



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

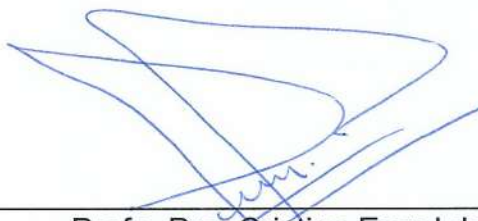
ANDERSON AZEVEDO FRAGA

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

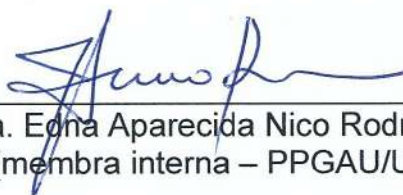
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito final para a obtenção do grau de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo.

Aprovada em 09 de março de 2020.

Comissão Examinadora



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



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



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

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

F811p Fraga, Anderson Azevedo, 1989-
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 encrências 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. Termino 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 efficientização 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

ABIVIDRO – 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. .	16
3	Oferta interna de energia elétrica no Brasil (a) e a participação setorial de consumo de eletricidade (b).	18
4	Evolução da geração de energia elétrica por fonte renovável e não-renovável no Espírito Santo.	19
5	Consumo de energia elétrica no Espírito Santo por classe.	20
6	Rendimento solar anual brasileiro.	21
7	Mapa do total anual de irradiação solar direta normal.	22
8	Radiação solar no plano inclinado do ES.	23
9	Esquema de geração de energia por célula fotovoltaica.	24
10	Componentes fotovoltaicos integrados a fachada do edifício Boulder Commons, localizado em Boulder, Colorado (EUA).	25

Lista de Gráficos

Gráfico 1

Gráfico 2

Gráfico 3

Gráfico 4

Gráfico 5

Gráfico 6

Gráfico 7

Gráfico 8

Gráfico 9

Gráfico 10

Lista de Tabelas

Sumário

1	Introdução	9
1.1	Questionamentos	11
1.2	Objetivos	11
2	Referencial Teórico	12
2.1	Introdução ao conceito <i>Zero Energy</i>	12
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	17
2.2.1	Potencial de geração de energia solar no Brasil e no Espírito Santo	20
2.2.2	Energia solar fotovoltaica	24
2.2.3	Legislação para a eficiência energética	26
2.3	Conceitos para a avaliação termoenergética	27
2.3.1	Parâmetros de conforto térmico	28
3	Metodologia	28

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 termoe-nergético, 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 concessionária, 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 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 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.

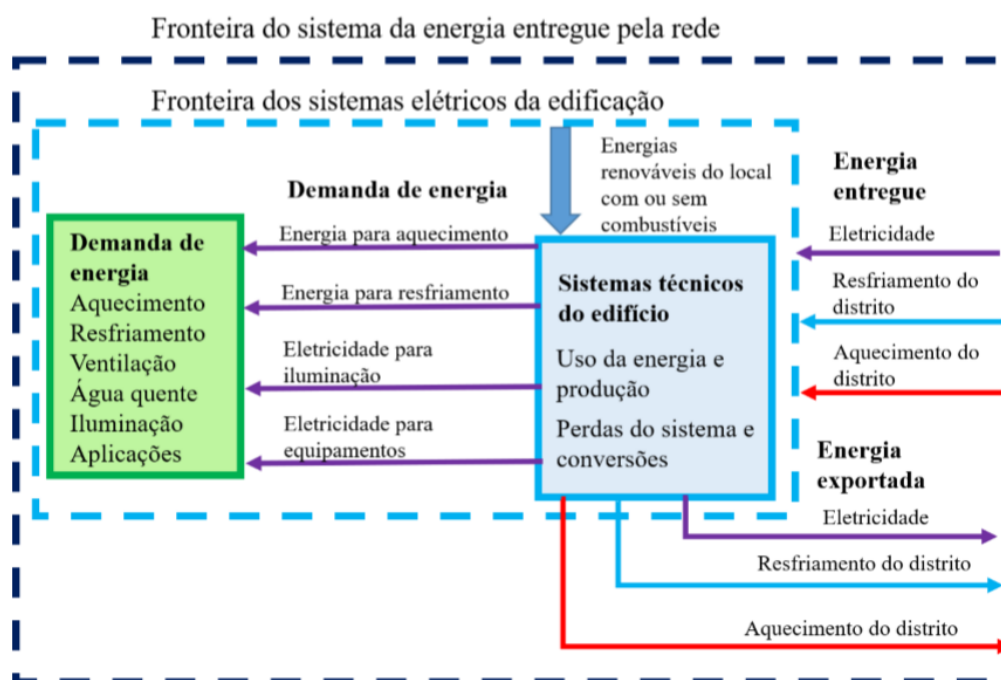
2.1.2 Métrica para balanço energético nulo

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 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.

