



EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM PRÉDIOS
PÚBLICOS NO SETOR DE EDUCAÇÃO NO NORDESTE DO BRASIL: O CASO
DA EXPANSÃO DO IFRN

Gabriel Constantino de Lima

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Planejamento Energético.

Orientador(es): Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas
Neilton Fidelis da Silva

Rio de Janeiro
Maio de 2019

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM PRÉDIOS
PÚBLICOS NO SETOR DE EDUCAÇÃO NO NORDESTE DO BRASIL: O CASO
DA EXPANSÃO DO IFRN

Gabriel Constantino de Lima

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas, D.Sc.

Prof. Neilton Fidelis da Silva, D.Sc.

Prof. Emílio Lébrea La Rovere, D.Sc.

Prof. Ricardo Ferreira Pinheiro, D.Sc.

Dr. Márcio Gianinni Pereira, D.Sc.

Prof. Renato Samuel Barbosa de Araújo, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2019

Lima, Gabriel Constantino de

Eficiência Energética e Energia Solar Fotovoltaica em Prédios Públicos no Setor de Educação no Nordeste do Brasil: o Caso da Expansão do IFRN/ Gabriel Constantino de Lima. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XVI, 164 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas

Neilton Fidelis da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 150-162.

1. Eficiência energética. 2. Edificações públicas. 3. Avaliação de Ciclo de Vida. 4. Sistema Fotovoltaico I. Freitas, Marcos Aurélio Vasconcelos *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Aos meus pais, José e Izabel, que me incentivaram a estudar; à Luana, minha esposa, que sempre me apoia e me incentiva; ao Guilherme, meu filho, um presente recebido durante o doutorado. À minha irmã Suzana.

Agradecimentos

Agradeço àqueles que direta ou indiretamente contribuíram com fornecimento de dados, com suas opiniões, críticas e sugestões que certamente foram consideradas na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas de doutorado, em especial ao amigo André Toledo, Eduardo Janser, João Maria e José Adriano.

Lembro e agradeço aos meus colegas de profissão, colegas de sala e companheiros de jornada, Alexandre Spotti, Geraldo Bezerra e Ênio Amorim.

Aos coordenadores do DINTER, Neilton Fidelis e Renato Samuel, pela ajuda e incentivo durante todas as fases deste programa.

Agradeço ao Professor Giovani Pacheco, que foi fundamental com os ensinamentos relação a simulação energética.

Ao setor de Engenharia do IFRN, na pessoa do Eng. Franklin, que disponibilizou os dados das usinas fotovoltaicas.

Aos professores do Programa de Planejamento Energético, e aos meus orientadores Neilton Fidelis e Marcos Freitas, pela confiança e autonomia dada no decorrer deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Professor Neilton Fidelis, por sua dedicação, disponibilidade e envolvimento no desenvolvimento deste trabalho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM PRÉDIOS PÚBLICOS NO SETOR DE EDUCAÇÃO NO NORDESTE DO BRASIL: O CASO DA EXPANSÃO DO IFRN

Gabriel Constantino de Lima

Maio/2019

Orientadores: Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas

Neilton Fidelis da Silva

Programa: Planejamento Energético

O aquecimento global representa, na atualidade, um dos mais complexos problemas enfrentados pela sociedade em âmbito global. Em 2016, a geração de eletricidade e aquecimento foi a responsável pela maior parcela das emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE), com 42% do total. Esta pesquisa teve o objetivo de Avaliar a Eficiência Energética, a luz da sustentabilidade, em termos de redução de demanda de energia e adoção de Geração Distribuída (GD) e, por consequência, a mitigação de GEE, em instituições de ensino, tendo a expansão do IFRN como estudo de caso. Foi realizada uma simulação energética usando o regulamento do (RTQ-C) em uma amostra dos *campi* do IFRN. Com relação a GD, foi realizado uma Avaliação do Ciclo de Vida de 10 usinas fotovoltaicas, com 1,1 MWp instalados, e 2 anos em operação. Os *campi* foram classificados de acordo com a Etiqueta de Eficiência energética (ENCE). Nas usinas, foram calculados o *Energy PayBack Time*, a *Green House Gas Emission Rate* (GHGerate) e o *Emission PayBack Time*. Ficou demonstrado a grande influência nos resultados das características da matriz elétrica do local onde os sistemas FV foram fabricados. Foi possível constatar a redução do consumo de energia para as edificações melhor classificadas na ENCE. Nos países em que a matriz elétrica conta com grande participação de fontes renováveis, como é o caso do Brasil, o incentivo ao uso de sistemas FV fabricados em nações cuja matriz elétrica registra altos fatores de emissão, necessita ser bem avaliado quanto ao impacto nas concentrações GEE e promoção do Desenvolvimento Sustentável.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ENERGY EFFICIENCY AND PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY IN PUBLIC BUILDINGS IN THE EDUCATION SECTOR IN NORTHEAST BRAZIL: THE CASE OF IFRN EXPANSION

Gabriel Constantino de Lima

May/2019

Advisors: Marcos Aurélio Vasconcelos Freitas

Neilton Fidelis da Silva

Department: Energy Planning

The global warming is today the most complex problems facing society at a global level. In 2016, electricity and heating generation accounted for most of the global emissions of greenhouse gases (GHG), with 42% of the total. This research had the effect of an Energy Efficiency, a light of sustainability, in terms of reduced energy demand and a Distributed Generation (GD) application and, consequently, GHG mitigation, in educational institutions, having expansion of the IFRN as a case study. An energy simulation was performed in a sample of the IFRN campus, having as reference the Regulation (RTQ-C). Regarding GD, a Life Cycle Assessment of 10 photovoltaic plants was carried out, with 1.1 MWp installed, and 2 years in operation. From the energy simulation performed, the campus were classified according to the Energy Efficiency Label (ENCE). Energy Pay-Back Time, Green House Gas Emission Rate (GHGe-rate) and Emission Pay-Back Time were. It was demonstrated the great influence in the results of the electrical matrix characteristics of the place where the PV systems were manufactured. It was possible to verify the reduction of the energy consumption for the buildings better classified in ENCE. In countries where the electricity matrix has a large share of renewable sources, such as Brazil, the incentive to use PV systems manufactured in nations whose electrical matrix registers high emission factors needs to be well evaluated for the impact on concentrations GHG and the promotion of Sustainable Development.

Sumário

Introdução.....	1
1. A expansão da Rede Federal de Educação Tecnológica: Oportunidade para adoção de eficiência energética em suas edificações.....	11
1.1. Introdução.....	11
1.2. A Rede Federal de Educação Tecnológica.....	13
1.3. O Processo de Expansão da Rede Federal de Educação Tecnológica.....	15
1.4. Sustentabilidade e Eficiência Energética na Prática Pedagógica e Gestão da Rede: O Comitê Temático de Formação Profissional em Energias Renováveis e Eficiência Energética.....	20
1.5. Projeto IF Solar.....	21
1.6. Projeto IFRN Solar.....	23
2. Eficiência Energética em Edificações: Repercussões Sobre Emissões de GEE	28
2.1. Introdução.....	28
2.2. Motivadores para Promoção da Eficiência Energética em Edificações.....	29
2.3. Emissões.....	36
2.4. Emissões nas Edificações.....	43
2.5. Emissões na Geração de Energia Elétrica.....	43
2.6. Energia Elétrica e Edificações.....	49
2.7. Eficiência Energética e Desempenho das Edificações.....	53
2.8. Certificações de Edificações Sustentáveis (A experiência Internacional).....	55
2.9. Políticas e Medidas de Eficiência Energética no Brasil.....	60
2.9.1. PBE Edifica.....	62
2.9.2. Estudos de Eficiência Energética em Edificações.....	65
3. Simulação Energética em Edificações como Ferramenta de Apoio a Certificação: Estudo de Caso para os <i>campi</i> do IFRN.....	68
3.1. Introdução.....	68
3.2. Metodologia da Simulação Energética em Edificações.....	68
3.3. Resultados e Análises.....	74
3.3.1. IFRN - Campus Natal Central.....	74
3.3.2. IFRN - Campus Caicó.....	87
3.3.3. Análise das Emissões de GEE com a Bonificação pelo Uso de Fotovoltaicas no Campus CNAT e no Campus Caicó.....	99
4. GD a Partir de Usinas Solares Fotovoltaicas e Seus Aportes às Emissões de GEE – Avaliação do Projeto IFRN Solar.....	102
4.1. Introdução.....	102
4.2. Energia Solar.....	104

4.3. Ciclo de Vida das Usinas Solares	108
4.3.1. Inventário de Material e Energia dos Sistemas Fotovoltaicos.....	110
4.3.2. Inventário de Carbono	114
4.4. Geração Solar Fotovoltaica em Edificações no Nordeste do Brasil.	115
4.5. Potencial Solar Brasileiro	115
4.6. Usinas Fotovoltaicas nas Unidades do IFRN	117
4.7. Metodologia do Estudo de Avaliação de Ciclo de Vida em Usinas Fotovoltaicas	129
4.7.1. Fronteiras do Sistema (<i>System boundaries</i>).....	129
4.7.2. Balanço do Sistema (<i>EPBT and GHG emission rate of PV systems</i>).....	129
4.8. Resultados do Estudo de LCA.....	131
4.8.1. Tempo de Retorno da Energia (<i>Energy Payback Time – EPBT</i>)	131
4.6.2. Taxa de Emissão e Tempo de Retorno das Emissões (<i>GHGe-rate e Payback time emissiom</i>)	132
4.6.3. Discussão dos Resultados do Estudo de LCA	133
4.6.4. Outro Cenário Analisado – Simulação das Usinas Fotovoltaicas Instaladas em um Único Local	139
5. Conclusões e Recomendações	143
Referências	150
Anexos	163

Índice de Figuras

Figura 1- Estimativa do potencial econômico setorial de mitigação global para diferentes regiões, em função do preço do carbono em 2030.	4
Figura 2- Expansão da rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica. Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (MEC, 2019)	17
Figura 3- Distribuição geográfica da Rede Federal Tecnológica	18
Figura 4- Expansão do IFRN	19
Figura 5- Evolução da capacidade instalada das usinas fotovoltaicas no IFRN (MWp)	26
Figura 6- Representatividade que a geração de cada usina fotovoltaica tem em média no consumo total de cada <i>campi</i>	26
Figura 7- Emissões de GEE por gás	32
Figura 8- Emissão de GEE por setor em 2016	38
Figura 9- Emissões líquidas brasileiras de GEE no período 1990-2015 em CO ₂ eq (Tg=milhões de toneladas)	39
Figura 10- Comparativo de representatividade das emissões líquidas de GEE por setor no período 2005-2015 em CO ₂ eq.	41
Figura 11 - Estimativas de emissões, até 2015 e limite de emissões em 2020 para o setor de energia.....	42
Figura 12- Emissões do Rio Grande do Norte por setor.....	42
Figura 13- Geração de energia elétrica mundial por fonte	44
Figura 14- Geração de energia elétrica no Brasil - Participação em 2017	45
Figura 15- Evolução da capacidade instalada por fonte de geração no Brasil	45
Figura 16- Fatores de emissões de eletricidade por combustível (g CO _{2e} /kWh)	46
Figura 17- Fator de emissão na eletricidade	47
Figura 18- Fatores de emissão em tCO _{2e} /GWh na eletricidade no Brasil (2006-2018)	48
Figura 19- Ciclo de vida das edificações	50
Figura 20- Energia no ciclo de vida das edificações	51
Figura 21- Evolução do consumo de energia elétrica (GWh) no Brasil no período de 2004 a 2017	52
Figura 22- Demanda de eletricidade e fontes de atendimento à demanda de energia	53
Figura 23- Histórico da política de eficiência energética no Brasil	61
Figura 24- Resumo do método prescritivo e de simulação	64
Figura 25- Zoneamento bioclimático brasileiro	70
Figura 26 - Distribuição geográfica dos <i>campi</i> do IFRN	70
Figura 27- Modelo do CNAT na tela do <i>DesignBuilder</i>	75
Figura 28- Distribuição das zonas térmicas do Bloco A do IFRN Campus CNAT	75
Figura 29- Distribuição das zonas térmicas do Bloco B do IFRN Campus CNAT	75

Figura 30- Distribuição das zonas térmicas do Bloco C do IFRN Campus CNAT	76
Figura 31- Ganhos internos Bloco A do campus CNAT (Caso Real).....	77
Figura 32- Ganhos internos Bloco A do campus CNAT (Nível A)	78
Figura 33- Ganhos internos Bloco A do campus CNAT (Nível B).....	78
Figura 34- Ganhos internos Bloco A do campus CNAT (Nível C).....	78
Figura 35- Consumo de energia do CNAT.....	80
Figura 36- Comparativo do consumo de energia simulados para o caso real e para os Nível A, Nível B e Nível C	81
Figura 37- Vista do CNAT original com percurso solar	83
Figura 38- Tipo de considerada no caso real da edificação CNAT	84
Figura 39- Tipo de Laje considerada no caso 2 e 4 do CNAT	84
Figura 40- Comparativo do consumo de cada caso simulado para o CNAT	85
Figura 41- Comparativo de emissões de GEE para cada caso simulado do CNAT	86
Figura 42- Modelo do IFRN Caicó na <i>tela</i> do <i>Designbuilder</i>	87
Figura 43- Zonas térmicas do IFRN Caicó.....	88
Figura 44- Ganhos internos bloco principal do campus Caicó (Caso Real).....	89
Figura 45- Ganhos internos bloco principal do campus Caicó (Nível A)	90
Figura 46- Ganhos internos bloco principal do campus Caicó (Nível B)	90
Figura 47- Ganhos internos bloco principal do campus Caicó (Nível C)	90
Figura 48- Consumo de energia do Campus Caicó por mês e por tipo de uso.....	92
Figura 49- Comparativo do consumo de energia simulados para o caso real e para os Nível A, Nível B e Nível C	93
Figura 50- Vista do Campus Caicó com o percurso solar	95
Figura 51- Cobertura considerada no caso real do Campus Caicó.....	95
Figura 52- Cobertura considerada no Caso 3 para o Campus Caicó.....	96
Figura 53- Comparativo do consumo de energia de todos os casos estudados	97
Figura 54- Comparativo de emissões de GEE para cada caso simulado do Campus Caicó	98
Figura 55- Comparativo de emissões de GEE dos casos simulados com o caso (bonificado) para o CNAT.....	100
Figura 56- Comparativo das emissões de GEE de todos os casos simulados como o caso 4 (Bonificado) para o Campus Caicó	101
Figura 57- Número de conexões acumuladas de GD	104
Figura 58- Processo de fabricação de módulos fotovoltaicos a base de silício.....	106
Figura 59- Árvore com as famílias das tecnologias FV	106
Figura 60- Estratégias de montagem dos sistemas	108
Figura 61- Estrutura do ciclo de vida dos sistemas FV	109

Figura 62- Média anual de radiação horizontal diária.....	116
Figura 63- Mapa com distribuição geográfica das usinas	117
Figura 64- Vista superior da instalação da usina na Reitoria	118
Figura 65- Vista superior da instalação da usina em Ceará Mirim	119
Figura 66- Vista superior da instalação da usina em São Paulo do Potengi.....	120
Figura 67- Vista superior da instalação da usina em Canguaretama.....	121
Figura 68- Vista superior da instalação da usina em Currais Novos.....	122
Figura 69- Vista superior da instalação da usina em São Gonçalo do Amarante.....	123
Figura 70- Vista superior da instalação da usina no CNAT	124
Figura 71- Vista superior da instalação da usina em Pau dos Ferros	125
Figura 72- Vista superior da instalação da usina em Caicó.....	126
Figura 73- Vista superior da instalação da usina em João Câmara	126
Figura 74- Exemplo de usina montada no Telhado.....	127
Figura 75- Exemplo de usina montada no solo	127
Figura 76- Exemplo de usina montado no teto de estacionamento	127
Figura 77- Comparação dos resultados da Taxa de GEE de Usinas Solares Fotovoltaicas operando no Nordeste brasileiro com o fator de emissão projetado para o SIN brasileiro para 2020.	133
Figura 78- Comparativo de Emissões de GEE dos sistemas Fotovoltaicos com o SIN.....	136
Figura 79 - Comparativo de taxas de emissão em fotovoltaicas de estudos de LCA no mundo (2014 a 2018).....	138
Figura 80- Comparativo de EPBT das alternativas simuladas com o caso real	141
Figura 81- Energia primária requerida (Produção + BOS) das alternativas simuladas	142

Índice de tabelas

Tabela 1- Principais tecnologias e práticas de mitigação para o setor de edificações.....	4
Tabela 2- Resumo das atividades desenvolvidas pelo Comitê temático de formação profissional em energias renováveis e eficiência energética	21
Tabela 3- Lista das instituições que aderiram ao processo de aquisição de usinas por meio do IF Solar	23
Tabela 4- Resumo das principais informações técnicas e financeiras das usinas do IFRN Solar.....	25
Tabela 5- Lista de GEE (pós COP17) - Anexo A do Protocolo de Quioto	32
Tabela 6- Fatores para GWP (100 anos) e GTP (100 anos)	34
Tabela 7- Metas do Brasil no Acordo de Paris	36
Tabela 8- Emissões em CO ₂ eq por setor para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015	40
Tabela 9- Lista de instrumentos e certificação de edifícios.....	56
Tabela 10- Amostra das unidades do IFRN que será simulada.....	71
Tabela 11 - Dados do projeto para classificação de desempenho energético.....	76
Tabela 12- Classes de eficiência energética da edificação	76
Tabela 13- Percentual de abertura da fachada calculado para as simulações.....	77
Tabela 14- Consumo mensal da edificação simulada (Caso REAL).....	79
Tabela 15- Comparativo de consumo anual das simulações do caso real e dos níveis A, B e C.....	81
Tabela 16- Resumo das modificações hipotéticas simuladas	83
Tabela 17- Resultados de consumo de energia para cada caso estudado no CNAT	84
Tabela 18- Cálculo das emissões de CO ₂ mês a mês para os casos simulados do CNAT	86
Tabela 19 - Dados do projeto para classificação de desempenho energético.....	88
Tabela 20- Classes de eficiência energética da edificação	89
Tabela 21- Percentual de abertura da fachada calculado para as simulações.....	89
Tabela 22- Consumo mensal da edificação simulada Campus Caicó (Caso REAL)	91
Tabela 23- Comparativo de consumo anual das simulações do caso real e dos níveis A, B e C.....	93
Tabela 24- Resumo dos casos hipotéticos simulados para o Campus Caicó.....	94
Tabela 25- Consumo de energia para os casos estudados no Campus Caicó.....	96
Tabela 26- Cálculo das emissões de CO ₂ mês a mês para os casos simulados do Campus Caicó.....	98
Tabela 27- Comparação da eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas	107
Tabela 28- Energia requerida para fabricação de módulos fotovoltaicos de Multi-Si	112

Tabela 29- Energia requerida dos componentes do BOS	113
Tabela 30 - Fatores de emissão dos países em g CO ₂ /kWh.....	115
Tabela 31- Irradiação solar diária e área por país.....	116
Tabela 32- Médias mensais dos totais diários de Irradiação global horizontal observada no Brasil.....	116
Tabela 33- Características técnicas UFV01.....	118
Tabela 34- Características técnicas UFV02.....	119
Tabela 35- Características técnicas UFV03.....	119
Tabela 36- Características técnicas UFV04.....	120
Tabela 37- Características técnicas UFV05.....	121
Tabela 38- Características técnicas UFV06.....	122
Tabela 39- Características técnicas UFV07.....	123
Tabela 40- Características técnicas UFV08.....	124
Tabela 41- Características técnicas UFV09.....	125
Tabela 42- Características técnicas UFV10.....	126
Tabela 43 - Especificações técnicas das Usinas fotovoltaicas estudadas.....	128
Tabela 44- Tempo de retorno de energia para as usinas de energia solar fotovoltaica	131
Tabela 45 - Tempo de retorno de emissões e taxa de GHGe para as usinas fotovoltaicas	132
Tabela 46 - Análise comparativa dos resultados com estudos anteriores.....	137
Tabela 47 - Análise de sensibilidade para parâmetros chave para sistemas fotovoltaicos com módulos Multi-Si.	139
Tabela 48- EPBT para casos alternativos simulados.....	140
Tabela 49- GHGe-rate para casos alternativos simulados.....	142
Tabela 50- Resumo sobre os regulamentos de países que avaliam a eficiência energética das edificações considerando o consumo de energia primária	163
Tabela 51- Resumo sobre os regulamentos de países que avaliam a eficiência energética das edificações considerando o consumo de energia final	163

Índice de equações

Equação 1- Cálculo da pontuação total para certificação energética	65
Equação 2- Equação para o Cálculo do PAft para Zona bioclimática 8.....	73
Equação 3- Equação para o Cálculo do PAft para Zona bioclimática 7.....	73
Equação 4- Cálculo do EPBT	109
Equação 5- Cálculo da taxa de emissão de GHG	110
Equação 6- Cálculo do tempo de retorno de emissões	132

Tabela de Siglas e Abreviaturas

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
AQUA	- Alta Qualidade Ambiental
BOS	- <i>Balance of System</i>
CES	- Câmara de Educação Superior
CNAT	- Campus Natal Central
CNE	- Conselho Nacional de Educação
COP	- Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
ENCE	- Etiqueta Nacional de Conservação de Energia do Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edificações
EPBT	- <i>Energy Payback Time</i>
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
FOLU	- Florestas e Outros Usos da Terra
FV	- Fotovoltaico
GD	- Geração Distribuída
GEE	- Gases de Efeito Estufa
GHG	- <i>Green House Gas</i>
GHGe-rate	- <i>Green House Gases Emission rate</i>
GIZ	- Agência de Cooperação Alemã de Desenvolvimento Sustentável
GtCO _{2e}	- Giga tonelada de CO ₂ equivalente
GTP	- <i>Global Temperature Potencial</i>
GWh	- Giga Watt hora
GWP	- <i>Global Warming Potencial</i>
ICenv	- Índice de Consumo
IEA	- <i>International Energy Agency</i>
IFRN	- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
kWp	- Kilo Watt Pico
LCA	- <i>Life Cycle Assessment</i>
LEED	- <i>Leadership in Energy and Enviromental Design</i>
MCTIC	- Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação
MEC	- Ministério da Educação
MJ	- Mega Joule
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
MWp	- Mega Watt Pico
NDC	- Contribuições Nacionalmente Determinadas
OIA	- Organismo de Inspeção Acreditada
PAFt	- Percentual de Abertura na Fachada
PBE	- Programa Brasileiro de Etiquetagem
PCH	- Pequenas Centrais Hidroelétricas
PDE	- Plano Decenal de Energia
PIB	- Produto Interno Bruto
PNE	- Plano Nacional de Energia
PNMC	- Política Nacional sobre Mudanças do Clima
PROCEL	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RTQ-C	- Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos
RTQ-R	- Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais
SIN	- Sistema Interligado Nacional
tCO _{2e}	- Tonelada de CO ₂ equivalente
TWh	- Tera Watt hora
UFV	- Usina Fotovoltaica
ZB	- Zona Bioclimática

Introdução

A humanidade, ao longo de sua existência, confronta-se às alterações climáticas historiadas no nosso planeta. Antes da ruptura provocada pelo emprego do maquinário tecnológico produtivo demarcado pela revolução industrial, às alterações climáticas configuravam-se por uma variabilidade no clima, fundamentalmente por regimes cíclicos. A consolidação de um processo produtivo marcado pelo emprego da máquina a vapor e pelas técnicas e tecnologias dela derivadas intensificaram a dependência de fontes de energia de origem fóssil, tais como, o carvão mineral, o petróleo e gás natural. E desde então o denominado processo de “aquecimento global” mostra-se crescente e ampliado em sua magnitude e, por consequência tem contribuído para o aumento da intensidade e frequência dos eventos climáticos extremos em todo o planeta.

O aquecimento global representa, na atualidade, um dos mais complexos problemas enfrentados pela sociedade, em âmbito global, sendo este raiz e intensificador de diversos problemas de ordem ambiental, social e econômica. O Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC) indica que o aumento das emissões antropogênicas dos Gases de Efeito Estufa (GEE) ou “*Green House Gas (GHG)*”, de acordo com os cenários projetados, são a principal causa da elevação da temperatura média na Terra a partir do meio do século XX, sendo dessa forma, uma das maiores responsáveis pelo desequilíbrio ambiental vigente (IPCC, 2013).

Em escala global, segundo o relatório do IPCC (2014c) que disponibiliza esses dados, os principais GEE emitidos pelas atividades humanas em 2014 alcançaram as seguintes participações: Gases fluorados (2%), Óxido nitroso (6%), Metano (16%) e Dióxido de carbono (77%). O total de Dióxido de carbono é a soma de Florestas e outros usos da terra atingindo 11%, e combustíveis fósseis e processos industriais com 66%.

Uma vez que o setor energético responde por cerca de 65% (IPCC, 2014b) das emissões globais de GHG, o desafio posto ao enfrentamento do aquecimento global e seus problemas derivados, aponta para a mitigação das emissões de GEE originadas na conversão e uso da energia, sem deixar de atender as novas demandas associadas ao desenvolvimento das nações.

Entretanto, quando da escolha do recurso energético e tecnologia empregada, se faz necessário promover uma análise que venha permitir que se avaliem todos os impactos socioeconômicos e ambientais provocados por estas ao longo do seu ciclo de vida.

No que concerne às contribuições para o aquecimento global é mister afirmar que todas as tecnologias de geração de eletricidade em alguma etapa de seu processo (exploração, transformação, distribuição, uso e descarte) são fontes, em maior ou menor escala de GEE. Com a finalidade de comparar o impacto de diferentes tecnologias, em termos de suas contribuições à intensificação do efeito estufa, deve ser contabilizado o total de emissões de GEE durante todas as etapas do processo, ou seja, em todo o seu ciclo de vida (FTHENAKIS, V.M. e KIM, 2011; MARIMUTHU e KIRUBAKARAN, 2013; NISHIMURA e colab., 2010; PENG e colab., 2013; STEPHANIE, 2006).

Diversificar a oferta de energia para dar suporte a um ritmo de crescimento econômico dos países se configura como um grande desafio. Também os países com taxa de crescimento de menor intensidade e elevada demanda reprimida, mesmo contando com um portfólio diversificado de fontes energéticas, como é o caso do Brasil, tem enfrentado dificuldades para atender a demanda interna de energia. Diante deste cenário, evidencia-se uma alternativa interessante do ponto de vista econômico e ambiental, o uso eficiente da energia. Neste sentido da busca pela eficiência energética, o custo da energia “evitada”, a partir da redução do consumo pela maior eficiência dos equipamentos, intervenções nos projetos arquitetônicos, além da promoção de mudança de hábitos e consumos das pessoas, é menor que o custo de acrescentar uma unidade de potência ao sistema a partir dos conversores utilizados.

Uma forma de também contribuir para a redução das pressões ambientais advindas do funcionamento dos sistemas energéticos, sem que se negligencie o atendimento das novas demandas por energia associadas ao desenvolvimento das nações, é ampliar o uso de fontes renováveis de energia.

Dentre os diversos recursos renováveis de energia que já se encontram em um estágio comercial de aproveitamento de forma operacional, a energia solar encontra-se disponível de forma abundante e bem distribuída pelo planeta.

Existe a possibilidade do aproveitamento passivo e o ativo deste recurso. O aproveitamento passivo usa a energia solar de forma a contribuir na regulação das condições ambientais da edificação, permitindo o aproveitamento direto da radiação solar

para um fim específico: iluminação de ambientes regulação de temperatura. Já o aproveitamento ativo é implementado pelo uso de diferentes tecnologias. A Energia Solar Fotovoltaica utiliza o efeito fotovoltaico para transformar a energia solar diretamente em eletricidade que pode ser utilizada em sistemas isolados ou interligada na rede de distribuição. Enquanto a Energia Solar Térmica transforma a energia solar em energia térmica que pode ser aproveitada no aquecimento de água, secagem de grãos, refrigeração, aquecimento de piscinas, aquecimento industrial e uso em concentradores para aquecimento de fluidos. Essa energia solar térmica gerada nos concentradores pode ser usada, para gerar vapor e expandi-lo em uma turbina a vapor acoplada a um gerador para produzir eletricidade.

As edificações também ganham grande destaque neste cenário de crescimento da demanda por eletricidade. Esta relevância se justifica devido à grande representatividade das edificações comerciais, públicas e residenciais no total de eletricidade consumida. No Brasil, que em 2017 registrou um consumo total de energia elétrica de 467.161GWh, os três tipos de edificações (comercial, poder público e residencial) representaram juntas 50,9% deste consumo (EPE, 2018a).

Em termos de subsídios à ciência da mudança do clima, as contribuições do grupo de trabalho III para o quarto relatório do IPCC (2007, p. 11), apresenta uma estimativa do potencial econômico setorial de mitigação do aquecimento global para diferentes regiões, como função do preço do carbono em 2030, utilizando estudos *bottom-up*, em relação as respectivas linhas de base utilizadas para a avaliação dos setores. Aponta que o setor de edificações é elencado no estudo como um setor que apresenta o maior potencial econômico de mitigação. Esse Potencial é estimado entre (4,8-6,1) GtCO_{2e} por ano para um carbono taxado em até US\$ 20,00. Conforme pode ser observado na Figura 1.

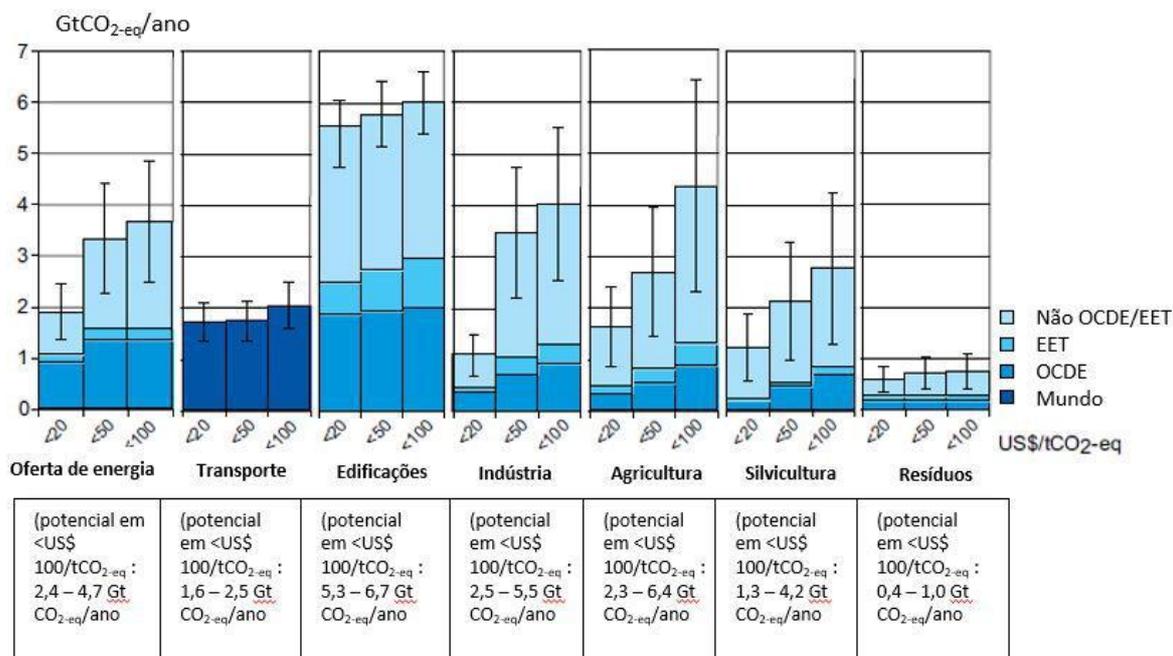


Figura 1- Estimativa do potencial econômico setorial de mitigação global para diferentes regiões, em função do preço do carbono em 2030.

Fonte:(IPCC, 2007, p. 11) ¹

Neste estudo do IPCC (2007, p. 11) as faixas baseiam-se nas alocações de uso final das emissões, dessa forma as emissões advindas do uso de eletricidade são contabilizadas nos setores de uso final e não no setor de oferta de energia.

As principais tecnologias e práticas de mitigação por setor foram divididas em dois grupos: as disponíveis comercialmente na atualidade e as projetadas para serem comercializadas antes de 2030. A seguir é apresentada na Tabela 1 as referidas tecnologias e práticas apenas para o setor de Edificações.

Tabela 1- Principais tecnologias e práticas de mitigação para o setor de edificações

¹

1. Os potenciais estimados foram limitados pela disponibilidade de estudos, especialmente nos níveis altos do preço do carbono.
 2. Os setores usaram diferentes linhas de base. Para a indústria, foi adotada a linha de base do cenário B2 do RECE, para a oferta de energia e o transporte, foi usada a linha de base do WEO de 2004; o setor de edificações usa uma linha de base entre o B2 e o A1B do RECE; para os resíduos, as forças motrizes do A1B do RECE foram usadas para construir uma linha de base específica para os resíduos; para a agricultura e a silvicultura, foram adotadas linhas de base que usaram principalmente as forças motrizes do B2.
 3. São mostrados apenas os totais globais para o transporte porque está incluída a aviação internacional.
 4. As categorias desconsideradas são: emissões não-CO₂ de edificações e do transporte, parte das opções de eficiência material, produção e co-geração de calor na oferta de energia, veículos pesados, transporte de cargas e transporte de passageiros com grande capacidade, a maioria das opções de custo alto para as edificações, tratamento de águas residuárias, redução de emissões das minas de carvão mineral e tubulações de gás, gases fluorados da oferta de energia e do transporte. A subestimativa do potencial econômico total dessas emissões é da ordem de 10-15%.

Tecnologias e práticas disponíveis comercialmente na atualidade	Tecnologias e práticas projetadas para serem comercializadas até 2030
Iluminação mais eficiente, inclusive durante o dia; aparelhos elétricos e de aquecimento e refrigeração mais eficientes; melhoria de fogões e da insulação; energia solar passiva e ativa para aquecimento e refrigeração; fluidos alternativos de refrigeração, recuperação e reciclagem de gases fluorados	Planejamento integrado de edificações comerciais, inclusive com tecnologias, como medidores inteligentes que forneçam informações e controle; energia solar fotovoltaica integrada nas edificações.

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (IPCC, 2007, p. 10)

Dentro do amplo universo das edificações, os equipamentos de ensino desempenham um papel singular como fomentador do desenvolvimento econômico com preservação do meio ambiente. Estas instituições tem um papel diferenciado na implementação de responsabilidade social e sustentabilidade (GÓES, 2015). A promoção de ações de eficiência energética nessas instituições, quando inserido no processo ensino-aprendizagem, pode potencializar os seus resultados e contribuir para o alcance das metas dos compromissos voluntários assumidos em diversas instancias internacionais, com maior evidência no acordo de Paris.

Nesse contexto, o processo de expansão da Rede Federal de Educação Tecnológica em curso, que registrou cerca de 520 novas unidades de ensino no período de 2002 a 2018, com destaque o IFRN - que contabiliza um total de 19 *campi* construídos entre 2009 a 2018, com perspectiva de crescimento da ordem de 10% nos próximos 3 anos - reveste-se de campo de interesse para a pesquisa da real aderência dessa política pública aos postulados presentes nas ações de promoção da sustentabilidade e redução de emissões de GEE, uma vez que esta expansão contempla em seus novos projetos a eficiência energética das edificações integrada a adoção de geração distribuída por sistemas solar fotovoltaico.

Este trabalho está orientado ao estudo das edificações no que concerne a promoção da sustentabilidade, contemplando uma avaliação das emissões advindas da demanda de

energia elétrica dos edifícios e suas alternativas de mitigação, com ênfase na energia operativa². Para a consecução dos objetivos são estudadas duas iniciativas sugeridas pelo IPCC com a finalidade de mitigar as emissões de GEE desse setor: i) Incentivo a eficiência energética e; ii) Adoção da geração de energia elétrica a partir de unidades solares fotovoltaica integradas a edificação.

A opção de direcionar o estudo para a energia operativa se justifica por esta ser a maior parcela de energia demandada pela edificação ao longo da sua vida útil. A partir do estudo de alternativas voltadas a redução do consumo de energia elétrica na operação das edificações busca-se reduzir os gastos públicos com energia elétrica, e por consequência, mitigar as emissões associadas a energia demandada.

Outra questão que dá atualidade e relevância a pesquisa são os vínculos dos estudos, e proposições com os compromissos assumidos e ratificados pelo governo brasileiro no acordo de Paris no setor de energia elétrica, a saber:

- Alcançar 23% de participação de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica. Que será contemplado na pesquisa pelo estudo da Geração distribuída de energia elétrica a partir de fontes renováveis.
- Alcançar 10% de ganhos de eficiência no setor elétrico até 2030. Que será trabalhado na análise de eficiência energética das edificações utilizando o PBE Edifica como regulamento de referência.

O trabalho também se debruça sobre as condições necessárias ao atendimento das normas determinadas pelo Ministério do Planejamento através da Instrução Normativa N. 2-SLTI/2014, instituída no ano de 2014, que torna compulsório a etiqueta ENCE³ Nível A em novos projetos ou *retrofit* de prédios públicos federais, com área superior a 500 m², fomentando assim a cultura da eficiência energética no setor público (BRASIL, 2014).

A pesquisa parte do pressuposto, assentado na percepção de consenso, de que as edificações exercem papel destacado na demanda de energia elétrica. E que a gestão eficiente de sua construção e, mais predominantemente de seu uso, pode ter grande impacto na mitigação de GEE. Dessa forma, a adoção de certificados (de eficiência) ao

² Energia operativa: Energia consumida com o funcionamento do edifício, incluindo os equipamentos, iluminação e os eletrodomésticos dos usuários.

³ ENCE: Etiqueta Nacional de Conservação de Energia do Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edificações (PBE Edifica) parceria do INMETRO e o PROCEL.

promover a eficiência energética propiciam a redução da demanda por recursos energéticos e, por consequência a emissão de GEE.

Em se tratando do objeto de estudo – a Rede Federal de Educação Tecnológica - a pesquisa amplia seu ambiente de alcance, uma vez que usa da hipótese de que as edificações em espaços de ensino caracterizam-se pelo grande potencial disseminador de conhecimentos e hábitos. Conforma-se em um laboratório a céu aberto, locus propício para o desenvolvimento e disseminação de práticas sustentáveis.

Neste contexto, tem-se também como hipótese que o uso da GD em edificações de instituições de ensino potencializa a redução da demanda energética, promove a economia de recursos financeiros, e pode minimizar os impactos ambientais e mitigar emissões de GEE a depender da técnica e da tecnologia utilizada.

Objetivo Geral

Avaliar a Eficiência Energética, a luz da sustentabilidade, em termos de redução de demanda de energia e adoção de GD e, por consequência, a mitigação de GEE, em instituições de ensino, tendo a expansão do IFRN como estudo de caso;

A partir desta avaliação espera-se elencar prioridades na adoção de alternativas construtivas e tecnológicas que se traduzam em políticas públicas que potencializem a eficiência energética e a sustentabilidade na prática construtiva em prédios públicos, com acento nas instituições de ensino multi-sede.

Objetivos específicos

- Avaliar quantitativamente o comportamento energético derivado da aplicação de medidas de eficiência energética orientadas pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica) nos prédios públicos de ensino, a partir de simulações utilizando o software *Design Builder/Energy plus*;
- Avaliar o impacto da implantação de geração distribuída na redução de consumo e emissões de GEE durante a vida útil nas edificações do IFRN, com especial

atenção as usinas fotovoltaicas que contabilizam 2,1 MWp distribuídos em 21 plantas;

- Avaliar o impacto na mitigação de emissões de GEE pela adoção da etiqueta de eficiência energética, podendo assim contribuir para o aprimoramento das diretrizes construtivas e de operação para futuras construções na região objeto de estudo.

Em seu **percurso metodológico**, a pesquisa buscou gerar conhecimentos que possam ser direcionados para aplicação prática na solução de problemas específicos. Portanto, esta pesquisa é de **natureza aplicada**. O método científico utilizado é o hipotético-dedutivo, pois hipóteses foram formuladas para expressar as dificuldades do problema, e a partir daí, são deduzidas algumas consequências possíveis, que deverão ser testadas ou falseadas (PRODANOV e FREITAS, 2013).

O estudo tem **objetivo exploratório e explicativo**. É exploratório porque busca proporcionar uma maior familiaridade com o problema levantado, além de torná-lo mais explícito, e de possibilitar a construção de hipóteses sobre ele. É também explicativo porque visa estudar um fenômeno identificando os fatores que o causam, aprofundando o conhecimento da realidade (PRODANOV e FREITAS, 2013).

Os procedimentos técnicos utilizados nesta pesquisa são: pesquisa bibliográfica, pesquisa experimental e estudo de caso. No corpo desse texto estes procedimentos metodológicos estão detalhados.

A abordagem da pesquisa é qualitativa, pois busca traduzir em números os conhecimentos que forem gerados durante a sua realização.

Inicialmente, é realizado um levantamento do referencial teórico e o estado da arte sobre o objeto de estudo. Em seguida, são avaliados projetos de dois *campi* do IFRN que serão estudados – i) 01 Projeto (edificações) de uma unidade tradicional do IFRN, Campus Natal Central como objeto de estudo das unidades construídas antes do programa de expansão; 01 Projeto (edificações) que tem servido de padrão de tipologia arquitetônica para a expansão do IFRN e outros Institutos da rede no âmbito nacional, Campus Caicó. Alguns critérios foram importantes nesta escolha, tais como: existência de instalação de usinas fotovoltaicas, projeto arquitetônico atualizado, região do estado onde estão

localizados, dentre outros critérios que serão melhor acentuados no decorrer deste trabalho.

Após a definição dos sistemas a serem estudados, o caminho da pesquisa se divide em duas partes, que evoluem em paralelo mantendo um objetivo comum, que é a promoção da eficiência energética, e, por consequência, a redução de emissões geradas pela demanda de eletricidade no uso das edificações. Desenvolve-se então: I), simulações energéticas das edificações, e; II) a avaliação, através da análise de ciclo de vida e dos benefícios/agravos energéticos e ambientais advindos da adoção da geração distribuída por meio das usinas solares fotovoltaicas instaladas nas unidades do IFRN.

A literatura apresenta trabalhos relatando a utilização de softwares com a finalidade de simular o comportamento energético das edificações. Este trabalho utilizará o software o *DesignBuilder* que tem o *Energy plus* associado à sua estrutura de processamento, na versão do *DesignBuilder 2.4.02.026* que roda o *Energyplus 6.0* em sua plataforma para desenvolver as simulações energéticas. Estes softwares escolhidos atendem as necessidades para executar a análise energética da edificação proposta, e estão de acordo com as exigências estabelecidas pelo sistema brasileiro de etiquetagem para edificações utilizando o método de simulação.

Com isso, foi possível realizar uma análise quantitativa do potencial de redução de consumo de energia elétrica em cada edificação simulada, comparando o caso base com os casos simulados. Todo o estudo referente a Simulações Energéticas em Edificações encontra-se apresentado no capítulo 3.

Os estudos de ciclo de vida foram conduzidos para avaliar o nível de eficiência em relação aos aspectos ambientais mais relevantes dos sistemas solares fotovoltaicos incorporados às edificações dos *campi* do IFRN. Nesta fase, foram levantados os projetos das usinas solares fotovoltaicas com todos os dados técnicos e construtivos, necessários aos cálculos dos valores teóricos de geração de eletricidade em cada usina. Em seguida, foram coletados os dados de geração real para as mesmas usinas, e procedidas as análises energéticas e de emissões de GEE utilizando a metodologia do ciclo de vida validada pela literatura. Todo o estudo e análise referente a avaliação de ciclo de vida realizado na pesquisa encontra-se descrito no capítulo 4.

Estrutura do trabalho

Para o alcance dos objetivos assumidos, esta tese encontra-se dividida em cinco capítulos, além de uma seção de caráter introdutório. No Capítulo 1 é apresentado o processo de expansão da rede federal de tecnologia, abordando o Projeto IF Solar em seus objetivos. O Capítulo 2 trata das repercussões da dependência de energia elétrica no uso das edificações, além das contribuições que as certificações de eficiência energética possam adicionar à sustentabilidade e a economia de recursos públicos. Para tanto faz uso de dados das emissões de GEE originadas na geração de energia elétrica com ênfase na demanda das edificações.

