século XXI: um estado desenvolvido e periférico? **Geografares**, v. 14, p. 107–132, 2013. DOI: 10.7147/geo14.4105. Disponível em:

<https://ren.emnuvens.com.br/ren/article/download/368/316>.

RAMOS, Greici et al. **Relatório técnico do método de avaliação do sistema de iluminação do RTQ-C**. Florianópolis, 2013. p. 19.

ABRAMOVAY, Ricardo. Innovations to democratize energy access without boosting emissions. **Ambiente e Sociedade**, v. XVII, n. 3, p. 1–18, 2014. Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31732525002>.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al. **Advance Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings: Achieving 50% Energy Savings Toward a Net Zero Energy Building**. 3^a ed. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating e Air-Conditioning Engineers, Inc., 2014. p. 236. ISBN 978-1-936504-05-3. Disponível em: www.ashrae.org.

DIDONÉ, Evelise Leite. **Parametric study for net zero energy building strategies in Brazil considering semi-transparent PV windows**. 2014. f. 230. Tese (Doutorado) – Karlsruhe Institute of Technology – KIT.

DIDONÉ, Evelise Leite; WAGNER, Andreas; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 3, p. 27–42, 2014. ISSN 1678-8621. DOI: 10.1590/S1678-86212014000300003.

DOMINGOS, Lucas et al. Definição de uma classificação climática para o estudo de edificações com balanço anual zero de energia no Brasil. n. 1, p. 213–222, 2014. DOI: 10.17012/entac2014.143. Disponível em:

http://www.infohab.org.br/entac2014/artigos/paper%7B%5C_%7D143.pdf.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **IEA SHC Task 40 / EBC Annex 52 Towards Net Zero Energy Solar Buildings: A review of 30 Net ZEBs case studies**. Le Tampon, 2014. p. 130. Disponível em:

<http://www.enob.info/en/net-zero-energy-buildings/map/>.

PIKAS, E.; THALFELDT, M.; KURNITSKI, J. Cost optimal and nearly zero energy building solutions for office buildings. **Energy and Buildings**, v. 74, p. 30–42, mai. 2014. ISSN 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.01.039.

TEKE, Ahmet; TIMUR, Oğuzhan. **Assessing the energy efficiency improvement potentials of HVAC systems considering economic and environmental aspects at the hospitals**. v. 33. [S.l.]: Elsevier Ltd, 2014. p. 224–235. DOI: 10.1016/j.rser.2014.02.002.

- WANG, Shaojie. Energy modeling of ground source heat pump vs. variable refrigerant flow systems in representative US climate zones. **Energy and Buildings**, v. 72, p. 222–228, abr. 2014. ISSN 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.12.017.
- ZHANG, Rongpeng et al. Dynamic optimization based integrated operation strategy design for passive cooling ventilation and active building air conditioning. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 85, p. 126–135, dez. 2014. ISSN 0378-7788. DOI: 10.1016/J.ENBUILD.2014.09.032. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814007257>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687, DE 24 DE NOVEMBRO DE 2015**. [S.l.]: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2015. p. 25. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>.
- ATHIENITIS, Andreas; O'BRIEN, William. **Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings**. Edição: Andreas Athienitis e William O'Brien. 1^a ed. Berlin: The Deutsche Nationalbibliothek, 2015. p. 375. ISBN 9783433030400.
- CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – CB3E; ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO – ABVIDRO. **CATÁLOGO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS E ÓTICAS DE VIDROS COMERCIALIZADOS NO BRASIL**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2015. p. 7. Disponível em: <http://www.cb3e.ufsc.brhttp://www.eletrobras.gov.br/procelhttp://www.eletrobras.gov.brhttp://www.inmetro.gov.br>.
- CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS. **Desempenho energético operacional em edificações - Relatório final: Benchmarking de escritórios corporativos e recomendações para certificação DEO no Brasil**. São Paulo, 2015. p. 110.
- TORCELLINI, Paul; PLESS, Shanti; LEACH, Matt. A pathway for net-zero energy buildings: Creating a case for zero cost increase. **Building Research and Information**, 2015. ISSN 14664321. DOI: 10.1080/09613218.2014.960783.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY - USDOE. **A Common Definition for Zero Energy Buildings**. Washington, DC, 2015. p. 22.
- _____. **Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2011**. Washington, D.C., 2015. p. 58. Disponível em: www.gard.com.
- CAO, Xiaodong; DAI, Xilei; LIU, Junjie. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. **Energy and Buildings**, Elsevier B.V., v. 128, p. 198–213, 2016. ISSN 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.089. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.089>.
- CONEJERO, Maria Carolina; CALIA, Rogério Cerávolo; SAUAIA, Antonio Carlos Aidar. **REDES DE INOVAÇÃO E A DIFUSÃO DA TECNOLOGIA SOLAR NO BRASIL. RAI - Revista de Administração e Inovação**, Universidade de São Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP, v. 12, n. 2, p. 90, out. 2016. DOI: 10.11606/rai.v12i2.100334.