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



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

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 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.

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



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

2.2 Cenários energéticos e a matriz elétrica brasileira

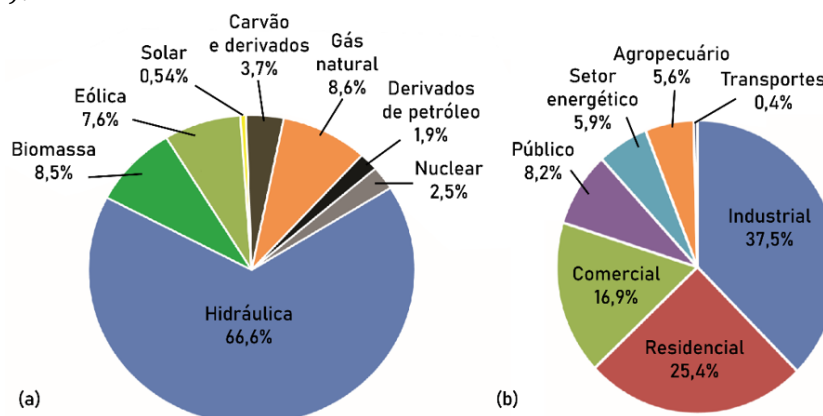
O cenário energético mundial vem apresentando progressos quanto ao desenvolvimento da eficiência energética e da busca de fontes limpas e renováveis de energia. A criação de políticas de redução de consumo energético, assim como a promoção de congressos, eventos e demais incentivos à pesquisa e desenvolvimento 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. Constata-se, ainda, que o consumo de energia poderia ter sido 12% maior em 2017 caso 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).

Figura 3: 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 3. 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

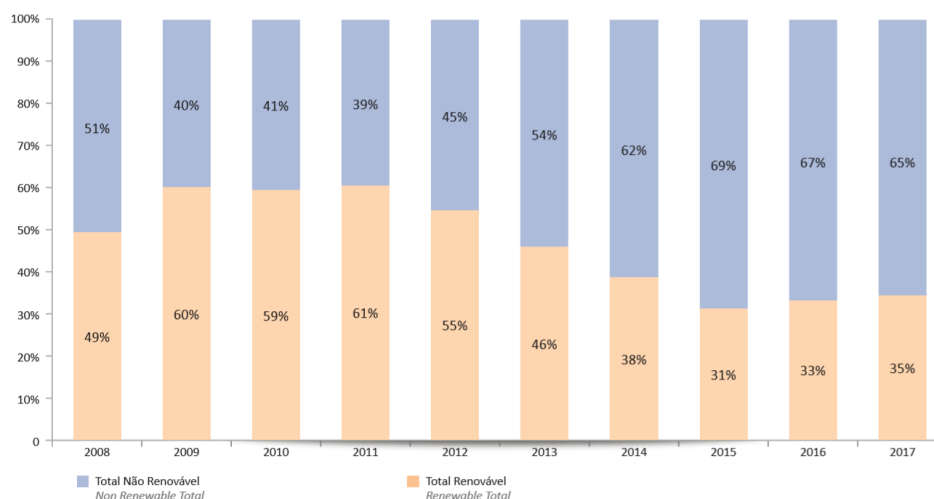
de energia elétrica serve como importante base para a definição de medidas de produção de energia, assim como para o balanço energético das edificações. Este mapeamento de fontes energéticas indica a potencialidade de geração de energia descentralizada, reforçado pelo crescimento no número de geradoras 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 4: Evolução da geração de energia elétrica por fonte renovável e não-renovável no Espírito Santo.