No Capítulo 3 é desenvolvida uma análise das edificações objetos desse estudo, os *campi* do IFRN, considerando a demanda de energia elétrica e suas emissões relacionadas. Para tanto foram utilizadas as simulações energéticas de uma amostra das edificações. Objetivando gerar sugestões de melhorias arquitetônicas de uso do espaço, utilizou-se na análise os procedimentos exigidos pelo regulamento da ENCE do PBE Edifica.

No capítulo 4, são considerados os desdobramentos do projeto IFRN Solar, apresentado no capítulo 1. Nele é feita uma análise por meio de uma Avaliação do Ciclo de Vida dos sistemas fotovoltaicos instalados nas unidades do IFRN, objetivando quantificar as emissões de GEE vinculadas à adoção dessa tecnologia.

Finalmente, no Capítulo 5 são tecidas conclusões do trabalho.

1. A expansão da Rede Federal de Educação Tecnológica: Oportunidade para adoção de eficiência energética em suas edificações

1.1. Introdução

A realidade imposta no planeta na atualidade aponta que os sistemas convencionas de oferta de energia (eletricidade, calor de processo e refrigeração) convivem com um crescente estado de pressão em temas ambientais, econômicos, aumento da concentração de CO₂ e suas repercussões e ainda o caráter limitado dos recursos não renováveis. Por outro lado, o que se registra é um crescente aumento do consumo e com ele a segurança no sistema de oferta se torna menos previsível. Nestes termos, a promoção da eficiência energética e a adoção de fontes renováveis de energia se configuram como uma imperativa alternativa ao problema energético global.

A promoção de ações que levem e consolidem a cultura da eficiência energética ganham maior relevância quando desenvolvidas nas instituições de ensino, isto porque, em sua função social estas instituições são compreendidas e estruturadas como espaços disseminadores de um saber sistematizado, a partir do conhecimento construído pela humanidade através dos tempos, e tem como objetivo a humanização (SAVIANI, 1992). A abrangência e influência de suas ações vão mais além das limitações físicas e das formalidades institucionais (PARO, 2011).

Neste contexto a escola é, por competência, um ambiente fundamental para a promoção da eficiência energética, sendo suas edificações, em face de suas formas determinadas em projetos que ao longo do tempo se modificam em função de suas demandas por ocupação e uso, são avaliadas como promissoras fontes de conservação de energia. A gestão pública federal tem a prerrogativa da gestão de uma parte maior das instituições de ensino superior e tecnológico, no entanto seus gestores são incentivados à eficiência energética a partir de incentivos advindos de programas e incentivos governamentais, que nem sempre são orientados à eficiência destas edificações.

Assim, as instituições de ensino devem assumir um protagonismo, desempenhando um papel de liderança no desenvolvimento de planos e programas voltados a implementação de redução do consumo de energia e seus desperdícios e, concomitante, políticas de redução de suas pegadas de carbono. Para tanto deve considerar diversos aspectos

estruturais: projeto e uso de suas edificações, redução de desperdícios, gerenciamento de seus sistemas de transporte e adoção de fontes renováveis, entre outros.

Toda a mobilização para a eficiência energética deve envolver os diferentes atores que compõe a escola. A inclusão dos estudantes deve ocorrer em todas as etapas desse processo. O objetivo é capacitá-los com habilidades e competências referentes aos conhecimentos e experiências acumuladas para que estes estejam preparados para incorporar as boas práticas em suas escolhas pessoais, profissionais e políticas relacionadas à eficiência energética e sustentabilidade.

No Brasil, a Rede Federal de Educação Tecnológica Profissional, Científica e Tecnológica tem como objetivo ofertar uma formação que aproprie os discentes de habilidades e competências profissionais para atuar em diferentes setores da economia, de forma articulada com os setores produtivos e a sociedade, de forma a contribuir para a materialização e sustentação dos arranjos produtivos locais. Visa também fomentar processos educativos que repercutam na geração de emprego. Para SILVA (2009) a Rede tem como função social a promoção de justiça social, a equidade e a inclusão social com base num desenvolvimento sustentável, buscando soluções técnicas e gerando novas tecnologias.

Composta pelos Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia (Institutos Federais); Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR; Centros Federais de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca do Rio de Janeiro (Cefet-RJ) e de Minas Gerais (Cefet-MG); Escolas Técnicas vinculadas às Universidades Federais; e o Colégio Pedro II, a Rede vem vivenciado um processo de implementação de políticas orientadas à adoção institucional de práticas de eficiência energética e introdução da geração de energia elétrica de forma distribuída, a partir de fontes renováveis de energias, concomitantemente a expansão da rede através da construção física de novos *campi* e/ou reformas de prédios públicos para sua incorporação a rede.

Essas novas edificações estão orientadas a buscarem selos de certificação de sustentabilidade que incorporam, nas suas condicionantes, a eficiência energética.

Neste capítulo é feita a apresentação do processo de criação, expansão e consolidação da rede federal de educação tecnológica, abordando os determinantes políticos, sociais e econômicos que levaram a mesma se firmar como instituição reconhecida pela qualidade do ensino ofertado, pela diversidade de cursos e formação ofertada, além da relevância

de seu desempenho junto à população e às empresas locais, potencializando a vocação regional no que concerne a oferta de trabalho, cultura e lazer.

O capítulo também aborda as iniciativas desenvolvidas no âmbito do governo federal, através do Ministério da Educação, da rede e do IFRN no que concerne a promoção da eficiência energética em seus prédios e adoção da geração distribuída através da instalação de sistemas solares fotovoltaicos orientados a redução de custo de energia elétrica e fomento à sustentabilidade no processo de ensino aprendizagem.

1.2. A Rede Federal de Educação Tecnológica

A adoção de um ensino voltado ao mundo do trabalho no Brasil tem seu marco histórico no início do século XX, durante a denominada República Velha, por iniciativa do então presidente Nilo Peçanha, a partir de proposta anterior do Marechal Deodoro da Fonseca, quando foram criadas 19 Escolas de Aprendizizes e Artífices, nas capitais dos estados da República, por meio do Decreto nº 7.566, de 23 de setembro de 1909. Esse conjunto de escolas, mantidas pelo Governo federal por intermédio do Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio, tinham por objetivo declarado ofertar ensino prático e os conhecimentos técnicos necessários à formação de operários e contramestres para uma juventude de desvalidos. Tais objetivos são marcadamente desvendados na exposição de motivo feita pelo presidente ao justificar o decreto acima citado:

"que o aumento constante da população das cidades exige que se facilite às classes proletárias os meios de vencer as dificuldades sempre crescentes da luta pela existência; que para isso se torna necessário, não só habilitar os filhos dos desfavorecidos da fortuna com o indispensável preparo técnico e intelectual, como fazê-los adquirir hábitos de trabalho profícuo, que os afastará da ociosidade, escola do vício e do crime; que é um dos primeiros deveres do Governo da República formar cidadãos úteis à Nação" (Decreto nº 7.566,

de 23 de setembro de 1909, art. 29.)

O conjunto de Escolas de Artífices, mais tarde, deu origem à Rede de Escolas Técnicas Federais, os Centros Federais de Educação Profissional e Tecnológica (CEFETS) e mais

recentemente os Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia e as Universidades Tecnológicas.

Inicialmente, criada como instrumento de política voltado para as “classes desprovidas”, a Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica se configura hoje como importante estrutura na busca da universalização do acesso às conquistas científicas e tecnológicas. Com penetração em todo o território nacional, a Rede Federal desempenha relevante função econômica e social, qualificando profissionais para os diversos setores da economia brasileira, realizando pesquisa e desenvolvendo novos processos, produtos e serviços em sinergias com os arranjos produtivos locais (MEC, 2016).

Em 2006, a educação profissional e tecnológica passa a vivenciar um processo de reestruturação a partir da iniciativa do MEC junto ao Conselho Nacional de Educação (CNE), fruto do Parecer CNE/CES nº. 277 (MEC, 2006). Observou-se a época, mediante as transformações por que passavam o mundo do trabalho, o conhecimento científico e os avanços dos arranjos produtivos de base tecnológica, necessidades de reorganização dos cursos superiores de tecnologia em eixos reduzidos e compactos, a partir da avaliação de que a organização por áreas profissionais definidas no Parecer CES/ CNE nº. 436/2001 estava defasada e não contribuía para o desenvolvimento industrial (AZEVEDO; COAN, 2018). É possível avaliar nestes movimentos do CNE o início de um novo momento para a Rede Federal de Educação Profissional em termos de sus objetivos e função social.

Em 24 de abril de 2007, o Decreto nº. 6.095 estabeleceu as diretrizes para o processo de integração de instituições federais de educação tecnológica, para fins de constituição do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFET), no âmbito da Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica (BRASIL, 2007).

Segundo o Art. 01, § 3º do Decreto no. 6.095, os IFETs se caracterizam como instituições de educação superior, básica e profissional, pluricurricular e multicampi, especializadas na oferta de educação profissional e tecnológica nas diferentes modalidades de ensino, com base na conjugação de conhecimentos técnicos e tecnológicos às suas práticas pedagógicas. Ficou determinado no referido Decreto que a vocação dos Institutos é formar e qualificar profissionais para os diversos setores da economia, em estreita articulação com os setores produtivos e a sociedade (Art. 4, § 1º, I), visando a consolidação e fortalecimento dos arranjos produtivos locais (Art. 4,§ 1º, III), bem como estimular e apoiar processos educativos que levem à geração de trabalho e renda (Art. 4, § 1º, IV). Em relação à oferta de educação superior, objetiva-se formar profissionais para

os diferentes setores da economia (Art. 4, § 1º, VII, a) (BRASIL, 2007; TURMENA, LEANDRO; AZEVEDO, 2017).

De acordo com os dados do (MEC, 2016), no final de 2008, 31 centros federais de educação tecnológica (Cefets), 75 unidades descentralizadas de ensino (Uneds), 39 escolas agrotécnicas, 7 escolas técnicas federais e 8 escolas vinculadas a universidades deixaram de existir para formar os Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia, conjunto de instituições que na última década registrou um aumento no número de *campi*, unidades, ampliações físicas, de matrículas e modalidades de ensino.

1.3. O Processo de Expansão da Rede Federal de Educação Tecnológica

Ao final de 2005, o Ministério da Educação, por meio de sua Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica (Setec/MEC), configurou e passou a implementar o Plano de Expansão da Rede Federal de Educação Profissional com o objetivo de ampliar a presença destas instituições em todo o território nacional. O governo federal por meio da Lei nº 11.195, de 18 de Novembro de 2005 revogou a proibição de criação de novas unidades de ensino profissional federais prevista no § 5º do Art. 3º da Lei nº 8.948, de 8 de dezembro de 1994 (MEC, 2018). Iniciou-se, nesse momento, o processo de expansão das instituições federais de educação profissional e tecnológica que hoje ainda segue em curso.

De acordo com o Ministério da Educação (MEC, 2018), o projeto buscava melhorar a distribuição espacial e a cobertura dessa rede de instituições de ensino e, conseqüentemente, ampliar o acesso da população à Educação Profissional e Tecnológica (EPT) no país. Esse processo de expansão foi dividido em 3 fases, a saber:

- i. **O Plano de Expansão na Fase I** priorizou a construção de escolas em unidades da federação ainda não atendidas por estas instituições, como Acre, Amapá, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal, além da instalação de instituições federais de educação profissional nas periferias de grandes centros urbanos e municípios do interior. Nesta primeira fase do plano de expansão, o projeto previu a criação de 5 (cinco) escolas técnicas federais e de 4 (quatro) escolas agrotécnicas federais, bem como a implantação de 33 novas unidades de ensino descentralizadas, contemplando 23 unidades da federação com a instalação de pelo menos uma instituição federal de educação tecnológica;

- ii. Iniciado em 2007, o **Plano de Expansão na Fase II**, a Setec/MEC estabeleceu como meta a criação, em quatro anos, de mais 150 novas instituições federais de educação tecnológica no marco do Plano de Expansão da Rede Federal de Educação Tecnológica. As instituições foram distribuídas nos 26 estados e no Distrito Federal, contemplando 150 municípios diferentes escolhidos pelo próprio MEC e mediante manifestação de interesse por parte das prefeituras municipais;
- iii. Iniciado em 2011, a **terceira fase da expansão** estabeleceu um projeto de criação de 208 novas unidades até 2014, permanecendo com o propósito de superação das desigualdades regionais e na viabilização das condições para acesso a cursos de formação profissional e tecnológica como ferramenta para melhoria de vida da população.

Como resultado, a expansão e interiorização das instituições federais de EPT partiu, em 2006, de um total de 144 unidades. Alcançando em 2018, 643 unidades funcionando em todo o país. Isto representou a construção de mais de 500 novas unidades, quantitativo maior do que o previsto nas três fases (que totalizava 400 novas unidades) (MEC, 2018). Portanto, a Rede Federal vivenciou nas décadas de 2000 e 2010 a maior expansão de sua história, evidenciando a atuação do governo federal no sentido da expansão da oferta pública e da melhoria do padrão de qualidade da educação brasileira, em especial da educação profissional e tecnológica em todo o território nacional, articulando-a com ações de desenvolvimento sustentável e orientando-a para a formação integral de cidadãos-trabalhadores emancipados.

A Figura 2 apresenta os quantitativos registrados no processo de Expansão vivenciado pela Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica.

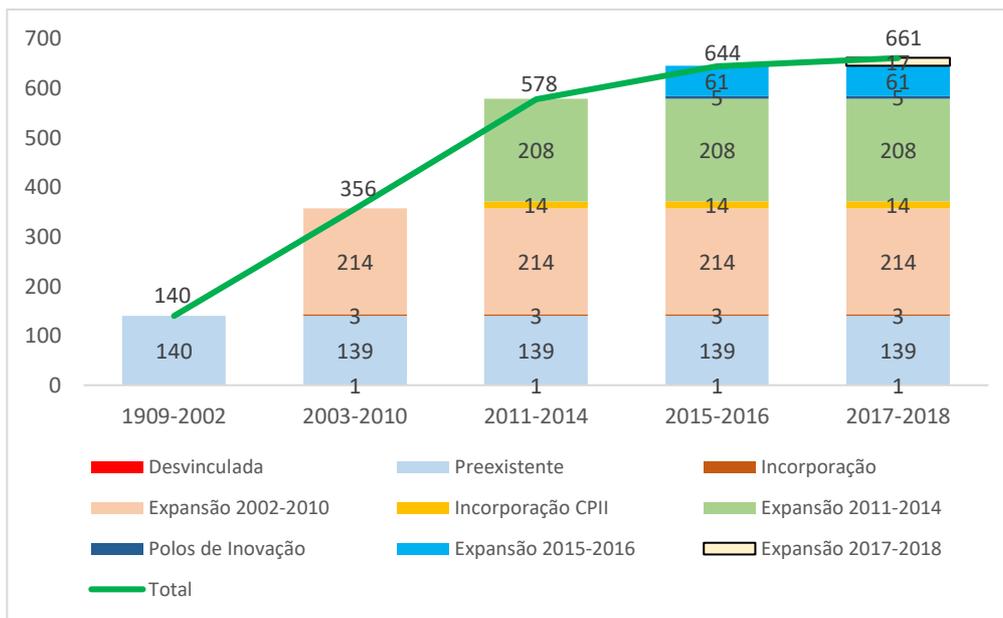


Figura 2- Expansão da rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica. Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (MEC, 2019)

Em 2019, a rede conta com mais de 661 unidades, sendo estas vinculadas a 38 Institutos Federais, 02 Centros Federais de Educação Tecnológica (Cefet), a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), a 22 escolas técnicas vinculadas às universidades federais e ao Colégio Pedro II (MEC, 2019). A Rede está presente em todas as Unidades da Federação ofertando cursos de qualificação, ensino médio integrado, cursos superiores de tecnologia, e licenciatura, Mestrados e Doutorados. A Figura 3 ilustra a distribuição espacial de toda a rede no Brasil.

Segundo os dados da Plataforma Nilo Peçanha⁴, cerca de 58% dos estudantes matriculados na Rede Federal têm renda familiar inferior a um salário mínimo por pessoa. A Rede Federal, em sintonia com as metas do Plano Nacional de Educação (PNE), aumentou a quantidade de matrículas por professor, saltando de 21 em 2017 para 23 em 2018. A qualidade do corpo docente também é destacada: 81% dos professores possuem mestrado ou doutorado (CONIF, 2019). A disponibilização e análise desses dados é fundamental para que se tomem as melhores decisões e se façam os ajustes necessários na Rede Federal, buscando o melhor retorno do capital investido pela sociedade brasileira.

⁴ Plataforma Nilo Peçanha: uma plataforma criada com a finalidade de reunir em um único ambiente dados e indicadores que contribuem para o desenvolvimento institucional. Criado em 2018, o ambiente virtual coleta, valida e dissemina estatísticas da Rede Federal. As informações são monitoradas pela Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica (Setec/MEC) (CONIF, 2019).

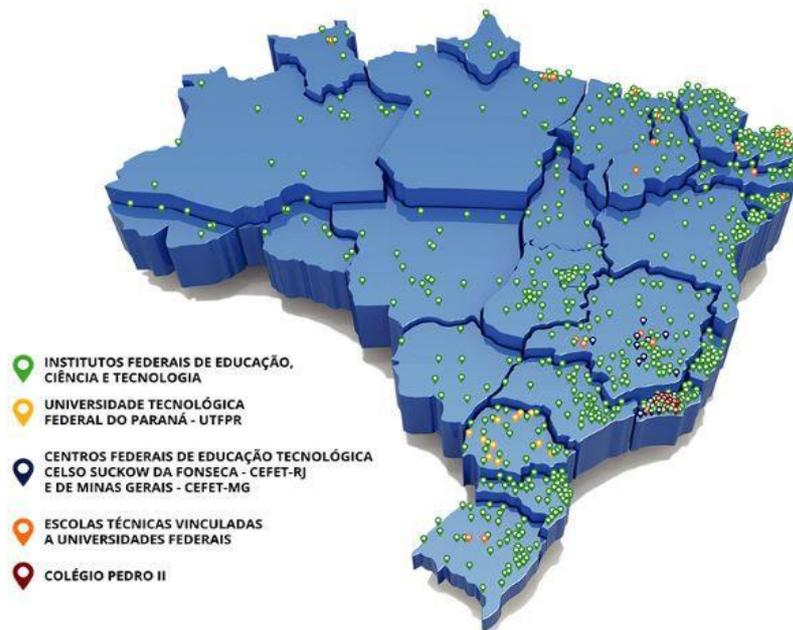


Figura 3- Distribuição geográfica da Rede Federal Tecnológica
 Fonte: (MEC, 2019)

De acordo com o Conselho Nacional das Instituições da Rede Federal de Educação Profissional Científica e Tecnológica (CONIF), a Rede Federal vem cumprindo seu papel de oferecer uma educação profissional, científica e tecnológica pública, inovadora e inclusiva. Os Institutos Federais, com uma proposta singular de organização e gestão, passam a fazer parte indissociável da educação nacional. Na autonomia que lhes é conferida, traduzem a realidade com que dialogam, regional e localmente, considerados em sintonia com o global, na perspectiva o desenvolvimento sustentável (CONIF, 2019; MEC, 2019).

A Rede Federal presente em cerca de 570 municípios nas 5 regiões do país, contando com aproximadamente 71.800 servidores (docentes e técnico-administrativos) e atendendo cerca de 800 mil alunos em cursos técnicos, tecnológicos, superiores, mestrado e doutorado presenciais e a distância, se consolida como um poderoso instrumento de disseminação de conhecimento e de transformação da sociedade (CONIF, 2019).

Neste cenário nacional de expansão, o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) teve um crescimento substancial, passando de 2 unidades em 2000, para 21 *campi* em 2019, distribuídas em 17 municípios do estado do Rio Grande do Norte.

Atualmente, o IFRN possui cerca de 30 mil alunos em seus 21 *campi* distribuídos por todas as regiões do Estado, atuando de forma verticalizada, oferecendo cursos de níveis

médio e superior, mestrado e doutorado nas modalidades presencial e à distância – esses últimos ofertados pela Instituição e também através da Rede Escola Técnica do Brasil (Rede e-Tec Brasil) e do Sistema Universidade Aberta do Brasil (UAB). Ao todo, são 109 cursos oferecidos, nas áreas de Energia, Recursos Naturais, Controle e Processos Industriais; Desenvolvimento Educacional e Social; Gestão e Negócios; Informação e Comunicação; Infraestrutura; Produção Alimentícia; Produção Cultural e Design; Turismo, Hospitalidade e Lazer e Produção Industrial (IFRN, 2019c).

A Figura 4 mostra a dimensão do crescimento do IFRN em número de *campi* desde o marco de criação do ensino profissional no Brasil até transformação em IF's.

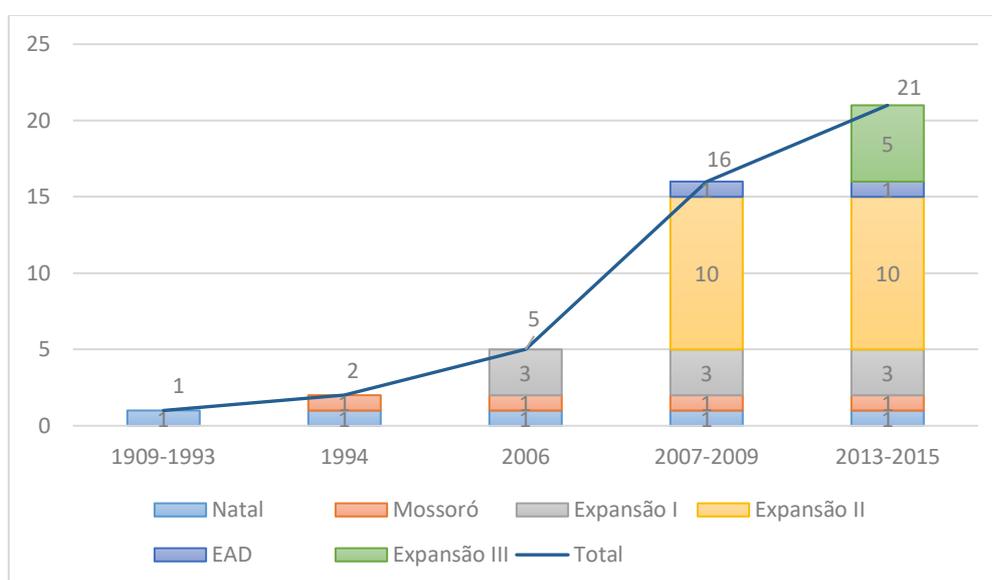


Figura 4- Expansão do IFRN
 Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (IFRN, 2019c).

Conforme observado, o IFRN apresentou um significativo crescimento no período de 2003 até 2019, cerca de 1000% em 16 anos, enquanto a média nacional alcançou 480%. É neste cenário, que surgem oportunidades para o desenvolvimento de políticas e ações educacionais que criem uma cultura institucional de sustentabilidade ambiental, contemplando nesta, a cultura da eficiência energética.

Corroborando com esse potencial da Rede Federal, GÓES (2015) analisa que o reconhecimento do importante papel desempenhado pelas universidades e outras IES na promoção do desenvolvimento sustentável é ainda refletido nas dezenas de declarações assinadas por líderes dessas instituições, estabelecendo e comunicando um compromisso informal com o Desenvolvimento Sustentável e de incorporação das filosofias e princípios da sustentabilidade em todas as funções da instituição.

1.4. Sustentabilidade e Eficiência Energética na Prática Pedagógica e Gestão da Rede: O Comitê Temático de Formação Profissional em Energias Renováveis e Eficiência Energética

Em 2015, a Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica do Ministério da Educação (Setec/MEC) criou o Comitê Temático de Formação Profissional em Energias Renováveis e Eficiência Energética, com a finalidade de promover o desenvolvimento sustentável alinhado com a expansão da formação profissional, o treinamento de recursos humanos em energia solar fotovoltaica, energia eólica, biogás e eficiência energética, bem como sua inserção nos processos de ensino aprendizagem. Participam do grupo representantes da Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica (Setec) do MEC, dos institutos federais, do Ministério de Minas e Energia e do setor produtivo atinentes às energias renováveis. Este comitê conta com apoio técnico e científico da Agência de Cooperação Alemã de Desenvolvimento Sustentável (GIZ)(MEC, 2017).

De acordo com o MEC (2017), as atividades do Comitê buscam a redução do custeio com as instituições da Rede, e concomitantemente a disseminação da cultura da eficiência energética e a sustentabilidade em seus núcleos básicos, seja na preparação dos alunos, seja através de processos de certificação, como também na pesquisa e/ou nas inovações. O objetivo é colocar todos os *campi* dos 38 Institutos Federais na vanguarda do ensino para a sustentabilidade e a eficiência energética. Como consequência das ações do Comitê as instituições públicas federais de ensino, no Brasil, em especial os Institutos Federais, têm sido estimulados a empregar políticas de promoção da eficiência energética em seus processos construtivos e nos espaços de ensino, pesquisa e extensão.

Na Tabela 2 são apresentadas as atividades, a metodologia e o detalhamento de ações que estão no escopo da atuação desse Comitê.

Tabela 2- Resumo das atividades desenvolvidas pelo Comitê temático de formação profissional em energias renováveis e eficiência energética

Comitê temático de formação profissional em energias renováveis e eficiência energética		
Atividade	Detalhamento	Metodologia
Reuniões Setoriais	Apoio ao estabelecimento de parcerias e diálogos com indústrias do ramo com as quais a GIZ mantém relações	- Eventos com participação de Institutos Federais e representantes das indústrias - Núcleos/workshops de trabalho
Desenvolvimento de itinerários e material didático	Adequação de conteúdos já elaborados para outras instituições de ensino no Brasil para as especificações dos institutos federais e desenvolvimento de novos itinerários	- Desenvolvimento e adequação de currículo e de material didático com especialistas - Especificação de equipamentos e laboratórios
Capacitação de professores	Capacitação de professores dos institutos federais para os novos conteúdos de energias renováveis e eficiência energética	- Treinamentos voltados para a parte prática
Implementação de curso	Apoio à realização e certificação de cursos pilotos, incluindo parcerias com instituições alemãs	- Apoio à implementação de curso-piloto pelos institutos federais
Avaliação de resultados e qualidade	Apoio à avaliação da qualidade e efetividade dos cursos oferecidos	- Pesquisa de contratação de ex-alunos em indústrias de energias renováveis e eficiência energética

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (MEC, 2015).

1.5. Projeto IF Solar

Fundamentado em um ambiente institucional favorável a promoção da sustentabilidade e eficiência energética, aderente, dessa forma, às orientações do Comitê Temático de Formação Profissional em Energias Renováveis e Eficiência Energética, em 2015, o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS), concebeu o projeto denominado IF Solar. O mesmo assume como objetivo promover ações que culminem na implantação e/ou ampliação de usinas solares

fotovoltaicas para geração de energia elétrica no IFSULDEMINAS e também replicar a iniciativa em mais 82 unidades da Rede (IFSULDEMINAS, 2016).

A partir do desafio de buscar fontes renováveis de energia, o IF Solar se configura como um projeto inovador e pioneiro, traz na base conceitual da sua proposta a vinculação da promoção da sustentabilidade com a economia de recursos financeiros das instituições envolvidas, pela redução dos custos com a aquisição de eletricidade.

Trata-se de um investimento de elevado impacto, no entanto, as avaliações econômicas e financeiras feita apontam, segundo seus gestores, para um retorno relativamente rápido. Com um investimento total de cerca de R\$ 1.900.000,00 para instalação de 4 unidades de geração - cada usina adquirida a R\$ 467.438,00 - o IFSULDEMINAS tem a expectativa de gerar uma economia de cerca de R\$ 600 mil ao ano. Nestes termos o tempo de retorno do investimento está estimado em torno de quatro anos (IFSULDEMINAS, 2016).

No âmbito nacional o projeto envolve 82 unidades da Rede Federal. Segundo IFSULDEMINAS, aquelas que aderiram à licitação somam 20.172 painéis fotovoltaicos de 265 Watts cada um, totalizando uma potência instalada nas usinas de 5.470 MWp. O valor do investimento totalizou R\$ 40.000.000,00 (IFSULDEMINAS, 2016). A Tabela 3 apresenta a relação das instituições participantes do processo e a respectiva quantidade de usinas contratadas.

Com a implantação das usinas fotovoltaicas na Rede Federal, além da expectativa de economia de recursos financeiros públicos, o projeto IF Solar dá a oportunidade para que seu corpo docente e discente utilize as usinas como laboratórios, ampliando o conhecimento sobre as fontes renováveis, fomentando a pesquisa e a inovação nesta área, tanto do ponto de vista técnico, quanto social e ambiental, incentivando e semeando ações para um desenvolvimento mais sustentável.

Tabela 3- Lista das instituições que aderiram ao processo de aquisição de usinas por meio do IF Solar

Instituição	Quantidade de usinas
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (IFES)	02
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins (IFTO)	02
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano (IFBAIANO)	02
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense (IFSUL)	02
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília (IFB)	02
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)	02
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (IFGOIANO)	01
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná (IFPR)	02
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso do Sul (IFMS)	02
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso (IFMT)	10
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)	03
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)	29
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Roraima (IFRR)	03
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte De Minas (IFNMG)	07
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG)	04

1.6. Projeto IFRN Solar

O IFRN desenvolve ações de ensino e pesquisa nas áreas ambiental e energética, ofertando diversos cursos em nível técnico e superior. Dentre os diversos cursos ofertados que trabalham essa temática, pode-se citar como exemplo o curso superior em Engenharia da Energia (CNAT), curso superior de Tecnologia em Energias Renováveis (Campus João Câmara), curso superior em Tecnologia Ambiental (CNAT) e Mestrado em recursos Naturais (CNAT) (IFRN, 2019a).

Em 2013, o governo brasileiro disponibilizou recursos para o financiamento de projetos orientados a disseminar ações de sustentabilidade a serem implantados em instituições de ensino federal, com a finalidade de incentivar a adoção de fontes renováveis de energia, através da geração distribuída de forma aderente a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, revisada pela a Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015 (ANEEL, 2012,

2015). O IFRN ao se credenciar a receber estes recursos teve seu projeto aprovado, possibilitando assim a captação de recursos para instalação de 21 usinas de geração de energia solar fotovoltaica, totalizando 2,11 MWp. De acordo com dados apresentados no projeto IFRN Solar, o montante de recursos públicos investidos nas instalações das referidas usinas foi de aproximadamente 16,7 milhões de reais (WANDERLEY e JÚNIOR, 2018). Ao final de 2018, todas as usinas inicialmente previstas já encontravam-se em operação, alcançando uma potência instalada de 2.102 kWp (IFRN, 2019d).

A Tabela 4 apresenta um resumo das principais informações técnicas e financeiras referentes aos sistemas fotovoltaicos instalados no IFRN. Na figura 5 se tem um gráfico representativo da evolução da capacidade instalada das usinas do projeto IFRN entre 2013 e 2018, enquanto a Figura 6 mostra a evolução da capacidade instalada das usinas do projeto IFRN Solar ao longo do tempo.

A partir dessa Tabela e Figuras se pode inferir que após a implantação exitosa das primeiras usinas em 2013 e 2014, o volume de investimentos foi ampliado, o que possibilitou que a potência instalada nos anos seguintes alcançasse os 2,11 MWp em 2018. No CNAT está instalada a maior usina fotovoltaica, com 197,32 kWp, porém por ser o campus de maior demanda de energia elétrica, a geração própria representa apenas 10%, o menor percentual dentre todos os *campi*. Enquanto que no Campus de João Câmara a geração advinda da usina fotovoltaica responde por cerca de 47% da energia elétrica demandada no campus. No complexo de usinas do IFRN foram utilizados três tipos de instalação: no telhado, no solo e no telhado de estacionamentos. Os custos por kWp instalado variaram entre as usinas devido a alguns fatores: tipo de instalação, pela especificação dos equipamentos, pelas particularidades de cada projeto, como também pela oscilação dos custos de importação dos sistemas.

Tabela 4- Resumo das principais informações técnicas e financeiras das usinas do IFRN Solar

Campus	Início da operação	Investimento R\$	Tipo de Instalação	Potência Instalada (kWp)
Reitoria	30/12/2013	319.000,00	Cobertura	56,40
Ceará Mirim	24/03/2014	638.000,00	Cobertura	112,80
São Paulo do Potengi	17/04/2014	638.000,00	Cobertura	112,80
Canguaretama	03/02/2015	638.000,00	Solo	112,80
Currais Novos	15/05/2015	650.000,00	Solo	112,80
Parelhas	06/08/2015	320.000,00	Cobertura	50,00
São Gonçalo do Amarante	17/11/2015	504.500,00	Estacionamento	56,35
Natal Central	18/01/2016	1.213.250,00	Cobertura	197,32
Pau dos Ferros	21/06/2016	767.000,00	Cobertura	114,40
Caicó	31/08/2016	1.009.000,00	Estacionamento	114,40
João Câmara	15/09/2016	1.009.000,00	Estacionamento	114,40
Lajes	01/12/2016	320.000,00	Cobertura	50,00
Santa Cruz	18/04/2017	653.520,00	Cobertura	82,68
Mossoró	23/05/2017	653.520,00	Cobertura	82,68
Zona Norte	2017	653.520,00	Cobertura	82,68
Nova Cruz	2017	896.700,00	Estacionamento	82,68
Apodi	2017	896.700,00	Estacionamento	82,68
Ipanguaçu	2017	1.114.540,00	Estacionamento	110,24
Macau	2017	896.700,00	Estacionamento	82,68
Cidade Alta (Rocas)	2017	896.700,00	Estacionamento	82,68
Parnamirim	2017	896.700,00	Estacionamento	82,68
Mossoró (ampliação)	2017-2018	435.680,00	Cobertura	55,00
Zona Norte (ampliação)	2017-2018	217.840,00	Cobertura	27,50
Santa Cruz (ampliação)	2017-2018	217.840,00	Cobertura	27,50
Reitoria (ampliação)	2017-2018	217.840,00	Cobertura	27,50
Total		16.673.550,00		2.102,01

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (IFRN, 2019b; WANDERLEY, 2017)

A Figura 5 mostra a evolução da capacidade instalada das usinas do projeto IFRN Solar ao longo do tempo.

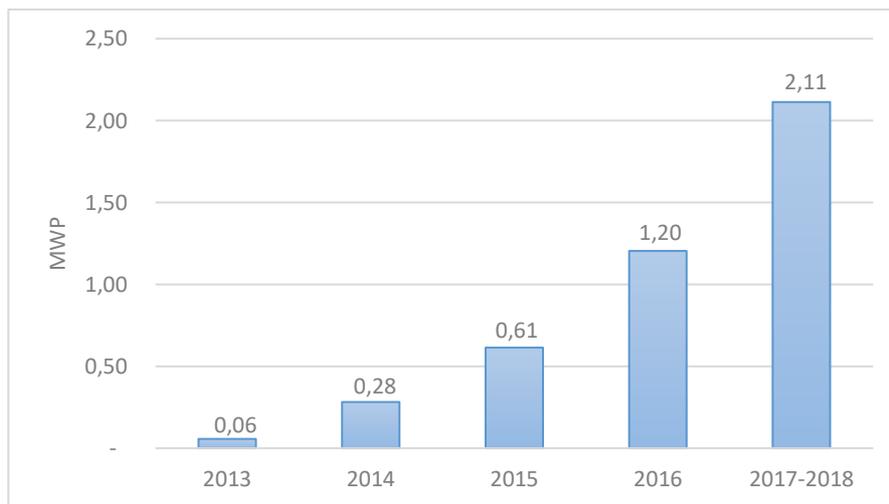


Figura 5- Evolução da capacidade instalada das usinas fotovoltaicas no IFRN (MWp)
 Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (IFRN, 2019b)

A Figura 6 mostra a representatividade que a energia gerada por cada usina do IFRN tem em relação a demanda total de energia de cada unidade.

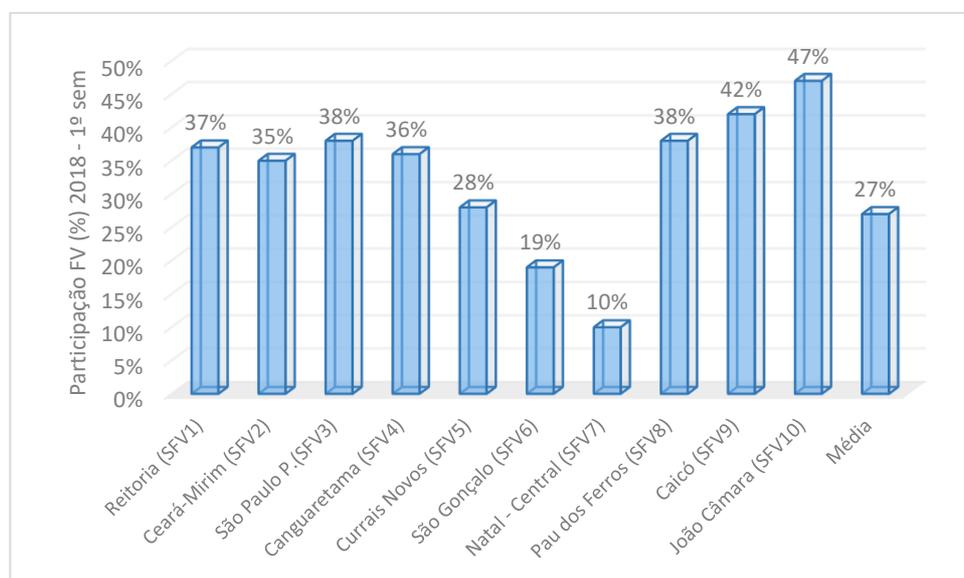


Figura 6- Representatividade que a geração de cada usina fotovoltaica tem em média no consumo total de cada *campi*
 Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (IFRN, 2019d).

No capítulo 4 desse trabalho serão apresentados dados mais completos utilizados em um estudo mais aprofundado que foi realizado em uma amostra com 10 dessas usinas.

Os resultados econômicos advindos da adoção dos sistemas fotovoltaicos ao serem contabilizados mostram que em 2015 a economia foi de R\$ 215.000,00 e no ano de 2016, com 12 sistemas instalados, a economia foi de R\$ 613.000,00 (WANDERLEY, 2017). Quando operado em sua totalidade, 2,11 MWp, o projeto IFRN Solar deverá, como projetado, responder por cerca de 30% da energia demandada por todos os *campi* do IFRN (IFRN, 2014).

Impulsionado pelo projeto IFRN Solar, o Plano de Desenvolvimento Institucional do IFRN 2014-2018, considerou para as unidades do IFRN, o mandatório desenvolvimento de projetos arquitetônicos que contemplassem conceitos relacionados à eficiência energética, tais como: ventilação, iluminação natural e proteção da fachada contra radiação solar, como também coleta e reaproveitamento de águas pluviais, tratamento e reuso de água servida, dimensionamento adequado dos circuitos elétricos - com exigência de equipamentos mais eficientes, com selo PROCEL, além da instalação de usinas solares fotovoltaicas e/ou eólicas para abonar, parcialmente ou na sua totalidade a demanda de energia elétrica advinda do funcionamento e uso de suas edificações. Tais procedimentos, conformam-se hoje em um dos critérios de alta relevância na busca pela obtenção dos selos verdes (IFRN, 2014).

Os selos verdes ou selos ambientais, também chamados de certificados ou rótulos ecológicos, são utilizados para identificar produtos (edificações), adequados ao uso eficiente dos recursos e que apresentam menor impacto ao meio ambiente quando comparado com outros produtos disponíveis no mercado. Objetivam promover a melhoria da qualidade ambiental de produtos e processos a partir do engajamento das forças de mercado pela conscientização de consumidores e produtores (FOELKEL, 2018; MEDEIROS, 2013).

A avaliação das ações voltadas a eficiência energética na construção e ampliação dos prédios do IFRN está apresentada no capítulo 3. Já os resultados do projeto IFRN Solar em termos de sua contribuição à sustentabilidade são discutidos no capítulo 4.

2. Eficiência Energética em Edificações: Repercussões Sobre Emissões de GEE

2.1. Introdução

O aquecimento global como apontado pelo IPCC, mostra ser possível observar, desde a década de 1950, mudanças que não eram percebidas anteriormente, como o aumento do degelo, aquecimento dos oceanos e subida do nível do mar, dentre outros (IPCC, 2014a).

Diante da constatação de que a influência humana na Terra tem contribuído de forma significativa para o aumento das emissões de GEE, e por consequências para as mudanças climáticas em curso, avalia-se os riscos e os possíveis desdobramentos que essas mudanças podem provocar na vida no planeta. Dessa forma, é possível constatar um maior interesse e empenho dos Estados Nacionais em planejar ações para adaptação e mitigação, por meio de protocolo de intenções e compromissos com metas de redução de emissões de GEE.

Uma das formas de assegurar que essas iniciativas tragam resultados positivos é elaborar estudos que possibilitem um melhor mapeamento e quantificação das principais fontes de emissão de GEE, bem como dos seus responsáveis. Buscando aprofundar esse conhecimento é primordial levantar a representatividade dos principais GEE, definir padrões para correlacionar suas contribuições ao aquecimento global. Assim como, mapear processos e setores que contribuem com as emissões de GEE. Dessa forma, é possível eleger ações prioritárias em cada nação e em cada setor e estimar os seus possíveis resultados, objetivando otimizar os recursos investidos nas ações que tenham a finalidade de mitigar emissões.

Dentre os setores produtivos, o setor de edificações, considerando neste as emissões decorrentes da geração de energia no local, da queima de combustíveis para aquecimento em edifícios ou para cocção nas residências, em 2016, foi responsável por cerca de 8,5% das emissões de GEE no mundo (IEA, 2018a). Porém, esta participação se eleva para aproximadamente 27% quando são consideradas as emissões advindas da geração de energia elétrica que é demandada pelo uso dessas edificações (IEA, 2018a). Este mesmo setor é apontado pelo IPCC como o que tem maior potencial econômico de mitigação de GEE (IPCC, 2007, p. 11).

A importância dada às emissões de GEE na geração elétrica demandada pelo setor de edificações se vincula fortemente a influência creditada ao fator de emissão da matriz elétrica de cada Estado Nacional, sendo esse resultado das rotas tecnológicas adotadas, assim como, da disponibilidade de recursos energéticos de cada Nação.

Em vários países e no Brasil identificam-se iniciativas que buscam fomentar a eficiência energética nas edificações, sejam por meio de certificações ambientais ou programas de etiquetagem que qualifiquem ou atestem as edificações que apresentam boas práticas com relação ao consumo de energia, como também a promoção da sustentabilidade ambiental.

Este capítulo tem o objetivo de abordar os fatores que influenciam nas mudanças climáticas, suas possíveis consequências e riscos relacionados. Trata também das iniciativas e compromissos que os países tem adotado/aderido para contribuir com a redução das emissões de GEE. Para tanto, inicia contextualiza a temática do aquecimento global e as alterações climáticas em curso, mostra um panorama das emissões de GEE no mundo e no Brasil, identificando participações de cada setor nas emissões totais, com atenção especial as edificações e a geração de energia elétrica. Discute, de maneira referencial, os instrumentos utilizados para fomentar a eficiência energética nas edificações, com atenção especial ao PBE EDIFICA. Conforma-se então como uma abordagem teórica que dá embasamento às discursões que serão sustentadas nos capítulos seguintes.

2.2. Motivadores para Promoção da Eficiência Energética em Edificações

Programas de governo, planos e projetos orientados a promoção da eficiência energética, bem como o fomento da expansão da geração centralizada ou distribuída, a partir de fontes renováveis de energia e suas tecnologias são iniciativas impulsionadas pela agenda global, através de protocolos e acordos resultantes das negociações no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC) e de outras iniciativas oriundas dos esforços planetários para promoção da sustentabilidade. Neste ambiente, os estados nacionais se articulam em torno de um objetivo comum que aponta para a compreensão das causas, suas possíveis consequências e quais as

alternativas viáveis de mitigação às emissões de GEE dirigidas ao enfretamento da denominada Mudanças Climáticas⁵.