- FONSECA, Raphaela Walger da et al. **Avaliação do desempenho termoenergético de modelos de referência de escritórios elaborados com base em levantamento de características construtivas nacionais**. São Paulo, 2016. p. 1853–1866. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/308698471>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **Manual para Aplicação do RTQ-C**. 4ª. Florianópolis: Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3e-UFSC, 2016. p. 213.
- NAVARRO, Lidia et al. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. active storage systems. **Renewable Energy**, v. 88, p. 526–547, 2016. ISSN 09601481. DOI: 10.1016/j.renene.2015.11.040. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115304584>.
- NOGUCHI, Masa. **ZEMCH: Toward the Delivery of Zero Energy Mass Custom Homes**. Edição: Masa Noguchi. Melbourne, Austrália: Springer International Publishing, 2016. p. 1–364. ISBN 9780739124376.
- RUPP, Ricardo Forgiarini et al. Conforto térmico humano em escritórios com sistema central de condicionamento artificial em clima subtropical úmido: estudos de campo vs. abordagem analítica. **Ambiente Construído**, FapUNIFESP (SciELO), v. 17, n. 1, p. 111–123, nov. 2016. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100127.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 67. DOI: 1041-2336.
- _____. **ASHRAE Handbook - Fundamentals**. 2017. ed. Georgia, Estados Unidos: ASHRAE, 2017. p. 1013. ISBN 6785392187.
- COSTA, Joao; OLIVEIRA, Natalia; AMORIM, Claudia. **Morphological characteristics and energy consumption of office buildings in the central area of Brasilia**. Edinburgo, 2017. p. 1111–1118. Disponível em: <https://plea2017.net/%7B%5C%7Dprogrammes-container>.
- DALBEM, Renata et al. Discussão do desempenho da envoltória de uma passive house adaptada à zona bioclimática 2 em acordo com o RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 201–222, 2017. ISSN 1678-8621. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100132. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci%7B%5C_%7Darttext%7B%5C%7Dpid=S1678-86212017000100201%7B%5C%7Dlng=pt%7B%5C%7Dtlng=pt.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**. [S.I.], 2017. p. 232. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/%20topico-168/Anuario2017vf.pdf>.
- _____. **Plano Decenal de Expansão de Energia**. Brasília, Distrito Federal, 2017. p. 345. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2027>.
- ENERGIAS DE PORTUGAL - EDP. **Living Energy Book by EDP: Relatório Anual 2017**. Vitória, 2017. p. 196. Disponível em: http://www.edp.com.br/conheca-edp/relatorios/Documents/RA%7B%5C_%7D2017%7B%5C_%7DVf.pdf.
- PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2a. São José dos Campos: INPE, 2017. p. 88. ISBN 978-85-17-00089-8.