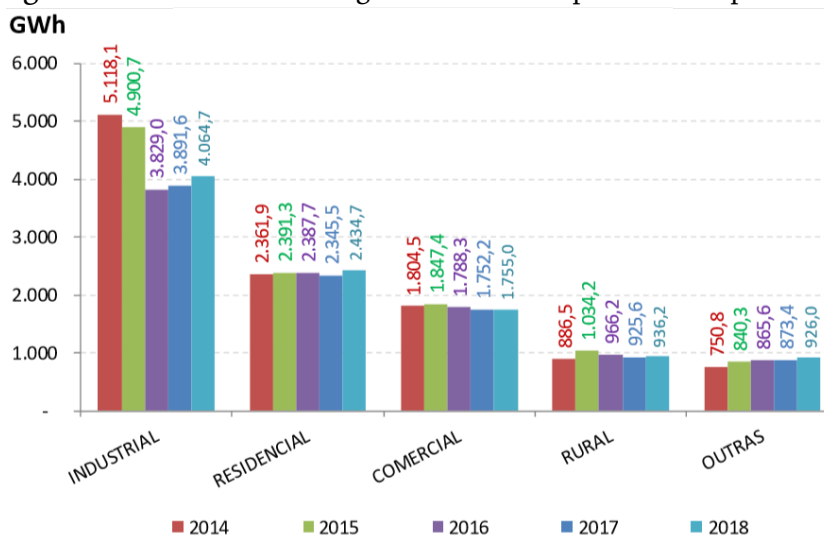


Fonte: adaptado de ARSP (2018).

O Espírito Santo conta ainda com a 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 5: 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 6.

Figura 6: Rendimento solar anual brasileiro.



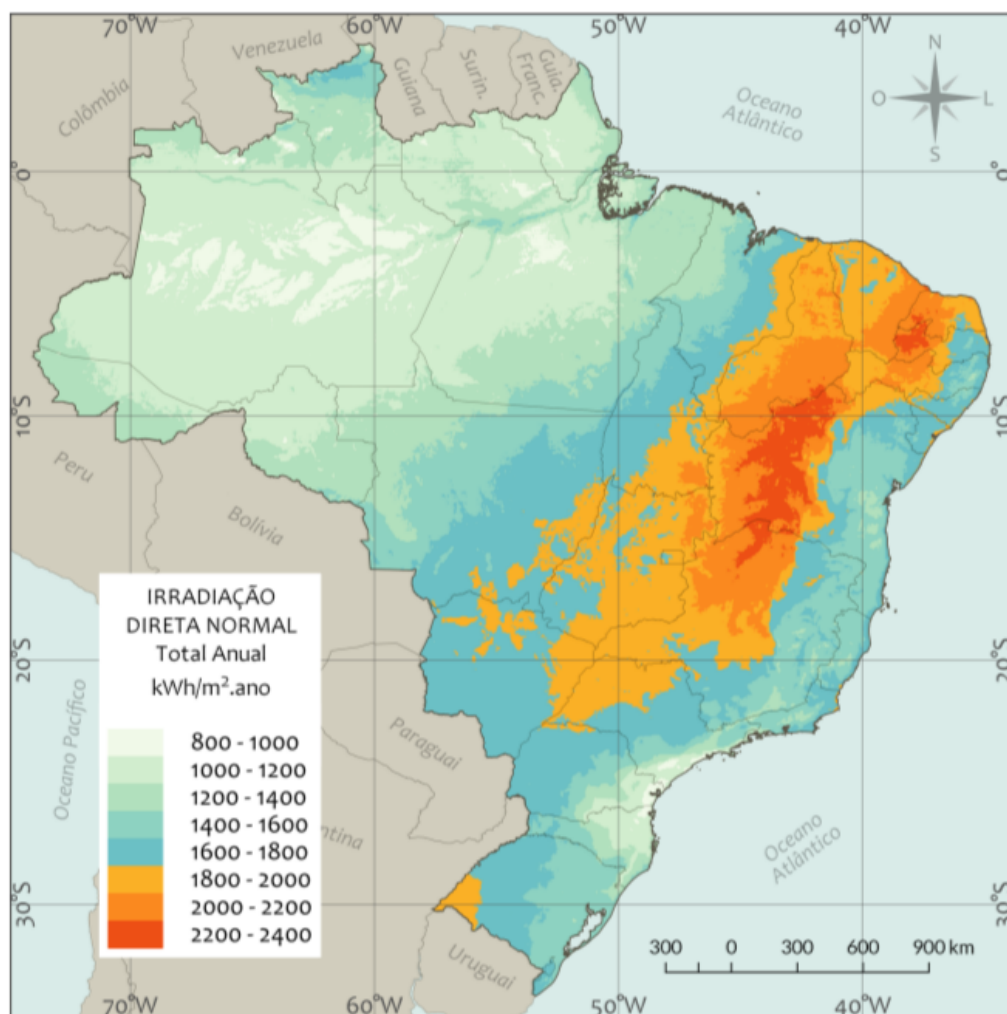
Fonte: adaptado de Pereira et al. (2017).