De acordo com o IPCC, a mudança climática é um dos maiores e mais complexos problemas de abrangência planetária da atualidade, materializando-se em desdobramentos de ordem social, econômica e ambiental. O Painel indica que as emissões antropogênicas dos Gases de Efeito Estufa (GEE), provavelmente, são a principal causa do aumento médio registrado da temperatura na Terra a partir do meio do século XX, sendo dessa forma, a maior responsável pelas possíveis alterações no regime climático global, com impacto na fauna e na flora em diversas regiões, com possíveis contribuições para o desequilíbrio ambiental vigente (IPCC, 2013).

Segundo HANSEN e colab. (2011) a diferença entre a quantidade de energia solar absorvida pelo planeta e a quantidade de energia emitida de volta ao espaço provoca um desequilíbrio energético, cuja consequência é o aquecimento global. Diversos fatores podem contribuir para a ocorrência de mudanças no equilíbrio energético da Terra, tanto naturais quanto humanos. Estimativas do comportamento do clima da Terra, referenciado a centenas e de milhares de anos, mostra que o sistema climático varia naturalmente dentro de uma ampla gama de escala de tempo. As mudanças climáticas anteriores à revolução industrial, vivenciada no século XVIII, geralmente podem ser explicadas por causas naturais, como alterações na energia solar, erupções vulcânicas e mudanças naturais das concentrações de GEE. No entanto, as mudanças climáticas verificadas nas últimas quatro décadas, não podem ser elucidadas apenas por causas naturais. As pesquisas indicam que as causas naturais não justificam o maior aquecimento observado, principalmente a partir de meados do século XX. Por outro lado, é extremamente provável que as atividades humanas tenham sido uma causa influente desse aquecimento (IPCC, 2013).

O IPCC (2018), em um relatório especial sobre os impactos do aquecimento global de 1,5 ° C acima dos níveis pré-industriais e dos caminhos globais de emissão de gases estufa, mostra que alguns modelos climáticos projetam alterações robustas nas características do clima regional, quando se compara os dias atuais com o cenário de aquecimento global de 1,5° C e com o cenário de aumento da temperatura entre 1,5° C e

⁵ Mudanças Climáticas: O IPCC define como sendo a variação estatística do estado médio ou da variância do clima, permanecendo por um longo período de tempo (geralmente décadas ou mais). Estas alterações climáticas podem ser devido a processos internos naturais ou forças externas, ou a alterações antropogênicas persistentes na composição da atmosfera ou no uso da terra (IPCC, 2001).

2° C. Essas alterações incluem aumentos na temperatura média na maioria das regiões terrestres e oceânicas, extremos quentes nas regiões mais habitadas, precipitação intensa em várias regiões, e a probabilidade de intensificação e recorrência de seca e déficits de precipitação em regiões já marcadas por esses eventos. Os riscos de eventos de precipitação pesada são projetados para ser maior a 2°C em comparação com 1,5 °C do aquecimento global em várias regiões de alta latitude e/ou alta elevação no hemisfério norte, leste da Ásia e leste da América do Norte. Diante desses riscos, é imprescindível adotar ações que atuem na curva de crescimento das emissões de GEE, de forma reverter sua escalada e apontar reduções no médio e longo prazo.

De acordo com o IPCC (2018), estima-se que as atividades humanas tenham contribuído para o aumento de aproximadamente 0,8°C a 1,2 °C de aquecimento global acima dos níveis pré-industriais. Se as emissões de GEE mantiverem o ritmo até agora apresentado, o aquecimento global continuará a aumentar à taxa atual e deverá atingir 1,5°C entre 2030 e 2052.

Ainda de acordo com o IPCC (2007) o nitrogênio e oxigênio são os dois gases mais abundantes na atmosfera, o primeiro compreende 78% da atmosfera seca e o segundo 21%. Estes dois gases não exercem quase nenhum efeito estufa. Ao invés disso, o efeito estufa vem de moléculas mais complexas e muito menos comuns. O vapor de água é o gás de efeito estufa mais importante e o dióxido de carbono (CO₂) é o segundo.

Os GEE estão presentes naturalmente da atmosfera terrestre, mas possuem também origem em determinadas atividades antrópicas conforme apresentado na Tabela 5. O Protocolo de Quioto, em seu Anexo A, apresenta como os principais GEE: o CO₂, o CH₄, o N₂O, os PFCs, os HFCs e o SF₆, tendo a queima de combustíveis fósseis como a principal fonte de emissão de CO₂, a alteração do uso da terra a principal fonte de emissão de CH₄ e o uso de fertilizantes agrícolas químicos a principal fonte de emissão de N₂O. Na Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP17), ocorrida em Durban no ano de 2011, o NF₃ (tri fluoreto de nitrogênio) foi incluído na lista dos GEE de Quioto (UNFCCC, 2011) .

GEE	Principais fontes de emissão
CO ₂	Uso de combustíveis fósseis, destruição de florestas e alteração dos usos do solo
CH ₄	Produção e consumo de energia (incluindo biomassa), atividades agrícolas, aterros sanitários e águas residuais
N ₂ O	Uso de fertilizantes, produção de ácidos e queima de biomassa e combustíveis fósseis
Halogenados (HFCs, PFCs e SF ₆)	Indústria, refrigeração, aerossóis, propulsores, espumas expandidas e solventes
NF ₃	Industria de semicondutores e fotovoltaica

Fonte: Adaptado de (PROCLIMA, 2016).

Em escala global, os principais GEE emitidos pelas atividades humanas estão divididos de acordo com o apresentado na Figura 7. Em 2014, o dióxido de carbono representou 77% das emissões de GEE, o que o credita o posto de principal GEE a ter ações de mitigação projetada e implementada no mundo.

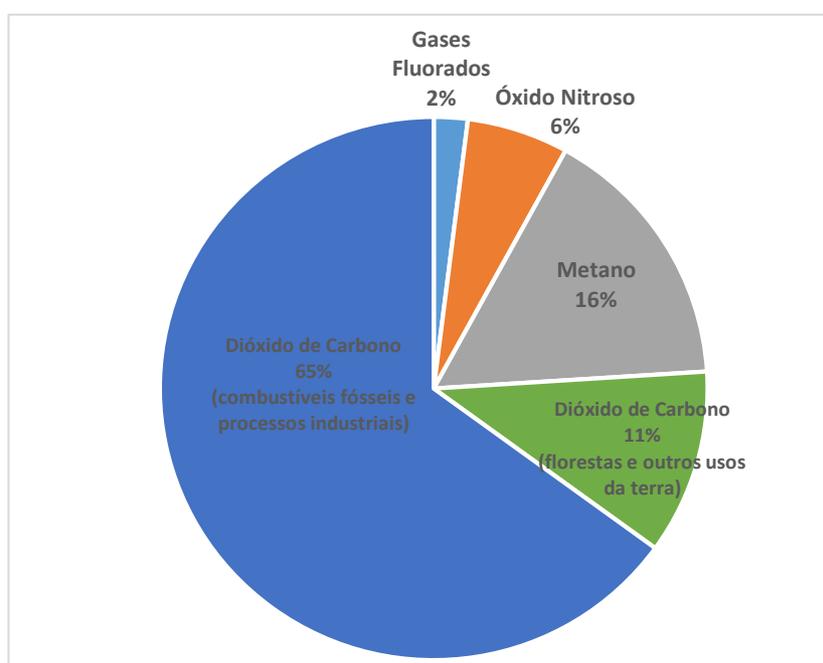


Figura 7- Emissões de GEE por gás

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (IPCC, 2014a).

Buscando uma análise consolidada dos quantitativos de GEE, utiliza-se uma conversão dos demais GEE para o CO₂ equivalente, uma medida internacionalmente aceita que expressa a quantidade de gases de efeito estufa (GEEs) em termos equivalentes da quantidade de dióxido de carbono (CO₂).

O *Global Warming Potencial* (GWP) é o fator que determina o impacto radiativo de uma unidade de massa de determinado GEE em relação a uma unidade de massa de dióxido de carbono em um período de tempo. Este valor está relacionado aos elementos químicos que compõem o gás, onde cada ligação química entre estes elementos tem um potencial

maior ou menor de absorver radiação infravermelha, resultando em um GWP maior ou menor. Desta forma, a emissão total de GEE é oficialmente consolidada uma unidade de medida específica, o CO₂ equivalente (CO_{2e}) (MCTIC, 2010).

De acordo com o MCTIC (2010), reside no pensamento científico críticas fundamentadas ao o uso do GWP como métrica de conversão em CO₂ equivalente, por ela não representar de forma adequada a contribuição relativa dos diferentes GEE à mudança climática. Seja mensurada em termos de aumento da temperatura terrestre, aumento do nível do mar ou em qualquer estatística de elementos meteorológicos relacionados aos danos. A mudança do clima não é proporcional à energia, exceto em curtos períodos de tempo. Na visão do Governo Brasileiro (MCTIC, 2010), a contribuição relativa de cada GEE não é representada de forma adequada pelo GWP. O seu uso enviesa a políticas de mitigação inadequada, enfatiza, assim, de forma sobrevalorizada, e de modo errôneo, a relevância de GEE de curto tempo de permanência na atmosfera, como é o caso do Metano.

A sequência dos relatórios do IPCC traz novas considerações sobre o GWP. O AR4 examina métricas alternativas ao GWP e o AR5 aprofundou esta análise. Foi apresentado no AR4 o *Global Temperature Potencial* (GTP), que mesmo com a incerteza maior para seu cálculo pela dependência de utilizar a sensibilidade do sistema climático, o GTP seria uma métrica mais adequada para mensurar os efeitos dos diferentes gases nas mudanças do clima. Portanto o seu uso proporcionaria a opção por políticas de mitigação mais apropriadas (MCTIC, 2010; SHINE e colab., 2005; ZHANG e colab., 2011).

Segundo o IPCC (2014a), o GTP é caracterizado como sendo uma medida *end-point* baseada na mudança de temperatura, ou seja, correlaciona a mudança na temperatura média da superfície da Terra, em determinado horizonte de tempo e em consequência de um impulso de emissão. Porém o IPCC pondera afirmando que a escolha mais adequada da métrica e de seu horizonte de tempo dependem de quais são os aspectos da mudança do clima mais relevantes (IPCC, 2013).

O IPCC (2013) conclui que a métrica de GTP é a mais adequada para as políticas que se baseiam em metas, por outro lado, o GWP não está diretamente relacionado a um limite de temperatura como é a meta de 2° C.

Portanto, diante do exposto, a métrica mais consistente com a finalidade de atuar de forma a reduzir o aumento da temperatura média global abaixo de 2° C em relação aos níveis pré-industriais é creditada ao uso do GTP (MCTIC, 2016).

Na Tabela 6 são apresentados os valores anteriores do GWP pelo SAR (IPCC, 1995) e os do AR5 (IPCC, 2014), para GWP e GTP

Tabela 6- Fatores para GWP (100 anos) e GTP (100 anos)

Gás	GWP anos SAR-1995	GWP anos AR5-2014	GTP 100 anos AR5-2014
CO ₂	1	1	1
CH ₄	21	28	4
CH ₄ fóssil	21	30	6
N ₂ O	310	265	234
HFC-23	11.700	12.400	12.700
HFC-32	650	677	94
HFC-125	2.800	3.170	967
HFC-134a	1.300	1.300	201
HFC-143a	3.800	4.800	2500
HFC-152	140	16	2
CF ₄	6.500	6.630	8.040
C ₂ F ₆	9.200	11.100	13.500
SF ₆	23.900	23.500	28.200

Fonte: Adaptado do (MCTIC, 2016)

A relação entre atividades humanas e os índices de emissões de GEE e suas consequências para o planeta Terra tem sido aceita por grande parte da comunidade científica como também pela maioria dos países (BORSARI, 2009).

A compreensão e convergência da aceitação de que as emissões antrópicas contribuem para a mudança climática global, tem provocado nos governos e nas organizações a obrigação da busca por medidas de mitigação de emissões de GEE e adaptação as mudanças climáticas. A utilização da metodologia do inventário de emissões de GEE tem sido adotada para mapear, quantificar e analisar a estrutura das fontes de emissão de GEE de uma atividade produtiva, processos, setores econômicos, municípios, estado ou Estado Nacional, possibilitando que de posse de uma melhor compreensão dessas estruturas o planejamento de ações estratégicas de gestão ocorram de maneira mais realista e eficiente (KENNEDY e colab., 2009).

De acordo com o segundo relatório da UNFCCC (Convenção- Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas), a mitigação é uma intervenção humana com a finalidade de reduzir as fontes ou aumentar os sumidouros de GEE (IPCC, 2014a). A mitigação das alterações climáticas consiste, portanto, em adotar ações destinadas a limitar a magnitude

ou a taxa de alterações climáticas a longo prazo. A mitigação da mudança climática geralmente envolve reduções nas emissões humanas (antropogênicas) de gases de efeito estufa (IPCC, 2007).

É crucial para a humanidade a busca por alternativas que contribuam para a mitigação das emissões de GEE. Uma vez que os riscos relacionados ao clima para sistemas naturais e humanos são maiores para o aquecimento global de 1,5° C do que o registrado no presente, mostrando ainda inferior, caso atingíssemos aumentos superiores a 2° C. Esses riscos dependem da magnitude e taxa de aquecimento esperada, localização geográfica, níveis de desenvolvimento e vulnerabilidade local e/ou regional, além das escolhas socioeconômicas e culturais em curso e alternativas implementadas objetivando a adaptação e mitigação (IPCC, 2018)

Diante dessa preocupação mundial com o tema das mudanças climáticas, em 2009, na Conferência das Partes (COP15) em Copenhague - que marcou o ápice de um processo de dois anos de negociações sobre um novo acordo climático – tinha-se como principal objetivo o estabelecimento de metas de redução de GEE para o período de 2013 até 2020. Na oportunidade, o Governo brasileiro apresentou o compromisso voluntário nacional de reduzir entre 36,1% e 38,9% a emissão de gases de efeito estufa até 2020 (PROCLIMA, 2016).

De acordo com MMA (2017b), o Brasil ao longo do processo de negociação internacional desenvolveu uma série de ações a nível nacional para combater e se adaptar as mudanças climáticas. A mais importante delas é a Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC), criada pela Lei nº 12.187, de 2009. O Ministério do Meio Ambiente (MMA), a partir desta legislação, estabeleceu estratégias e apresentou propostas de política pública voltadas ao monitoramento das emissões nacionais de GEE e a estruturação e implementação de planos setoriais de mitigação e adaptação.

A PNMC oficializou o compromisso voluntário brasileiro junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima de reduzir as emissões de GEE entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas para o ano de 2020. O Decreto nº. 7.390/2010, regulamentou a PNMC, e estabeleceu a linha de base das emissões de GEE para 2020 em 3,236 GtCO₂-eq, esse seria o valor da projeção natural, caso nenhuma medida fosse adotada. Ficou ainda determinada pela Lei o desenvolvimento dos planos setoriais de mitigação e adaptação nos âmbitos local, regional e nacional. A PNMC tem o objetivo de

harmonizar o desenvolvimento sustentável com crescimento econômico, erradicação da pobreza e redução das desigualdades sociais (MMA, 2017a).

Em 2015, o Brasil apresentou sua Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (iNDC) ao Acordo de Paris. Na sequência, em novembro de 2016, após a ratificação do Acordo de Paris, o Brasil assumiu o compromisso de implantar ações e medidas que apoiem o cumprimento das metas estabelecidas pelas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC) (MMA, 2017a). Os critérios de medição e metas do Brasil estabelecidas na NDC estão sintetizados na Tabela 7.

Tabela 7- Metas do Brasil no Acordo de Paris

Mitigação	Emissões de GEE
Ponto de referência	2005
Tipo	Meta absoluta em relação ao ano-base
Abrangência	Todo território nacional, para o conjunto da economia, incluindo CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, PFCs, HFCs, SF ₆
Métrica	GWP-100 (IPCC AR5)
Redução em 2025 (Contribuição)	Redução em 2030 (Contribuição indicativa)
37%	43%

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (BRASIL, 2016)

No detalhamento da NDC é possível identificar duas metas na área de energia elétrica que são exploradas nesta tese. A primeira delas refere-se ao compromisso de alcançar 10% de ganhos de eficiência no uso de energia elétrica em 2030. Dessa forma se projeta que a energia conservada será equivalente à geração de 25.500 MWh em hidrelétricas. A outra meta, objeto de atenção da pesquisa, contempla a participação por fonte na oferta de energia elétrica, o compromisso estabelecido é de expandir a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) para pelo menos 23% até 2030.

2.3. Emissões

As atividades humanas têm contribuído para o crescimento das emissões de GEE. Aproximadamente a metade das emissões antropogênicas de CO₂ entre 1750 e 2011 foram geradas nos últimos 40 anos. Estas emissões acumuladas de totalizam cerca de 2040 ±310 GtCO₂ adicionadas à atmosfera entre 1750 e 2011. Desde o ano de 1970, as emissões cumulativas de CO₂ gerada pela queima de combustíveis fósseis, produção de cimento e queimadas triplicaram enquanto as emissões de CO₂ provenientes das florestas

e outros usos da terra (FOLU)⁶ aumentaram cerca de 40%. As emissões anuais médias de FOLU foram de $3,3 \pm 2,9$ GtCO₂/ano, no entanto no ano de 2011 as emissões de FOLU alcançaram $34,8 \pm 2,9$ GtCO₂. Cerca de 40% destas emissões antropogênicas de CO₂ permaneceu na atmosfera, ou seja, o equivalente a 880 ± 35 GtCO₂ desde 1750, e o restante desse montante foi removido da atmosfera por sumidouros e armazenado em reservatórios naturais do ciclo de carbono. Já os 60% restante foram absorvidos em medida aproximadamente igual pela captação dos solos quanto pela vegetação e oceanos (IPCC, 2014a, p. 45) .

Segundo o IPCC (2014a, p. 45) em seu quinto relatório, as emissões antropogênicas totais de GEE continuaram aumentando entre 1970 e 2010, com maiores índices ao final deste período. Apesar da adoção de políticas voltadas à mitigação, as emissões anuais de GEE aumentaram em média 1,0 Giga tonelada equivalente de dióxido de carbono por ano (GtCO_{2eq})⁷, alcançando uma taxa de crescimento de 2,2% por ano entre 2000 e 2010, em comparação com 0,4 GtCO_{2eq} (1,3% ao ano) entre o período de 1970 a 2000. As emissões antropogênicas de GEE no período de 2000 a 2010 foram as mais elevadas da história humana, e atingiram 49(+/- 4,5) GtCO_{2eq}/ano em 2010. A crise econômica mundial de 2007/2008 apenas reduziu momentaneamente as emissões.

Neste mesmo período, entre 2000 e 2010, as emissões antropogênicas anuais de GEE cresceram em 10 GtCO_{2eq}. Este incremento foi diretamente creditado aos setores de fornecimento de energia (47%), indústria (30%), transportes (11%) e edificações (3%). Quando são contabilizadas as emissões indiretas elevam-se as contribuições dos setores de edificações e da indústria, isto ocorre por esses setores serem grandes demandantes de energia. A partir de 2000, as emissões de GEE aumentam em todos os setores com exceção do AFOLU, sendo o crescimento populacional e econômico os fatores mais importantes para esse crescimento (IPCC, 2014b). Por outro lado, algumas iniciativas foram bem sucedidas para reduzir o ritmo de exploração e degradação das florestas, a exemplo do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (PPCDAm) e do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento das queimadas no Cerrado (PPCerrado).

⁶ FOLU - Florestas e outros uso da terra também se refere a LULUCF (uso da terra, mudanças no uso da terra e florestas), que é o subconjunto das emissões de produtos agrícolas, florestais e de outros usos do solo (AFOLU) e remoções de GEE relacionadas a atividades diretas humanas induzidas por LULUCF, excluindo ainda as emissões e remoções agrícolas.

⁷ Salvo indicação em contrário, as emissões de CO₂ equivalentes neste trabalho incluem a cesta de gases de Kyoto (CO₂, CH₄, N₂O e gases fluorados) calculada com base no aquecimento global de 100 anos Potencial (GWP100) da SAR.

De acordo com o IEA (IEA, 2018a), considerando as emissões diretas do ano de 2016, o setor de eletricidade e geração de calor foi responsável pela maior parcela, 41,5% do total de emissões de GEE, seguido pelo setor de transporte (24,4%), setor da indústria (18,9%), setor de edificações⁸ (8,4%) e os demais setores representaram 6,8%. Quando se aloca as emissões de eletricidade nos setores consumidores, a indústria foi a maior emissora, seguida pelas edificações, cuja participação aumentou de 8% para 27% - devido à forte dependência de eletricidade deste setor - e depois pelo setor de transporte. A participação de cada setor nas emissões globais de GEE é apresentada na Figura 8, essas emissões são apresentadas em duas análises: a primeira considera as emissões diretas, e a segunda levou em conta a realocação das emissões do setor de eletricidade e geração de calor nos setores consumidores.

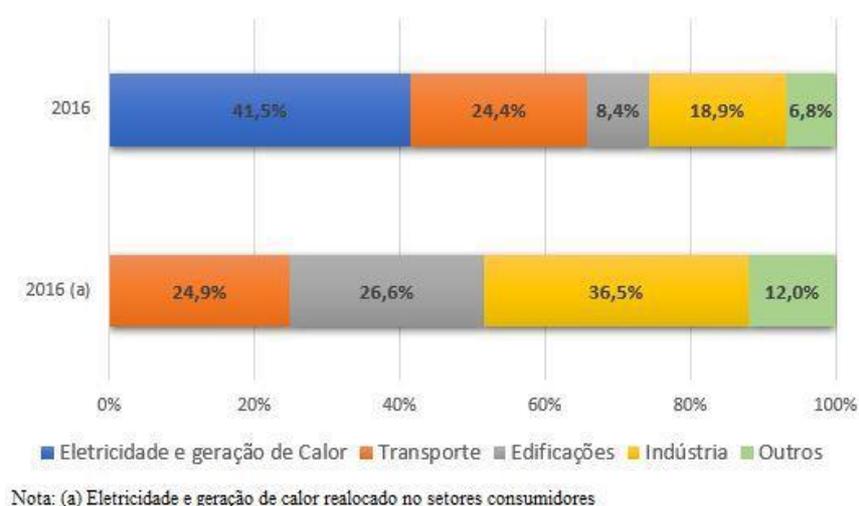


Figura 8- Emissão de GEE por setor em 2016
 Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (IEA, 2018a).

Nas análises que consideram as emissões advindas do processo de geração de eletricidade nos setores de consumo, o setor de edificações passa a ter significativa representatividade no total de emissões, apontando para a grande contribuição que o uso das edificações tem no consumo de energia, e por consequência, na responsabilidade por parcelas significativas das emissões de GEE. Dessa forma, o uso das edificações se consolida como campo fértil para atuações que objetivem mitigar emissões de GEE.

⁸ As emissões de gases do efeito estufa deste setor são decorrentes da geração de energia no local e queima de combustíveis para aquecimento em edifícios ou para cozinhar em residências. As emissões do uso de eletricidade em edifícios são excluídas e são cobertas pelo setor de eletricidade e produção de calor.

Emissões no Brasil

O Brasil é uma das maiores economias do mundo tendo vários potenciais caminhos para o seu desenvolvimento a longo prazo, atentando para os vários desafios no campo econômico, social e ambiental. Entretanto, o Brasil apresenta grande vulnerabilidade frente as mudanças climáticas, como consequência das suas dimensões continentais e das diferenças regionais de caráter tanto geográfico quanto socioeconômico. Neste cenário é imprescindível que o país se empenhe junto ao esforço global de mitigação de emissões de GEE, assegurando a segurança e o bem-estar da população, por meio da implementação de políticas de mitigação em sintonia com o desenvolvimento sustentável (LA ROVERE, 2016, p. 9).

Historicamente, a maior parcela de emissões líquidas estimadas de CO_{2eq} no Brasil é gerada pela mudança do uso da terra, mais especificamente pela degradação de florestas para o uso agropecuário. Porém, a partir de 2009 percebeu-se um aumento da participação relativa do setor de energia na emissão total de CO₂, provocado pelo aumento das emissões no setor de energia e pela redução significativa de emissões no setor de mudança do uso da terra (MCTIC, 2017, p. 10). A evolução das emissões de GEE no Brasil ao longo dos anos em cada setor pode ser observada na Figura 9. Observa-se que as emissões líquidas totais atingiram seu pico no ano de 2004, foram reduzidas em 2015 aos mesmos níveis de 1990.

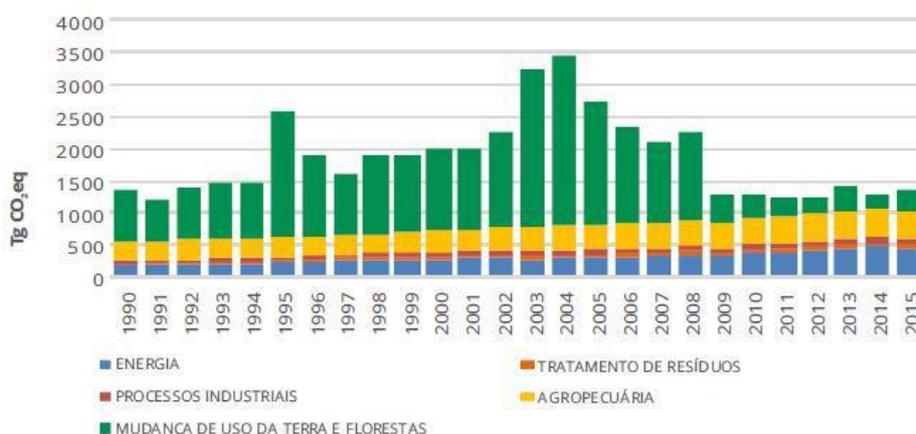


Figura 9- Emissões líquidas brasileiras de GEE no período 1990-2015 em CO_{2eq} (Tg=milhões de toneladas)

Fonte: (MCTIC, 2017, p. 10)

De acordo com o MCTIC (2017, p. 11) em sua estimativa anual de emissões, é possível constatar a evolução em números absolutos das emissões de CO_{2eq} em cada setor além de avaliar a variação percentual nos períodos de 2005-2015 e de 2010-2015. Estes

resultados⁹ são apresentados na Tabela 8. Observa-se um aumento da ordem de 42% das emissões em energia entre 2005 e 2015 e do período de 2010 a 2015 o crescimento estimado de 19,93%. Enquanto que no setor de mudanças do uso da terra e florestas ocorreu o inverso, uma redução de 50,04% entre 2005 e 2015, e outra redução menos significativa de 4,97% quando se analisa o período de 2010 a 2015.

Tabela 8- Emissões em CO2eq por setor para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015

Setores	1990	1995	2000	2005	2010	2015	Variação	
							2005-2015	2010-2015
Gg CO2eq								
Energia	187	225	286	316	375	449	42,14%	19,93%
Processos Industriais	52	65	74	78	90	95	21,86%	6,02%
Agropecuária	287	317	328	392	407	429	9,28%	5,36%
MUDANÇA DE USO DA TERRA E FLORESTAS (com remoções)	792	1.931	1.266	1.905	349	332	-82,58%	-4,97%
Tratamento de Resíduos	28	33	40	47	53	63	34,01%	18,60%
TOTAL (emissões líquidas)	1.345	2.572	1.994	2.738	1.274	1.368	-50,04%	7,41%
MUDANÇA DE USO DA TERRA EFLORESTAS (sem remoções)	949	2.139	1.473	2.154	629	639	-70,32%	1,60%
TOTAL (emissões brutas)	1.503	2.779	2.202	2.988	1.554	1.676	-43,92%	7,84%

Fonte: : Elaborado pelo autor utilizando como fonte de dados (MCTIC, 2017, p. 12) Gg=milhares de toneladas

Esta nova configuração da participação relativa de cada setor no total de emissões de GEE no Brasil pode ser visualizada na Figura 10. onde é apresentado a participação percentual de cada setor nas emissões de GEE totais para os anos de 2005 e 2015.

⁹ Os resultados das emissões líquidas e brutas totais apresentados na Tabela 8 tem a diferença entre os dois totais correspondente às remoções pelo crescimento da vegetação nas florestas e campos naturais manejados.

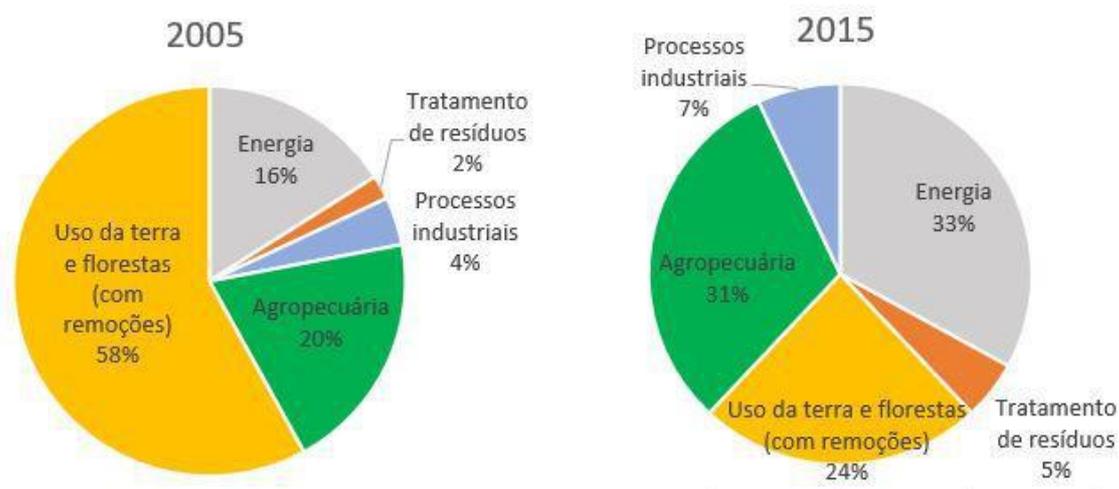


Figura 10- Comparativo de representatividade das emissões líquidas de GEE por setor no período 2005-2015 em CO₂eq.

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando como fonte de dados (MCTIC, 2017, p. 12)

No inventário realizado utilizando os dados até o ano de 2010, o III inventário, o setor de Energia representou 47,0% das emissões totais de CO₂, tendo aumentado 19,7% em relação às emissões de 2005. O setor de Energia engloba as emissões por queima de combustíveis fósseis e emissões fugitivas. As emissões fugitivas incluem a queima de gás nas tochas de plataformas e refinarias e a combustão espontânea de carvão em depósitos e pilhas de rejeito (MCTIC, 2016).

Ainda sobre o setor de energia, o Decreto 7.390/2010 considera o percentual de redução de emissões de gases de efeito estufa contido no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), de 27% em 2020. Essa redução corresponderá a um limite de emissão do setor em até 634 Tg CO₂eq. Entre 2012 e 2015, a estimativa de emissões do setor Energia quando comparado à trajetória exponencial hipotética para a meta, encontra-se dentro do esperado. A redução nas emissões no setor de energia no ano de 2015 quando comparado ao ano de 2014, pode ser explicado como reflexo da recessão econômica e também do menor consumo de combustíveis nas usinas térmicas devido à situação hídrica mais favorável (MCTIC, 2017). Conforme pode ser observado na Figura 11.

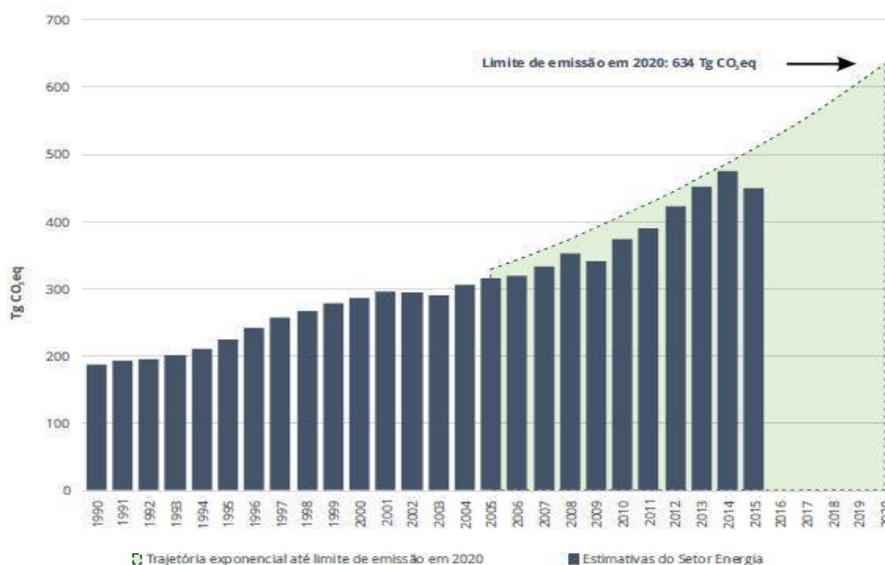


Figura 11 - Estimativas de emissões, até 2015 e limite de emissões em 2020 para o setor de energia
 Fonte: (MCTIC, 2017, p. 21)

No estado do Rio Grande do Norte, região objeto da pesquisa, os dados relativos a emissões de GEE mais atualizados são disponibilizados pelo Sistema de Estimativas de Emissões de GEE (SEEG), que é uma iniciativa do Observatório do Clima. Estas estimativas de emissão de GEE são calculadas de acordo com as diretrizes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), com base nos dados elaborados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e Comunicação (MCTIC) nos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de GEE, além de dados obtidos em relatórios governamentais, institutos, centros de pesquisa, entidades setoriais e organizações não governamentais. Na Figura 12 observa-se que as emissões geradas pelo setor de energia no RN têm aumentado no período de 1990 a 2017.

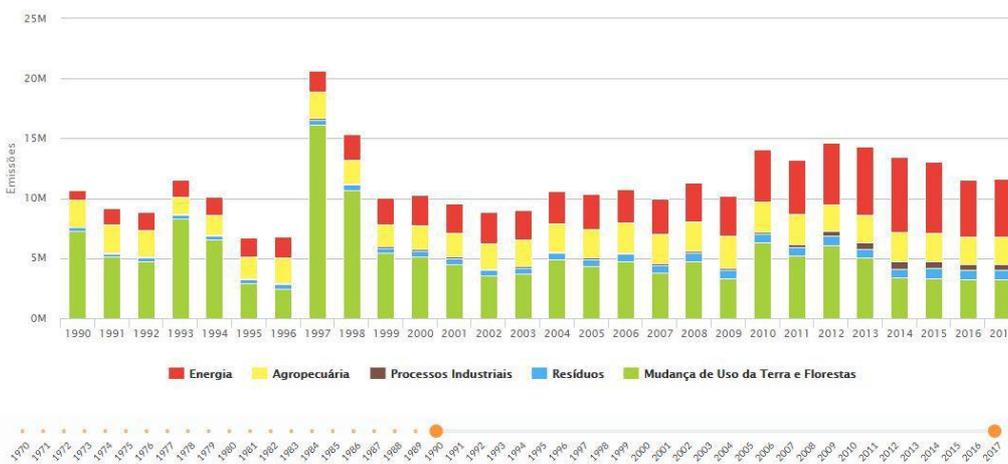


Figura 12- Emissões do Rio Grande do Norte por setor
 Fonte: (SEEG BRASIL, 2018)

2.4. Emissões nas Edificações

As emissões relacionadas à edificação ocorrem nas diversas etapas do seu ciclo de vida. Existem as emissões que estão associadas aos materiais de construção empregados, a construção da edificação e a fase de operação. Nesta última fase, as emissões são contabilizadas com base na energia elétrica consumida na edificação.

De acordo com MME (2003), os materiais de construção fazem parte do grupo de produtos com o maior consumo energético, tanto direto quanto indireto para sua fabricação. Sendo que cinco dos dez setores industriais que apresentam o maior consumo energético são ligados diretamente à construção civil.

A análise detalhada de todos os materiais que compõem uma edificação tem sido uma atividade de grande dificuldade para ser executada, principalmente pela grande diversidade de materiais envolvidos. Por outro lado, algumas pesquisas mostram que uma pequena parcela destes insumos da construção tem representatividade com relação as análises energéticas (THORMARK, 2002).

Com base em um estudo realizado por TAVARES e LAMBERTS (2004), pode ser identificado que apenas quatro itens da lista de materiais estudados (cimento Portland 32, Tijolo 8 furos (10x20x20 cm), Aço CA 50A D=12,5 mm e Chapa compensada resinado de 17 mm) representam cerca de 80% do total das emissões associadas ao material de construção empregado em uma edificação residencial utilizada como referência no estudo. No item a seguir será abordada a parcela de emissões de GEE relacionadas a energia elétrica consumida pelas edificações.

2.5. Emissões na Geração de Energia Elétrica

Em uma análise global, segundo a (IEA, 2018b), a matriz elétrica mundial é dominada pelos combustíveis fósseis. No ano de 2016, 65,10% da geração elétrica mundial foi proveniente da queima de combustíveis fósseis. As energias renováveis corresponderam a apenas 24,5% do total. Dessas renováveis a maior parcela é gerada por hidroelétricas (16,6%). A participação de cada fonte na matriz elétrica pode ser observada na Figura 13.

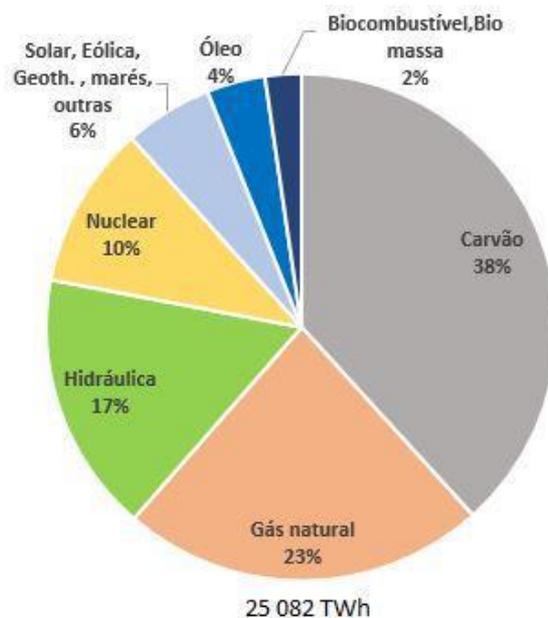


Figura 13- Geração de energia elétrica mundial por fonte
 Fonte: Elaborado pelo autor utilizando como fonte de dados (IEA, 2018b)

No Brasil, devido à conjuntura econômica adversa dos últimos anos, registrando variações do Produto Interno Bruto (PIB) de 0,1% (2014), -3,8% (2015), -3,6% (2016), a geração de energia elétrica em 2015 foi de 581,23 TWh, que correspondeu a uma retração de 1,5% com relação ao que foi gerado em 2014. Da geração total de 2015, a geração pela hidroelétrica atingiu 359,7 TWh, registrando uma queda de 9,1% sobre o valor gerado em 2014. Esta queda também ocorreu na eletricidade produzida a partir de derivados de petróleo, que teve uma retração de 18,6% em relação a 2014, gerando um total de 25,4 TWh respondendo por 4,4% de participação na matriz elétrica. A fonte eólica apesar de representar em 2015 3,7% do total, teve um crescimento de 77,1% em relação ao ano de 2014. O Brasil se manteve na liderança entre os países que tem maior participação de fontes renováveis na sua matriz elétrica, atingindo cerca de 74% em 2015 (EPE, 2016a). Em 2016 a geração foi de 578,90 TWh, o que representou uma queda de 0,4% em relação a 2015. Já em 2017, com a geração de 587,96 TWh, houve um incremento de 1,57% em relação ao ano anterior (EPE, 2018a). Em 2017 a variação do PIB foi de 0,98% e em 2018 houve um crescimento de 1,1%, iniciando um leve movimento de recuperação da economia brasileira. A Figura 14 mostra a participação de cada fonte na matriz elétrica em 2017.

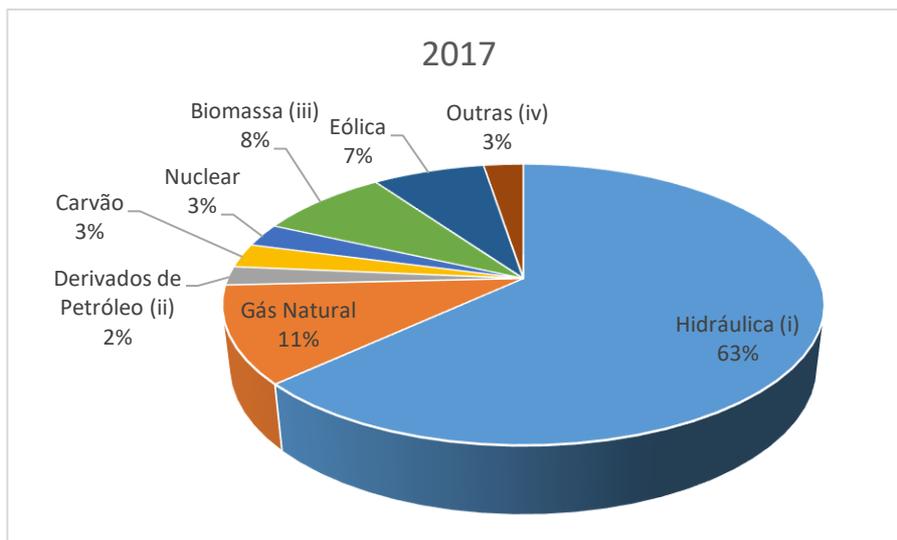


Figura 14- Geração de energia elétrica no Brasil - Participação em 2017
 Fonte: Elaborado pelo autor utilizando como fonte de dados (EPE, 2018a) ¹⁰

Estas características da matriz elétrica brasileira com grande participação de renováveis, segundo a (EPE, 2017) no seu Plano Decenal de Expansão de Energia no período de 2016 a 2026 (PDE 2026), deve ser ampliada. Conforme pode ser visto na Figura 15, que compara as participações das fontes na capacidade instalada para geração de energia elétrica para o ano de 2016 e 2026.

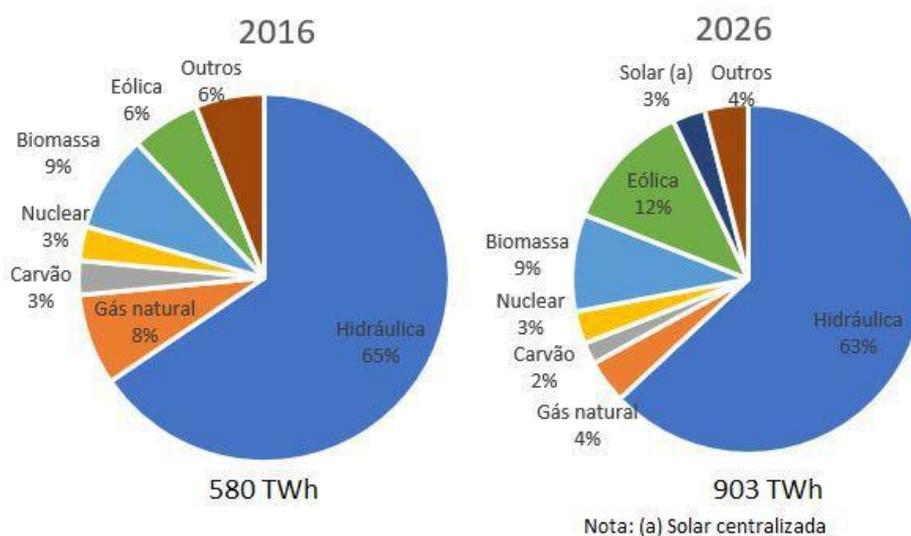


Figura 15- Evolução da capacidade instalada por fonte de geração no Brasil
 Fonte: Elaborado pelo autor utilizando como fonte de dados (EPE, 2017)

¹⁰ Inclui autoprodução; Derivados de Petróleo: óleo diesel e combustível; Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixívia; Outras recuperações: gás de coque e outros secundários.

Os recursos energéticos utilizados na geração de energia elétrica possuem diferentes intensidades de carbono, conforme pode ser observado na Figura 16. Isto impacta significativamente as emissões provenientes da geração de energia elétrica.