- PIKAS, Ergo; KURNITSKI, Jarek et al. Cost-benefit analysis of nZEB energy efficiency strategies with on-site photovoltaic generation. **Energy**, Elsevier Ltd, v. 128, p. 291–301, 2017. ISSN 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2017.03.158. Disponível em: [ihttp://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.158](http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.158).
- PINTO, Lucía Iracema Chipponelli; MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno. O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 6, p. 1082–1100, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2064>. Disponível em: [ihttps://doi.org/10.4136/ambi-agua.2064](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2064).
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESPÍRITO SANTO - SINDUSCON. **32º Censo Imobiliário**. v. 1. Vitória, ES: [s.n.], 2017. p. 37. Disponível em: [ihttp://sinduscon-es.com.br/v2/upload/572018171542%7B%5C_%7DApresentacao%7B%5C_%7DCenso%7B%5C_%7DJULHO%7B%5C_%7D2017.pdf](http://sinduscon-es.com.br/v2/upload/572018171542%7B%5C_%7DApresentacao%7B%5C_%7DCenso%7B%5C_%7DJULHO%7B%5C_%7D2017.pdf).
- UNITED NATIONS. New Urban Agenda. In: UNITED Nations Conference on Housing and Sustainable Urban Development (Habitat III). Quito, Ecuador: Habitat III Secretariat, 2017. p. 66. ISBN 978-92-1-132731-1. DOI: ISBN:978-92-1-132757-1.
- VELOSO, Ana Carolina De Oliveira. **Avaliação do Consumo de Energia Elétrica de Edificações de Escritório e sua Correlação com as Decisões de Projeto**. 2017. f. 125. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: [ihttp://hdl.handle.net/1843/BUOS-ASFEMQ](http://hdl.handle.net/1843/BUOS-ASFEMQ).
- WERNECK, Daniela et al. Studies on energy performance utilizing computer simulations towards a ZEB building: a case study in Chico Mendes Institute in Brasilia. In: PASSIVE and Low Energy Architecture 2017 - Design to Thrive. Edinburgo: [s.n.], 2017. p. 2720–2727.
- AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP. **Balanço Energético do Espírito Santo**. Vitória, 2018. p. 75.
- BANCO MUNDIAL. **Relatório Anual 2018 do Banco Mundial**. Washington, DC, 2018. p. 97. DOI: 10.1596/978-1-4648-1310-8.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017 - Relatório síntese**. Rio de Janeiro, 2018. p. 62.
- GUO, Yabin et al. Deep learning-based fault diagnosis of variable refrigerant flow air-conditioning system for building energy saving. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 225, p. 732–745, set. 2018. ISSN 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.075.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOREOLOGIA - INMET. **Arquivo climático de Vitória**. Brasília: Instituto Nacional de Metereologia, 2018. p. 1. Disponível em: [ihttp://climate.onebuilding.org/WMO%7B%5C_%7DRegion%7B%5C_%7D3%7B%5C_%7DSouth%7B%5C_%7DAmerica/BRA%7B%5C_%7DBrazil/ES%7B%5C_%7DEspirito%7B%5C_%7DSanto/BRA%7B%5C_%7DES%7B%5C_%7DVitoria.868300%7B%5C_%7DINMET.zip](http://climate.onebuilding.org/WMO%7B%5C_%7DRegion%7B%5C_%7D3%7B%5C_%7DSouth%7B%5C_%7DAmerica/BRA%7B%5C_%7DBrazil/ES%7B%5C_%7DEspirito%7B%5C_%7DSanto/BRA%7B%5C_%7DES%7B%5C_%7DVitoria.868300%7B%5C_%7DINMET.zip).
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL - INMETRO. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - CONDICIONADORES DE AR SPLIT HI-WALL COM ROTAÇÃO FIXA**. Brasília, 2018. p. 29. Disponível em: [iwww.eletrobras.com/procel.c](http://www.eletrobras.com/procel.c).
- _____. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas**. [S.l.]: Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial, 2018. p. 122.