Os resultados de Cronemberger, Caamaño-Martín e Sánchez (2012), após a conclusão do estudo em 78 cidade 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 7, 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.

Figura 7: Mapa do total anual de irradiação solar direta normal.



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

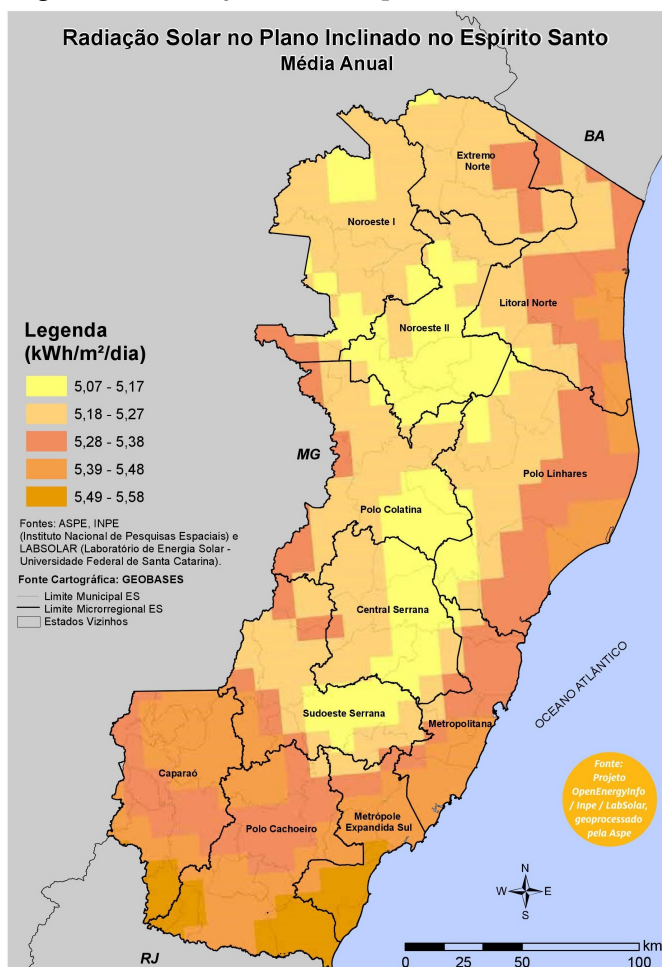
Outro ponto importante no estudo de Pereira et al. (2017) foi a constatação de que a geração máxima nos estados da região Sudeste, nos meses de verão, coincide com os

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 8. 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).

Figura 8: Radiação solar no plano inclinado do ES.



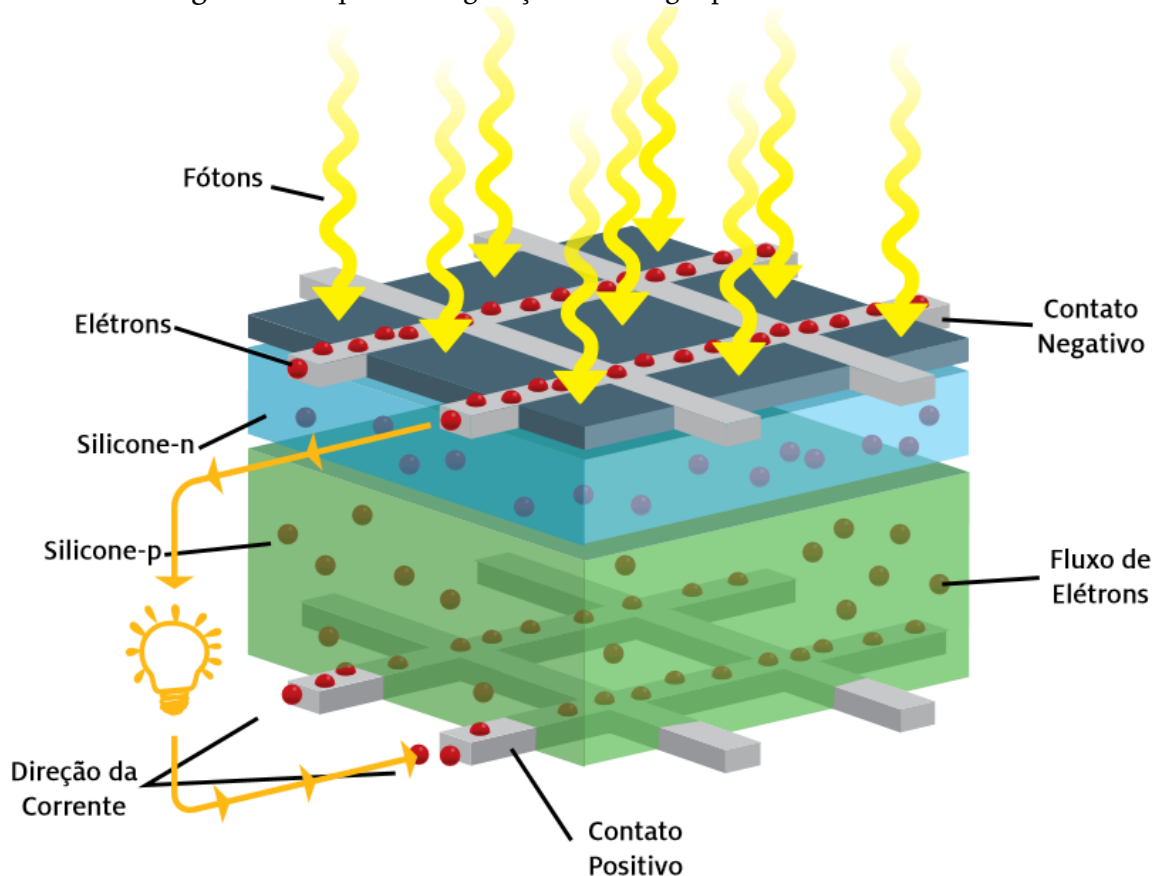
Fonte: adaptado de ARSP (2013).