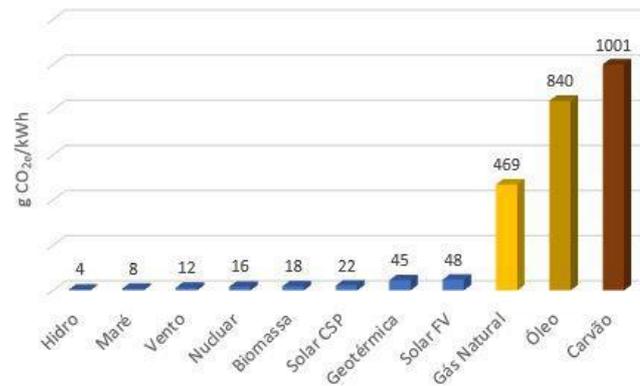
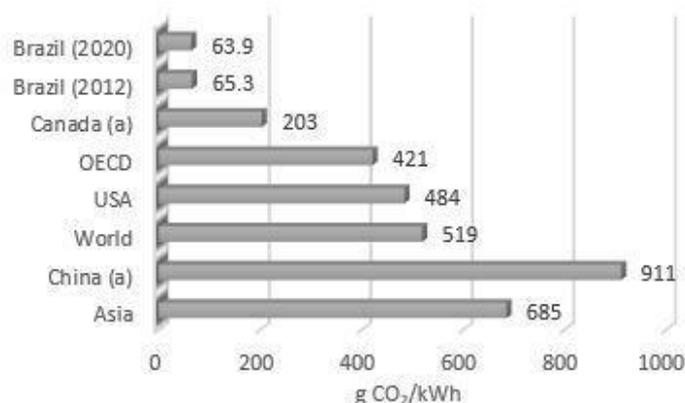


Figura 16- Fatores de emissões de eletricidade por combustível (g CO_{2e}/kWh)
 Fonte: Elaborado pelo autor utilizando como fonte de dados (IPCC, 2012).

O carvão tendo um fator de 1001 g de CO_{2e} / kWh é a forma de produção de energia com maior intensidade de carbono, seguido pelo óleo que também é intensivo em carbono em cerca de 840 g CO_{2e} / kWh, enquanto o gás natural é o menor intensivo em carbono dos principais combustíveis fósseis, atingindo 469 g CO_{2e} / kWh. Por outro lado, a energia solar, eólica, nuclear, geotérmica e hidrelétrica emite menos de 50 g de CO_{2e} / kWh, pois eles apenas têm emissões indiretas limitadas, principalmente causadas pela fabricação da tecnologia de geração. A mistura entre essas tecnologias e as perdas de transmissões e distribuição, determinam a intensidade de carbono na energia elétrica da rede em diferentes locais (IPCC, 2012).

As emissões provenientes da geração de eletricidade dependem da quantidade de eletricidade produzida e de qual é a intensidade de carbono do processo para se gerar esta energia. Desta forma, como os países têm disponibilidade diferente de recursos energéticos para gerar energia elétrica, a intensidade de carbono varia muito dependendo da fonte de combustível utilizada. Em 2012, em um panorama mundial, o IEA (2016) apresenta um cenário de emissões de alguns países ou de grupos de nações, onde é possível observar a variação dos fatores de emissão no setor elétrico das nações. A Figura 17 mostra uma lista de alguns importantes países ou continentes e os seus respectivos fatores de emissão no setor elétrico.



Nota: (a) Este valor é a média do IEA e IPCC

Figura 17- Fator de emissão na eletricidade
 Fonte: (EPE, 2012; IEA, 2016)

Segundo os estudos para o planejamento da expansão do sistema desenvolvidos pela EPE, o PDE2026 e o PNE2030, as projeções indicam que será mantida a proporção de fontes renováveis na matriz elétrica nas próximas décadas. Na Figura 17, a projeção do fator de emissão do setor elétrico brasileiro para 2020 alcança 63,9 g CO_{2e}/kWh (EPE, 2012), ligeiramente inferior ao do ano de 2012 que foi 65,3 g CO_{2e}/kWh.

Para o caso do Brasil, mesmo o crescimento nos últimos anos da geração termelétrica a combustíveis fósseis, a matriz elétrica brasileira tem a participação predominante de energias renováveis, que participaram com 78,7% da oferta interna de eletricidade no ano de 2017. Deste percentual, a geração eólica contribuiu com 7,2%, biomassa com 8,4% e a geração hidráulica representou 63,1%. Esta presença significativa das fontes renováveis na matriz elétrica no Brasil, assegura ao país um lugar privilegiado junto as nações desenvolvidas quando assunto são as emissões de GEE do setor de energia. Entretanto, constata-se um aumento significativo da participação das fontes não renováveis na geração de eletricidade, elas elevaram a sua participação de 12,9% em 2011 para representar 18,8% do total gerado em 2017. (EPE, 2018a)

Em 2017, em comparação com o ano anterior, as emissões de GEE tanto tiveram uma redução de 4,9% a partir do sistema interligado nacional (SIN) quanto nos sistemas isolados, onde as emissões tiveram uma queda de 52,8%. Já na autoprodução houve um incremento de 1,0% do ano de 2016 para 2017. Conseqüentemente o Brasil ainda se mantém na liderança entre as nações que apresentam a maior participação de energias renováveis em sua matriz elétrica. Em 2017 as emissões de GEE oriundos da geração de eletricidade caíram cerca de 35% em relação aos níveis de 2014 (EPE, 2018a).

A Figura 18 mostra a evolução das emissões e do fator de emissão, em g CO₂e/kWh no SIN, entre os anos de 2006 a 2018, de acordo com os dados oficiais do governo brasileiro disponibilizados pelo MCTIC,

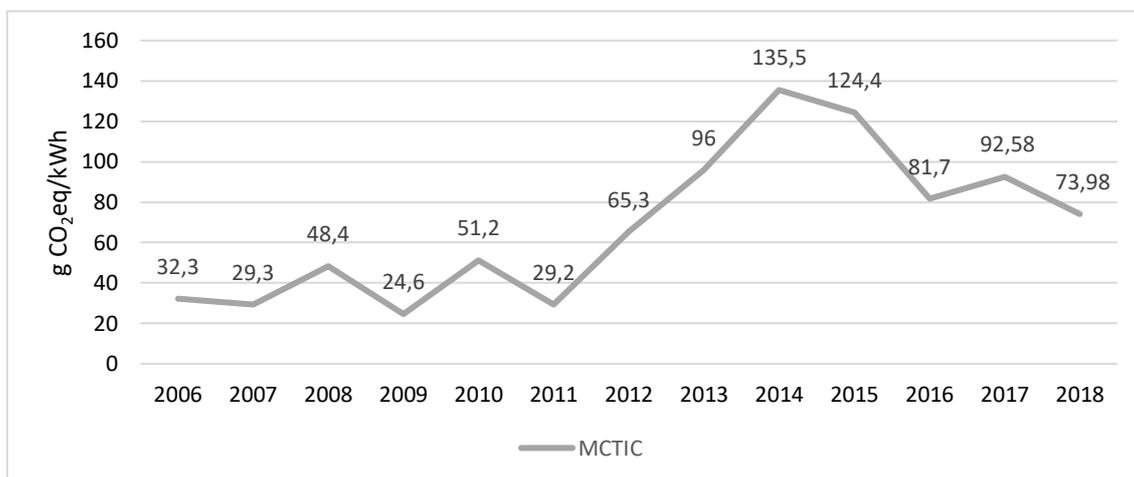


Figura 18- Fatores de emissão em tCO₂/GWh na eletricidade no Brasil (2006-2018)
Fonte: (MCTIC, 2018)

Atualmente no país existem alguns programas e iniciativas que incentivam o uso de energias renováveis e a conservação ou eficiência energética na busca por um desenvolvimento mais sustentável. O principal plano para o setor energético brasileiro é o Plano Decenal de Energia (PDE), que busca incorporar ações que atendam à política nacional sobre mudança do clima, mitigando as futuras emissões, buscando um cenário de baixas emissões de carbono no uso e na geração de energia. Estas iniciativas estudam e incentivam a expansão da oferta hidrelétrica e da oferta de outras fontes renováveis, como as centrais eólicas, pequenas centrais hidroelétrica (PCH), bioeletricidade, energia solar e o aumento da eficiência energética (MCTIC, 2016).

As fontes renováveis para geração de energia elétrica podem ser pensadas na geração centralizada, que precisa ser distribuída por linhas de transmissão para os centros consumidores, como é o caso das hidroelétricas, mas também podem ter uma solução de geração descentralizada, ou geração distribuída (GD), onde a energia gerada pode ser consumida no próprio local ou injetada na rede. A utilização de fontes renováveis para a GD pode ser um instrumento significativo para diminuir os impactos ambientais na geração de energia como também contribuir para o desenvolvimento econômico local.

2.6. Energia Elétrica e Edificações

O aumento da concentração humana nos centros urbanos, culminou no processo denominado de urbanização, neste é possível identificar duas fases marcantes: a primeira ocorreu no final do século XVIII impulsionada pela revolução industrial, quando registra-se um grande processo de migração das zonas rurais para as cidades, nos países até então de maior desenvolvimento; já a segunda fase se deu no pós II Guerra Mundial. Estimuladas pelo desejo de melhores condições de vida, oportunidades de trabalho e renda e acesso à educação, as pessoas migraram para as cidades. Este processo não ocorreu simultaneamente em todo o mundo (FREITAS, 2017).

A população urbana que em 2014 representava 54% deve aumentar para 70%, em 2050. Além disso, estima-se que mais cidades surgirão, especialmente em países em desenvolvimento onde localizam-se 90% dos 2,5 bilhões de habitantes urbanos e onde a maior parte do crescimento de cidades secundárias e terciárias são projetados até o ano de 2050 (UN-HABITAT III, 2015; UN, 2015).

As cidades são consideradas motores do crescimento econômico, geram cerca de 80% do PIB mundial. E consomem aproximadamente 75% da energia primária do mundo e respondem por 70% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Este cenário direciona uma atenção especial para a questão de sustentabilidade nas cidades. Uma abordagem de cidades inteligentes que busca melhorar a qualidade de vida de seus moradores, promovendo crescimento econômico com proteção do meio ambiente, demanda uma série de esforços. As soluções de cidades inteligentes e sustentáveis tratam de forma diferente os edifícios, a energia, a água, o transporte, os resíduos, a educação e a saúde (UN-HABITAT, 2011; UN-HABITAT III, 2015).

Diante do exposto, com o entendimento da ocupação do espaço urbano no processo de transformação das cidades, percebe-se a relevância do estudo, do planejamento e do desenvolvimento de políticas públicas para o crescimento das cidades, e dentro destas, o papel estratégico das edificações inteligentes, em face a seu consumo de energia e suas respectivas emissões de GEE, que, por consequência, contribui para as mudanças climáticas.

As edificações têm a característica de demandar energia durante todo o seu ciclo de vida. Iniciando este consumo na extração de matérias primas, em seguida na fabricação dos materiais que serão utilizados na construção, na própria construção, e ainda durante o seu

uso e manutenção e finalmente em sua demolição e reciclagem ou deposição. Este ciclo está ilustrado na Figura 19 a seguir.

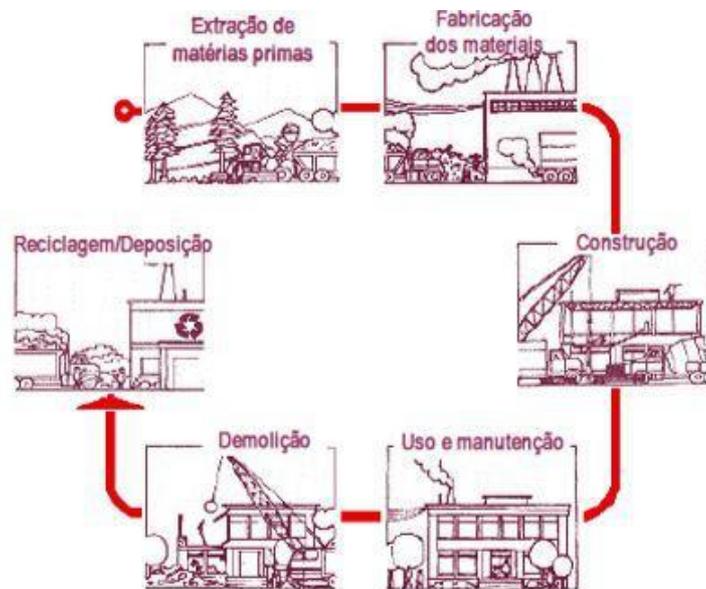


Figura 19- Ciclo de vida das edificações
Fonte: (TAVARES, 2006)

A seguir é apresentado um enquadramento da energia demandada pelas edificações durante o seu ciclo de vida:

- Energia incorporada: na fabricação dos materiais de construção, dos seus sistemas e componentes necessários para construir;
- Energia cinza: na distribuição e transporte dos materiais e sistemas;
- Energia induzida: na construção do edifício;
- Energia operativa: no funcionamento do edifício incluindo equipamentos e eletrodomésticos dos usuários.

A representatividade destas parcelas de energia consumida pela edificação pode ser observada na Figura 20. É possível identificar nesta figura que a maior parcela do consumo de energia se concentra na fase operativa da edificação.

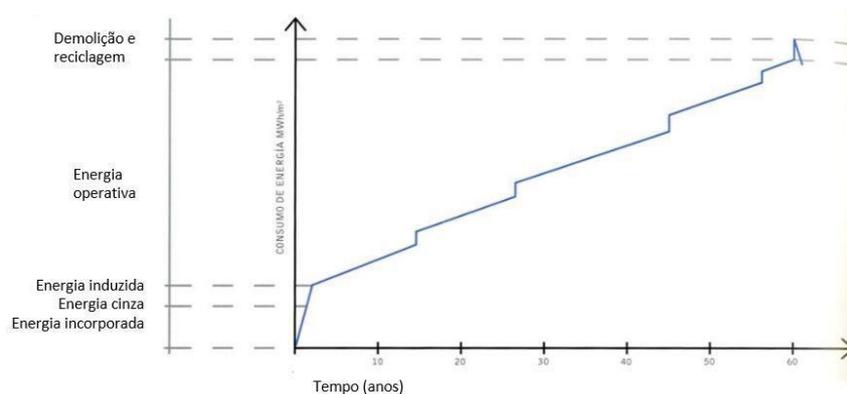


Figura 20- Energia no ciclo de vida das edificações
 Fonte: (Mero, 2014)

Segundo GOULART (2008, p. 3) um dos maiores consumidores de recursos naturais são as edificações, demandando cerca de 16% do fornecimento mundial de água pura, 25% da colheita da madeira, e 40% dos materiais manufaturados e dos combustíveis fósseis. Cerca de 50% da energia consumida na Europa é usada na construção e manutenção de edifícios.

No mundo, as edificações respondem por cerca de 32% da demanda global de energia, segundo a IEA (2012). No âmbito planetário, algumas ações foram tomadas no sentido de redução de consumo, como por exemplo, incluir o estabelecimento em padrões mínimos de desempenho para edificações e adoção de sistemas de certificação voluntária (EPE, 2014).

No Brasil, em 2017, o consumo energético em edificações comerciais, residenciais e públicas foi responsável por 14,5% do consumo total de energia e cerca de 50,8% do consumo de eletricidade neste mesmo ano (EPE, 2018b). Estas condições fazem com que várias iniciativas venham sendo tomadas buscando a redução da demanda de energia elétrica, e por consequência de recursos naturais, o que está aderente aos objetivos orientados a mitigar as emissões de GEE. Atua-se dessa forma para que se conceba as edificações com espaços confortáveis e saudáveis para o trabalho e vivência humana, utilizando menos recursos naturais, materiais e energia na sua construção e operação. Um projeto considerado sustentável deve estar amparado em três pilares: o ambiental, o social e o econômico.

O uso final da energia tem sido o foco de grande parte das pesquisas a respeito do consumo de energia nas edificações. Dessa forma, estas pesquisas buscam a redução do consumo na fase operacional dos prédios, que representa o maior peso sobre o consumo de energia. Entretanto, também é importante, para proceder a avaliação dos impactos

ambientais causados pelos edifícios que seja analisada a energia embutida na edificação (TAVARES, 2006, p. 11).

Em uma análise geral do processo de urbanização do país se registra o aumento do número de edificações. Estas construções foram se tornando maiores e mais complexas, ampliando a demanda crescente de conforto pelos usuários, contribuindo para o aumento do consumo o consumo de energia elétrica no país. No Brasil, no período de 2004 a 2014 teve crescimento de 43,5%. Entretanto, no período de 2014 a 2017, devido a conjuntura econômica, o consumo de eletricidade teve uma retração, chegando a 2017 ainda com valor inferior ao registrado em 2014. Conforme pode ser observado na Figura 21.

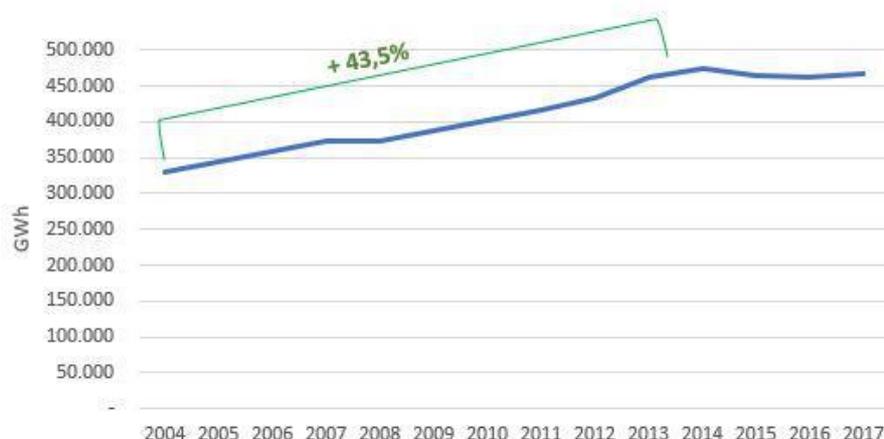


Figura 21- Evolução do consumo de energia elétrica (GWh) no Brasil no período de 2004 a 2017
Fonte: Elaborado pelo autor utilizando dados de (EPE, 2015, 2018a)

Quando se compara o consumo per capita de energia elétrica no Brasil com outros países, percebe-se que ainda existe um grande potencial de crescimento do consumo para as próximas décadas. Segundo (EPE, 2015), em suas projeções para o ano de 2025 e 2030, o consumo per capita se manterá em uma taxa de 4% a 5% ao ano, na próxima década. Foi registrado um crescimento de cerca de 29% no consumo per capita entre os anos de 2004 a 2014, e estima-se que que a variação entre 2014 e 2025 será de 41%, e por fim entre o ano de 2025 até 2030 tem-se uma previsão de incremento de 16,4%. Com estes incrementos já registrados e com a expectativa da trajetória se manter, levará o Brasil em 2030 a níveis de consumo per capita de eletricidade mais próximos dos países desenvolvidos (EIA, 2012; EPE, 2016b).

Corroborando com esta tendência, a (EPE, 2016b) em seu Plano Nacional de Energia (PNE 2050), projeta um incremento significativo no consumo de energia elétrica durante o período de 2014 a 2050. Principalmente no setor comercial, que apresenta uma variação

considerável, de aproximadamente quatro vezes o consumo do ano de 2014. Segundo a EPE, para atender a esta expectativa de aumento de consumo de eletricidade nas próximas décadas será necessário o incremento de geração por meio de três caminhos: o aumento da geração no grid, o aumento da auto geração e geração distribuída, além da economia gerada pelo avanço das ações na área de eficiência Figura 22.

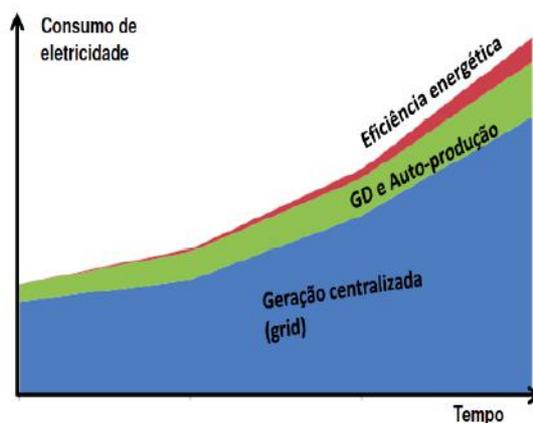


Figura 22- Demanda de eletricidade e fontes de atendimento à demanda de energia
Fonte: (EPE, 2016b)

Este cenário nos traz uma grande questão. Como será possível estabelecer uma estratégia para atender a este crescimento da demanda por energia elétrica e ainda reduzir as emissões de GEE?

Os estudos econômicos que embasam as projeções de consumo de energia (EPE, 2016b) ressaltam que com a busca por novos perfis de edificações e com a expansão de prédios comerciais e habitações, surgirão oportunidades para penetração de edificações eficientes, beneficiadas pelo avanço das tecnologias existentes e impulsionadas por políticas públicas. Estas oportunidades serão discutidas nesta pesquisa.

2.7. Eficiência Energética e Desempenho das Edificações

Segundo LAMBERTS e colab. (1997, p. 14), a eficiência energética pode ser definida como sendo a obtenção de um serviço com baixo consumo de energia. Ou seja, um edifício pode ser considerado mais eficiente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor gasto de energia. Os autores sugerem uma alteração no

triângulo conceitual de Vitruvius (que considera três elementos fundamentais da arquitetura: o material construtivo, o uso e a estética), onde seria acrescentado um novo vértice, que contemplaria a eficiência energética.

O tema da economia de energia elétrica em edifícios tem conquistado cada vez mais espaço, tanto através de campanhas educativas quanto pela adoção de tecnologias de gestão e equipamentos de menor consumo e maior eficiência energética. Porém, além da incorporação dessas novas tecnologias no cotidiano, para melhorar a eficiência na arquitetura, é importante a elaboração de projetos que contemplem estudos sobre o comportamento energético do edifício. O setor de edificações tem tido um progresso relativamente lento quando comparado às melhorias que ocorreram na indústria e no transporte (GOULART, 2008; LAMBERTS, ROBERTO; DUTRA, LUCIANO; PEREIRA, 1997).

Os projetistas para adequar o edifício ao clima se colocaram em uma posição bastante cômoda, utilizando largamente sistemas de iluminação e de climatização artificial. Com isso foram aparecendo alguns colossos arquitetônicos, grandes consumidores de energia elétrica e de recursos financeiros. Todavia, esta opção provoca impactos ambientais com a implantação de novas usinas geradoras além de consumir recursos públicos que poderiam ser investidos em outras áreas como saúde, habitação e educação. A alternativa mais adequada neste contexto é aumentar a eficiência no uso da energia (LAMBERTS, ROBERTO; DUTRA, LUCIANO; PEREIRA, 1997, p. 18).

Segundo GELLER (1994) é mais barato economizar energia do que fornecê-la, diminuindo a necessidade de gastos do setor público e transferindo a responsabilidade do investimento para os fabricantes de equipamentos e consumidores.

As Edificações eficientes são um relevante passo para a transformação do ambiente construído e para o desenvolvimento sustentável das cidades. A atuação de líderes urbanos para incentivar, priorizar e implementar ações de sustentabilidade é fundamental para fomentar o avanço da eficiência em edificações no Brasil. Algumas ações devem ser prioritárias, efetivas e com impactos positivos. Essas ações, por sua vez, requerem forte envolvimento e compromisso de líderes urbanos, autoridades governamentais, bem como uma estreita colaboração entre os setores público e privado (DALL'AGNOL, F., CACCIA e MACKRS, E., YU, 2018).

Nesse mesmo estudo são identificados os atores interessados, as ações necessárias e as barreiras para que se alcance edifícios mais eficientes.

As partes interessadas ou os autores-chave: Governos (federal, estadual e municipal), concessionária de energia elétrica, organizações da sociedade civil, incorporadoras e construtoras, profissionais de construção e projetos, fornecedores e fabricantes, prestadores de serviços financeiros e investidores, proprietários e administradores dos edifícios e ocupantes dos edifícios.

As ações necessárias: códigos e normas, metas, informações e certificações, incentivos e financiamentos, liderança governamental pelo exemplo, envolvimento de proprietários, gestores e ocupantes, envolvimento de prestadores de serviços técnicos e financeiros e trabalho com concessionárias.

As barreiras: mercado, financeiras, técnicas, conscientização e institucionais.

A concepção, o projeto, a especificação dos materiais e a execução de edificações que proporcionem condições adequadas de conforto e uso com um menor consumo de energia é o cerne da questão quando se busca a eficiência energética. A identificação dos produtos e equipamentos por meio de selos ou certificações é uma das principais ferramentas utilizadas para destacar qual o nível que uma edificação atende a determinados critérios avaliados quanto a eficiência energética.

2.8. Certificações de Edificações Sustentáveis (A experiência Internacional)

A criação de regulamentos que classificam o desempenho energético das edificações segundo a eficiência, tem sido uma das medidas adotadas pelos países com a finalidade de contribuir para o desenvolvimento sustentável. A busca por alcançar melhores níveis de eficiência - que se caracteriza pela redução do consumo de energia - é impulsionada pela obrigatoriedade, que alguns países adotam em suas normativas, de se atingir determinados níveis de eficiência energética e uso de recursos naturais (EUROPEAN COMMISSION, 2001). A exigência de alguns selos ou certificados são utilizados como critérios de aprovação ou diferenciais para os empreendimentos, podendo viabilizar a captação de recursos financeiros a custos de capital menores como formas de incentivar o uso de tais certificados.

Em diversos países no mundo observa-se a formulação de leis e incentivos com a finalidade de obter edificações projetadas com alto desempenho energético e ambientalmente amigável. Em muitos destes países já existem sistemas de certificação ambiental onde o desempenho das edificações é avaliado de acordo com critérios de sustentabilidade. Estes movimentos iniciaram na Europa e foram se difundindo em países da América e de outros continentes que passaram a desenvolver seus próprios sistemas de certificação.

Segundo LAMBERTS e colab. (2008), os seguintes certificados destacam-se entre os principais sistemas de avaliação ambiental para edificações: LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*); BREEAM e ECOHOMES - BRE *Environmental Assessment Method.*; CASBEE - *Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*; HQE – *Haute Qualité Environnementale des Batiments* e GREEN STAR. Esses sistemas de avaliação são membros do *World Green Building Council* (World GBC).

A seguir é apresentada uma lista com as principais certificações, suas características e seu país de origem.

Tabela 9- Lista de instrumentos e certificação de edifícios

AQUA – Alta Qualidade Ambiental	
Abrangência	Brasil
Instituição Responsável	Fundação Vanzolini
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	Escritórios e Escolas; Hotéis; e Edifícios Habitacionais
Critérios avaliados para Certificação:	14 Categorias são avaliadas: relação do edifício com o seu entorno; escolha integrada de produtos, sistemas e processos construtivos; canteiro de obras com baixo impacto ambiental; gestão da energia; gestão da água; gestão dos resíduos de uso e operação do edifício; manutenção - permanência do desempenho ambiental; conforto higrotérmico; conforto acústico; conforto visual; conforto olfativo; qualidade sanitária dos ambientes; qualidade sanitária do ar; qualidade sanitária da água. Para obter a certificação o empreendedor da construção deve estabelecer o controle total do projeto em todas as suas fases: Programa; Concepção (Projeto); Realização (Obra) e Operação (Uso).
Link	www.processoaqua.com.br
BREEAM	
Abrangência	Reino Unido. Pode ser adaptado ao mundo todo. Tem esquemas de certificação específicos para Europa e Região do Golfo
Instituição responsável	BRE
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	BREEAM Outros Edifícios; BREEAM Tribunais; The Code for Sustainable Homes (O Código para Casas Sustentáveis); BREEAM EcohomesXB; BREEAM Saúde; BREEAM Industrial; BREEAM Internacional (avalia edifícios ou apoia a criação de versões do BREEAM fora do Reino Unido); BREEAM Multi-residencial; BREEAM Prisões; BREEAM Escritórios; BREEAM Varejo; BREEAM Educação; BREEAM Comunidades; BREEAM Em Uso.
Critérios avaliados para Certificação:	Variam de acordo com o Sistema
Link	www.breeam.org
CASBEE	
Abrangência	Ásia
Instituição Responsável	Japan Sustainable Building Consortium (JSBC)
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	CASBEE para Pré-Projeto; CASBEE para Novas Construções; CASBEE para Edifícios existentes; e CASBEE para Reformas. As ferramentas atendem a uma larga variedade de usos do edifício (escritórios, escolas, habitação, etc).

Critérios avaliados para Certificação:	Q (Qualidade) - Construindo Qualidade Ambiental e Performance: Avalia a "melhoria na qualidade de vida dos usuários do edifício, dentro do espaço fechado hipotético (propriedade privada)." L (Cargas) - Construindo Cargas Ambientais: Avalia "os impactos ambientais negativos que vão além do espaço hipotético fechado para o exterior (a propriedade pública)." Há quatro campos de levantamento: (1) Eficiência Energética, (2) Eficiência de Recursos, (3) Ambiente Local, (4) Ambiente Interno
Link	www.ibec.or.jp/CASBEE/english/
DGNB	
Abrangência	Alemanha
Instituição Responsável	German Sustainable Building Council (DGNB for "Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen")
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	Sistema flexível, avalia diversos tipos de edifício.
Critérios avaliados para Certificação:	Campos avaliados - Aspectos ecológicos, econômicos, socioculturais e funcionais, tecnologia, processos e local. Cada campo é avaliado com critérios específicos que podem ser desenhados e pesados de maneira distinta a depender do perfil de ocupação. Cada campo é avaliado durante todo ciclo de vida do edifício. A avaliação é focada em metas, e não em ações individuais.
Link	www.dgnb.de/en
Energy Star	
Abrangência	Estados Unidos. Porém outros países adotaram o programa
Instituição Responsável	U.S. Environmental Protection Agency (EPA) e U.S. Department of Energy
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	O sistema 'Edifícios e Fábricas' abrange diversos tipos de construções
Critérios avaliados para Certificação:	Para se qualificar para receber a etiqueta ENERGY STAR, um edifício ou fábrica deve estar entre os 25% de melhor performance energética entre seus similares de acordo com Sistema Nacional de Classificação de Performance Energética da EPA.
Link	www.energystar.gov
SBToll	
Abrangência	Global
Instituição Responsável	International Initiative for a Sustainable Built Environment (iisbe)
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	Escritórios, Residências, Outros.
Critérios avaliados para Certificação:	São avaliadas quatro fases da Construção - Pré Projeto, Projeto, Construção, e Operação - e 7 categorias - Seleção do Local; Planejamento de Projeto e Desenho Urbano; Consumo de Energia e Recursos; Carga Ambiental; Qualidade Ambiental Interna; Qualidade de Serviço; Aspectos Econômicos e Sociais; Aspectos Culturais e de Percepção
Link	www.iisbe.org
Green Globes	
Abrangência	Estados Unidos e Canadá
Instituição Responsável	Green Building Initiative / BOMA Canada / ECD Jones Lang LaSalle
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	Projetos de Novos Edifícios ou Reforma Significativas; Gerência e Operação de Edifícios Existentes; Gerenciamento de Emergência em Edifícios; Inteligência do Edifício; Ajuste.
Critérios avaliados para Certificação:	Gerenciamento, Local, Energia, Água, Recursos, Emissões, Ambiente Interno
Link	www.greenglobes.com
Green Star	
Abrangência	Austrália
Instituição Responsável	Green Building Council Austrália
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	Green Star - Educação; Green Star - Saúde; Green Star - Industrial; Green Star - Residencial Múltiplas Unidades; Green Star - Escritório; Green Star - Interiores de Escritório; Green Star - Varejo; Green Star - Projeto de Escritório; Green Star - Escritório Construído
Critérios avaliados para Certificação:	Gerenciamento; Qualidade Ambiental do Ambiente Interno; Energia; Transporte; Água; Materiais; Uso do Solo & Ecologia; Emissões; Inovação. O peso de cada uma destas categorias é alocado de acordo com a região do país para atender condições locais específicas
Link	www.gbca.org.au/green-star
HKBEEM	
Abrangência	Hong Kong
Instituição Responsável	The BEAM Society
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	BEAM para Novas Edificações; BEAM para Edificações Existentes
Critérios avaliados para Certificação:	Avaliação baseada em créditos para benchmark da performance ambiental dos edifícios ao longo do ciclo de vida sobre o local, uso de materiais, aspectos energéticos, consumo de água, qualidade ambiental do ambiente interno, e inovações.
Link	www.hk-beam.org.hk
HQE	
Abrangência	França e atende também Bélgica, Luxemburgo, Tunísia e Argélia.

Instituição Responsável	Association pour la Haute Qualité Environnementale (ASSOHQE).
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	Edifícios novos e edifícios existentes nas modalidades comercial, residencial individual e coletivo.
Critérios avaliados para Certificação:	Manejo de impactos ao ambiente exterior (relação harmônica com o ambiente imediato, escolha integrada dos métodos de construção e materiais, evitar incômodo aos arredores, minimização do uso de energia, minimização do uso de água, minimização de resíduos em operações, minimização da necessidade de manutenção e reparos) e Criação de Ambiente Interno Agradável (medidas de controle hidrotermal, medidas de controle acústico, atratividade visual, medidas de controle de odores, higiene e limpeza dos espaços internos, controle da qualidade do ar, controle da qualidade da água)
Link	assohqe.org/hqe
LEED	
Abrangência	Estados Unidos, entretanto atendo todo o mundo.
Instituição Responsável	U.S. Green Building Council
Esquemas de avaliação disponíveis / tipos de edifícios avaliados	Novas construções, Edificações existentes, Interiores Comerciais, Núcleo & Casca, Escolas, Varejo, Saúde, Casas, e Desenvolvimento de Comunidades
Critérios avaliados para Certificação:	Possui 5 categorias Ambientais para concessão de créditos: Locais Sustentáveis, Eficiência Hídrica, Energia e Atmosfera, Materiais e Recursos, e Qualidade Ambiental do Ambiente Interno. Além disso pontos extra podem ser concedidos por Inovação em Design e Especificações Regionais.
Link	www.usgbc.org/LEED

Fonte: elaborado pelo autor baseado em (ICLEI, 2016)

A maioria dos sistemas de avaliação tem explicitamente instrumentos específicos de análises para as edificações do setor de educação, e são apresentados no formato de *checklist* como ferramenta para a avaliação do desempenho sustentável de edifícios. O LEED, por exemplo, apresenta em seu questionário itens que são requeridos obrigatoriamente e outros que podem gerar uma pontuação adicional. TSAI e CHANG (2012) avaliam que a aplicação de *checklist* facilita o uso e compreensão, auxiliando os profissionais especializados na documentação de experiências, bem como facilitando a cooperação entre as equipes de trabalho.

Baseado em seu estudo envolvendo doze certificadores de sustentabilidade de diferentes países, REED (2009) argumenta sobre a impossibilidade de compará-los, pois estes não se apresentam nos mesmos níveis devido as suas características únicas e diferentes focos. Tal argumento é reforçado por NEAMA (2012) quando ressalta a incompatibilidade de uso generalizado do LEED quanto avalia a sua aplicação no Oriente Médio. Isso orienta a necessidade de se utilizar indicadores de avaliação que considere as especificidades locais para cada país ou região.

Os certificados existentes no mundo podem ser classificados e agrupados utilizando enfoques diferentes. Em um estudo desenvolvido por BAVARESCO e GHISI (2016) foram analisados os regulamentos de 53 nações distribuídas da seguinte forma: Europa(32); Ásia(8); América do Sul(3); América do Norte(2); Oceania(2); América Central(1); Oriente Médio(1); Nações Transcontinentais(3) e a Cidade-Estado de Hong Kong. O autor conclui que quando o enfoque é relacionado ao tipo de energia considerada

na análise, é possível separar as nações em dois grupos: os que possuem normas de etiquetagem que consideram a energia primária na análise (32 países) e os que avaliam suas edificações através do consumo de energia final (22 países).

Das 53 normas analisadas neste estudo, 10 delas não apresentam o consumo energético da edificação. Sendo que a maioria (35) dos (43) regulamentos que apresentam o consumo, utilizam o indicador de consumo energético por unidade de área por ano (kWh/m².ano). Percebe-se ainda que nos países onde as normas são mais antigas, as etiquetas de certificação mostram o consumo energético anual de energia por unidade de área (ICLEI, 2016).

No Anexo 1 são apresentados nas Tabelas 50 e 51 os grupos dos países pelo tipo de energia considerada na análise (primário ou consumo final), trazendo ainda a unidade de medida do consumo energético e suas classes de eficiência.

Diante de um portfólio de opções de certificações de sustentabilidade e eficiência energética que são aplicados no mundo, este trabalho se orienta para uma análise do que é praticado no mercado brasileiro. Em 2015, segundo o MMA (2015) os dois sistemas de certificação ambiental mais difundidos no Brasil eram o LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), que foi o primeiro sistema de certificações a chegar no Brasil, nos anos 2000, e o AQUA (Alta Qualidade Ambiental), que é uma adaptação do sistema Francês HQE (*Haute Qualité Environnementale*). O BREEAM, e o certificador LEED são os mais utilizados no mundo (ALTOMONTE, S.; SCHIAVON, 2013; LEE, W; BURNETT, 2013)

Em 2018, após 10 anos de atuação no Brasil da certificação AQUA-HQE, a cargo da Fundação Vanzolini, 503 edificações já tinham sido certificadas, totalizando mais de 9,5 milhões de m² de área construída (NUNES, 2018). Nesse mesmo ano, o *U.S. Green Building Council* (USGBC) em seu ranking anual, considerando mercados fora dos Estados Unidos que utilizam o LEED em edificações, o Brasil se manteve na 4^a posição com mais de 460 empreendimentos certificados LEED, que totalizam mais de 14.8 milhões de m² certificados, ficando atrás de China (1^o.), Canadá (2^o.) e Índia (3^o.) (GBC BRASIL, 2018).

A Fundação Vanzolini, responsável pela certificação AQUA-HQE, ampliou seu portfólio de sistemas de avaliação de conformidade e reconhecimento, passando a ofertar ao mercado a inspeção para etiquetagem PBE-Edifica acreditada pelo Inmetro, que avalia o

nível de eficiência energética das edificações (FUNDAÇÃO VANZOLINI, 2019). A etiquetagem PBE-Edifica será detalhada mais adiante nesta pesquisa.

2.9. Políticas e Medidas de Eficiência Energética no Brasil

Em 2001 no Brasil, com a crise no abastecimento de energia elétrica enfrentada, as pesquisas sobre a eficiência energética ganharam atenção. Foi promulgada neste mesmo ano a LEI n. 10.295, que trata sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia (BRASIL, 2001). A partir desta lei, com o desenvolvimento de pesquisas na área de eficiência energética se ampliando, outros importantes marcos podem ser observados. Em 2003 o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) lançou o Procel Edifica, com a finalidade de promover o uso racional de energia elétrica em edificações. No final de 2005 o GT-Edificações criou a Secretaria Técnica de Edificações (ST-Edificações), que tinha competência para tratar das questões técnicas envolvendo os requisitos técnicos e os indicadores de eficiência energética. Esta ST teve uma atuação importante até a aprovação dos RTQ-C, em 2008 e RTQ-R em 2010 (PBE EDIFICA, 2014). Em 2009, o Programa lançou a etiquetagem para edifícios comerciais, de serviços e públicos, um ano depois foi lançada a etiqueta para edifícios residenciais.

Após a revisão do programa de etiquetagem no período de 2012 a 2014, foi dado um passo significativo para incentivar a propagação dos certificados nos prédios públicos federais. Como consequência, em 2014, a Instrução Normativa n. 02 SLTI/2014 de 4 de junho de 2014, tornou obrigatório o uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia Elétrica (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam *retrofit*. Esta Instrução Normativa (IN) determina que os projetos de edificações públicas federais devem ser desenvolvidos ou contratados visando, obrigatoriamente, à obtenção da ENCE Geral de Projeto classe “A” (BRASIL, 2014).

Esta obrigatoriedade tratada na IN. N°02 deve ser aplicada na construção ou no *retrofit* de todos prédios públicos que tenham área superior a 500 m², ou cujo valor da obra seja superior ao equivalente ao Custo Unitário Básico da Construção Civil (CUB) aplicado a uma edificação da mesma área já citada (BRASIL, 2014). Um histórico dos acontecimentos relatados anteriormente relacionados a eficiência energética que ocorreram no Brasil está resumido na Figura 23.

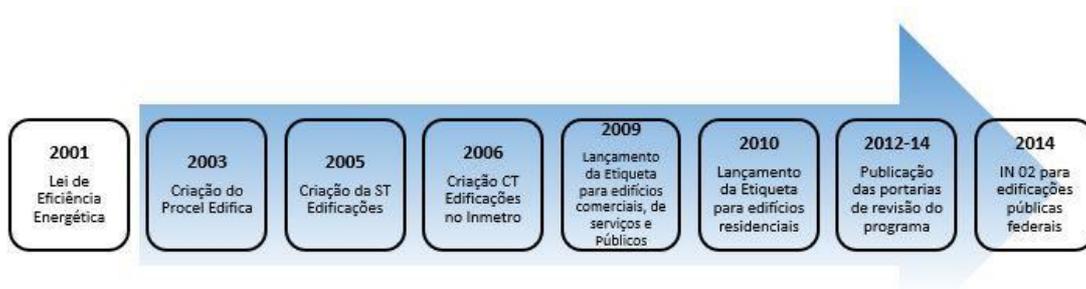


Figura 23- Histórico da política de eficiência energética no Brasil
 Fonte: adaptado de (GOMES, 2015)

Outro fato relevante neste tema, foi a promulgação da Lei 13.280/2016, que alterou alguns pontos no programa de eficiência energética. A Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, é alterada para disciplinar a aplicação dos recursos destinados a programas de eficiência energética (POMPERMAYER, 2016). Dentre estas medidas podem ser citadas: a alteração da alíquota do recolhimento de recursos para o PROCEL – passando de 0,05% para 0,10% sobre a receita operacional líquida das distribuidoras de energia elétrica; a isenção da obrigação de investimento em P&D e EE para algumas empresas (cooperativas concessionárias de serviço público de distribuição de energia elétrica que comercializem menos de 500 GWh por ano), e a alteração da obrigatoriedade de investimento para consumidores com tarifa social. O incremento no volume de recursos repassados diretamente ao PROCEL tende a alavancar mais projetos na área de eficiência energética, gerando oportunidades para profissionais e pesquisadores envolvidos com esta temática. Por outro lado, os investimentos para os consumidores com tarifa social deixando de ser obrigatório pode impactar negativamente os projetos e iniciativas neste setor.

Os resultados advindos das ações fomentadas pelo PROCEL no ano de 2016 dão um indicativo do retorno que esses investimentos em eficiência energética podem trazer. Em 2016, baseado em estimativas de mercado e aplicação de metodologias específicas de avaliação de resultados, estima-se que o PROCEL alcançou uma economia de energia de aproximadamente 15,15 bilhões de kWh. Utilizando o fator de emissão do Sistema Interligado Nacional do ano de 2016, com essa economia de energia foram evitadas que 1,238 milhão tCO₂ equivalentes fossem liberadas na atmosfera. Esse resultado também equivale à energia fornecida, em um ano, por uma usina hidrelétrica com capacidade de 3.634 MW. Avalia-se que o custo anual evitado, por conta dos resultados energéticos proporcionados pelas ações do PROCEL no ano, foi de aproximadamente R\$ 2,92

bilhões, por outro lado o valor aplicado no programa foi de R\$ 14,99 milhões, sendo R\$ 0,12 milhões em investimento e R\$ 14,87 em custeio (ELETROBRAS, 2017). Esses resultados mostram que, além de ser rentável o investimento em ações que fomentem a eficiência energética também repercute positivamente em benefícios ambientais com as reduções de emissões de GEE.