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Energy efficiency 2018: Analysis and outlooks to 2040**. Paris, France, 2018. p. 1–174. Disponível em: [iwww.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm](http://www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm).
- _____. **World Energy Outlook 2018**. France: IEA Publications, 2018. p. 661. ISBN 9789264306776. Disponível em: [iwww.iea.org/weo](http://www.iea.org/weo).
- INTERNATIONAL MONETARY FUND - IMF. **World Economic Outlook: Cyclical Upswing, Structural Change**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 302. ISBN 978-1-48434-971-7. Disponível em: [ihttps://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2009/01/pdf/text.pdf](http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2009/01/pdf/text.pdf).
- PREFEITURA MUNICIPAL DE VITÓRIA - PMV. **PDU - Plano Diretor Urbano**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1. Disponível em: [ihttps://www.vitoria.es.gov.br/prefeitura/plano-diretor-urbano](http://www.vitoria.es.gov.br/prefeitura/plano-diretor-urbano). Acesso em: 31 dez. 2019.
- SCHULZE, Tobias; GÜRLICH, Daniel; EICKER, Ursula. Performance assessment of controlled natural ventilation for air quality control and passive cooling in existing and new office type buildings. **Energy and Buildings**, v. 172, n. 1, p. 265–278, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.023>. Disponível em: [ihttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818307400](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818307400).
- SORGATO, M. J.; SCHNEIDER, K.; RÜTHER, R. Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate. **Renewable Energy**, Elsevier Ltd, v. 118, p. 84–98, abr. 2018. ISSN 18790682. DOI: [10.1016/j.renene.2017.10.091](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.091).
- AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP. **Informações Energéticas do Estado do Espírito Santo**. Vitória, 2019. p. 40.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE; THE AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS - AIA et al. **Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings: achieving zero energy**. 1^a ed. Washington: ASHRAE, 2019. p. 240. ISBN 9781947192232. Disponível em: [iwww.ashrae.org](http://www.ashrae.org).
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço Energético Nacional 2019: Ano base 2018**. Rio de Janeiro, 2019. p. 303. DOI: [620.9:553.04\(81\)](https://doi.org/10.21449/620.9.553.04(81)).
- _____. **Status e benefícios da eficiência energética: perspectivas brasileiras e globais**. Brasília, 2019. p. 55.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Panorama de Vitória**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1. Disponível em: [ihttps://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/vitoria/panorama](http://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/vitoria/panorama). Acesso em: 17 jan. 2019.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Electricity Information - Overview**. Paris, 2019. p. 10.
- _____. **Energy Efficiency Market Report 2019**. Rio de Janeiro, 2019. p. 22.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA; UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **2019 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector**. Paris, 2019. p. 41. ISBN 9789280737684. Disponível em: [iwww.iea.org](http://www.iea.org).

KAMAL, Rajeev et al. Strategic control and cost optimization of thermal energy storage in buildings using EnergyPlus. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 246, p. 77–90, jul. 2019. ISSN 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.017.

SHIN, Minjae et al. Evaluation of the energy performance of a net zero energy building in a hot and humid climate. **Energy and Buildings**, Elsevier Ltd, v. 204, dez. 2019. ISSN 03787788. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109531.

SUDHAKAR, K.; WINDERL, Maximilian; PRIYA, S. Shanmuga. Net-zero building designs in hot and humid climates: A state-of-art. **Case Studies in Thermal Engineering**, Elsevier, v. 13, p. 100400, mar. 2019. ISSN 2214-157X. DOI: 10.1016/J.CSITE.2019.100400. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X18304131>.

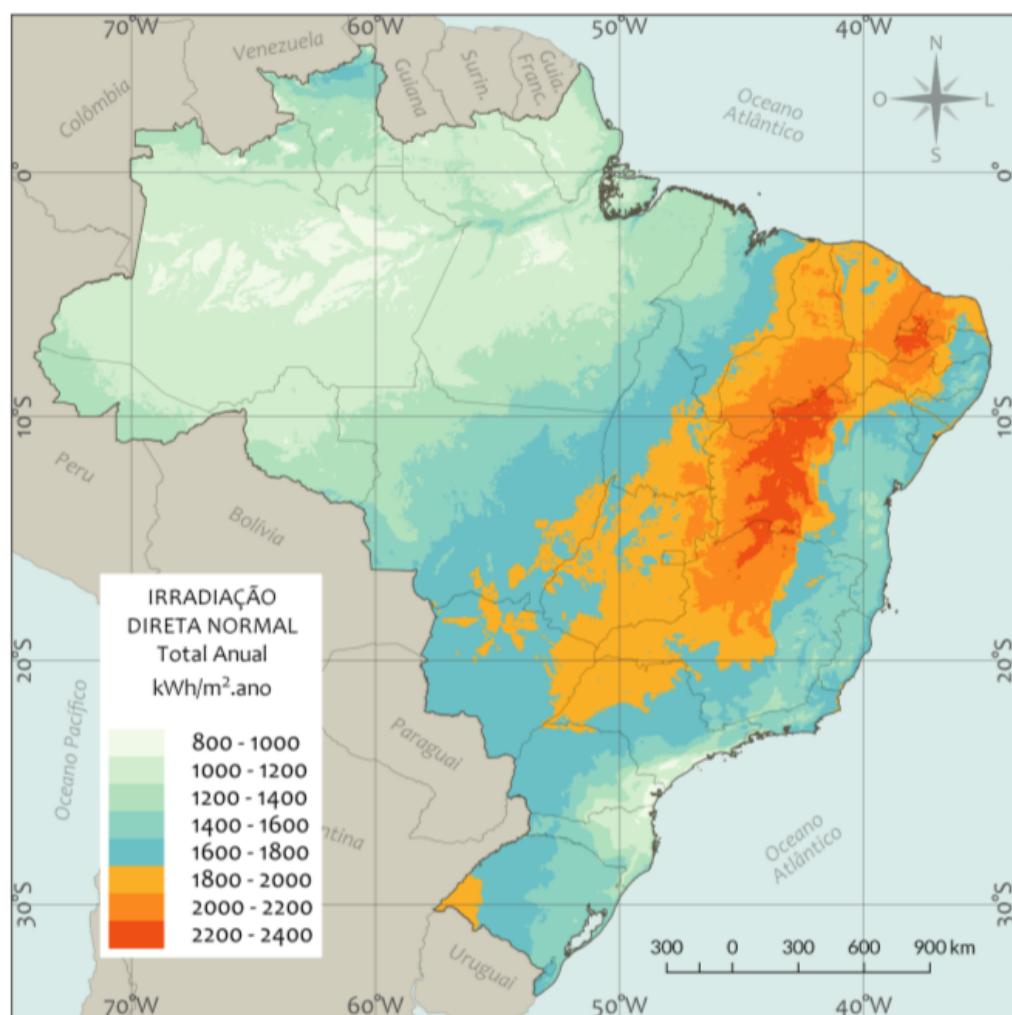
UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP. **The Renewables in Cities: 2019 Global Status Report**. Paris, 2019. p. 174. DOI: 978-3-9818911-9-5. Disponível em: www.ren21.net.