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 9.

Figura 9: Esquema de geração de energia por célula fotovoltaica.



Fonte: adaptado de ARSP (2013).

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 et al., 2019), como apresentado pela Figura 10.

Figura 10: Componentes fotovoltaicos integrados a fachada do edifício Boulder Commons, localizado em Boulder, Colorado (EUA).



Fonte: adaptado de ASHRAE (2019).

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 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.

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..., 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..., 2018).

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..., 2018).

Dada a abrangência de cenários do regulamento e a utilização de referências como normas nacionais e internacionais para o desenvolvimento dos parâmetros de avaliação, o INI-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

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 efficientização da edificação;

Referências

- TOLMASQUIM, Mauricio. As Origens da Crise Energética Brasileira. **Ambiente & Sociedade**, n. 6/7, p. 179–183, 2000.
- 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>.
- 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&dc=2&durl=http://www.stanford.edu/group/peec/cgi-bin/docs/home/events/2009/public_%7Ddiscussions/presentation%7D_Selkowitz.pdf&de=D1JGSvimPIHaNaCF3aIB%7Dusg=AFQjCNGQgaTzt2zJXfRxbcdGcd2lE-J6WQ.
- ABRAMOVAY, Ricardo. Desenvolvimento sustentável: Qual a estratégia para o Brasil? **Novos Estudos - CEBRAP**, n. 87, p. 97–113, 2010.
- 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>.
- 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>.
- 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.
- 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.
- 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>.

- 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.
- ATHIENITIS, Andreas; O'BRIEN, William. **Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings**. Edição: Andreas Athienitis e William O'Brien. 1ª ed. Berlin: The Deutsche Nationalbibliothek, 2015. p. 375. ISBN 9783433030400.
- 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.
- 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 Sao 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>.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**. [S.l.], 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: <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: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2064>.
- UNITED NATIONS. New Urban Agenda. In: UNITED Nations Conference on Housing and Sustainable Urban Development (Habitat III). Quito, Equador: 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: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-ASFEMQ>.
- AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESPÍRITO SANTO - ARSP. **Balanco 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. **Balanco Energético Nacional 2018: Ano base 2017 - Relatório síntese**. Rio de Janeiro, 2018. p. 62.
- 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: www.eletrobras.com/procel.
- _____. **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: www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm.
- _____. **World Energy Outlook 2018**. France: IEA Publications, 2018. p. 661. ISBN 9789264306776. Disponível em: 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: <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2009/01/pdf/text.pdf>.

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.

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 et al. **Advanced Energy Design Guide for Small to Medium Office Buildings: achieving zero energy**. 1ª 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).

_____. **Status e benefícios da eficiência energética: perspectivas brasileiras e globais**. Brasília, 2019. p. 55.

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).

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:

[ihttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X18304131](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: [iwww.ren21.net](http://www.ren21.net).