Em 2009, foi lançada a Etiqueta do PBE Edifica que faz parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), ela foi desenvolvida em uma parceria entre o Inmetro e a Eletrobras/PROCEL Edifica. O Programa Brasileiro de Etiquetagem em Edificações (PBE Edifica) é um programa de etiquetagem, não um sistema de certificação ou qualificação de boas práticas ambientais (MMA, 2015). Os edifícios que obtêm certificações ambientais podem, inicialmente, ser considerados eficientes, entretanto, uma edificação com a etiqueta do PBE Edifica pode ter a avaliação da sua eficiência relativizada, dependendo, portanto, do nível de classificação que ela alcança. Se ela obtém uma etiqueta ENCE Nível E por exemplo, ela não apresenta bons resultados quanto a eficiência energética, embora seja etiquetada.

2.9.1. PBE Edifica

Após uma análise crítica do estado da arte internacional, o GT-Edificações decidiu pela etiquetagem de edificações como sua primeira ação. Para efetivar esta ação, envolveu diversos atores institucionais e acadêmicos no processo.

Este programa é um instrumento para avaliar o potencial de desempenho energético das edificações, buscando incentivar a eficiência energética. Enquadram-se nessas condições os projetos de edificações com estratégias bioclimáticas, desenvolvidas levando em consideração a orientação solar, o conforto térmico, o aproveitamento da ventilação e iluminação natural e o uso de técnicas mais eficientes de projetos e de construção. As edificações que passam pelo processo de avaliação recebem a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), que tem o nível “A” como o mais eficiente e o último nível é o “E” (MMA, 2015, p. 9–10).

Em 2014, foi estabelecido o selo Procel Edificações, ele é um instrumento de adesão voluntária que tem por objetivo principal identificar as edificações que apresentem as melhores classificações de eficiência energética em determinada categoria. Da mesma forma que a Etiqueta PBE Edifica, ele é outorgado tanto na etapa de projeto, válido até a finalização da obra, quanto na etapa da edificação construída. Um pré-requisito para obter

o Selo Procel Edificações, é inicialmente a obtenção da Etiqueta PBE Edifica, Nível A, para os três sistemas avaliados: envoltória, sistema de iluminação e sistema de condicionamento de ar (PROCEL, 2015). O mercado consumidor deverá ser incentivado a comprar e utilizar imóveis mais eficientes. Esse comportamento já é uma realidade em alguns países da Europa, como Inglaterra e França. O selo Procel Edificações será um diferencial positivo para as edificações.

Existem hoje dois regulamentos: um para edificações residenciais (RTQ-R) e outro para edificações comerciais e de serviço (RTQ-C). Estes dois sistemas enquadram em 5 classes de eficiência entre “A” e “E”, que são relacionadas a um indicador adimensional de consumo, ou seja, não representa exatamente o consumo energético do edifício. Para o cálculo do desempenho energético, tanto o RTQ-R quanto o RTQ-C consideram três sistemas: a envoltória, a iluminação e o condicionamento de ar (BRASIL, 2010).

O responsável pela emissão da etiqueta do PBE Edifica é um Organismo de Inspeção Acreditado (OIA), uma empresa pública ou privada autorizada e reconhecida pelo Inmetro. O interessado em obter a etiqueta deve escolher entre os dois métodos para o processo de etiquetagem: o prescritivo e o de simulação. O método Prescritivo é mais simplificado, e avalia a edificação baseado em equações e tabelas que limitam parâmetros da edificação de acordo com o nível de eficiência energética. Ele compara os requisitos e parâmetros estipulados pelo RTQ-C ou RTQ-R, avaliando os indicadores de consumo de energia e conforto térmico projetados para a edificação. Enquanto que o método de simulação compara os parâmetros da edificação proposta (nova ou *retrofit*) com um modelo de referência em eficiência energética (MMA, 2015).

O método prescritivo utiliza os dados referentes a três áreas de análise: a envoltória, a iluminação e o sistema de condicionamento de ar. Esses dados são lançados em equações analíticas para calcular o resultado de cada área e depois utilizam-se pesos para ponderar cada uma das áreas analisadas e chegar a uma pontuação final da edificação. Essa pontuação final é comparada com uma escala de eficiência energética que servirá para classificar a edificação do nível A até o nível E. Cada uma das áreas (envoltória, iluminação e condicionamento de ar) também recebe uma classificação que também vai do Nível A ao Nível E.

Já no método de simulação, o projeto da edificação é implementado em um programa de simulação energética, são parametrizadas as especificações técnicas dos materiais utilizados, as rotinas de uso da edificação e os dados climáticos do local onde será

construída a edificação. A partir dos resultados da simulação que são comparados com os modelos de referência em eficiência energética da mesma edificação, é feita a classificação final quanto ao nível de eficiência energética. A Figura 24 mostra um resumo dos dois métodos descritos.

O método de simulação avalia o consumo anual de energia levando em consideração as variações climáticas e os hábitos de uso da edificação. Permitindo que sejam mais bem avaliados os impactos na edificação de novas tecnologias. Sendo mais flexível, dá mais liberdade ao projeto e permite soluções não previstas nas equações dos regulamentos.

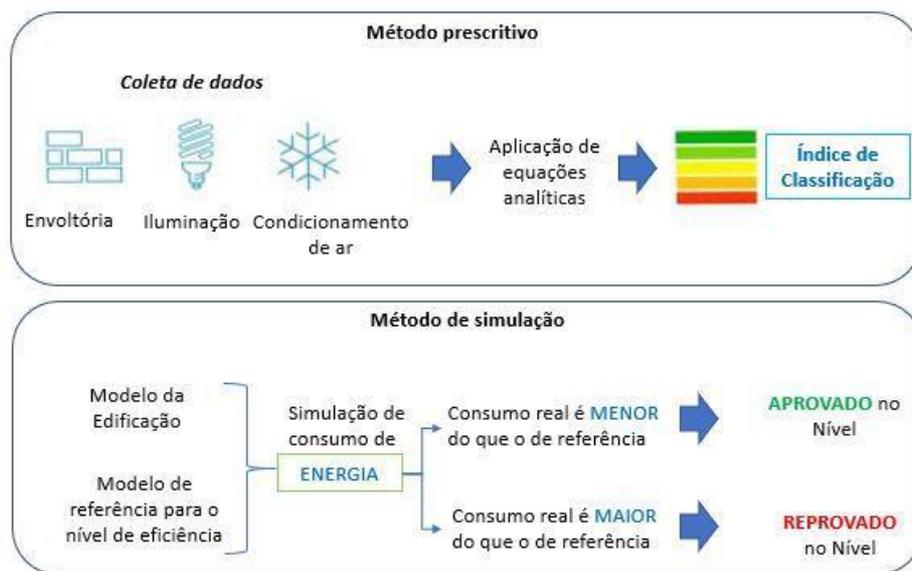


Figura 24- Resumo do método prescritivo e de simulação
 Fonte: Adaptado de (MMA, 2015, p. 17; UFSC/LABEEE, 2015).

A partir dos dados fornecidos pelo construtor/incorporador em conjunto com as informações levantadas na inspeção da OIA, com base no regulamento do RTQ-C, é calculada uma pontuação total permitindo definir o nível da etiqueta da edificação. Existem duas etapas na emissão da etiqueta ENCE, a etiqueta de projeto e após a obra concluída, o OIA faz uma inspeção de verificação e emite a etiqueta ENCE de construção (MMA, 2015).

Em março de 2019, já tinham sido emitidas 131 etiquetas ENCE para avaliação de projetos e 94 ENCE para inspeção *in loco*, totalizando 225 ENCE emitidas em edifícios comerciais, de serviço e públicas (INMETRO, 2019).

As bonificações, iniciativas que aumentem a eficiência da edificação, poderão receber até um ponto na classificação geral. Para que isto ocorra, essas ações deverão ser justificadas e a economia gerada deve ser comprovada. Estas bonificações podem ser obtidas com o uso de sistemas e equipamentos que racionalizem o uso da água, aproveitamento de água pluvial, aquecimento solar de água, inovações técnicas ou de sistemas e ainda para a utilização dos sistemas de fontes renováveis de energia, geração eólica e fotovoltaica, neste caso a bonificação será alcançada se proporcionar uma economia mínima de 10% no consumo anual de energia (MMA, 2015). A bonificação advinda da utilização de fontes renováveis de energia é explorada neste trabalho de pesquisa pois as edificações simuladas tem usinas fotovoltaicas instaladas.

A bonificação obtida pela edificação deve ser adicionada ao resultado encontrado no método de simulação. O equivalente numérico de simulação (EqNumS) para edifícios simulados deverá ser calculado através de interpolação linear entre os consumos calculados nos modelos de referência que definem a classificação da etiqueta. Para a Pontuação Total o cálculo é feito a partir da Equação 3.

$$PT = EqNumS + b_0^1 \quad (3)$$

Equação 1- Cálculo da pontuação total para certificação energética

Onde: PT: pontuação total; EqNumS: equivalente numérico obtido através da simulação; b: pontuação obtida pelas bonificações, que varia de 0 a 1.

Existe um potencial de redução de 50% no consumo de energia para novos edifícios e de 30% nos que podem ser reformados (MMA, 2015, p. 14). O relevante potencial de redução de consumo de energia que pode ser obtido pela adoção de medidas de eficiência energética tanto em novos projetos quanto em *retrofits*, propicia aos profissionais-chave (Arquitetos, Engenheiros, Projetistas e Urbanistas) o papel de contribuir de forma significativa para o desenvolvimento de edificações mais sustentáveis, e como consequência mitigar os danos ambientais causados pelas edificações.

2.9.2. Estudos de Eficiência Energética em Edificações

Quando se aborda o melhor desempenho das edificações, vários autores ao longo do tempo discutiram alguns conceitos que corroboram para o desenvolvimento sustentável das futuras cidades. LI (2008) discute o conceito do *Low Carbon Architecture*, a arquitetura de baixo carbono. Enquanto que outros autores como KRONER (1997)

abordam o *Intelligent Building Design*. Já a ideia do *Zero Energy Building* (ZEB) foi discutida por (BROWN e VERGRAGT, 2008; CATTO, 2008; MARSH, 2002). Com este mesmo enfoque, GHAFFARIANHOSEINI (2013) evolui no seu estudo para discussão de conceitos mais completos, como o *Net Zero Energy Buildings* (NZEB) e o *Zero Energy Intelligent Buildings* (ZEIB).

Outros trabalhos também atuaram no tema da eficiência energética de edificações, como CARLO e LAMBERTS (2010b, a) que discutiram os parâmetros e métodos adotados tanto pelo método prescritivo quanto o método de simulação, a luz do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), neste trabalho foram realizadas análise em um prédio de escritórios de 10 pavimentos localizado na cidade de Florianópolis, onde foram avaliados os resultados de pontuação no sistema de etiquetagem do RTQ-C para diferentes hipóteses de orientação da fachada principal, sombreamento do entorno, tipos de vidros, aumento de área envidraçada dentre outras variáveis. No método de simulação os autores utilizaram o software *Energyplus*.

Com este enfoque de aplicação do RTQ-C, SILVA e colab. (2012) empregaram os métodos prescritivo e de simulação parcial do prédio da Faculdade de Computação da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, campus de Campo Grande, obtendo resultados de economia com relação ao consumo de energia. O software utilizado nesta simulação foi o *DesignBuilder* e a cidade pertence a Zona Bioclimática 6 (ZB 6), segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Em sua tese de doutorado CARLO (2008) desenvolveu um estudo nas edificações não residenciais do tipo lojas, escritórios e hotéis. Foram observados em 1103 edificações localizadas em 5 cidades brasileiras: Recife, Salvador, Belo Horizonte, São Paulo e Florianópolis. Uma equação de regressão linear multivariada foi desenvolvida para identificar as variáveis que tinham maior influência no consumo de energia. A volumetria da edificação influenciou de forma significativa no consumo de energia pela área, os menores consumos por área nas grandes edificações e maiores consumos para pequenas edificações. Os resultados ressaltaram que o percentual de área de janela na fachada é uma medida de conservação de energia que tem relevante influência no consumo de energia elétrica, seguido das proteções solares. As equações e as conclusões desse trabalho foram utilizadas e foram de suma importância na construção dos regulamentos do programa de etiquetagem de edificações.

Foi realizado por LIMA (2007) um estudo sobre diretrizes arquitetônicas e sua interferência na eficiência energética no Campus da UFRN. Neste trabalho ele executou simulações variando alguns parâmetros individualmente. O autor apresentou como resultado do trabalho um conjunto de recomendações gerais sobre cada decisão projetual que precisa ser tomada, podendo contribuir para futuros projetos de edificações no local do estudo.

Um estudo que utiliza como objeto de análise um prédio de escritórios com todas as fachadas envidraçadas, na cidade do Rio de Janeiro foi desenvolvido por (CARVALHO, 2011). Neste trabalho a autora utiliza o software Visual DOE 2,61. Os resultados mostraram a relevância que as decisões na fase de concepção de projeto têm na eficiência energética da edificação. Ressaltando que as escolhas adequadas de tipos de vidro, sombreamento externo, aberturas das fachadas e os materiais utilizados nas fachadas e cobertura tem impacto significativo na demanda de energia elétrica dos edifícios. A autora sugere que sejam analisadas outras tipologias e aponta para a possibilidade de se analisar uma contribuição da energia solar.

Um estudo publicado pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações realizado por (BAVARESCO e GHISI, 2016), apresenta os métodos de avaliação de eficiência energética por consumo global e energia primária e compara o caso de 53 nações no mundo e traz reflexões sobre o método brasileiro. Os autores concluem que expor o nível de consumo na etiqueta além da classificação (A, B, C, D ou E) torna a etiquetagem mais acessível para o consumidor. Mostrar os limites para cada nível e apresentar o indicador obtido pela edificação permite avaliar quão distante da classe imediatamente inferior (ou superior) a edificação analisada está. E sugerem duas ações para facilitar o entendimento da classificação da eficiência energética: definir os intervalos para cada nível na própria etiqueta, e criar subdivisões no nível máximo de eficiência, como acontece em diversos países (Nível A (A+ e A++), o que segundo os autores poderia incentivar a aplicação das bonificações.

Em 2016, HONDA (2016), observa que o setor de Edifícios de Escritórios Corporativos no Brasil é pressionado a adotar práticas mais sustentáveis, e por consequência, buscam certificações estrangeiras, que segundo o autor possuem algumas limitações para o uso no Brasil. Diante deste cenário, o seu trabalho de pesquisa propõe uma certificação da sustentabilidade de edifícios corporativos no Brasil, que seria executado pelo Núcleo de *Real Estate* da Escola Politécnica de São Paulo.

3. Simulação Energética em Edificações como Ferramenta de Apoio a Certificação: Estudo de Caso para os *campi* do IFRN

3.1. Introdução

A participação de profissionais experientes no desenvolvimento de projetos utilizando ferramentas de simulação que possibilitem maior agilidade nas análises das repercussões das escolhas arquitetônicas e de engenharia que podem ser aplicadas como solução para uma edificação, contribuirá para melhores decisões projetuais. Fomentando a execução de edificações mais eficientes energeticamente.

A Simulação é a reprodução da operação de um sistema real ou de um processo ao longo do tempo. Para executar uma simulação é necessário o desenvolvimento de um modelo que retrate as principais características e comportamento do sistema real que se deseja analisar (LAMBERTS, 2014). O uso de simuladores de consumo energético de edificações é considerado uma ferramenta consistente para o desenvolvimento de projetos eficientes.

No processo de obtenção da ENCE do PBE Edifica o método de simulação possibilita uma análise mais completa da edificação. Como o método possibilita que sejam alimentados no software uma maior quantidade de parâmetros construtivos e de uso da edificação, além dos dados climáticos do local da construção, é possível uma análise conjunta desses dados o que aproxima os resultados simulados da realidade. E baseado nessas análises possibilita classificar a edificação quanto a eficiência energética.

Neste capítulo serão apresentados os estudos de simulações energéticas que tiveram como base o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais de Serviços e Públicos (RTQ-C), realizados em uma amostra dos *campi* do IFRN. Inicialmente é descrita a metodologia utilizada, na sequência são apresentados os modelos energéticos simulados, e por último, encontram-se os resultados e suas respectivas análises.

3.2. Metodologia da Simulação Energética em Edificações

As informações quantitativas geradas na simulação possibilitam uma análise detalhada dos impactos que cada estratégia adotada tem na edificação. Sendo possível aprimorar o desempenho dessa estratégia ao longo de testes sucessivos (VENANCIO, 2012).

O processo de simulação proporciona agilizar a etapa de concepção do projeto, permite analisar diferentes possibilidades de solução, gerando redução de custos (CLARK, 2001). Como forma de avaliar, em termos de eficiência energética, edificações destinadas a instituições de ensino, foi aplicada a Metodologia da simulação energética em edificações, para então elencar prioridades na adoção de alternativas construtivas e tecnológicas que se traduzam em políticas públicas que potencializem a eficiência energética e a sustentabilidade na prática construtiva em prédios públicos, destacando as instituições de ensino multi-sede. Dessa forma a Metodologia da simulação energética foi aplicada em duas unidades do IFRN que melhor representam o conjunto arquitetônico de propriedade dessa instituição: Para tanto, foram escolhidos: o campus Natal Central, por ser a composição mais antiga dos prédios do IFRN, estando localizado na zona bioclimática¹¹ 8 (clima quente e úmido). Já o campus Caicó, também escolhido, apresenta uma tipologia de edificação que foi e segue adotada na concepção dos prédios da expansão do IFRN executados e planejados, que vem ocorrendo desde o ano de 2005 e está localizada na Zona bioclimática 7 (clima quente e seco).

O território brasileiro foi dividido em oito zonas relativamente homogêneas quanto as características climáticas e, para cada uma destas zonas, foram formuladas uma série de recomendações técnico-construtivas que otimizam o desempenho térmico das edificações, através de sua melhor adequação climática (ABNT, 2005).

As recomendações construtivas para a Zona Bioclimática 7 são para aberturas pequenas e sombreadas o ano todo, o uso de paredes e de coberturas pesadas. As estratégias bioclimáticas são de resfriamento evaporativo e ventilação seletiva no verão. Enquanto para a Zona Bioclimática 8, as recomendações construtivas são para aberturas grandes e totalmente sombreadas, o uso de paredes e coberturas leves e refletoras. A estratégia bioclimática recomendada é o uso de ventilação cruzada o ano todo (ABNT, 2005).

No RN, o processo de expansão da Rede Federal de Educação profissional proporcionou uma maior distribuição geográfica das unidades do IFRN, estando, na atualidade, suas 21 unidades localizadas nas zonas bioclimáticas 7 e 8, como apresentado na Figura 25 e Figura 26,

¹¹ O Zoneamento Bioclimático brasileiro é o resultado do cruzamento de dados como: zonas de conforto térmico humano, dados climáticos, estratégias construtivas e de condicionamento térmico passivo, com o objetivo de estabelecer critérios para proporcionar conforto térmico nas edificações habitacionais.

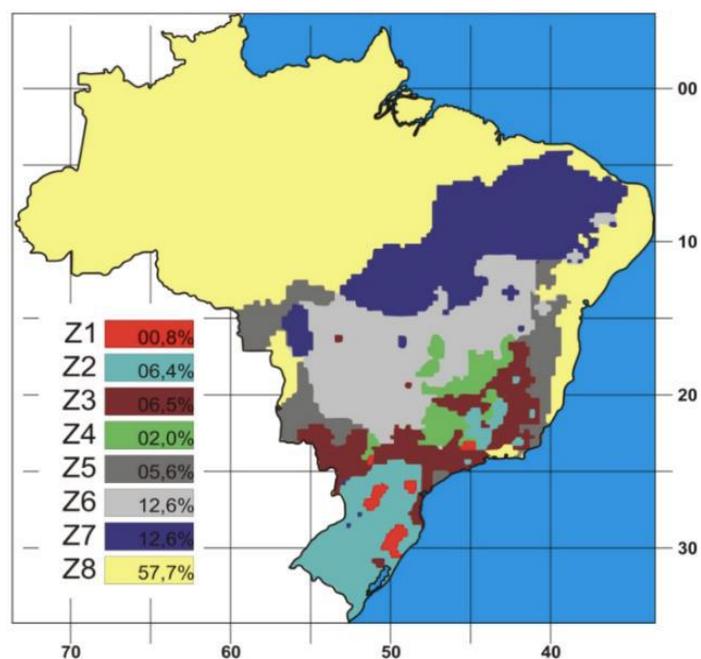


Figura 25- Zoneamento bioclimático brasileiro
 Fonte: NBR 15.220-3



Figura 26 - Distribuição geográfica dos *campi* do IFRN

Na Tabela 10 é apresentado um resumo das características da amostra dos *campi* do IFRN (área simulada, Zona bioclimática onde está localizada e data de início das operações). Percebe-se a diferença de mais de 40 anos entre o início das atividades do Campus Natal Central e o Campus Caicó.

Tabela 10- Amostra das unidades do IFRN que será simulada

	Campus CNAT Central	Campus Caicó
Cidade	Natal	Caicó
Zona Bioclimática	8	7
Área simulada	8.224 m ²	4.493 m ²
Início de operação	Março/1967	Agosto/2009

O Procel Edifica disponibiliza uma lista de softwares para simulação energética. Um destes programas é o *EnergyPlus*, desenvolvido a partir dos códigos do DOE-2.1E e BLAST, para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. O programa possui capacidade de simulação diferenciada, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas (fotovoltaico, aquecimento solar, dentre outros) (MELO e colab., 2009).

De acordo com MELO e colab. (2009), o *EnergyPlus* tem as seguintes características técnicas:

- Solução simultânea e integrada em que a resposta do prédio e o sistema primário e secundário estão acoplados;
- Intervalos de tempos definidos pelo usuário, com fração de hora, para interação entre as zonas térmicas e o ambiente, e intervalos de tempo variável para interação entre a zona térmica e o sistema HVAC (automaticamente variável para assegurar uma solução estável);
- Arquivos de entrada, saída e climática que incluem condições ambientais horárias ou sub-horárias (até um quarto de hora) e relatórios padrões reajustáveis pelo usuário;
- Técnica de solução baseada no balanço de energia para as cargas térmicas prediais, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos radiante e convectivo na superfície interior e exterior, durante cada intervalo de tempo;
- Condução de calor transiente através dos elementos do prédio como paredes, tetos, pisos, etc, usando funções de transferência; modelo de conforto térmico, baseado na atividade, temperatura de bulbo seco interna, umidade;
- Modelo de céu anisotrópico para cálculos mais complexos da radiação difusa sobre superfícies inclinadas;

- Cálculo de balanço de calor de janelas que permite o controle eletrônico de persianas, balanço térmico camada por camada, o que permite a identificação do comprimento de onda da energia solar absorvida pelo vidro da janela;
- Controle da luz do dia, incluindo cálculos da iluminância interior, controle dos brilhos das luminárias e do efeito da iluminação artificial;
- Sistemas de condicionamento de ar configuráveis, que permitem ao usuário simular sistemas típicos comuns e sistemas poucos modificados, sem ter que recompilar o código fonte do programa; entre outras.

O *EnergyPlus* simula o consumo de energia da edificação baseado em informações climáticas horárias da região, descrição arquitetônica e construtiva do prédio, rotinas de uso e ocupação, potência instalada em iluminação, equipamentos, características do sistema de condicionamento de ar e estrutura tarifária (LABEEE, 2015). Este software, adota entrada e saída de dados apenas no formato texto, por isso são utilizados outros softwares com uma interface mais amigável trabalhando em conjunto com o *EnergyPlus*. Neste trabalho, a simulação energética realizada fez uso dos softwares *DesignBuilder* e o *Energyplus*

Para tanto foram executados os seguintes procedimentos metodológicos:

- 1) Parametrização com os dados climatológicos das duas cidades;
 - ✓ Nesta etapa os dados climáticos¹² da cidade de Natal e da cidade de Caicó foram importados para o programa.
- 2) Implementação do projeto arquitetônico das edificações no software de simulação;
 - ✓ Nesta etapa o projeto arquitetônico foi implementado no *DesignBuilder*, em seguida, utilizando as divisões físicas existentes, são definidas as zonas térmicas da edificação com base na natureza de uso de cada espaço da edificação.
- 3) Configuração e parametrização do arquivo base com os dados reais de funcionamento de cada zona térmica da edificação;

¹² Os arquivos climáticos apresentam os seguintes dados horários: Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido; Radiação solar direta e difusa; Direção e velocidade dos ventos; Altitude e azimute solar e Pressão atmosférica.

- ✓ Este passo consiste em realizar o cadastro dos horários de funcionamento de cada setor, como também o período de férias letivas.
- 4) Definição das rotinas de utilização dos equipamentos, ocupação dos ambientes, iluminação e condicionamento de ar.
- 5) Simulação dos seguintes modelos: Caso Real, Caso RTQ-C “A”, Caso RTQ-C “B”, Caso RTQ-C “C”, Caso RTQ-C “D” e Caso RTQ-C “E”; Classificação da edificação de acordo com a etiqueta ENCE de eficiência energética;
- ✓ *A nomenclatura Caso Real* foi utilizada para identificar a situação na qual a edificação foi realmente projetada e executada;
- ✓ *As nomenclaturas Caso RTQ-C “A”, RTQ-C “B”, RTQ-C “C”, RTQ-C “D”,* foram utilizadas para identificar os modelos de referência em eficiência energética para os diferentes níveis da ENCE.
- 6) Verificação se a edificação alcançou a etiqueta Nível A, caso não alcance serão executadas alterações para que se atenda a exigência.
- ✓ Neste item, caso a edificação não atinja o Nível A, as modificações serão feitas no modelo real que está implementado no *Designbuilder* buscando diminuir o consumo de energia elétrica da edificação de maneira que ela se torne mais eficiente.
- 7) Utilização dos dados de consumo anual de eletricidade para análise das emissões de GEE, e ainda será estudado o impacto que a adequação das edificações para atenderem a exigência da certificação ENCE Nível A tem nas emissões de GEE.
- 8) Cálculo do Percentual de Abertura na Fachada (PAFt) de cada Nível (A, B, C, D e E) deverá ser utilizada a Equação 2 ou a Equação 3, substituindo a ICenv para cada nível.

$$ICenv = -160,36.FA + 1277,29.FF - 19,21.PAFt + 2,95.FS - 0,36.AVS \\ - 0,16.AHS + 290,25FF.PAFt + 0,01.PAFt.AVS.AHS - 120,58$$

Equação 2- Equação para o Cálculo do PAFt para Zona bioclimática 8

$$ICenv = -69,48.FA + 1347,78FF + 37,74.PAFt + 3,03.FS - 0,13.AVS - 0,19.AHS \\ + \frac{19,25}{FF} + 0,04.\frac{AHS}{(PAFt.FS)} - 306,35$$

Equação 3- Equação para o Cálculo do PAFt para Zona bioclimática 7

Com a conclusão do processo de simulações das edificações são extraídos no software os dados de consumo de eletricidade anual para todos os casos simulados. Após encontrado o consumo de eletricidade para a edificação em todos os casos simulados, utiliza-se o fator de emissão do SIN para que sejam calculadas as emissões de GEE relacionadas a geração dessa energia.

3.3. Resultados e Análises

Os itens 3.3.1. e 3.3.2. trazem os resultados das simulações para o Campus Natal Central do IFRN (CNAT), Campus Caicó, respectivamente.

Após realizada a simulação do caso real das duas edificações estudadas, procedeu-se de acordo com o que determina o RTQ-C, executou-se as alterações nos parâmetros determinados no regulamento para as edificações e foram simulados os modelos de referência das duas edificações para os níveis A, B, C e D. Com a comparação entre os consumos anuais de energia elétricas do caso real e dos modelos de referência foi possível classificar as duas edificações em análise quanto ao nível de eficiência energética. Esses resultados extraídos do software de simulação foram analisados com enfoque do consumo de energia e suas implicações nas emissões de GEE.

Para os casos em que a edificação real simulada não foi classificada com Nível A, foi realizada uma análise detalhada dos resultados do caso real, foram consultadas as diretrizes construtivas orientados pela NBR 15.220-3 para Zona bioclimática 7 e 8, e considerou-se ainda, às experiências de trabalhos anteriores relacionados ao tema, e testados na mesma região bioclimática em que a edificação avaliada está situada. Após essas análises, alguns parâmetros foram alterados no caso real e foram rodadas novas simulações. Esses novos resultados extraídos do software foram novamente comparados com os casos de referência (Real, Nível A, Nível B e Nível C).

Ressalta-se, entretanto, que o foco deste trabalho consiste em avaliar a repercussão que as soluções fomentadas pela busca pela certificação de eficiência energética possam trazer para redução de emissões de GEE.

3.3.1. IFRN - Campus Natal Central

Na Figura 27 é apresentado o modelo que foi implementado no software de simulação. Para o CNAT foi simulado o prédio que contempla os três blocos principais de aula e da

administração do campus. Na Figura 28, Figura 29 e Figura 30 são apresentadas as distribuições das zonas térmicas dos blocos A, B e C conforme foram simuladas.

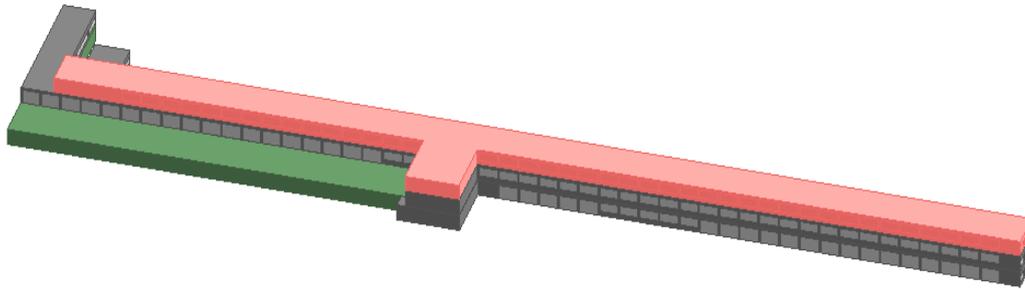


Figura 27- Modelo do CNAT na tela do *DesignBuilder*

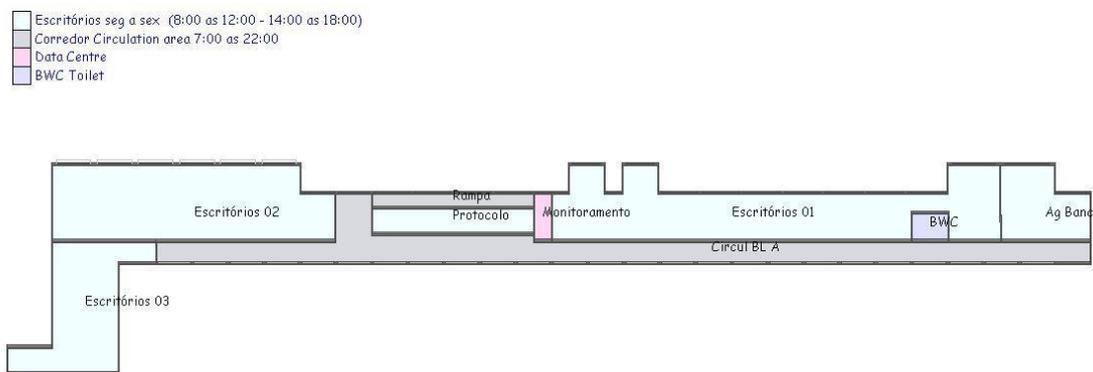


Figura 28- Distribuição das zonas térmicas do Bloco A do IFRN Campus CNAT

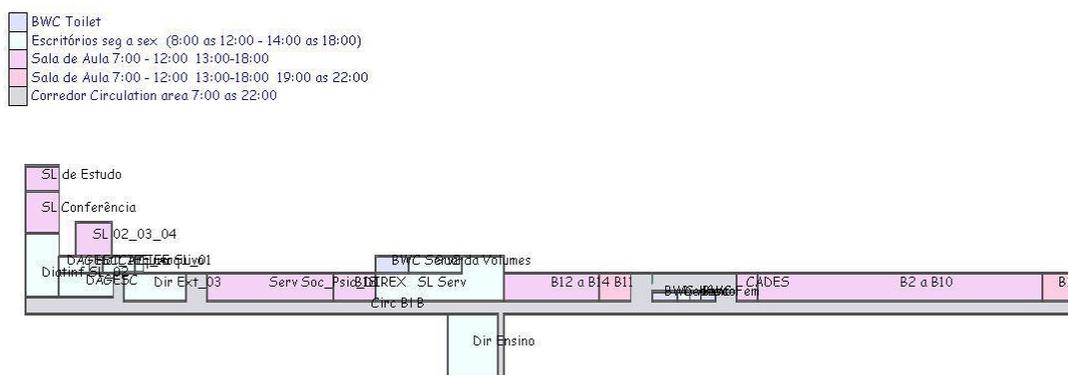


Figura 29- Distribuição das zonas térmicas do Bloco B do IFRN Campus CNAT

Assembly areas / halls
 Corredor Circulation area: 7:00 as 22:00
 Sala de Aula: 7:00 - 12:00 13:00-18:00 19:00 as 22:00
 Escritórios seg a sex (8:00 as 12:00 - 14:00 as 18:00)

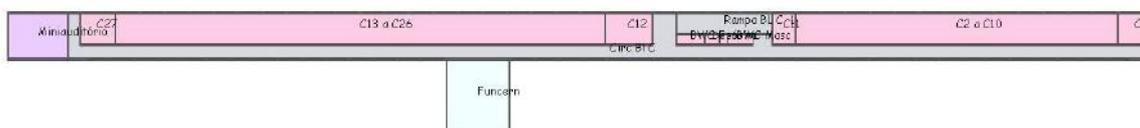


Figura 30- Distribuição das zonas térmicas do Bloco C do IFRN Campus CNAT

Para o cálculo dos parâmetros que serão utilizados na simulação para os casos, RTQ-C Nível A, RTQ-C Nível B, RTQ-C Nível C e RTQ-C Nível D, foram utilizados os dados coletados no projeto original e as recomendações do regulamento de certificação Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C).

As Tabelas 11, 12 e 13 apresentam os cálculos dos parâmetros utilizados nas simulações. É possível observar que o Percentual de Abertura na Fachada (PAFt) no caso real que é de 25% (Tabela 11) é aproximadamente igual ao PAFt do nível A, que é 24% (Tabela 13). O que sugere que a contribuição deste item no consumo de eletricidade poderia ser similar, se fosse analisado isoladamente.

Tabela 11 - Dados do projeto para classificação de desempenho energético

CLASSIFICAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO		
Área de projeção do edifício (m ²)	APE	2.741,36
Área de projeção da cobertura (m ²)	Apcob	3.247,56
Área total de piso (m ²)	Atot	8.224,07
Área da envoltória (m ²)	Aenv	5.315,63
Ângulo Vertical de Sombreamento (graus)	AVS	15,68
Ângulo Horizontal de Sombreamento (graus)	AHS	0,00
Percentual de Abertura na Fachada (adimensional)	PAFT	0,25
Volume total da edificação (m ³)	Vtot	9.594,75
Fator solar	FS	0,22
Zona Bioclimática	ZB 8	

Tabela 12- Classes de eficiência energética da edificação

Eficiência	A	B	C	D	E
lim mín	-	552,67	571,94	591,22	610,50
lim máx	552,66	571,93	591,21	610,49	-

Tabela 13- Percentual de abertura da fachada calculado para as simulações

PAFT nível A	0,24
PAFT nível B	0,38
PAFT nível C	0,51
PAFT nível D	0,65

Implantado no software de simulação energética o modelo de referência real da edificação a ser simulada e feita sua parametrização, foram gerados os resultados de consumo energético anual para o caso real. As Figura 31 a 34, mostram os resultados dos ganhos internos de energia provocados pelas condições ambientais e pelo uso da edificação. Nelas pode ser verificado que o ganho térmico devido a luz solar é o maior responsável pelo aquecimento da edificação, seguido pela iluminação, pelas pessoas que ocupam o ambiente e por último pelos equipamentos utilizados no ambiente. Quando se comparam as figuras 32 (Nível A), Figura 33 (Nível B) e figura 34 (Nível C), nota-se que devido ao aumento do Percentual de Abertura de Fachada (PAFt), a contribuição da luz solar nos ganhos internos aumentam a medida que vai indo do nível A para o Nível D. Esta observação nos aponta alguns caminhos que podem ser seguidos nas intervenções também simuladas neste trabalho para obtenção de uma melhor classificação energética para a edificação. Percebe-se ainda que os ganhos internos devido a luz solar são maiores nos meses mais quentes do ano.

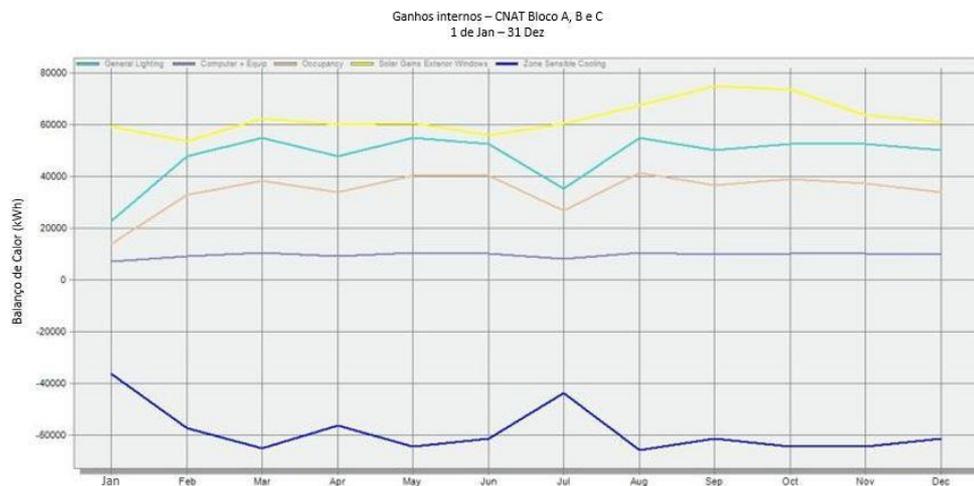


Figura 31- Ganhos internos Bloco A do campus CNAT (Caso Real)

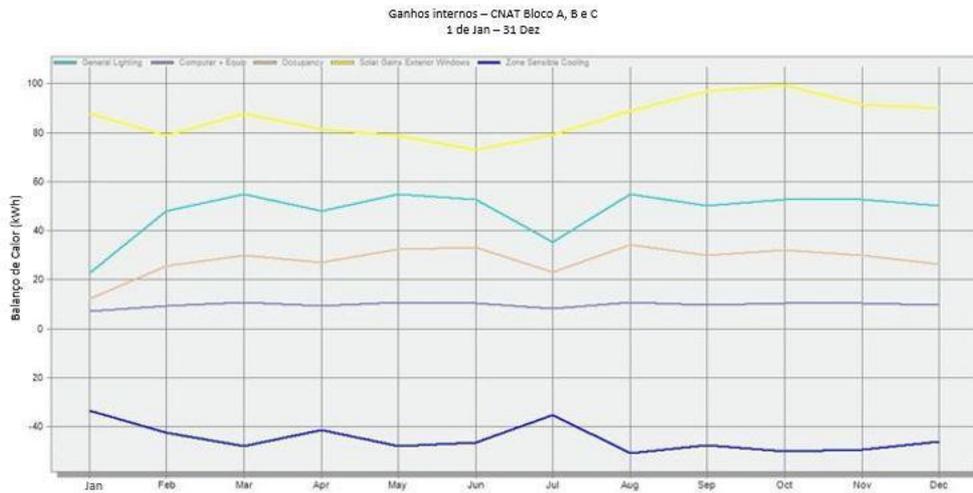


Figura 32- Ganhos internos Bloco A do campus CNAT (Nível A)

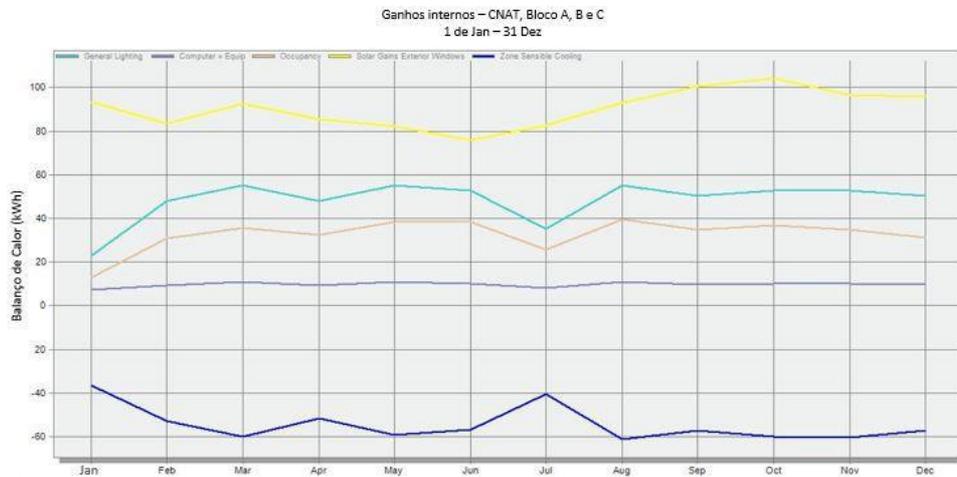


Figura 33- Ganhos internos Bloco A do campus CNAT (Nível B)

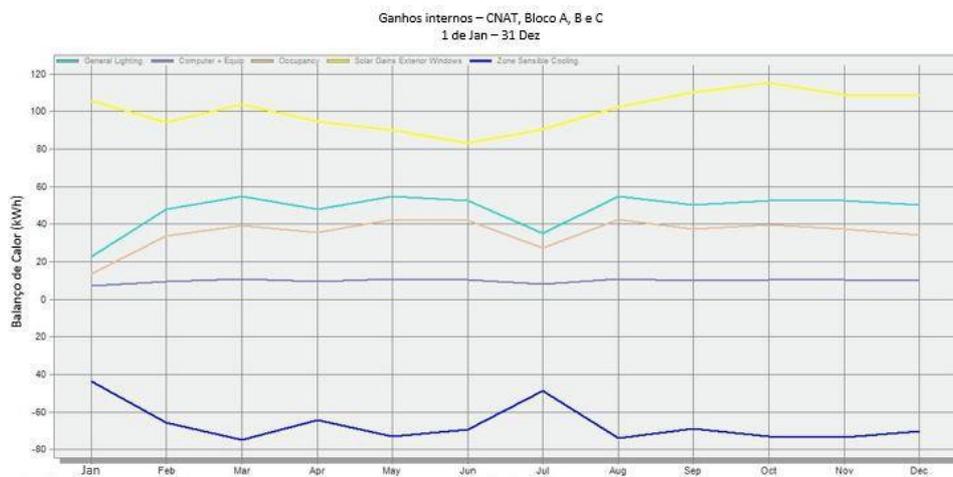


Figura 34- Ganhos internos Bloco A do campus CNAT (Nível C)

Já na Tabela 14 e Figura 35 tem-se os resultados de consumo de energia elétrica distribuídos ao longo do ano e agrupados em equipamentos, iluminação e condicionamento de ar para o Caso Real. Na Figura 35, verifica-se que nos meses de janeiro e julho registra-se uma redução no consumo de energia, isto se justifica porque nesses meses ocorrem as férias escolares de acordo com o calendário letivo da instituição. Nesse mesmo período, as maiores reduções ocorrem na iluminação e no condicionamento de ar, pois esses estão mais relacionados ao uso das salas de aula, enquanto que os equipamentos, na sua grande maioria, continuam sendo utilizados nos setores administrativos durante as férias escolares, provocando assim pouca influência no consumo de energia nesse período

Tabela 14- Consumo mensal da edificação simulada (Caso REAL)

	Equipamentos	Iluminação	Ar condicionado	Total
	(MWh)			
Janeiro	7,19	22,79	18,29	48,27
Fevereiro	9,34	47,87	32,27	89,48
Março	10,74	55,05	36,88	102,67
Abril	9,34	47,87	31,87	89,08
Maiο	10,74	55,05	36,27	102,06
Junho	10,27	52,66	34,06	96,99
Julho	8,26	35,33	23,15	66,74
Agosto	10,74	55,05	35,71	101,50
Setembro	9,80	50,27	33,01	93,08
Outubro	10,27	52,66	34,50	97,43
Novembro	10,27	52,66	34,88	97,81
Dezembro	9,80	50,27	33,74	93,81
Total ANO	116,75	577,54	384,64	1.078,93

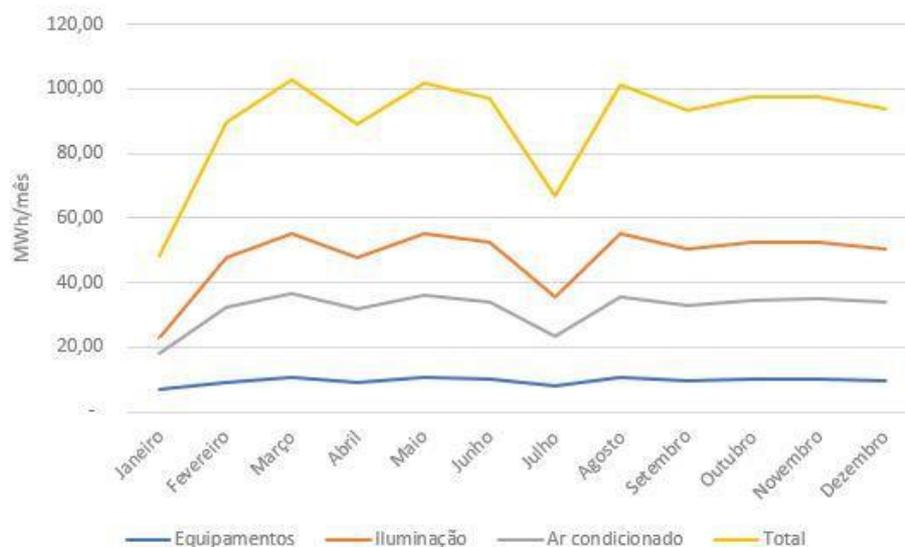


Figura 35- Consumo de energia do CNAT

Após a simulação do Caso Real, de acordo com as orientações do regulamento do RTQ-C, devem ser simulados os demais casos, com os níveis de eficiência ENCE Nível A, ENCE Nível B, ENCE Nível C, ENCE Nível D e ENCE Nível E. Para tanto, devem ser utilizados os parâmetros calculados e apresentados anteriormente nas Tabelas 11, 12 e 13.