Figura 5: Rendimento solar anual brasileiro.



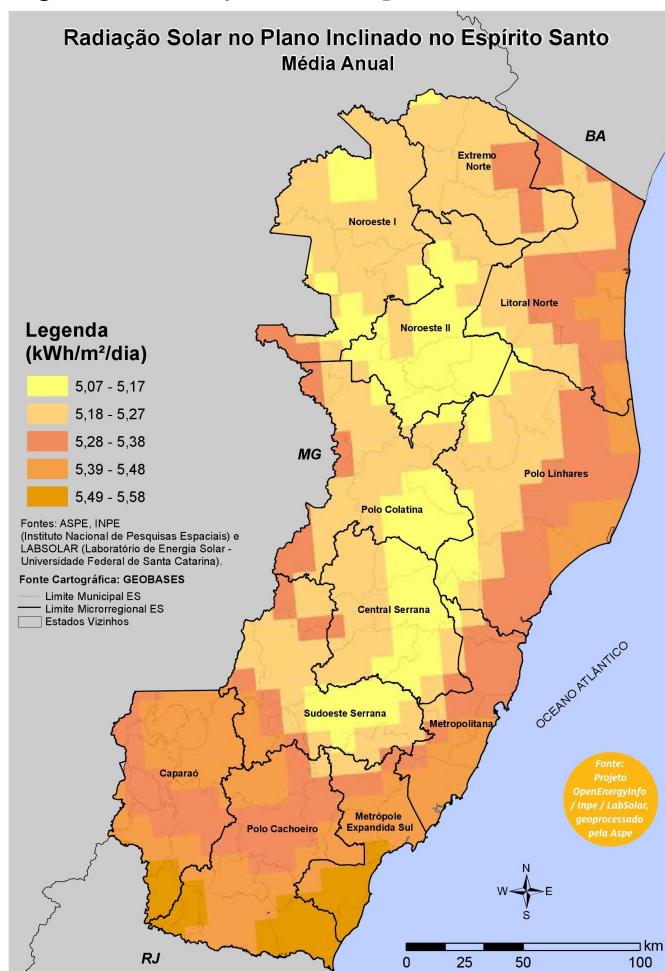
Fonte: adaptado de Pereira et al. (2017).

Figura 6: Mapa do total anual de irradiação solar direta normal.