A comparação dos casos simulados referentes ao consumo anual do Caso Real e dos níveis A, B e C estão apresentadas na Tabela 15 e Figura 36, onde se pode observar que pelos resultados obtidos a edificação em análise é classificada com a ENCE Nível C¹³, quando se leva em consideração o consumo anual de energia elétrica na edificação obtido nas simulações. Isso ocorre, devido a edificação apresentar um consumo anual maior que o apresentado no Nível B e menor que o Nível C. Não foi necessário simular a edificação para o Nível D e para o Nível E, pois os dados disponíveis já permitiam o enquadramento da edificação do CNAT em análise.

¹³ Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) Nível C do Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edificações (PBE Edifica)

Tabela 15- Comparativo de consumo anual das simulações do caso real e dos níveis A, B e C

	Caso Real	Nível A	Nível B	Nível C
	<i>(MWh)</i>			
Janeiro	48,27	47,25	48,50	50,95
Fevereiro	89,48	85,21	88,35	92,23
Março	102,67	97,92	101,42	105,66
Abril	89,08	84,96	87,86	91,42
Mai	102,06	97,52	100,67	104,50
Junho	96,99	92,97	95,71	99,16
Julho	66,74	64,35	65,91	68,29
Agosto	101,50	97,31	100,22	104,10
Setembro	93,08	89,07	91,82	95,58
Outubro	97,43	93,29	96,17	100,19
Novembro	97,81	93,56	96,71	100,88
Dezembro	93,81	89,45	92,74	96,85
Total ANO	1.078,93	1.032,85	1.066,07	1.109,82



Figura 36- Comparativo do consumo de energia simulados para o caso real e para os Nível A, Nível B e Nível C

Porém, conforme já explicado no item 2.9.1. o regulamento RTQ-C prevê a possibilidade desta classificação melhorar com base em bonificações.

Para a edificação em questão - Campus CNAT – registra-se a existência de uma usina de geração solar fotovoltaica instalada. De acordo com o RTQ-C a edificação que anualmente gera 10% do seu consumo anual utilizando fontes renováveis de energia ganha 1(um) ponto de bonificação. Portanto, como o campus CNAT tem uma Usina

fotovoltaica que gera mais que 10% do seu consumo¹⁴, a edificação passa da classificação ENCE Nível C para a ENCE Nível B. No capítulo 4 é apresentada uma avaliação das repercussões desse *upgrade* de nível que a edificação obteve com relação a mitigação das emissões de GEE amparados pelo estudo de LCA.

É importante observar que mesmo com a bonificação, a edificação não atingiu o Nível A, mesmo sendo obrigatório segundo a IN02/2014. Então, nesse contexto, como forma de buscar cumprir as determinações dessa Instrução Normativa, executou-se, nas simulações, alterações na edificação para que ela alcance o Nível A de eficiência energética. Para tanto, diferentes hipóteses que foram consideradas, a saber:

Caso 1- Alterações que são realizadas na fase de projeto – orientação da edificação no terreno;

Caso 2 - Alterações que podem ser feitas após a edificação construída, que poderiam fazer parte de um *Retrofit* – Substituição da atual cobertura por uma outra de material diferente.

Caso 3 - Alterações que podem ser feitas após a edificação construída, que poderiam fazer parte de um *Retrofit* – Trocar a cobertura e colocar toldos para sombrear as janelas.

Caso 4 - Alterações que podem ser feitas após a edificação construída, que poderiam fazer parte de um *Retrofit* - Trocar a cobertura e colocar brises¹⁵ nas janelas.

Todas as alterações propostas e simuladas para os casos estudados, a partir das proposições acima descritas estão resumidas na

Tabela 16.

¹⁴ Consumo de eletricidade 1º. semestre 2018 no CNAT:1335 MWh e Geração na Usina fotovoltaica do CNAT no 1º. Semestre de 2018: 149 MWh, que representando 11,11% nesse período.

¹⁵ O brise é um dispositivo arquitetônico utilizado para impedir a incidência direta de radiação solar nos interiores de um edifício, de forma a evitar aí a manifestação de um calor excessivo

Tabela 16- Resumo das modificações hipotéticas simuladas

	Orientação da edificação	Cobertura	Sombreamento da abertura (Toldos)	Sombreamento da abertura (Brisas)
Caso 1	Alterado Caso real = 20° Leste Simulado = 110° Leste	Igual caso real	Igual caso real	Igual caso real
Caso 2	Igual caso real	Substituída Caso Real = Laje + Fibrocimento Simulado = Laje + Metálica com poliestireno	Igual caso real	Igual caso real
Caso 3	Igual caso real	Igual caso real	Adicionado Toldos nas janelas	Igual caso real
Caso 4	Igual caso real	Substituída Caso Real = Laje + Fibrocimento Simulado = Laje + Metálica com poliestireno	Igual caso real	Adicionado Brisas nas janelas

Para o Caso 1, a orientação original da edificação de 20° SE, foi testada na orientação 110° SE. Esta situação hipotética, só teria validade quando da fase de projeto, porém é pertinente que seja testada para avaliar o impacto da escolha mais adequada nos próximos projetos de *campi*. Na Figura 37 é apresentada a situação original da edificação.



Figura 37- Vista do CNAT original com percurso solar

Para os Casos 2 e 4, o tipo de cobertura foi substituído. O Caso Real foi executado utilizando laje maciça com telha de fibrocimento, e sendo então, na simulação, substituída a telha de fibrocimento por uma telha com duas camadas metálicas com poliestireno entre as mesmas, que apresenta uma menor transmitância térmica. Conforme observado na Figura 38 e Figura 39 abaixo.

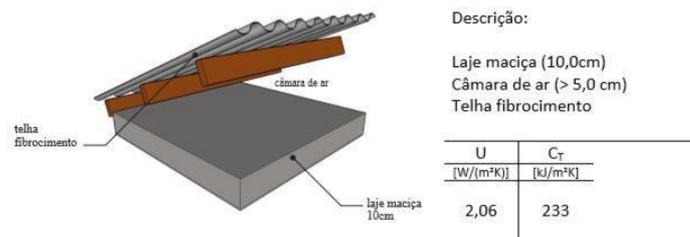


Figura 38- Tipo de considerada no caso real da edificação CNAT

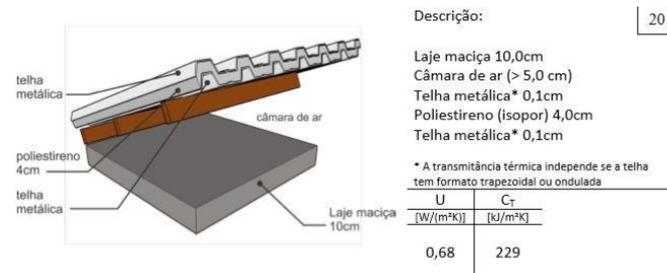


Figura 39- Tipo de Laje considerada no caso 2 e 4 do CNAT

A Tabela 17 mostra os resultados de consumo de eletricidade para cada caso estudado. Observa-se que os casos propostos 2, 3 e 4 obtiveram resultados de economia de eletricidade quando comparados com o Caso Real, enquanto o caso 1 apresentou um pequeno acréscimo. No caso 2 a edificação ficaria classificada como ENCE Nível B e nos casos 3 e 4 como ENCE Nível A.

Tabela 17- Resultados de consumo de energia para cada caso estudado no CNAT

	Caso Real	Nível A	Nível B	Nível C	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
	MWh							
Janeiro	48,27	47,25	48,50	50,95	48,39	46,94	46,38	45,86
Fevereiro	89,48	85,21	88,35	92,23	89,98	85,59	83,74	82,08
Março	102,67	97,92	101,42	105,66	103,17	98,39	96,26	94,31
Abril	89,08	84,96	87,86	91,42	89,41	85,46	83,60	81,87
Mai	102,06	97,52	100,67	104,50	102,53	98,12	96,02	94,07
Junho	96,99	92,97	95,71	99,16	97,50	93,49	91,53	89,70
Julho	66,74	64,35	65,91	68,29	66,96	64,74	63,64	62,59
Agosto	101,50	97,31	100,22	104,10	102,16	97,62	95,64	93,85
Setembro	93,08	89,07	91,82	95,58	93,75	89,26	87,44	85,84
Outubro	97,43	93,29	96,17	100,19	98,13	93,42	91,53	89,90
Novembro	97,81	93,56	96,71	100,88	98,58	93,68	91,73	90,04
Dezembro	93,81	89,45	92,74	96,85	94,58	89,69	87,76	86,10
Total ANO	1.078,93	1.032,85	1.066,07	1.109,82	1.085,13	1.036,39	1.015,27	996,21

Na Figura 40 são apresentados dados que permitem comparar os resultados para os 4 casos estudados, tanto com o caso real quanto com o Nível A, B e C anteriormente calculados. Nele se pode avaliar que as modificações propostas no Caso 3 e Caso 4 proporcionariam uma redução no consumo de 5,90% e 7,66%, respectivamente, em relação ao Caso Real. Essa economia é maior do que a prevista para o limite superior para atingir o Nível A, que seria de 4,27%. O investimento a ser realizado nessas alterações propostas devem ser quantificados para que sejam calculados o seu tempo de retorno a partir da economia nos custos de energia. A alteração sugerida no Caso 1 não obteve impacto positivo nos resultados, ficando seu consumo 0,57% superior ao caso real.



Figura 40- Comparativo do consumo de cada caso simulado para o CNAT

Com relação a contribuição que a adoção da etiqueta de eficiência energética tem na mitigação das emissões e GEE, é feito um comparativo das emissões anuais de cada caso simulado, como mostrado na Figura 41. O cálculo das emissões de GEE foi realizado considerando o consumo simulado de energia elétrica mês a mês (Tabela 15) e o seu respectivo fator de emissão determinado pelo SIN, no ano de 2018. Estes resultados estão na Tabela 18.

Tabela 18- Cálculo das emissões de CO2 mês a mês para os casos simulados do CNAT

	SIN 2018	Caso Real	Nível A	Nível B	Nível C	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
	tCO _{2e} /MWh	t CO _{2e}							
Janeiro	0,06	3,09	3,02	3,10	3,26	3,10	3,00	2,97	2,94
Fevereiro	0,06	5,44	5,18	5,37	5,61	5,47	5,20	5,09	4,99
Março	0,06	6,52	6,22	6,44	6,71	6,55	6,25	6,11	5,99
Abril	0,05	4,66	4,44	4,59	4,78	4,68	4,47	4,37	4,28
Mai	0,06	6,20	5,92	6,11	6,34	6,22	5,96	5,83	5,71
Junho	0,09	8,87	8,51	8,76	9,07	8,92	8,55	8,37	8,21
Julho	0,11	7,18	6,92	7,09	7,35	7,21	6,97	6,85	6,73
Agosto	0,12	11,99	11,49	11,84	12,29	12,07	11,53	11,30	11,08
Setembro	0,12	11,00	10,53	10,85	11,30	11,08	10,55	10,34	10,15
Outubro	0,08	7,81	7,48	7,71	8,04	7,87	7,49	7,34	7,21
Novembro	0,04	3,58	3,42	3,54	3,69	3,61	3,43	3,36	3,30
Dezembro	0,03	3,22	3,07	3,18	3,32	3,24	3,08	3,01	2,95
Total ANO	0,074	79,56	76,21	78,59	81,77	80,01	76,48	74,93	73,54

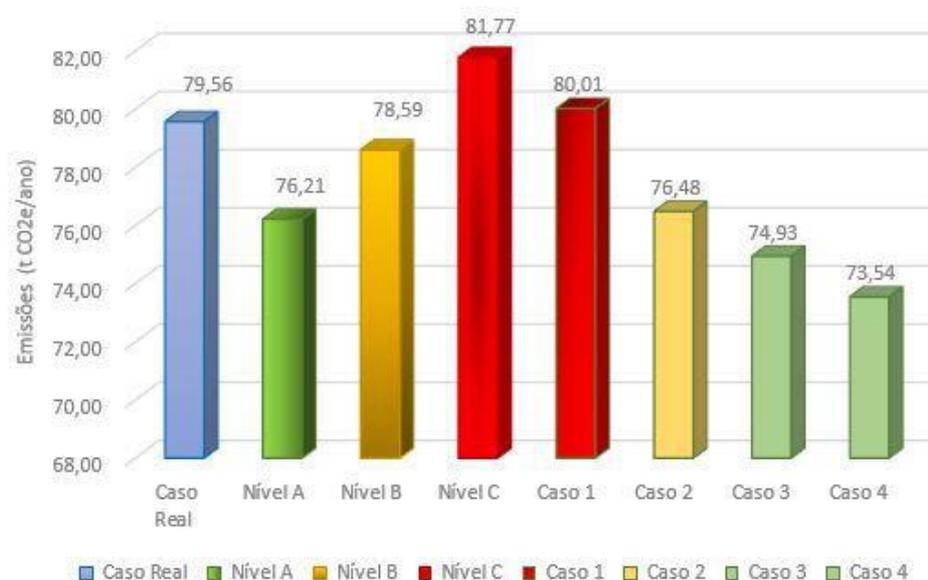


Figura 41- Comparativo de emissões de GEE para cada caso simulado do CNAT

A análise dos resultados de redução de emissões de GEE advindos das intervenções propostas, permite concluir que as intervenções arquitetônicas propostas e simuladas, contribuem tanto para economizar recursos de custeio com gastos de energia quanto para mitigar as emissões de GEE. A hipótese da adoção das alterações propostas no Caso 4

representaria uma mitigação de cerca de 7,5 % nas emissões de GEE, gerando ainda uma economia de aproximadamente R\$ 33.000,00 por ano, levando em consideração a média do custo de tarifa do ano de 2018. Analisando os resultados de redução de emissões de GEE advindos das intervenções propostas, conclui-se que as intervenções arquitetônicas propostas e simuladas, contribuem tanto para economizar recursos de custeio com gastos de energia quanto para mitigar as emissões de GEE. Dessa forma, estas iniciativas têm relevantes repercussões, pois atuam positivamente tanto no pilar econômico quanto no ambiental da sustentabilidade.

3.3.2. IFRN - Campus Caicó

Na Figura 42 é apresentado o modelo que foi implementado no software de simulação. Para o campus de Caicó do IFRN, foi simulado o prédio principal, que engloba salas de aula, laboratórios e administração do campus. Na Figura 43 é apresentada a distribuição das zonas térmicas da edificação conforme foram simuladas.

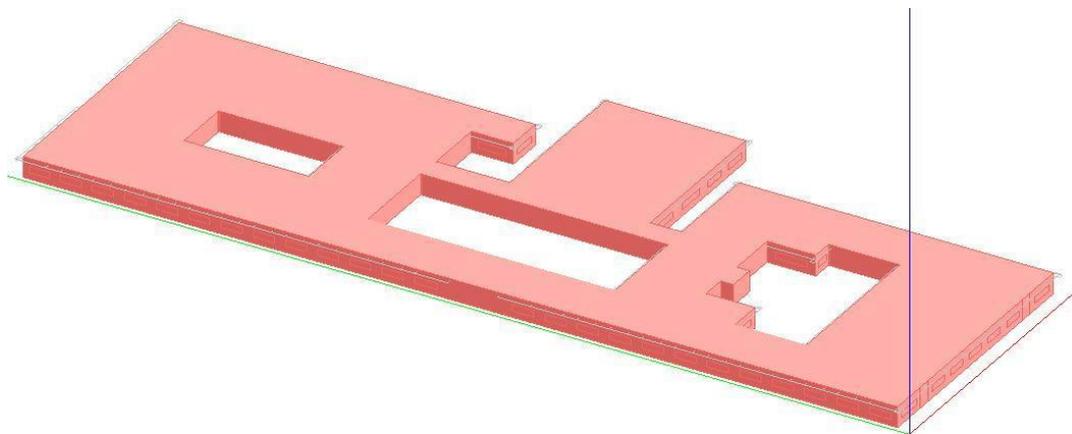


Figura 42- Modelo do IFRN Caicó na tela do *Designbuilder*

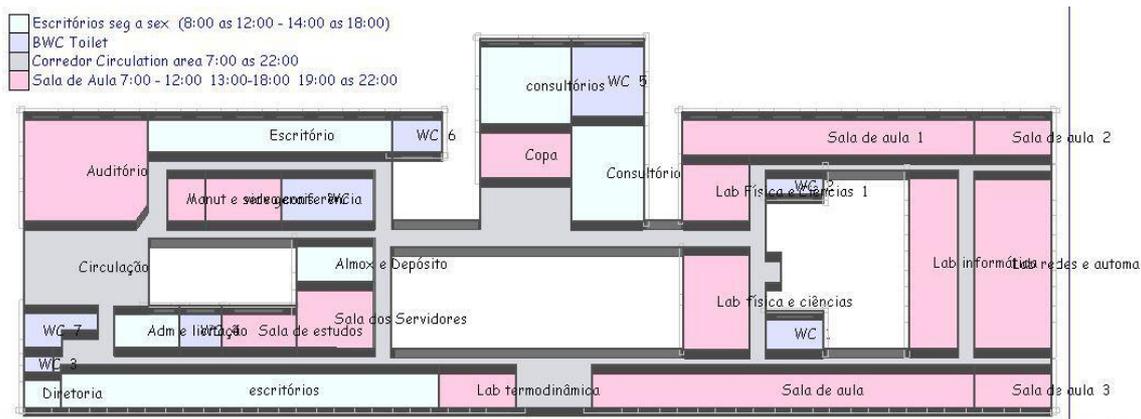


Figura 43- Zonas térmicas do IFRN Caicó

Para o cálculo dos parâmetros que serão utilizados na simulação para os casos, RTQ-C Nível A, RTQ-C Nível B, RTQ-C Nível C e RTQ-C Nível D, foram utilizados os dados coletados no projeto original e as recomendações do regulamento da certificação de Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C).

As Tabelas 19, 20 e 21 apresentam os cálculos dos parâmetros utilizados nas simulações. É possível observar que o Percentual de Abertura na Fachada (PAFt) no caso real que é de 17% (Tabela 19) é inferior ao PAFt do nível A, que é 27% (Tabela 21). O que sugere que a contribuição deste item no consumo de eletricidade poderia influenciar para um menor consumo, o que enquadraria a edificação próxima ao Nível A. Entretanto a simulação irá considerar todos os fatores analisados em conjunto.

Tabela 19 - Dados do projeto para classificação de desempenho energético

CLASSIFICAÇÃO DE DESEMPENHO ENERGÉTICO		
Área de projeção do edifício (m ²)	APE	4493,10
Área de projeção da cobertura (m ²)	Apcob	4493,10
Área total de piso (m ²)	Atot	4493,10
Área da envoltória (m ²)	Aenv	1522,88
Ângulo Vertical de Sombreamento (graus)	AVS	20,00
Ângulo Horizontal de Sombreamento (graus)	AHS	0,00
Percentual de Abertura na Fachada (adimensional)	PAFT	0,17
Volume total da edificação (m ³)	Vtot	15051,89
Fator solar	FS	0,56
Zona Bioclimática	ZB 7	

Tabela 20- Classes de eficiência energética da edificação

Eficiência	A	B	C	D	E
lim mín	-	-23,95	-18,95	-13,96	-8,97
lim máx	-23,96	-18,96	-13,97	-8,98	-

Tabela 21- Percentual de abertura da fachada calculado para as simulações

PAFT nível A	0,27
PAFT nível B	0,40
PAFT nível C	0,54

Implantado no software de simulação energética o modelo de referência real da edificação simulada e feita sua parametrização, foram gerados os resultados de consumo energético anual para o Caso Real. A Figura 44, mostra o resultado dos ganhos internos de energia provocados pelas condições ambientais e pelo uso da edificação. Nelas pode ser verificado que o ganho térmico devido a luz solar é o maior responsável pelo aquecimento da edificação, seguido pela iluminação, pelas pessoas que ocupam o ambiente e por último pelos equipamentos utilizados no ambiente. Quando se compara as Figura 45(Nível A), Figura 46(Nível B) e Figura 47(Nível C), nota-se que devido ao aumento do Percentual de Abertura de Fachada (PAFt), a contribuição da luz solar nos ganhos internos aumenta a medida que vai indo do nível A para o Nível E. Assim como no CNAT, esta observação nos aponta alguns caminhos que podem ser seguidos nas intervenções que serão simuladas mais adiante neste trabalho para obtenção de uma melhor classificação energética para a edificação. Percebe-se ainda que os ganhos internos devido a luz solar são maiores nos meses mais quentes do ano

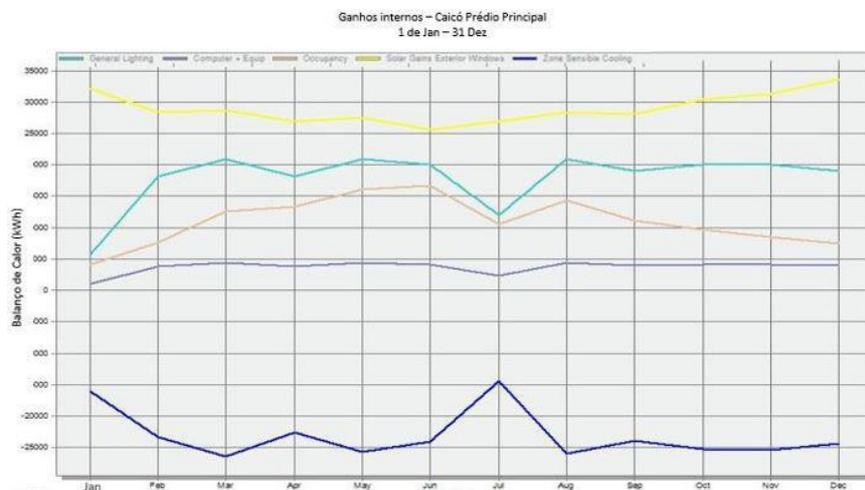


Figura 44- Ganhos internos bloco principal do campus Caicó (Caso Real)

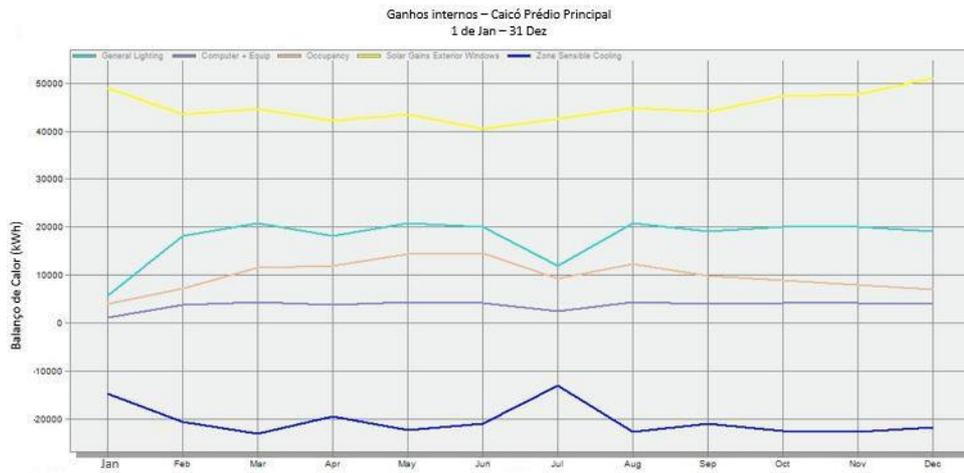


Figura 45- Ganhos internos bloco principal do campus Caicó (Nível A)

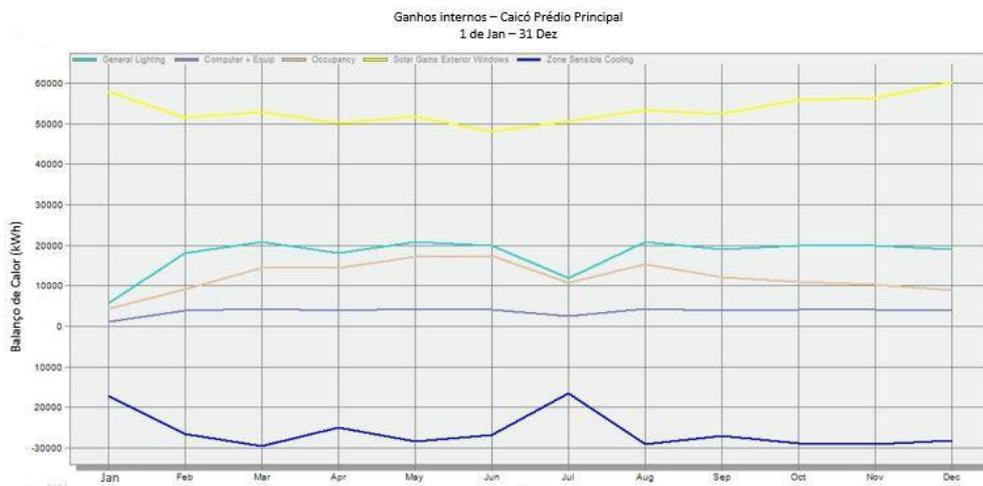


Figura 46- Ganhos internos bloco principal do campus Caicó (Nível B)

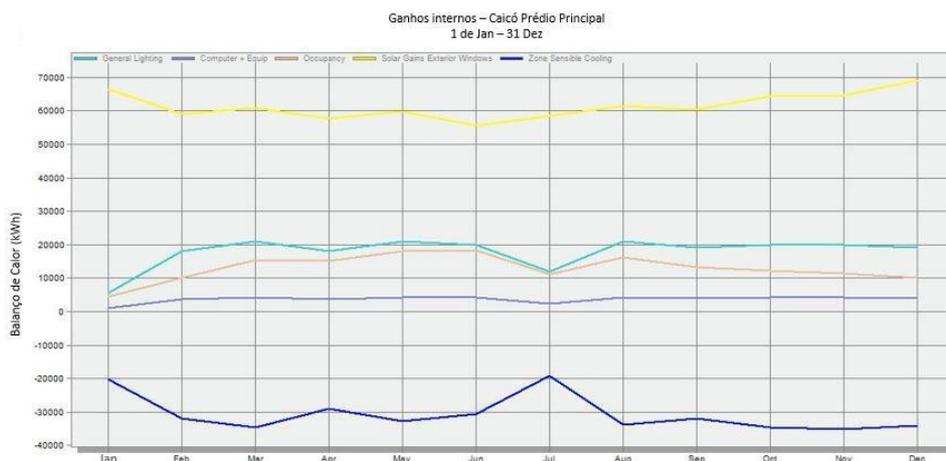


Figura 47- Ganhos internos bloco principal do campus Caicó (Nível C)

Já na Tabela 22 e Figura 48 tem-se os resultados de consumo de energia elétrica distribuídos ao longo do ano e agrupados em equipamentos, iluminação e

condicionamento de ar para o Caso Real. Na Figura 48, assim como no caso anterior do campus CNAT, verifica-se que nos meses de janeiro e julho registra-se uma redução no consumo de energia, isto se justifica porque nesses meses ocorrem as férias escolares de acordo com o calendário letivo da instituição. Nesse mesmo período, as maiores reduções ocorrem na iluminação e no condicionamento de ar, pois esses estão mais relacionados ao uso das salas de aula, enquanto os equipamentos, na sua grande maioria, continuam sendo utilizados nos setores administrativos durante as férias escolares, provocando assim pouca influência no consumo de energia nesse período.

Tabela 22- Consumo mensal da edificação simulada Campus Caicó (Caso REAL)

	Equipamentos	Iluminação	Ar condicionado (MWh)	Total
Janeiro	1.063,88	5.713,94	7.637,04	14.414,85
Fevereiro	3.791,50	18.157,50	14.779,04	36.728,04
Março	4.360,23	20.881,13	16.529,11	41.770,47
Abril	3.791,50	18.157,50	13.999,46	35.948,46
Maiο	4.360,23	20.881,13	15.916,40	41.157,76
Junho	4.170,65	19.973,25	14.907,94	39.051,84
Julho	2.427,69	11.935,72	9.080,84	23.444,25
Agosto	4.360,23	20.881,13	16.142,66	41.384,02
Setembro	3.981,07	19.065,38	14.994,77	38.041,22
Outubro	4.170,65	19.973,25	15.971,05	40.114,95
Novembro	4.170,65	19.973,25	16.107,54	40.251,44
Dezembro	3.981,07	19.065,38	15.493,49	38.539,94
Total ANO	44.629,34	214.658,56	171.559,34	430.847,24

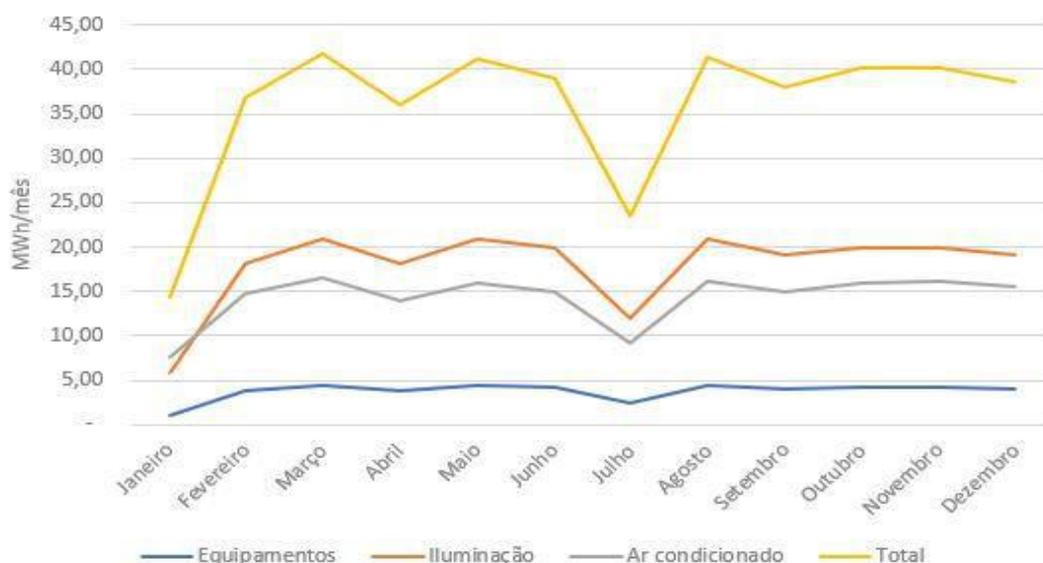


Figura 48- Consumo de energia do Campus Caicó por mês e por tipo de uso

Após a simulação do Caso Real, de acordo com as orientações do regulamento do RTQ-C, devem ser simulados os demais casos, com os níveis de eficiência ENCE Nível A, ENCE Nível B, ENCE Nível C, ENCE Nível D e ENCE Nível E. Para tanto, devem ser utilizados os parâmetros calculados e apresentados anteriormente nas Tabelas 19, 20 e 21.

A comparação dos casos simulados referentes ao consumo anual do Caso Real e dos níveis A, B e C estão apresentadas nas Tabela 23 e Figura 49, onde se pode observar que pelos resultados obtidos a edificação em análise é classificada com a ENCE Nível B¹⁶, quando se leva em consideração o consumo anual de energia elétrica na edificação obtido nas simulações. Isso ocorre, devido a edificação apresentar um consumo anual maior que o apresentado no Nível A e menor que o Nível B. Não foi necessário simular a edificação para o Nível D e para o Nível E, pois os dados disponíveis já permitiam o enquadramento da edificação do campus Caicó em análise.

¹⁶ Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) Nível B do Programa Brasileiro de Etiquetagem para Edificações (PBE Edifica)

Tabela 23- Comparativo de consumo anual das simulações do caso real e dos níveis A, B e C

	Caso Real	Nível A	Nível B	Nível C
	<i>(MWh)</i>			
Janeiro	14.414,85	13.880,74	14.740,77	15.695,84
Fevereiro	36.728,04	35.139,93	37.462,29	39.193,16
Março	41.770,47	39.987,06	42.399,09	44.073,63
Abril	35.948,46	34.500,09	36.492,81	37.780,10
Mai	41.157,76	39.562,91	41.782,36	43.186,26
Junho	39.051,84	37.676,17	39.700,16	40.959,45
Julho	23.444,25	22.779,12	23.989,26	24.864,50
Agosto	41.384,02	39.768,54	42.101,90	43.690,02
Setembro	38.041,22	36.487,28	38.751,84	40.357,55
Outubro	40.114,95	38.453,33	40.967,22	42.816,93
Novembro	40.251,44	38.570,37	41.151,80	43.088,73
Dezembro	38.539,94	36.955,99	39.481,52	41.418,23
Total ANO	430.847,24	413.761,52	439.021,00	457.124,39

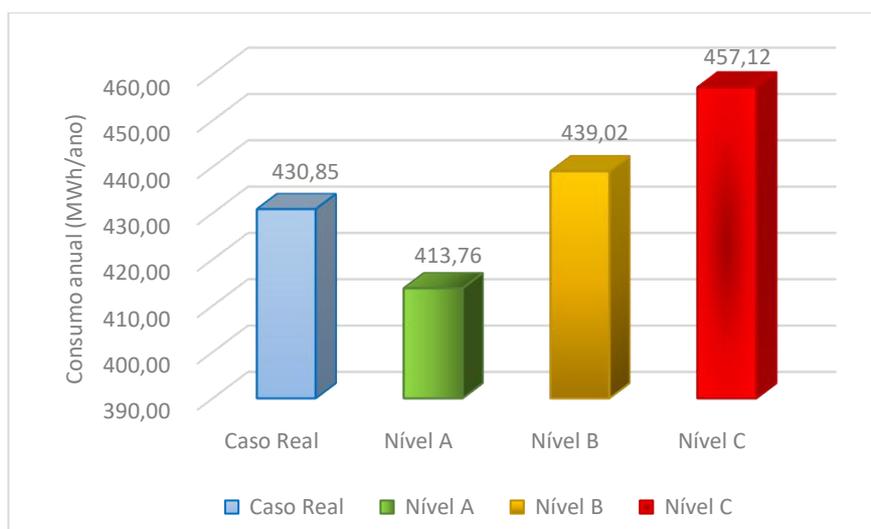


Figura 49- Comparativo do consumo de energia simulados para o caso real e para os Nível A, Nível B e Nível C

Porém, conforme já explicado no item 2.9.1. o regulamento RTQ-C prevê a possibilidade desta classificação melhorar com base em bonificações.

Para a edificação em questão – o Campus Caicó – registra-se a existência de uma usina de geração solar fotovoltaica instalada. De acordo com o RTQ-C a edificação que anualmente gera 10% do seu consumo anual utilizando fontes renováveis de energia ganha 1(um) ponto de bonificação. Portanto, como o campus Caicó tem uma Usina

fotovoltaica que gera cerca de 42% do seu consumo¹⁷, a edificação passa da classificação ENCE Nível B para a ENCE Nível A. No capítulo 4 é apresentada uma avaliação das repercussões desse *upgrade* de nível que a edificação obteve com relação a mitigação das emissões de GEE amparados pelo estudo de LCA.

É importante observar que com a bonificação, a edificação atingiu o Nível A, atendendo a obrigatoriedade da IN02/2014. Entretanto, assim como se procedeu no caso do CNAT, executou-se, nas simulações, alterações na edificação para que ela alcance o Nível A de eficiência energética sem contabilizar a bonificação. Para tanto, diferentes hipóteses que foram consideradas, a saber:

Caso 1) Alterações que são realizadas na fase de projeto – orientação da edificação no terreno;

Caso 2) Alterações que podem ser feitas após a edificação construída, que poderiam fazer parte de um *Retrofit* – Substituição da atual cobertura por uma outra de material diferente.

Caso 3) Alterações que podem ser feitas após a edificação construída, que poderiam fazer parte de um *Retrofit* - Trocar a cobertura e colocar Brises nas janelas.

Todas as alterações propostas e simuladas para os casos estudados, a partir das proposições acima descritas estão resumidas na Tabela 24.

Tabela 24- Resumo dos casos hipotéticos simulados para o Campus Caicó

	Orientação da edificação	Cobertura	Sombreamento da abertura (Brises)
Caso 1	Alterado Caso real = -60° Oeste Simulado = 250° Leste	Igual caso real	Igual caso real
Caso 2	Igual caso real	Substituída Caso Real = Laje + telha cerâmica Simulado = Laje + Metálica com poliestireno	Igual caso real
Caso 3	Igual caso real	Substituída Caso Real = Laje + telha cerâmica Simulado = Laje + Metálica com poliestireno	Adicionado Brises nas janelas

¹⁷ Consumo de eletricidade 1º. semestre 2018 no Campus Caicó:209 MWh e Geração na Usina fotovoltaica do Campus Caicó no 1º. Semestre de 2018: 88,08 MWh, que representando 42% nesse período.

Para o Caso 1, a orientação original da edificação de -60° Oeste e foi testada na orientação 250° Leste. Esta situação hipotética, só quando da fase de projeto, porém é pertinente que seja testada para avaliar o impacto da escolha mais adequada nos próximos projetos de *campi*. A Figura 50 apresenta a situação original da edificação.



Figura 50- Vista do Campus Caicó com o percurso solar

Para os Casos 2 e 3, o tipo de cobertura foi substituído. O caso real foi executado utilizando laje pré-moldada com telha cerâmica, e sendo então, na simulação, substituída a telha de cerâmica por uma telha com duas camadas metálicas com poliestireno entre as mesmas, que apresenta uma menor transmitância térmica. Conforme observado nas Figura 51 e Figura 52 abaixo. No caso 3, além da substituição das coberturas foram adicionados elementos de sombreamento das janelas, os brises.

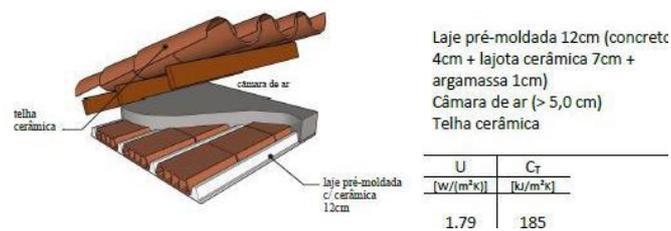


Figura 51- Cobertura considerada no caso real do Campus Caicó

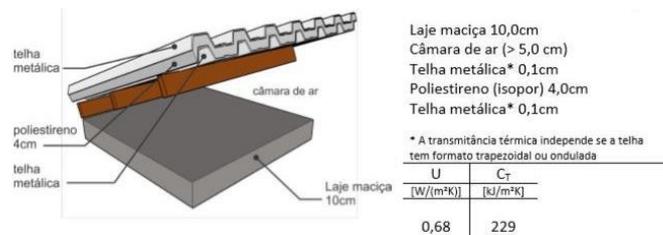


Figura 52- Cobertura considerada no Caso 3 para o Campus Caicó

A Tabela 25 mostra os resultados de consumo de eletricidade para cada caso estudado. Observa-se que os casos propostos 1, 2 e 3 obtiveram resultados de economia de eletricidade quando comparados com o Caso Real. No caso 1 a edificação ficaria classificada como ENCE Nível B e nos casos 2 e 3 como ENCE Nível A. Em todos os casos proposto obtiveram resultados melhores que o caso real.

Tabela 25- Consumo de energia para os casos estudados no Campus Caicó

	Caso	Nível	Nível	Nível	Caso	Caso	Caso
	MWh						
Janeiro	14,41	13,88	14,74	15,70	14,27	13,06	12,53
Fevereiro	36,73	35,14	37,46	39,19	36,02	33,93	31,86
Março	41,77	39,99	42,40	44,07	41,15	38,78	36,60
Abril	35,95	34,50	36,49	37,78	35,54	33,52	31,76
Mai	41,16	39,56	41,78	43,19	40,74	38,46	36,48
Junho	39,05	37,68	39,70	40,96	38,70	36,65	34,81
Julho	23,44	22,78	23,99	24,86	23,25	21,99	20,92
Agosto	41,38	39,77	42,10	43,69	40,85	38,58	36,48
Setembro	38,04	36,49	38,75	40,36	37,44	35,33	33,31
Outubro	40,11	38,45	40,97	42,82	39,38	37,15	34,93
Novembro	40,25	38,57	41,15	43,09	39,47	37,20	34,94
Dezembro	38,54	36,96	39,48	41,42	37,76	35,59	33,40
Total ANO							

Na Figura 53 são apresentados dados que permitem comparar os resultados para os 4 casos estudados, tanto com o caso real quanto com o Nível A, B e C anteriormente calculados. Nele se pode avaliar que as modificações propostas no Caso 1, Caso 2 e Caso 3, proporcionariam uma redução no consumo de 1,45%, 7,10% e 12,26% respectivamente, em relação ao Caso Real. A economia gerada para os casos 2 e 3 é maior do que a prevista para o limite superior para atingir o Nível A, que seria de 3,96%. O investimento a ser realizado nessas alterações propostas devem ser quantificados para que

sejam calculados o seu tempo de retorno a partir da economia nos custos de energia. A alteração sugerida no Caso 1 obteve impacto positivo nos resultados, porém a edificação ficou ainda classificada com etiqueta ENCE nível B apesar da redução do consumo de energia.

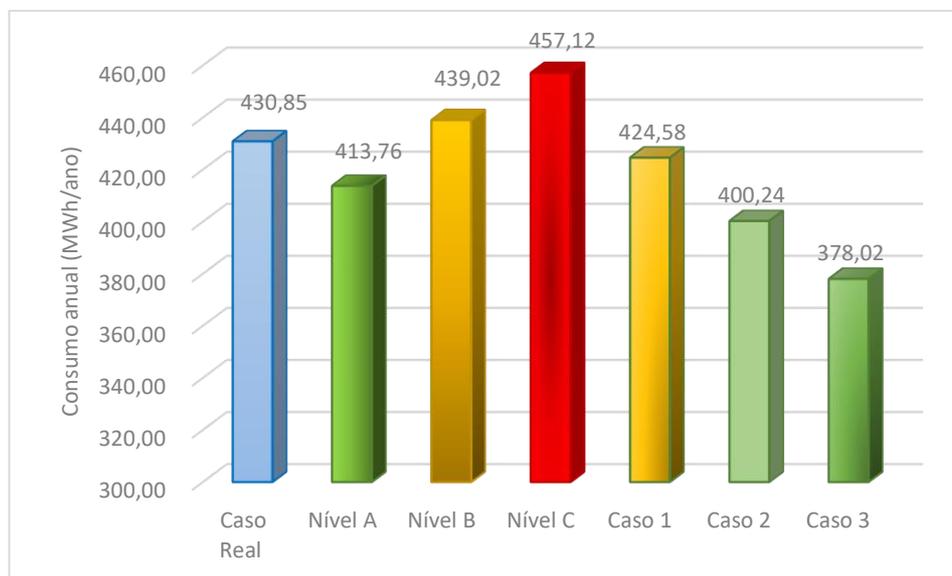


Figura 53- Comparativo do consumo de energia de todos os casos estudados

Mesmo o campus Caicó sendo de uma tipologia mais recente, onde os conceitos da arquitetura bioclimática estão mais difundidos, o potencial de melhoria nestas edificações que podem gerar economia de energia ainda é substancial. No Caso 1, hipótese de alteração na fase de projeto, a simulação obteve uma economia de 1,45%, que seria a menor das economias dentre os casos simulados.

Com relação a contribuição que a adoção da etiqueta de eficiência energética tem na mitigação das emissões e GEE, é feito um comparativo das emissões anuais de cada caso simulado, como mostrado na Figura 54. O cálculo das emissões de GEE foi realizado considerando o consumo simulado de energia elétrica mês a mês (Tabela 25) e o seu respectivo fator de emissão determinado pelo SIN, no ano de 2018.. Estes resultados estão na Tabela 26.

Tabela 26- Cálculo das emissões de CO2 mês a mês para os casos simulados do Campus Caicó

	SIN 2018	Caso Real	Nível A	Nível B	Nível C	Caso 1	Caso 2	Caso 3
	tCO _{2e} /MWh	t CO _{2e}						
Janeiro	0,06	0,92	0,89	0,94	1,00	0,91	0,84	0,80
Fevereiro	0,06	2,23	2,14	2,28	2,38	2,19	2,06	1,94
Março	0,06	2,65	2,54	2,69	2,80	2,61	2,46	2,32
Abril	0,05	1,88	1,80	1,91	1,98	1,86	1,75	1,66
Mai	0,06	2,50	2,40	2,54	2,62	2,47	2,33	2,21
Junho	0,09	3,57	3,45	3,63	3,75	3,54	3,35	3,19
Julho	0,11	2,52	2,45	2,58	2,68	2,50	2,37	2,25
Agosto	0,12	4,89	4,70	4,97	5,16	4,82	4,56	4,31
Setembro	0,12	4,50	4,31	4,58	4,77	4,43	4,18	3,94
Outubro	0,08	3,22	3,08	3,29	3,43	3,16	2,98	2,80
Novembro	0,04	1,47	1,41	1,51	1,58	1,44	1,36	1,28
Dezembro	0,03	1,32	1,27	1,35	1,42	1,30	1,22	1,15
Total ANO	0,074	31,68	30,44	32,27	33,57	31,24	29,46	27,85

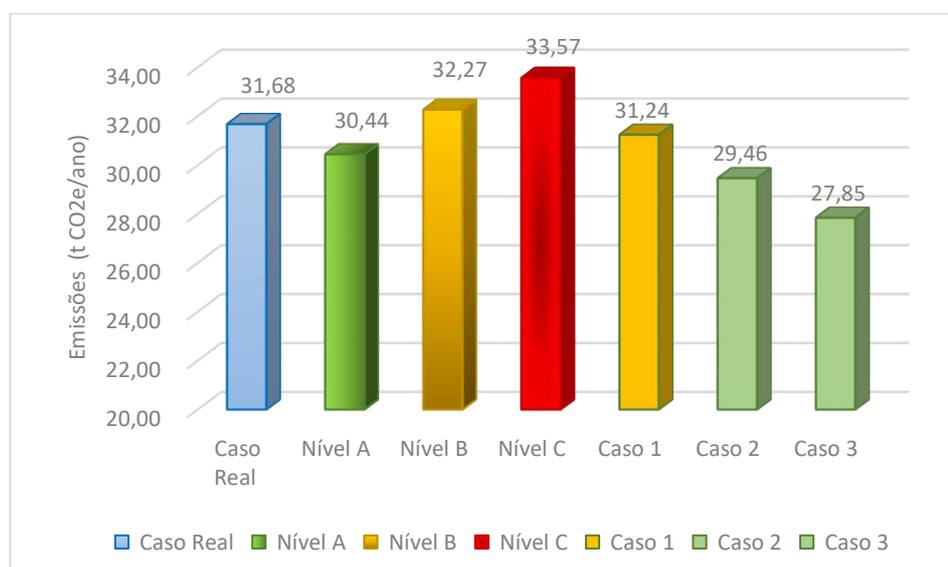


Figura 54- Comparativo de emissões de GEE para cada caso simulado do Campus Caicó

A análise dos resultados de redução de emissões de GEE advindos das intervenções propostas, permite concluir que as intervenções arquitetônicas propostas e simuladas, contribuem tanto para economizar recursos de custeio com gastos de energia quanto para mitigar as emissões de GEE. A hipótese da adoção das alterações propostas no Caso 3 representaria uma mitigação de cerca de 12 % nas emissões de GEE, gerando ainda uma

economia de aproximadamente R\$ 20.000,00 por ano, levando em consideração a média do custo de tarifa do ano de 2018. Dessa forma, estas iniciativas tem relevantes repercussões, pois atuam positivamente tanto no pilar econômico quanto o ambiental da sustentabilidade.

3.3.3. Análise das Emissões de GEE com a Bonificação pelo Uso de Fotovoltaicas no Campus CNAT e no Campus Caicó

Um outro cenário que precisa ser analisado é o impacto com relação às emissões de GEE para a situação da edificação ser bonificada por usar energia fotovoltaica. Para esta análise o procedimento adotado será o seguinte:

- a) Será considerado o consumo anual de energia de cada caso simulado;
- b) Para o cálculo das emissões de cada caso simulado serão consideradas duas situações:
 - i) situação 1: o cálculo das emissões anuais (t CO_{2eq}/ano) será obtido pela multiplicação do consumo anual (MWh/ano) pelo fator de emissão do SIN projetado para 2020 (t CO_{2eq}/MWh)
 - ii) situação 2: o cálculo das emissões anuais (t CO_{2eq}/ano) será obtido pela multiplicação do consumo anual (MWh/ano) pelo fator de emissão do SIN projetado para 2020 (t CO_{2eq}/MWh) e pelo fator de emissão da usina fotovoltaica (t CO_{2eq}/MWh). Será considerado o percentual de consumo que é atendido pelo SIN e o percentual que é atendido pelas usinas. O fator de emissão das usinas fotovoltaicas foi objeto de estudo e será detalhado no capítulo 4.

Para o Campus CNAT do IFRN, os resultados mostram que, comparando com o caso real, as emissões são reduzidas nas seguintes hipóteses: nível A, nível B, caso 1, caso 3, caso 4. Por outro lado, as emissões seriam maiores no nível C, no caso 2 e no caso (bonificado). A Figura 55 mostra os resultados de emissões anuais de GEE para cada caso estudado.

O Caso (bonificado) representa uma situação que requer uma atenção especial. Nessa hipótese, a edificação continua com o mesmo consumo de energia do caso real, porém, ele era etiquetado como ENCE Nível C, após a bonificação pelo fato de usar energia

fotovoltaica ele passou para o ENCE Nível B, sendo que 90% do seu consumo é fornecido pela concessionária e 10% pela usina fotovoltaica instalada no campus (ver Figura 6). Portanto, com relação a emissões de GEE, ocorre um sutil aumento de 1,35% das emissões, apesar da edificação ter tido um *upgrade* do Nível C para o Nível B. Isto ocorreu pois o fator de emissão de GEE da usina fotovoltaica, de acordo com o estudo de LCA que será apresentado no capítulo 4, é maior que o fator de emissão do SIN projetado para 2020. Se na edificação fosse feito um *retrofit* com as alterações propostas e simuladas pelo Caso 4, a redução das emissões de GEE seria de cerca de 7,65%, com equivalente redução no consumo de energia, gerando benefícios econômicos e ambientais.

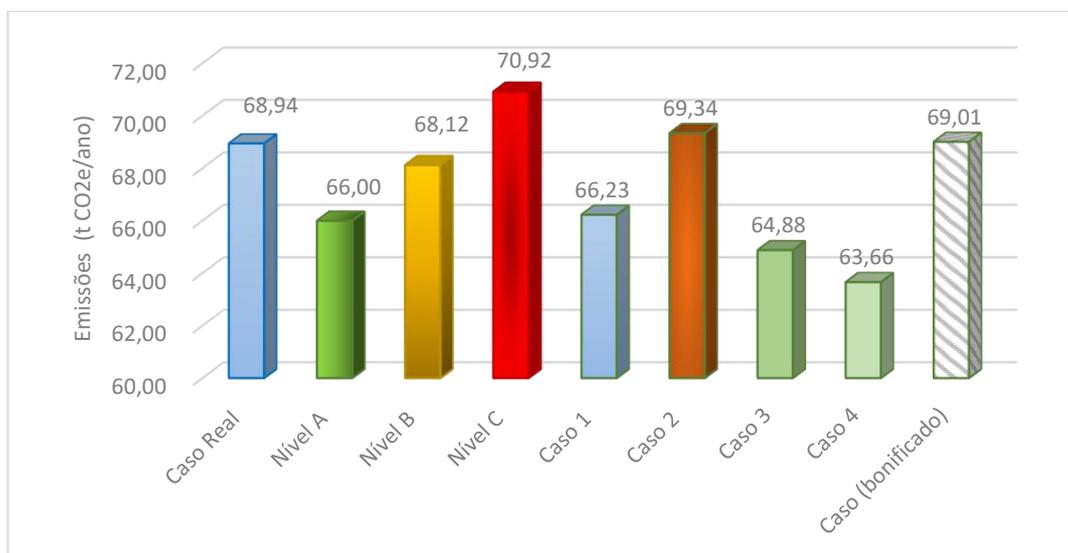


Figura 55- Comparativo de emissões de GEE dos casos simulados com o caso (bonificado) para o CNAT

Já para o Campus Caicó do IFRN, os resultados mostram que, comparando com o caso real, as emissões são reduzidas nas seguintes hipóteses: Nível A, caso 1, caso 2, caso (bonificado). Por outro lado, as emissões seriam maiores no nível C, no caso 3 e no Caso 4 (bonificado). Vale ressaltar, que as diferenças registradas entre o Caso Real e os Casos 3 e 4, estão dentro de uma oscilação inferior a 0,20%. A Figura 56 mostra os resultados de emissões anuais de GEE para cada caso estudado.

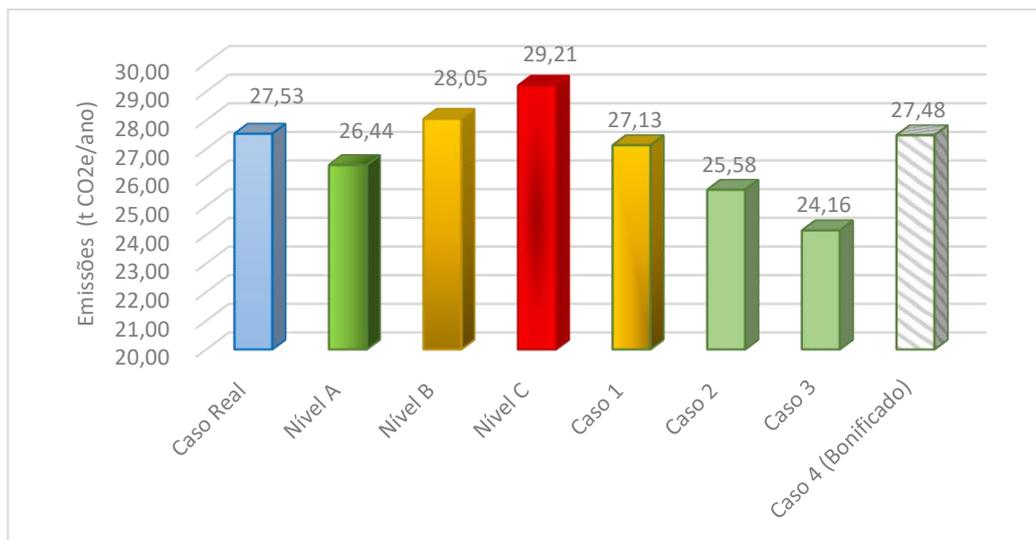


Figura 56- Comparativo das emissões de GEE de todos os casos simulados como o caso 4 (Bonificado) para o Campus Caicó

Para o Campus Caicó, as emissões para o Caso 4 (Bonificado) são menores em 0,18% que o Caso Real, uma variação muito pequena. Nessa hipótese, a edificação continua com o mesmo consumo de energia do Caso Real, porém, ele era etiquetado como ENCE Nível B, após a bonificação pelo fato de usar energia fotovoltaica ele passou para o ENCE Nível A, sendo que 58% do seu consumo é fornecido pela concessionária e 42% pela usina fotovoltaica instalada no campus (ver Figura 6). Portanto, com relação a emissões de GEE, o ganho efetivo na redução foi mínimo, apesar da edificação ter tido um *upgrade* do Nível B para o Nível A. Isto ocorreu pois o fator de emissão de GEE da usina fotovoltaica, de acordo com o estudo de LCA que será apresentado no capítulo 4, é ligeiramente inferior ao fator de emissão do SIN projetado para 2020. Se na edificação fosse feito um *retrofit* com as alterações propostas e simuladas pelo Caso 2, a redução das emissões de GEE seria de cerca de 7,08%, com equivalente redução no consumo de energia, gerando benefícios econômicos e ambientais.

4. GD a Partir de Usinas Solares Fotovoltaicas e Seus Aportes às Emissões de GEE – Avaliação do Projeto IFRN Solar.

4.1. Introdução

Na primeira metade do século XX, as condicionantes tecnológicas limitavam a capacidade das redes de transmissão em se expandir em termos de potência e área de abrangência. Dessa forma, a geração local mostrou ser a tecnologia indicada para atender à indústria, domicílios, comércio e à agricultura. Os avanços tecnológicos incorporados aos transformadores e linhas de transmissão, bem como os níveis de rendimento nos processos de conversão de energia foram otimizados. Assim, a produção centralizada por meio de grandes centrais geradoras se tornou a tecnologia dominante em relação à Geração Distribuída (GD), e está fortemente pautada nos ganhos de escala possíveis de serem auferidos.

A GD assume então a função de atendimento aos locais mais isolados, onde os custos de serem alimentados pelas redes centralizadas eram elevados. Porém este cenário se altera a partir dos anos 70, onde se registra a crescente participação da co-geração, e em alguns casos remotos, a produção de energia a partir de distintas fontes no próprio local, se caracterizando com GD. A partir dos anos 90, a competição no serviço de energia elétrica fomentou que novas tecnologias renováveis alcançassem custos competitivos. Com isso novos equipamentos foram incorporados e a GD teve sua atratividade incrementada.

Uma das principais ações visando promover a GD tem sido no uso das Fontes Renováveis para Geração de Energia Elétrica. Isto ocorreu inicialmente na década de 70, motivados pelos choques do Petróleo e aceleraram o ritmo na década de 90, quando alguns países passaram a discutir as questões ambientais e a mudança climática com maior engajamento, o que fomentou a introdução comercial dessas fontes no mercado de forma competitiva (COSTA, 2006).

No Brasil, alguns programas de incentivo às fontes renováveis foram criados. Em 2002, foi lançado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), que buscava a diversificação a matriz energética brasileira e aumentar a segurança do abastecimento interno, além de estimular a uma maior participação da energia elétrica a partir das fontes eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH) no Sistema Interligado Nacional (SIN) (BRASIL, 2002). O PROINFA foi uma importante iniciativa abrindo caminho para os leilões específicos (COSTA, 2006). Em

2004, os leilões¹⁸ são implantados na reformulação do modelo de comercialização de energia elétrica no setor elétrico brasileiro (BRASIL, 2004).

A mini e microgeração ganharam espaço de interesse quando da Resolução Normativa (RN) nº 482/2012 publicada pela ANEEL, e posteriormente atualizada pela Resolução Normativa 687/2015, estabelecendo, dentre outras providências, as condições para o ingresso das pequenas centrais geradoras e o sistema de compensação de crédito (ANEEL, 2012, 2015).

Com a atualização da RN nº 482/2012 pela RN 687/2015, ficou estabelecido que a classificação de microgeração distribuída de energia elétrica refere-se a uma central geradora conectada à rede de distribuição, cuja potência instalada é de até 75 kW e que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis. Enquanto isso, a minigeração distribuída diz respeito a centrais geradoras de potência instaladas de 75 kW até potência menor ou igual a 3 MW, para fontes hídricas, ou menor que 5 MW para cogeração qualificada, conforme regulamentado pela ANEEL, ou para as demais fontes renováveis, conectadas na rede de distribuição por instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012, 2015).

Impulsionado pela REN 482/12 registra-se que o número de conexões de micro e mini geradores no Brasil cresceu aproximadamente 31 vezes entre 2014 e 2016, saindo de 284 para 8.474 conexões. Segundo a ANEEL este resultado confirma o início de um progressivo processo de difusão de micro e mini geradores distribuídos, intensificado a partir de 2016 (ANEEL, 2017). Em 2018 com o acréscimo de mais 26.876 novas ligações se alcançou um total acumulado de 49.010 conexões de GD no Brasil (ANEEL, 2019). As projeções para o ano de 2026 são de 770.000 conexões (EPE, 2017). Este crescimento é fruto das políticas que foram implementadas e estão sendo ajustadas ao longo do tempo, podendo ser vistos na Figura 57 onde são apresentados os valores acumulados de conexões de GD acumuladas até o ano de 2018.

¹⁸ Os leilões no Brasil foram um exitoso instrumento criado com o marco regulatório do novo setor elétrico nacional, definido pela Lei nº 10.848/2004, que determinou as diretrizes para que a expansão do sistema interligado Nacional (SIN) e para a comercialização da energia elétrica para os consumidores neste ambiente regulado (SILVA, Neilton Felis Da, 2015).

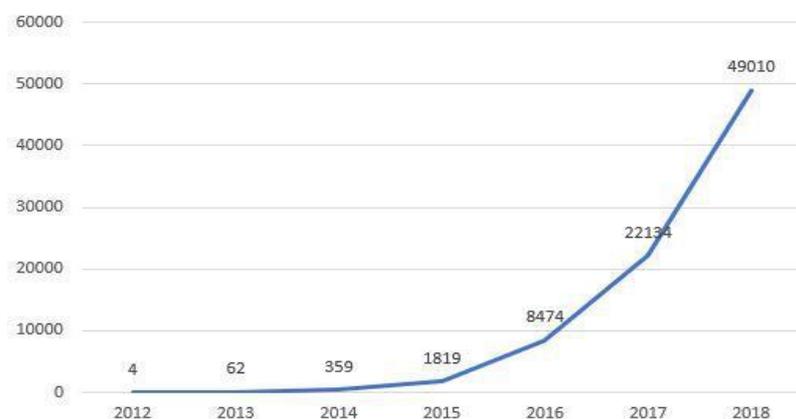


Figura 57- Número de conexões acumuladas de GD
Fonte: (ANEEL, 2019)

No início de 2019, a fonte mais utilizada pelos consumidores-geradores foi a solar com 71.935 de um total de 72.227 de usinas instaladas, o que representou 99,5% da quantidade total instalada e cerca de 85% da potência total instalada de 873.424,49 kW (ANEEL, 2019). Este domínio da energia solar dentre as renováveis na geração distribuída pode ser creditado a flexibilidade quanto aos tipos de instalação, a política de compensação, que possibilitou que a rede de distribuição funcionasse como um “acumulador para o excedente gerado”, e aos custos decrescentes da tecnologia (SAUAIA, 2018). Outros fatores que têm contribuído para essa expansão são a contínua elevação das tarifas de energia elétrica, o desejo do consumidor em ser um agente ativo deste mercado, acrescentando a relativa independência ao grid, além da motivação ambiental de redução da emissão dos GEE.

4.2. Energia Solar

Dentre as fontes renováveis, a radiação solar direta é considerada em vários lugares do mundo como uma das melhores prospecções de fontes de energia. Os projetos ativos e passivos são os melhores caminhos para converter a radiação solar em eletricidade. Os projetos passivos utilizam a radiação solar para diminuir a necessidade de luz artificial ou de aquecimento no caso de regiões mais frias (BAÑOS e colab., 2011; CHARRON e ATHIENITIS, 2006). Já os projetos ativos fazem uso de painéis solares convertendo radiação solar em aquecimento de água ou utilizando células fotovoltaicas que convertem a radiação solar em energia elétrica.

Com relação aos custos dos sistemas fotovoltaicos nota-se uma queda vertiginosa, até final da década de 2000, os valores para sistemas isolados da rede mostravam-se

antieconômicos e não competitivos na comparação com as outras fontes (IEA, 2006). Já ao final desta mesma década esses custos iniciam um processo de queda onde se registra entre 2010 a 2015 uma redução de cerca de 75%, segundo o IRENA (IRENA, 2016). Em 2015 o custo no Brasil dos sistemas fotovoltaicos era em média R\$ 8,81/Wp caindo em 2018 para R\$ 6,52/Wp, uma redução de 26% (SAUAIA, 2018).

Estudos realizados pela EPE (2016b) apontam que a energia solar fotovoltaica tende a alcançar a paridade tarifária no Brasil, entre o início e o fim da década de 2020.

A alternativa dos sistemas interligados ao Grid de poderem utilizar a rede como substitutos das baterias, a partir da compensação da energia gerada, funciona como um incentivador para a implantação de novas instalações de GD.

Nesse capítulo aborda-se a geração de energia elétrica a partir da radiação solar (projetos ativos), associando suas análises ao estudo da eficiência energética em edificações (projetos passivos), como discutido no capítulo 3. A utilização de usinas de energia solar já instaladas, fazendo uso de seus registros reais acessados, incorpora um caráter prático e diferencial para essa pesquisa.

Os processos de fabricação dos sistemas fotovoltaicos incluem principalmente a mineração do silício, purificação de silício de grau metalúrgico (silício-MG), silício eletrônico (EG-silício) ou produção de silício de grau solar (SoG-silício), a cristalização do Mono-Si ou Multi-Si, o corte dos tabletes, a produção de células e painel ou laminados e a montagem (PENG e colab., 2013). Um resumo contendo várias etapas do processo de fabricação dos módulos baseados em silício é apresentado na Figura 58 onde a partir desta visualização será possível um melhor entendimento das fronteiras de estudo que os diversos autores utilizam.

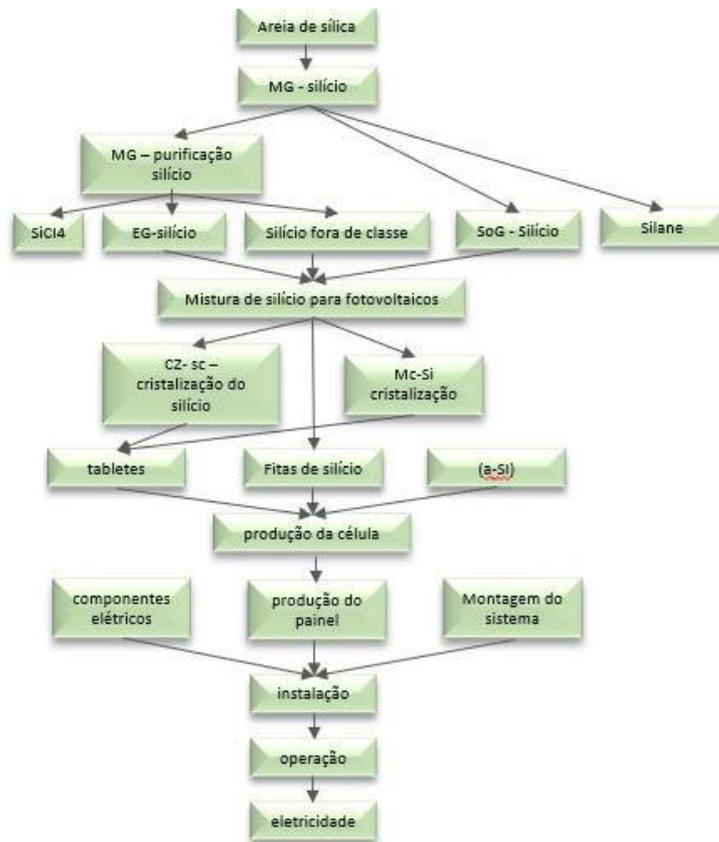


Figura 58- Processo de fabricação de módulos fotovoltaicos a base de silício
 Fonte: Adaptado de (PENG e colab., 2013, p. 258)

Os sistemas de FV solar podem ser projetados com módulos de mono/poli silício cristalino ou ainda através do uso de filmes finos de células fotovoltaicas, ou ainda, alguma outra tecnologia superior que tenham eficiência melhor (MARIMUTHU e KIRUBAKARAN, 2013). Duas principais categorias de tecnologias são definidas a partir do tipo de semiconductor utilizado: o silício cristalino em forma de tabletes ou os filmes finos de outros materiais. A Figura 59 apresenta as possíveis tecnologias que são utilizadas nos sistemas fotovoltaicos.

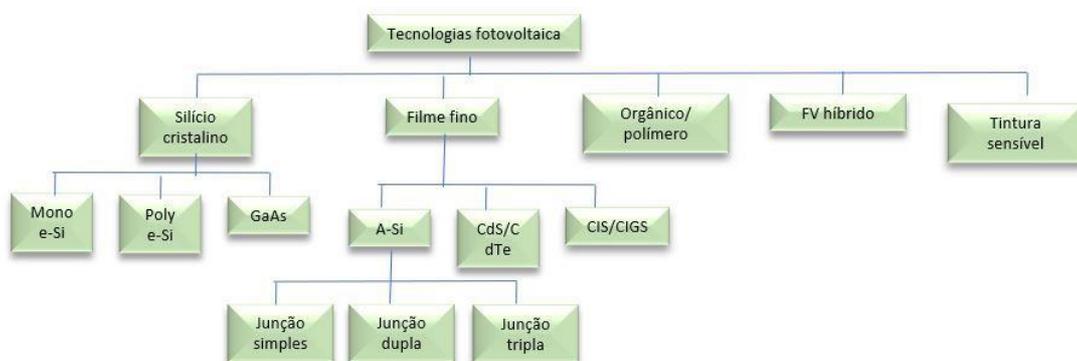


Figura 59- Árvore com as famílias das tecnologias FV
 Fonte: Adaptado de (AKINYELE e colab., 2015)

A tecnologia de células a base de silício lidera o mercado de painéis solares, com mais de 80% do mercado, pois seu preço é constantemente reduzido com o avançar das pesquisas. A eficiência do mono-silício fica entre 14% e 20%, enquanto que do multi-silício fica em torno de 13%. Os filmes finos, como por exemplo o silício amorfo tem sua eficiência em torno de 7,5 % (AKINYELE e colab., 2015; VLLALVA, M. G.; GAZOLI, 2012). A Tabela 27 apresenta um resumo da eficiência de vários tipos de módulos fotovoltaicos.

Tabela 27- Comparação da eficiência das diversas tecnologias de células fotovoltaicas

Material da célula fotovoltaica	Eficiência da célula em laboratório	Eficiência da célula comercial	Eficiência dos módulos fotovoltaicos
Silício monocristalino	24,7%	18%	14%
Silício policristalino	19,8%	15%	13%
Silício cristalino de filme	19,2%	9,5%	7,9%
Silício amorfo	13%	10,5%	7,5%
Silício microamorfo	12%	10,7%	9,1%
Célula solar híbrida	20,1%	17,3%	15,2%
CIS, CIGS	18,8%	14%	10%
Telureto de cádmio	16,4%	10%	9%

Fonte: Adaptado de (VLLALVA, M. G.; GAZOLI, 2012)

Os projetos de sistemas de painéis fotovoltaicos devem considerar muitos fatores quando se seleciona um local apropriado para montagem dos módulos. A escolha do tipo de sistema de montagem depende dos seguintes fatores: orientação da edificação, sombreamento do local, considerações climáticas, material do telhado, a capacidade de suportar carga do solo ou do telhado e as aplicações do sistema. Na figura 60 é possível observar os seguintes tipos de montagens dos sistemas: FV integrado a fachada do edifício, em telhados, em estrutura montada no solo e montados em postes. Neste trabalho foram estudados sistemas utilizando três tipos montagem (telhado, solo e telhado de estacionamento).

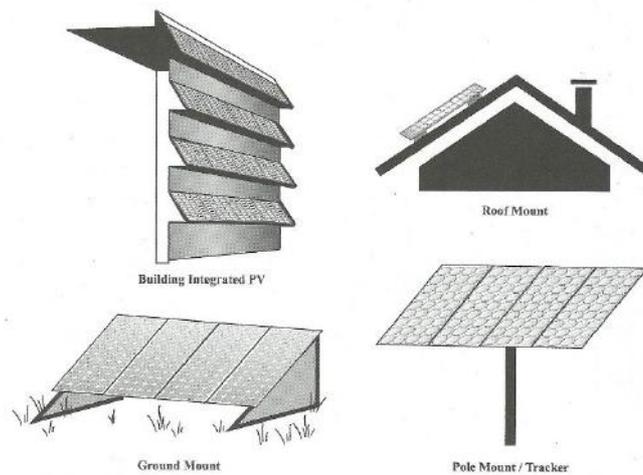


Figura 60- Estratégias de montagem dos sistemas
 Fonte: (INTERNATIONAL, 2009)

Existem muitas variáveis que interferem na geração de eletricidade em cada tipo de projeto dos sistemas fotovoltaicos. Desde o tipo de material que é fabricado o módulo e da tecnologia empregada, as características climáticas do local de instalação, o tipo de montagem do sistema dentre outros. Para uma análise completa dos possíveis impactos ao meio ambiente advindos da utilização de sistemas FV é necessário que todas estas possibilidades de configuração sejam analisadas.

Atualmente, o método de Avaliação de Ciclo de Vida (*Life Cycle Assessment - LCA*) tem sido amplamente utilizado para avaliar e comparar os benefícios energéticos e o desempenho ambiental de diferentes tecnologias energéticas, como fotovoltaica, eólica, nuclear (PENG e colab., 2013).

4.3. Ciclo de Vida das Usinas Solares

O ciclo de vida de um produto ou processo é definido desde suas primeiras interações com o meio-ambiente, tais como as obtenções das matérias primas e seus processamentos básicos até o descarte final do produto (ISO, 1997).

A LCA é uma ferramenta que contempla o impacto ambiental decorrente de todas as entradas e saídas de um produto ou processo *from cradle to grave* (FTHENAKIS, V.M. e KIM, 2011; MANN e colab., 2014).

A estrutura de avaliação do ciclo de vida dos sistemas dos FV pode ser visualizado na Figura 61.

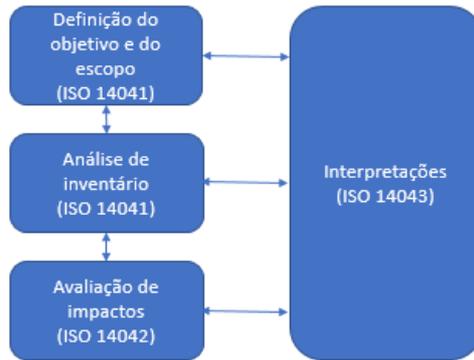


Figura 61- Estrutura do ciclo de vida dos sistemas FV
 Fonte: (VARUN e colab., 2009)

Os estudos de Ciclo de vida são geralmente conduzidos para avaliar a performance ambiental dos sistemas FV. Dois indicadores que são largamente utilizados: Tempo de retorno de energia (*Energy Payback Time – EPBT*) e taxa de emissões (*Green House Gases Emission rate - GHG_{e-rate}*). Estes estudos geralmente têm quatro estágios: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação dos impactos e interpretação (PENG e colab., 2013).

A equação utilizada para calcular o EPBT de determinado sistema fotovoltaico é a seguinte (PENG e colab., 2013; YUE e colab., 2014):

$$EPBT = \frac{CED}{E_{agen}/n_g}$$

Equação 4- Cálculo do EPBT

Onde:

$$CED = E_{input} + E_{BOS}.$$

CED (cumulative energy demand) é a soma de E_{input} : energia primária que entra durante o ciclo de vida (MJp) com o E_{BOS} : energia requerida pelo *Balance of System* (BOS) (MJp);

E_{agen} : geração anual de eletricidade pelo sistema FV (MJ) e n_g é a taxa média de conversão da energia primária em eletricidade do grid do país onde é instalado o painel. A E_{input} inclui a energia requerida na fabricação dos módulos, transporte, instalação, operação e manutenção, e o descomissionamento ou reciclagem do módulo.

A E_{BOS} é a energia requerida para os componentes do BOS, que incluem estrutura de suporte, cabeamento, componentes eletrônicos e elétricos, inversores e baterias para os sistemas padrão isolado.

O outro indicador avaliado é a taxa de emissão de GHG dada pela seguinte equação (PENG e colab., 2013):

$$GHG_{e-rate} = \frac{GHG_{e-total}}{EE_{LCA-output}}$$

Equação 5- Cálculo da taxa de emissão de GHG

Onde:

GHG_{e-rate} : é a taxa de emissão de GHG por unidade de eletricidade gerada pelo sistema FV (g CO_{2-eq}/kWh);

$GHG_{e-total}$: é o total de das emissões de GHG durante o ciclo de vida (g CO_{2-eq});

$EE_{LCA-output}$: é o total de eletricidade gerada pelo sistema FV durante o ciclo de vida (kWh).

Um grande número de fatores interfere nas análises de ciclo de vida, tais como o tipo de módulo, a sua eficiência, a tecnologia de fabricação, local de instalação (fachada, telhado ou no solo), o padrão de montagem, estrutura de suporte da matriz, com moldura ou sem moldura, tipo de conexão (grid ou isolado) e sua taxa de performance incluindo todas as perdas (NIEUWLAAR e ALSEMA, 1997; PENG e colab., 2013). Para uma análise completa sobre a quantidade e qualidade da energia gerada, os possíveis impactos ambientais e as contribuições para às emissões de GHG provocado pelos sistemas FV são necessários que todas estas possibilidades de configuração sejam conhecidas e analisadas. Ressalta-se que a maior exatidão dos resultados do LCA depende significativamente das informações precisas dos dados de consumo de energia.

4.3.1. Inventário de Material e Energia dos Sistemas Fotovoltaicos

Ao longo do tempo, vários estudos têm sido desenvolvidos para avaliar o consumo de energia e as emissões de GHG decorrentes da fabricação dos sistemas FV. Em 1995, PHYLIPSEN e ALSEMA (1995) desenvolveram um estudo da avaliação ambiental dos módulos Multi-Si. Os resultados encontrados da energia necessária para fabricação foi de 970 kWh_t/m² referente as células e 175 kWh_t/m² gastos com a armação dos FV, totalizando 1.145 kWh_t/m².

ALSEMA e colab. (1998), em 1998, analisando estudos anteriores com relação ao conteúdo energético, buscando uma estimativa mais aproximada da realidade, fez uma investigação avaliando a energia incorporada em módulos de Mono-Si e Multi-Si. O estudo concluiu que a energia necessária para a preparação da matéria prima de silício é a principal incerteza nestas análises. As estimativas eram maiores ou menores a depender do método de preparação utilizado para matéria-prima do silício. Projetando-se que as

novas formas de purificação do silício tenham avanços tecnológicos no futuro, as estimativas baixas terão maior representatividade. De acordo com ALSEMA (2000), nas considerações de baixa estimativa, a energia requerida para módulos Mono-Si são 6000 MJ/m² e para os de Multi-Si são 4200 MJ/m². Os valores da energia requerida em estudos anteriores variavam de 5300 a 16500 MJ/m² para mono-Si e 2400 a 7600 para multi-Si.

Entre 1990 e 2010 observou-se o aumento da produção de células fotovoltaicas juntamente com a evolução tecnológica no seu processo produtivo, que se reflete em uma menor quantidade de energia embutida. Os principais fatores que contribuíram para esta redução foram: a melhoria da eficiência do uso do silício com a redução da espessura da bolacha e menores perda de silício no processo de *wafering*; substituição do padrão mais complexo de purificação do silício no nível eletrônico pelo processo específico de purificação para a indústria fotovoltaica, o que torna menor a necessidade os energia para atingir uma menor pureza; e reciclagem e reutilização do material de silício (PENG e colab., 2013).

Em 2005, BATTISTI e CORRADO (2005) encontraram o valor de 5150 MJ/m², em um estudo desenvolvido na Austrália. ALSEMA, Erik A e DE WILD-SCHOLTEN (2006) calcularam em 3940 MJ/m² a energia embutida no sistema FV, ressaltando que cerca de 72% da energia é consumida no processo de fabricação dos tabletes. Em 2007, PACCA e colab. (2007) estimaram em 1075 MJ/m² a energia envolvida no SI feedstock e 3247 MJ/m² no *wafers process*, totalizando 4322 MJ/m². Também em 2007, ALSEMA, E A e WILD-SCHOLTEN (2007) consolidando a energia requerida em todo processo de fabricação, estimaram em 3120 MJ/m². No ano de 2009, WILD-SCHOLTEN, Mariska (2009) encontrou o valor total de 2699 MJ/m².

Em 2014, YUE e colab. (2014) desenvolveram um estudo de ciclo de vida que comparou e analisou os resultados de painéis fabricados na China e na Europa e instalados na Europa. Evidenciando em seus resultados que a conteúdo energético dos painéis fabricados na China, que apresenta uma matriz elétrica com uma eficiência elétrica menor que a da Europa, foi 48% maior para o caso de Multi-Si do que quando fabricado na Europa. O valor de energia primária embutida na fabricação dos painéis na China foi de 4455 MJ/m² enquanto na Europa foi 3010 MJ/m². Um resumo detalhado dos valores referentes a energia total envolvida no processo de fabricação dos sistemas FV, a partir de 2005 é apresentado na Tabela 28.

Tabela 28- Energia requerida para fabricação de módulos fotovoltaicos de Multi-Si

Autores	Anos	SI matéria prima (MJ _p /m ²)	Fundição, corte, processo de tablete (MJ _p /m ²)	Processo de produção da célula (MJ _p /m ²)	Montagem do módulo (MJ _p /m ²)	Moldura (MJ _p /m ²)	Outros (MJ _p /m ²)	Total (MJ _p /m ²)
(BATTISTI e CORRADO, 2005)	2005	3904	535	115	556	-	40	5150
(ALSEMA, Erik e DE WILD, 2005)	2005	1759	1078	473	276	236	118	3940
(PACCA e colab., 2007)	2007	1075	0	3247	0	-	0	4322
(ALSEMA, E A e WILD- SCHOLTEN, 2007)	2007	1400	550	400	500	270	0	3120
(WILD-SCHOLTEN, Mariska, 2009)	2009	1110	744	378	467	Frameles s	0	2699
(YUE e colab., 2014)	2014							3010

Como os trabalhos realizados antes de 2005 não contemplavam um processo dedicado de purificação de silício para fabricação de matéria-prima de silício para a indústria fotovoltaica, e ainda pelo fato de diferentes casos de alocação de energia na produção dos tabletes de silício provocarem uma grande diferença na demanda de energia requerida, os estudos anteriores a 2005 não fazem parte das simulações presentes nesta pesquisa.

Em uma extensa revisão da literatura realizada por PENG e colab. (2013), consolidando uma série de estudos anteriores o autor encontrou os seguintes intervalos para o valor da energia requerida para fabricação dos diferentes tipos de sistemas fotovoltaico: Mono-Si (2860 a 5253 MJ/m²); Multi-Si (2699 a 5150 MJ/m²); a-Si (710 a 1990 MJ/m²); CdTe (790 a 1803 MJ/m²) e CIS (1069 a 1684 MJ/m²). Dessa forma, ficou demonstrado que a energia requisitada no ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos de película fina é muito menor do que os sistemas fotovoltaicos de silício cristalino. Ademais, mesmo com os módulos de Mono-silício possuindo maiores fatores de eficiência quando comparados com os módulos de Multi-Si, eles têm uma grande desvantagem em relação ao de Multi-Si, pois são intensivos em energia no processo de cristalização.

Para esta pesquisa foi utilizada a média¹⁹ dos valores de energia requerida coletados na literatura no período de 2005 a 2014, para Multi-Si, que tende a refletir a evolução tecnológica no processo de fabricação dos painéis, o que resultaria em valores mais aproximados da energia demandada nestes sistemas FV. O valor encontrado de energia primária requerida para fabricação dos sistemas FV foi de 3418,20 MJ_p/m², que levando em consideração o valor médio de eficiência elétrica do grid dos países pesquisados, resultou em um consumo estimado de eletricidade de 310,17 kWh/m².

¹⁹ As fontes dos valores utilizados para o cálculo da média: 3940 (ALSEMA, Erik e DE WILD, 2005), 4322 (PACCA e colab., 2007), 3120 (ALSEMA, E A e WILD-SCHOLTEN, 2007), 2699 (WILD-SCHOLTEN, Mariska, 2009), 3010 (YUE e colab., 2014)

O valor do consumo de eletricidade encontrado se aproxima do resultado de um estudo realizado por MARIMUTHU e KIRUBAKARAN (2013) em uma usina solar na Índia, cujo valor obtido para o consumo de energia elétrica foi 277,11 kWh/m². Neste mesmo estudo foram desconsiderados o transporte, a mineração do material para o Si e o processo de reciclagem.

Além da energia embutida nos módulos FV, deve ser considerada a parcela de energia concentrada nos demais componentes, os chamados componentes do *Balance of System* (BOS). Estão incluídos no BOS: os inversores, controladores, caixa de junção, cabeamento, estrutura de suporte, etc. Diferentes estudos realizaram levantamento da energia BOS para diferentes situações de instalação: ALSEMA, E A e colab. (1998), FRANKL e colab. (1997), PACCA e colab. (2007), ALSEMA, E A e WILD-SCHOLTEN, 2007; ALSEMA, Erik e DE WILD, 2005) e ALSEMA, E.A e NIEUWLAAR (2000). A Tabela 29 apresenta a energia requerida nos diversos itens que compõem o BOS a partir dos resultados de vários estudos anteriores.

Tabela 29- Energia requerida dos componentes do BOS

Autores	Ano	Suporte da matriz e cabeamento (MJ _p /m ²)	inversor (MJ _p /kW _p)	Transporte (MJ _p /m ²)	instalação (MJ _p /m ²)	Tipo de montagem
(ALSEMA, E A e colab., 1998)	1997	1800 a	0,5			(solo)
(FRANKL e colab., 1997)	1998	1800				(solo)
(ALSEMA, E A e colab., 1998)	1997	500	0,5			(telhado)
(FRANKL e colab., 1997)	1998	600				(telhado)
(ALSEMA, E.A e NIEUWLAAR, 2000)	2000	500 b				(telhado)
(ALSEMA, Erik e DE WILD, 2005)	2005		1930			
(ALSEMA, E A e WILD-SCHOLTEN, 2007)	2007		1300			
(PACCA e colab., 2007)	2007		503	134	34	

a Este valor é projetado para o futuro; b Este valor é projetado para o ano de 2010.

Para converter os dados de energia primária térmica requerida para fabricação e instalação dos painéis em eletricidade, deve-se utilizar o índice de eficiência de geração de eletricidade. Nos EUA a eficiência foi determinada em 0,29 (FTHENAKIS, Vasilis e KIM, 2005) e 0,33(EIA, 2003) de acordo com as características dos combustíveis utilizados nas usinas. ALSEMA, Erik A e DE WILD-SCHOLTEN (2006) chegaram ao resultado de 0,31 como sendo o coeficiente global de conversão da rede elétrica no continente europeu ocidental. Já RAUGEI e colab. (2007) estimava em 0,32. Os painéis estudados neste artigo foram produzidos na China. Dessa forma, o índice de eficiência de geração de eletricidade utilizado neste trabalho foi de 0,22 para a China YUE e colab. (2014), 0,625 para o Brasil RUPP e LAMBERTS (2017), e 0,33 como a média dos demais países que tiveram dados de consumo de energia primária utilizados.