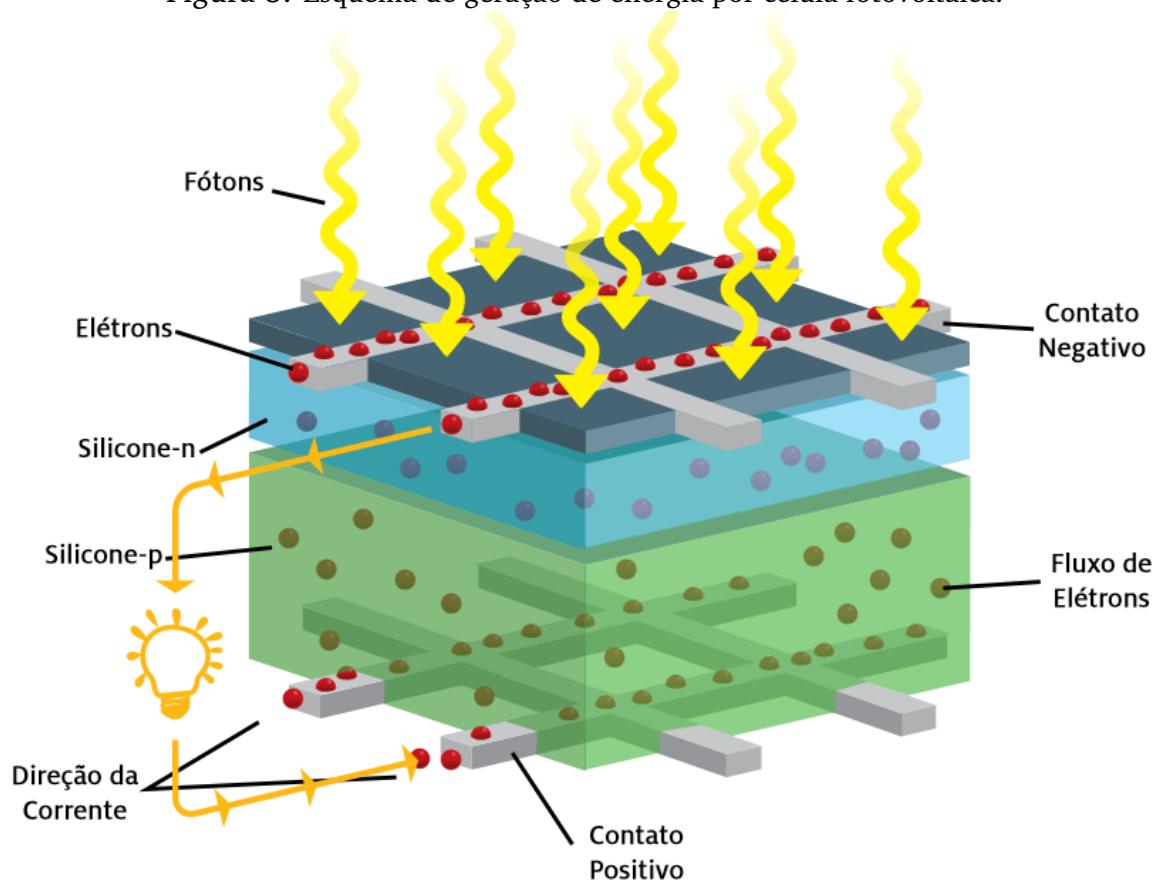
Fonte: adaptado de Pereira et al. (2017).

Figura 7: Radiação solar no plano inclinado do ES.



Fonte: adaptado de ARSP (2013).

Figura 8: Esquema de geração de energia por célula fotovoltaica.



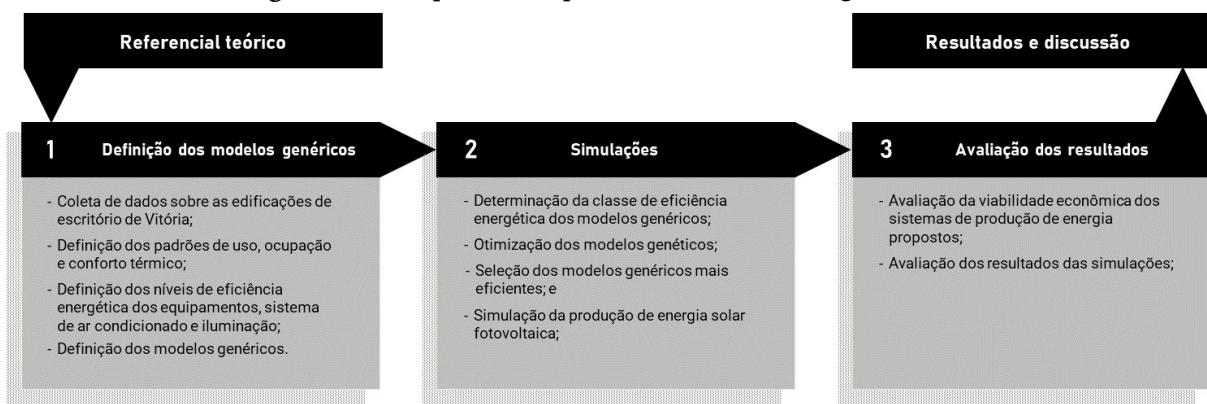
Fonte: adaptado de ARSP (2013).

Figura 9: Componentes fotovoltaicos integrados a fachada do edifício Boulder Commons, localizado em Boulder, Colorado (EUA).



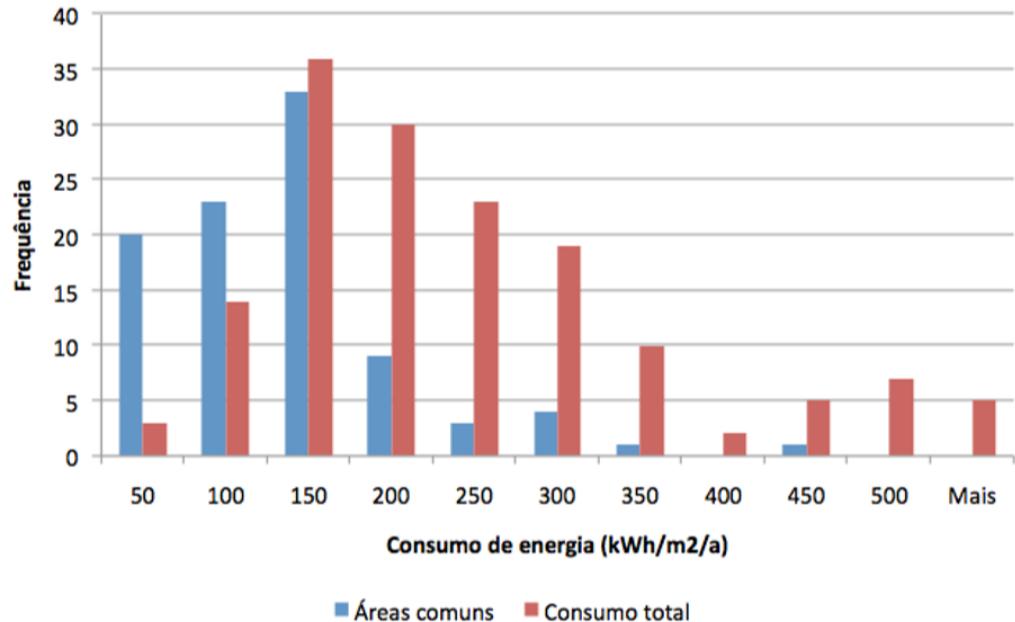
Fonte: adaptado de ASHRAE (2019).

Figura 10: Esquema simplificado da metodologia criada.



Fonte: autor (2019).

Figura 11: Consumo energético em edificações de escritório brasileiras.



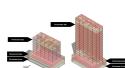
Fonte: adaptado de CBCS (2015).

Figura 12: Fatores utilizados como parâmetros de configuração volumétrica dos modelos genéricos.



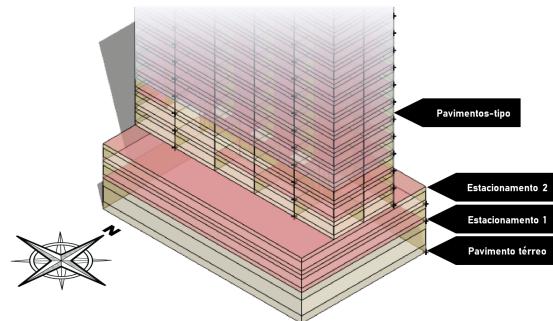
Fonte: autor (2019)

Figura 13: Estrutura arquitetônica dos modelos genéricos.



Fonte: autor (2019).

Figura 14: Conformação do pavimento térreo e estacionamentos.



Fonte: autor (2019).