Para o cálculo das emissões relacionadas ao transporte do sistema fotovoltaico, foram utilizados dados referentes às usinas, as distâncias entre a usina e o local da instalação e os meios de transporte utilizados com suas respectivas taxas de emissão de CO₂. Em relação ao processo de reciclagem do sistema fotovoltaico, foram utilizados dados da literatura ALSEMA, Erik (1998) e os projetos das usinas. No entanto, decidiu-se apresentar os resultados do processo de transporte e reciclagem separadamente dos demais itens devido à baixa representatividade neste estudo de LCA das emissões geradas durante o processo de transporte e reciclagem em relação ao total de emissões (Transporte (0,81%), Reciclagem (0,72%)) e para facilitar a comparação dos resultados deste estudo com outros disponíveis na literatura, abrangendo tanto os estudos que incluem quanto aqueles que não incluem estes dois itens. Assim, as conclusões deste estudo são sólidas e podem ser utilizadas em outros países que apresentam uma elevada participação de fontes de energia renováveis, reduzindo possíveis distorções devido a diferentes localizações geográficas.

4.3.2. Inventário de Carbono

Durante sua operação a energia elétrica disponibilizada pelos módulos fotovoltaicos não registra emissão de GHG, por outro lado, considerando o ciclo de vida, é possível identificar emissões GHG, predominantemente no processo de fabricação das partes componentes do sistema. Sendo estas classificadas como emissões diretas - originadas do processo de fabricação dos componentes - e as emissões indiretas, provenientes da energia consumida associada ao respectivo fator de emissão da geração de eletricidade do país onde é produzido o sistema FV.

De acordo com MARIMUTHU e KIRUBAKARAN (2013) as emissões de CO₂ durante o processo de fabricação dos painéis é 57,19 kg CO₂/m². Sendo cerca de 87% destas emissões provenientes da produção do alumínio. Neste estudo foram utilizados módulos de 1,25 m² e foi desconsiderado o processo de mineração do Si. Também foram estimadas em 6,1 kg CO_{2-eq}/m² as emissões no *Array suport and cabling* e 125 kg CO_{2-eq}/kWp no inversor.

Quando se analisa o consumo de energia elétrica e as emissões de GHG relacionadas a sua respectiva geração, conforme anteriormente citado, vários fatores podem interferir nos resultados. Identifica-se uma incerteza com relação aos dados disponibilizados, além de diferentes pressupostos utilizados em cada estudo, o que provocam uma alta variação nos resultados encontrados. Tanto com relação ao consumo de energia em cada parte do

processo de fabricação, informação que depende dos fabricantes, como também, a informação do fator de emissão do local onde é fabricado o sistema, que depende da informação voluntária de cada país (ARDENTE e colab., 2005; PENG e colab., 2013).

Utilizou-se nesta tese os dados da literatura pesquisada sobre o tema como fonte de informação para o consumo de energia. Já o IPCC, o IEA e MCTIC são as fontes utilizadas com relação aos fatores de emissão da matriz elétrica de cada país. A Tabela 30 apresenta os fatores de emissão do país onde são fabricados os painéis em estudo e também os do Brasil, onde foram instalados os painéis.

Tabela 30 - Fatores de emissão dos países em g CO₂/kWh

Country	IPCC ²⁰	IEA ²¹	MCTIC ²²	Average
Brasil	87	88	87	87,33
China	1.049	772		910,50

4.4. Geração Solar Fotovoltaica em Edificações no Nordeste do Brasil.

Como já abordado no capítulo 1, com o projeto de expansão da Rede Federal de ensino em todo país, o IFRN, no rio Grande do Norte, registrou expansão por vários municípios do estado. Nesses locais, as emissões de GEE relacionadas a energia elétrica foram estudadas sobre duas vertentes: a redução do consumo de eletricidade originada pela adoção de práticas de eficiência energética nas edificações, como também pela geração de eletricidade a partir de usinas fotovoltaicas instaladas nas edificações. A redução de GEE pelas práticas de eficiência energética foram exploradas no capítulo anterior.

4.5. Potencial Solar Brasileiro

O Brasil, um país localizado na sua maior parte na região inter-tropical, possui grande potencial de energia solar durante todo ano. As áreas localizadas no NE do Brasil, têm valores da radiação solar média anual comparáveis às melhores regiões do mundo (PEREIRA, 2017; TIBA, 2000) .

²⁰ Os fatores de emissão pela metodologia do IPCC são do ano de 2003. O último dado disponível oficialmente pelo IPCC.

²¹ Os fatores de emissão do IEA são do ano de 2013.

²² O fator de emissão do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC) refere-se ao ano de 2016.

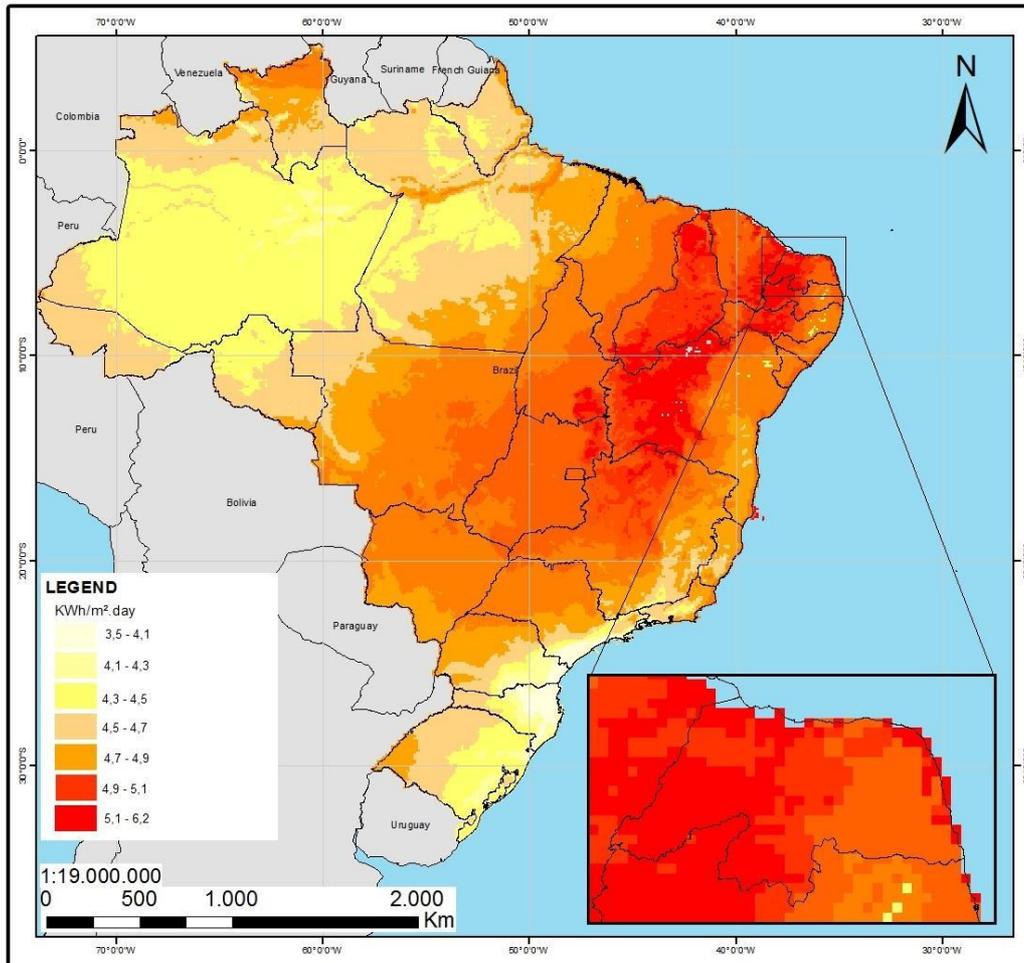


Figura 62- Média anual de radiação horizontal diária
 Fonte: (LABREN, 2018; PEREIRA, 2017)

Em uma análise comparativa com outros países, o Brasil apresenta um dos melhores índices de radiação solar global. A Tabela 31 apresenta os dados do Brasil, França, Alemanha e Espanha (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2014). Quando a análise foca os dados de irradiação em cada região geográfica brasileira, a região NE é a que apresenta o melhor potencial solar (Tabela 32) (PEREIRA, 2017).

Tabela 31- Irradiação solar diária e área por país

País	Média	Mínimo (kWh/m ² .dia)	Máximo	Área (mil.km ²)
Alemanha	2,95	2,47	3,42	357,02
França	3,49	2,47	4,52	543,97
Espanha	4,18	3,29	5,07	504,97
Brasil	5,50	4,25	6,75	8515,77

Tabela 32- Médias mensais dos totais diários de Irradiação global horizontal observada no Brasil

	N	NE	MW	SE	S	Média
(Wh/m ²)	4825	5483	5082	4951	4444	5153

4.6. Usinas Fotovoltaicas nas Unidades do IFRN

Em 2019, 21 usinas solares fotovoltaicas já estavam em funcionamento em 20 *campi* e na Reitoria do IFRN, totalizando 2,1 MWp instalado. Para este estudo, são utilizados os dados de 10 usinas em operação com período de funcionamento superior a 2 anos.

A Figura 63 mostra a localização geográfica do conjunto de UFV instaladas em diversos *campi* do IFRN, em diferentes cidades do estado do Rio Grande do Norte (RN), no NE do Brasil. Em destaque na cor laranja, as 10 UFV que fizeram parte da amostra deste estudo. O estado do RN tem uma área de 52.811 km², tamanho equivalente a países como a Dinamarca e a Bósnia

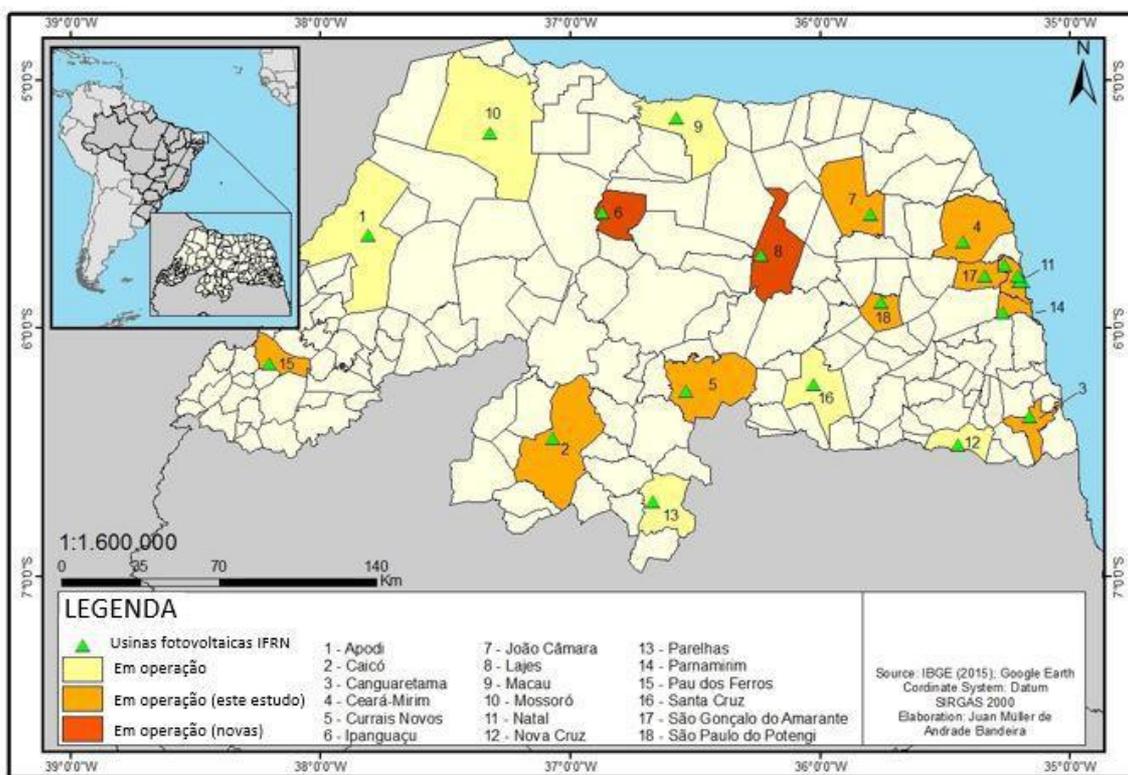


Figura 63- Mapa com distribuição geográfica das usinas
Fonte: (LABREN, 2018)

As UFV, objeto deste estudo, utilizam módulos à base de Multi-Si. Os painéis foram instalados no solo, em telhados e em estruturas metálicas no telhado de estacionamentos. Os fornecedores dos painéis Yingli Solar (Fornecedor 1) e Canadian Solar (Fornecedor 2), tiveram o processo de produção integralmente na China.

Essas usinas tem diferentes tipos de montagem (telhado, no solo, estacionamento), diferentes orientações e inclinação de instalação e diferentes fornecedores de equipamentos. As próximas 10 Tabelas apresentam a descrição das características

técnicas de instalação, de equipamentos utilizados, o tipo de instalação, a condição de orientação e inclinação nas quais as 10 usinas foram instaladas.

Unidade IFRN Reitoria (UFV01)

Tabela 33- Características técnicas UFV01

Cidade	Natal
Potência instalada (KWp)	56,4
Quantidade de módulos	240
Potência do módulo	235 Wp
Modelo do módulo	TBP156x156-60-P
Tipo de montagem	Telhado (<i>Rooftop</i>)
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	37%
Início da operação	30/12/2013

Na Figura 64 é apresentado a vista superior dos prédios onde está instalado o sistema fotovoltaico, identificando as mesas de módulos fotovoltaicos montados sobre o telhado que tem inclinação de 7°, orientação Norte e desvio azimutal de 24° (Nordeste).



Figura 64- Vista superior da instalação da usina na Reitoria

Unidade IFRN Ceará Mirim (UFV02)

Tabela 34- Características técnicas UFV02

Cidade	Ceará Mirim
Potência instalada (KWp)	112,80
Quantidade de módulos	480
Potência do módulo	235 Wp
Modelo do módulo	TBP156x156-60-P
Tipo de montagem	Telhado (Rooftop)
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	35%
Início da operação	24/03/2014

Na Figura 65 é apresentada a vista superior da área da instalação do sistema fotovoltaico, identificando as mesas de módulos fotovoltaicos montadas sobre o telhado que têm inclinação de 7°, orientação Norte e desvio azimutal de 8° (Nordeste).



Figura 65- Vista superior da instalação da usina em Ceará Mirim

Unidade IFRN São Paulo do Potengi (UFV03)

Tabela 35- Características técnicas UFV03

Cidade	São Paulo do Potengi
Potência instalada (KWp)	112,80
Quantidade de módulos	480
Potência do módulo	235 Wp
Modelo do módulo	TBP156x156-60-P
Tipo de montagem	Telhado (Rooftop)
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	38%
Início da operação	17/04/2014

A Figura 66 mostra a vista superior da área da instalação do sistema fotovoltaico, identificando as mesas de módulos fotovoltaicos montadas sobre 4 meia águas do telhado que têm inclinação de 7°, orientação Norte e desvio azimutal de 50° (Nordeste).



Figura 66- Vista superior da instalação da usina em São Paulo do Potengi

Unidade IFRN Canguaretama (UFV04)

Tabela 36- Características técnicas UFV04

Cidade	Canguaretama
Potência instalada (KWp)	112,80
Quantidade de módulos	480
Potência do módulo	235 Wp
Modelo do módulo	TBP156x156-60-P
Tipo de montagem	Solo (<i>Ground mounted</i>)
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	36%
Início da operação	03/02/2015

Na Figura 67 é apresentada a vista superior da área da instalação do sistema fotovoltaico, identificando as mesas/arranjos de módulos fotovoltaicos montadas sobre porção de terreno à esquerda do prédio principal com inclinação de 10°, definida pela estrutura de suporte em alumínio, orientação Norte e desvio azimutal de 24° (Noroeste).

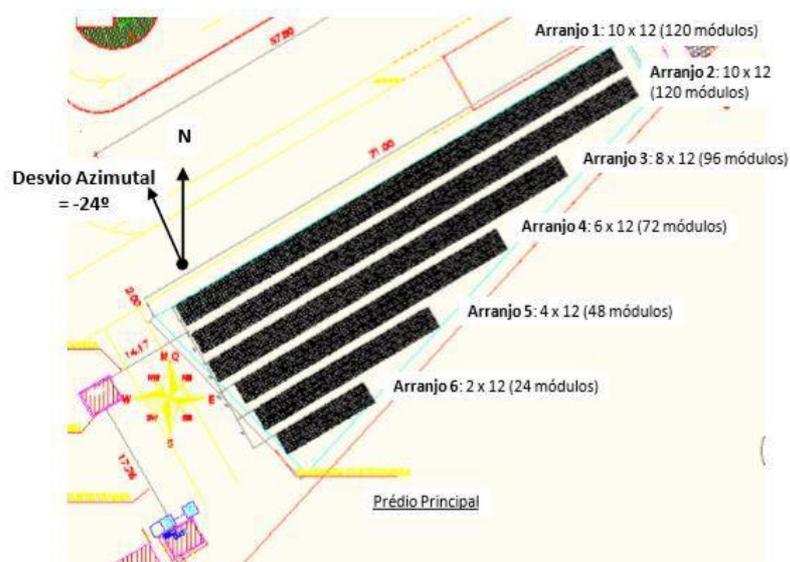


Figura 67- Vista superior da instalação da usina em Canguaretama

Unidade IFRN Currais Novos (UFV05)

Tabela 37- Características técnicas UFV05

Cidade	Currais Novos
Potência instalada (KW _p)	112,80
Quantidade de módulos	480
Potência do módulo	235 W _p
Modelo do módulo	TBP156x156-60-P
Tipo de montagem	Solo (<i>Ground mounted</i>)
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	28%
Início da operação	15/05/2015

Na Figura 68 é apresentada a vista superior da área da instalação do sistema fotovoltaico, identificando as mesas/arranjos de módulos fotovoltaicos montadas sobre a porção de terreno entre o campo de futebol e o tanque de peixes, com inclinação de 10° definida pela estrutura de suporte em alumínio e com orientação Norte.

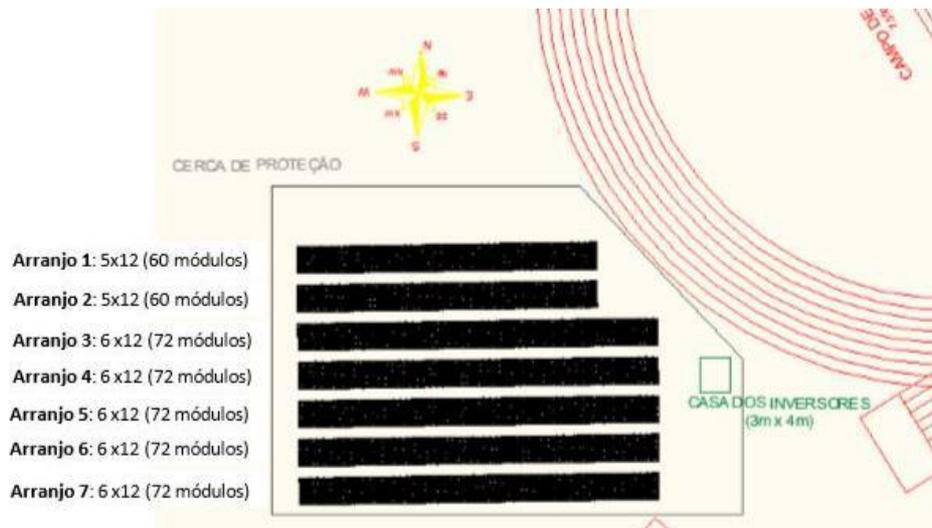


Figura 68- Vista superior da instalação da usina em Currais Novos

Unidade IFRN São Gonçalo do Amarante (UFV06)

Tabela 38- Características técnicas UFV06

Cidade	São Gonçalo do Amarante
Potência instalada (KWp)	56,35
Quantidade de módulos	230
Potência do módulo	245 Wp
Modelo do módulo	YL245P-29b
Tipo de montagem	Telhado de estacionamento
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	19%
Início da operação	17/11/2015

A Figura 69 mostra a vista superior da área da instalação do sistema fotovoltaico, identificando estrutura sob estacionamento montada sob solo com 7° de inclinação e orientada ao Norte com desvio azimutal de 0°.



Figura 69- Vista superior da instalação da usina em São Gonçalo do Amarante

Unidade IFRN Campus Natal Central (UFV07)

Tabela 39- Características técnicas UFV07

Cidade	Natal
Potência instalada (KWp)	197,32
Quantidade de módulos	480(a) + 345(b)
Potência do módulo	(a) 235 Wp (b) 245 Wp
Modelo do módulo	(a) TBP156x156-60-P
Tipo de montagem	Telhado (<i>Rooftop</i>)
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	10%
Início da operação	18/01/2016

A Figura 70 mostra as mesas de módulos fotovoltaicos montadas sobre 2 meias-águas do telhado que têm inclinação de 12°, um lado orientado ao noroeste com desvio azimutal de 70° e o outro lado orientado ao sudeste com desvio azimutal de 110°.

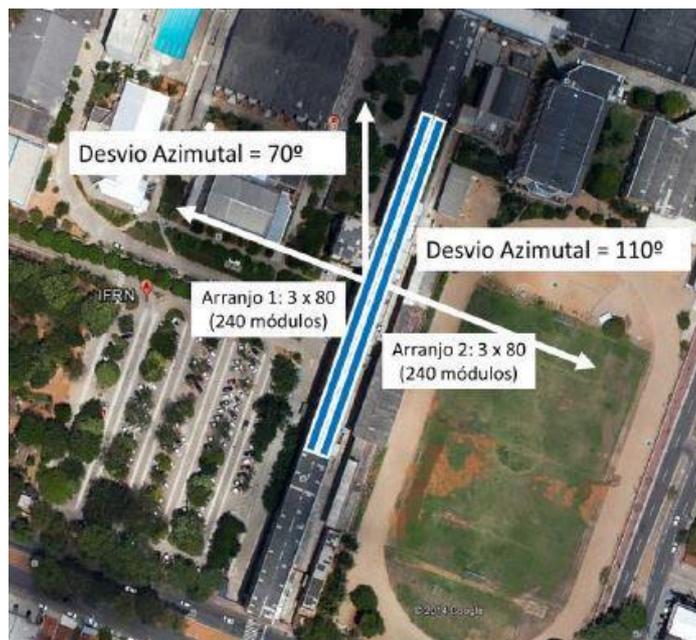


Figura 70- Vista superior da instalação da usina no CNAT

Unidade IFRN Pau dos Ferros (UFV08)

Tabela 40- Características técnicas UFV08

Cidade	Pau dos Ferros
Potência instalada (KWp)	114,0
Quantidade de módulos	440
Potência do módulo	260 Wp
Modelo do módulo	CS6P-260P
Tipo de montagem	Telhado (<i>Rooftop</i>)
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	38%
Início da operação	21/06/2016

A Figura 71 mostra a vista superior da área da instalação do sistema fotovoltaico no IFRN – CAMPUS PAU DOS FERROS, ilustrando a distribuição das mesas de módulos fotovoltaicos nos Blocos 1 e 2, e identificando as mesas de módulos fotovoltaicos montadas sobre telhado com inclinação de 5°. No Bloco 1 as mesas estarão orientadas para Noroeste com desvio azimutal de 23° e para Sudoeste com desvio azimutal de 157°, e no Bloco 2 as mesas estarão orientadas para o Nordeste com desvio azimutal de 2° e para o Sul com desvio azimutal de 178°.



Figura 71- Vista superior da instalação da usina em Pau dos Ferros

Unidade IFRN Caicó (UFV09)

Tabela 41- Características técnicas UFV09

Cidade	Caicó
Potência instalada (KWp)	114,0
Quantidade de módulos	440
Potência do módulo	260 Wp
Modelo do módulo	CS6P-260P
Tipo de montagem	Telhado de estacionamento
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	42%
Início da operação	31/08/2016

A Figura 72 mostra a vista superior da área da instalação realizada em solo, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte em Caicó, local onde está instalado o sistema fotovoltaico “UFV IFRN – CAMPUS CAICÓ”. As mesas montadas em solo com 7° de inclinação e orientadas para o Nordeste com desvio azimutal de 27°.



Figura 72- Vista superior da instalação da usina em Caicó

Unidade IFRN João Câmara (UFV10)

Tabela 42- Características técnicas UFV10

Cidade	João Câmara
Potência instalada (KWp)	114,0
Quantidade de módulos	440
Potência do módulo	260 Wp
Modelo do módulo	CS6P-260P
Tipo de montagem	Telhado de estacionamento
Energia gerada / Consumo de energia total (%)	47%
Início da operação	15/09/2016

A Figura 73 mostra a vista superior da área da instalação realizada em solo, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte em João Câmara, local onde está instalado o sistema fotovoltaico “UFV IFRN - CAMPUS JOÃO CÂMARA”. As duas mesas montadas em solo com 10° de inclinação e orientada para o Nordeste com desvio azimutal de 15°



Figura 73- Vista superior da instalação da usina em João Câmara

Após apresentado o detalhamento técnico da instalação das usinas, a Figura 74, Figura 75 e Figura 76 mostram o exemplos das três formas de instalação que foram realizadas.



Figura 74- Exemplo de usina montada no Telhado



Figura 75- Exemplo de usina montada no solo



Figura 76- Exemplo de usina montado no teto de estacionamento

A

Tabela 43 apresenta um detalhamento completo das 10 UFV em estudo. Trazendo informações de localização, área ocupada, potência instalada, tipo de montagem, quantitativo de geração de eletricidade, custos, dentre outras características das UFV.

Tabela 43 - Especificações técnicas das Usinas fotovoltaicas estudadas

	UFV 1	UFV 2	UFV 3	UFV 4	UFV 5	UFV 6	UFV 7	UFV 8	UFV 9	UFV 10	
1 Localização											
Cidade e estado	Natal/RN	Ceará Mirim/RN	São Paulo do Potengi/RN	Canguaretama /RN	Currais Novos/RN	São Gonçalo do Amarante /RN	Natal/RN	Pau dos Ferros/RN	Caicó/RN	João Câmara/RN	
Latitude	5°55'	5°65'	5°89'	6°36'	6°25'	5°72'	5°48'	6°15'	6°45'	5°54'	
Longitude	35°20'	35°42'	35°75'	35°16'	36°53'	35°24'	35°12'	38°20'	37°07'	35°80'	
Irradiação anual (kWh/m ² .year)	1.925,54	1.931,61	1.927,99	1.881,72	2.013,57	1.924,45	1.925,54	2.039,17	2.060,33	1.940,94	
2 Área para Usina FV											
Área (m ²)	346	692	692	692	692	331	1.188	634	634	634	
3 Usina Fotovoltaica											
Potência (kWp)	56,40	112,80	112,80	112,80	112,80	56,35	197,32	114,00	114,00	114,00	
N. de módulos	240	480	480	480	480	230	480+345	440	440	440	
Potência dos módulos (Wp)	235	235	235	235	235	245	235 / 245	260	260	260	
Fabricante	Yingli Solar (made in China)						Canadian Solar (made in China)				
4 Detalhes dos módulos											
Tipo do módulo FV	Multi-cristalline										
Comprim. com moldura (m)	1,642	1,642	1,642	1,642	1,642	1,642	1,642	1,638	1,638	1,638	
Largura com moldura (m)	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,982	0,982	0,982	
Espessura (m)	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,040	0,040	0,040	
Peso do módulo (kg)	20	20	20	20	20	20	20	18	18	18	
Eficiência (%)	14,4						16,6				
Corrente nominal (A)	8,05	8,05	8,05	8,05	8,05	8,05	8,05	8,6	8,6	8,6	
Voltagem nominal (V)	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	29,2	30,4	30,4	30,4	
Corrente de curto circuito (A)	8,47	8,47	8,47	8,47	8,47	8,47	8,47	9,1	9,1	9,1	
Voltagem circuito aberto (V)	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	37,5	37,5	37,5	
5 Arranjo de montagem											
Montagem	Fixed										
Tipo de montagem	Telhado		Solo			Estacionam ento		Telhado		Estacionamento	
Ângulo de azimute de superfície do módulo fotovoltaico	7° (N)	7° (N)	7° (N)	10° (N)	10° (N)	7° (N)	12° (NO); 12° (SE)	5° (NO); 5° (SO); 5° (NE); 5° (S)	7° (NE)	10° (NE)	
Âng.de inclinação (inclinação) do módulo fotovoltaico	24° (NE)	8° (NE)	50° (NE)	24° (NO)	0°	0°	70°; 110°	23°; 157°; 2°; 178°	27°	15°	
6 Inversor											
Número de unidades	10	20	20	20	20	10	20/15	4	4	4	
Capacidade nominal (kW)	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	5,0	4,4 / 5	25,0	25,0	25,0	
Frequência (Hz)	60										
Eficiência	97,3%						98,3%				
7 Conexão com o GRID											
Parâmetros elétricos para interconexão	380 V / 60 Hz										
8 Geração de energia anual											
Energia anual (MWh)	78,56	151,95	155,90	139,42	156,35	85,56	298,45	176,29	165,85	170,02	
Produtividade de energia anual (kWh/kWp)	1.393	1.347	1.382	1.236	1.386	1.518	1.513	1.546	1.455	1.491	
9 Custos											
Custos (US\$) ^c	148.746	297.492	297.492	297.492	303.088	165.116	565.725	320.552	321.078	321.078	
Custo por kWp (US\$/kWp)	2.637	2.637	2.637	2.637	2.687	2.930	2.867	2.812	2.816	2.816	
10 Custo da energia gerada											
Tarifa nivelada(US\$/kWh) (d)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	
Custo geração (US\$/kWh) (d)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07	
Início da operação											
	12/30/2013	3/24/2014	4/17/2014	2/3/2015	5/15/2015	11/17/2015	1/18/2016	6/21/2016	8/31/2016	9/15/2016	

4.7. Metodologia do Estudo de Avaliação de Ciclo de Vida em Usinas Fotovoltaicas

4.7.1. Fronteiras do Sistema (*System boundaries*)

As seguintes premissas foram assumidas neste estudo:

1. Os dados referentes a energia embutida na produção dos FV e do BOS foram obtidos pelos valores médios disponíveis na literatura.
2. Foram utilizados dados reais de geração de energia das UFV com mais de dois anos de operação.
3. Foram consideradas que todas as etapas do processo de produção dos painéis ocorreram no país onde se localizam as plantas utilizadas pelos fabricantes para fornecerem os sistemas FV para o Brasil, que neste caso foi a China.

As fronteiras do sistema estudado são apresentadas a seguir:

- A combinação de fabricação de módulos fotovoltaicos, material para BOS e produção de energia fotovoltaica foi considerada para o sistema.
- Foram contabilizadas as emissões diretas do processo de fabricação dos módulos FV e as emissões originadas na geração da energia necessária à fabricação.
- Os dados referentes ao transporte e ao processo de reciclagem foram considerados, mas os resultados desses dois itens foram apresentados separadamente dos demais.

4.7.2. Balanço do Sistema (*EPBT and GHG emission rate of PV systems*)

A metodologia utilizada para o cálculo de EPBT das usinas FV baseou-se nas etapas a seguir:

- 1) Coleta na literatura dos valores de energia requerida nos sistemas FV e na sua estrutura de instalação. Estes valores estimados de energia primária são dados em MJ_p/m^2 ;
- 2) Utilização da área de cada UFV para calcular a energia primária requerida total em (MJ_p);
- 3) Coleta dos valores de eletricidade gerada por cada usina FV estudada em kWh;
- 4) Conversão da unidade kWh para MJ;

- 5) Cálculo do EPBT através da Equação (4). Nesta etapa, para converter os valores de eletricidade gerada para energia primária, foi utilizado fator de eficiência da matriz elétrica do país onde está instalada a UFV;

Para o cálculo da $\text{GHG}_{e\text{-rate}}$ das UFV, foram executadas as seguintes etapas:

- 1) A partir da energia primária requerida total de cada UFV em (MJp), os valores foram convertidos de energia primária em energia elétrica. Estes valores foram expressos em MJ;
- 2) Conversão da unidade MJ para kWh;
- 3) Cálculo do valor de GHG emitidos na geração de eletricidade embutidas na fabricação e instalação dos sistemas FV. Nesta etapa foi utilizado o fator de emissão da matriz elétrica do país onde foi fabricado o sistema FV, dado em $\text{g CO}_{2\text{-eq}}/\text{kWh}$ (Tabela 30);
- 4) Coleta na literatura os valores estimados de GHG emitidos diretamente no processo de obtenção e fabricação dos materiais utilizados nos sistemas FV, em $\text{g CO}_{2\text{-eq}}/\text{m}^2$
- 5) Totalização de todas as emissões de GHG diretas e indiretas (passos 3 e 4), em $\text{g CO}_{2\text{-eq}}$;
- 6) Cálculo do $\text{GHG}_{e\text{-rate}}$ utilizando a Equação (5) e os dados de eletricidade gerados em cada UFV. O resultado do $\text{GHG}_{e\text{-rate}}$ é dado em $\text{g CO}_{2\text{-eq}}/\text{kWh}$.

Outros parâmetros e indicadores utilizados objetivando maior exatidão nos resultados foram calculados conforme explicitado a seguir:

- Para projeção da energia gerada pelas usinas, nos anos seguintes aos dados reais coletados, considerou-se uma degradação de 0,5% ao ano (ITO e colab., 2011).
- O total de emissões evitadas durante a vida útil das usinas foi obtido multiplicando-se o valor da eletricidade gerada por ano (dado em MWh) pelo fator de emissão do SIN projetado (dado em $\text{t CO}_2/\text{MWh}$).
- As emissões geradas pelos sistemas FV foram obtidas multiplicando-se o consumo de eletricidade embutido nos painéis pelo fator de emissão do país onde foram fabricados os painéis. Adicionando a este valor as emissões diretas de $\text{CO}_{2\text{-eq}}/\text{m}^2$.

- Foi calculado o tempo de retorno das emissões geradas na fabricação dos sistemas utilizando a Equação (6).

4.8. Resultados do Estudo de LCA

4.8.1. Tempo de Retorno da Energia (*Energy Payback Time – EPBT*)

A energia anual média gerada pelas 10 usinas analisadas, considerando os dados reais de geração, totalizou 1675,11 MWh. Por outro lado, quando se considera as projeções de geração, levando em conta a degradação anual dos sistemas FV (0,5% ao ano (ITO e colab., 2011)), a média anual de geração se reduz para 1578,35 MWh.

Quando se analisa individualmente, a produção média anual projetada para vida útil de cada UFV, a mesma oscilou de 78,56 a 298,45 MWh respectivamente para a UFV1 e UFV7.

O resultado consolidado da geração média anual projetada de todas as usinas foi de 1427 kWh gerado para cada kWp instalado. Sendo a usina com melhor desempenho de geração anual a UFV8, que atingiu 1546,43 kWh/kWp, enquanto a UFV4 registrou 1236,04 kWh/kWp, o menor resultado dentre as usinas estudadas. Estes dados estão detalhados na Tabela 43 (vide página 128).

Com base nos valores de energia necessária para produção e instalação das UFV, foi calculado o EPBT para as 10 usinas. Os valores encontrados nesta pesquisa ficaram no intervalo de 2,9 a 5,16 anos, como pode ser observado na Tabela 44.

Tabela 44- Tempo de retorno de energia para as usinas de energia solar fotovoltaica

UFV	Energia Primária		
	Requerida (GJ _p)	Gerada (GJ _p)	Payback Time (Anos)
1	1,600.59	452.49	3.54
2	3,201.18	875.21	3.66
3	3,201.18	897.99	3.56
4	4,140.06	811.97	5.16
5	4,140.06	900.56	4.6
6	1,993.53	492.85	4.04
7	5,531.58	1,719.07	3.22
8	2,958.47	1,015.45	2.91
9	3,819.11	955.27	4.00
10	3,819.11	979.32	3.9

4.8.2. Taxa de Emissão e Tempo de Retorno das Emissões (*GHGe-rate e Payback time emission*)

O *Payback Time Emission* mostra em quantos anos de funcionamento das UFV serão compensadas as emissões geradas durante o processo de fabricação e instalação das mesmas. Este cálculo foi realizado da mesma forma como se procedeu o EPBT. Para o cálculo de *Payback Time Emission* foi utilizada a seguinte equação:

$$\text{Payback time emission} = \frac{\text{Generated emissions}}{\left(\frac{\text{avoided emissions during lifetime}}{\text{lifetime}}\right)}$$

Equação 6- Cálculo do tempo de retorno de emissões

Utilizando os dados de emissões provenientes da energia requerida para os sistemas FV e as emissões diretas relacionadas ao processo de fabricação dos sistemas, foram calculadas as *GHGe-rate*. Na Tabela 45 e na Figura 77 são apresentados os valores consolidados de emissões de cada UFV, além dos fatores de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN) no ano de 2018 e o fator projetado para o SIN no ano de 2020, que serão utilizados na comparação com os resultados obtidos de *GHGe-rate* dos sistemas fotovoltaicos estudados.

Tabela 45 - Tempo de retorno de emissões e taxa de GHGe para as usinas fotovoltaicas

UFV	Emissões		Tempo de retorno (anos)	GHG e-rate Fotovoltaicas (g CO ₂ -eq/kWh)	SIN	
	Evitada (t CO ₂ -eq)	Gerada (t CO ₂ -eq)			2018	2020
1	126.26	139.27	27.58	70.91		
2	244.22	278.54	28.51	73.33		
3	250.57	278.54	27.79	71.47		
4	226.57	285.53	31.51	81.02		
5	251.29	285.53	28.41	73.05		
6	137.52	137.62	25.02	64.34	73,98	63.9
7	479.69	481.19	25.08	64.49		
8	283.35	257.32	22.7	58.38		
9	266.56	263.72	24.73	63.61		
10	273.27	263.72	24.13	62.05		

As emissões relativas ao transporte e ao processo de reciclagem representaram um aumento médio de 1,53% em relação ao total de emissões geradas e apresentadas na Tabela 33. Esses dois itens não estão incluídos no total apresentado na Tabela 33, com 0,81% de emissões do transporte e 0,72 % originado do processo de reciclagem dos sistemas.



Nota: Sistema Solar Fotovoltaico (SPV) ; SIN (Sistema Interligado Nacional) ou GRID.

Figura 77- Comparação dos resultados da Taxa de GEE de Usinas Solares Fotovoltaicas operando no Nordeste brasileiro com o fator de emissão projetado para o SIN brasileiro para 2020.

4.8.3. Discussão dos Resultados do Estudo de LCA

Os resultados encontrados de EPBT neste estudo ficaram em média 1,5 ano acima dos padrões médios apresentados por outros autores em pesquisas anteriores (ALSEMA, E. A., 2000; BREYER e colab., 2015; FTHENAKIS, Vasilis e ALSEMA, 2006; HONDO, 2005; ITO e colab., 2010; LENZEN, 2008; STOPPATO, 2008; WILD-SCHOLTEN, M.J., 2013; YUE e colab., 2014). Isto ocorre devido a energia primária economizada pelo uso dos sistemas FV ser menor quando instaladas no Brasil, um país com fator de eficiência do grid de 0,625. Por outro lado, nos estudos realizados nos EUA (EIA, 2003; FTHENAKIS, Vasilis e KIM, 2005), Europa (ALSEMA, Erik A e DE WILD-SCHOLTEN, 2006; RAUGEI e colab., 2007) o EPBT é calculado considerando um fator médio de eficiência do grid de aproximadamente 0,327. Assim, os resultados indicam que no Brasil, país com elevados índices de irradiação solar média anual, a energia demandada na produção, e instalação dos sistemas FV é compensada em um curto período quando comparado com a vida útil de 25 anos, declarada pelo fabricante dos painéis e respaldada pela literatura (LENZEN, 2008; PEHNT e colab., 2003).

As 10 UFV estudadas apresentam diferentes resultados de geração de eletricidade em kWh anual para cada kWp instalado, o que interfere nos respectivos EPBT (Tabela 45). As variações das produtividades encontradas podem ser interpretadas pelas diferentes configurações adotadas (orientação e inclinação dos painéis) na instalação de cada usina, da diferença de irradiação solar a qual estão submetidas, e ainda, do fator de eficiência

dos módulos estudados, estes apresentados na (Tabela 43). As usinas do fornecedor Canadian Solar, UFV8, UFV9 e UFV10, tem o fator de eficiência dos painéis especificada em 16,6%, enquanto no fornecedor Yingli Solar a eficiência dos seus módulos é igual a 14,4%. A usina que apresentou menor produtividade anual²³ foi UFV4 (1236,04 kWh/kWp), que teve a média anual de geração cerca de 20% inferior a energia gerada pela usina com melhor resultado, a UFV8 (1546,43 kWh/kWp). A UFV4 obteve o maior EPBT dentre as usinas, isto pode ser explicado devido a sua menor produtividade anual apresentada, somado ao fato do tipo de instalação *ground mounted* requerer mais energia para o BOS do que o tipo *rooftop* (ALSEMA, E. A., 2000).

O tipo de instalação do sistema fotovoltaico (*ground mounted*, *rooftop*, ou *parking ground mounted*) tem um impacto significativo na energia requerida total, com interferência direta na E_{BOS} , energia requerida pelo BOS. Para a situação de instalação *ground mounted* a energia BOS representa 33% da energia total requerida enquanto para o caso de *roof-top* essa energia representa apenas 13%. Por outro lado, como essa parte dos equipamentos são fabricados no país de instalação dos sistemas, que nesse estudo foi o Brasil, o impacto nas emissões de GEE originados pela energia requerida no BOS representa apenas 4% para o caso da instalação do tipo *ground mounted* e 1% para o tipo de instalação do tipo *rooftop*.

O custo unitário do kWh gerado durante a vida útil da usina representou em média 45% da tarifa²⁴ atualmente contratada à distribuidora de eletricidade em cada local estudado (Tabela 43). O que representa a possibilidade de uma economia significativa com os custos de eletricidade para os usuários da tecnologia FV.

Em relação a taxa de emissão (CO_2/kWh) de 2018 do grid brasileiro, apenas a UFV4 mostra um GHG_{e-rate} superior ao creditado ao grid. Isto é justificado pela irradiação registrada no local, cerca de 4% inferior à média das usinas, além das condições de orientação e inclinação inadequada na qual os painéis foram instalados. Importante ressaltar que do ano de 2014 a 2018 registrou-se um comportamento atípico, com regime hídrico desfavorável ao armazenamento nos reservatórios provocando um aumento no despacho térmico, e com isso uma elevação da taxa de emissão do grid no ano. O resultado da UFV4 é ainda 27% maior que a taxa projetada para o grid do Brasil no ano

²³ Produtividade anual: relação entre kWh gerado para cada kWp instalado

²⁴ O valor da tarifa considerado foi 0,17 US\$/kWh. Dólar utilizado de 30/09/2017.

2020, por outro lado, esta $\text{GHG}_{e\text{-rate}}$ da UFV4 representa apenas 16% do fator de emissão médio mundial, e 40% quando se compara com o Canadá, um outro país de matriz elétrica com grande participação de renováveis (Figura 17).

Com relação aos resultados de $\text{GHG}_{e\text{-rate}}$, a taxa média de emissões calculada para as 10 UFV foi 68,35 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ /kWh, que quando comparada ao valor de 63,9 g CO_2 /kWh, que é a taxa de emissão do grid do Brasil projetada para o ano de 2020, levantam um importante alerta quando da adoção de fontes renováveis de energia, no que tange ao balanço de emissões dessas tecnologias. As taxas de emissão neste estudo ficaram no intervalo de 58,38 a 81,92 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ /kWh. A partir desses resultados é possível afirmar que a $\text{GHG}_{e\text{-rate}}$ média das usinas instaladas se mostrou uma solução mais emissora do que a alternativa de consumo de eletricidade do próprio Grid.

A UFV 8 apresentou a menor taxa de emissão dentre as usinas estudadas, 58,38 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ /kWh, este resultado é cerca de 9% menor do que a taxa prevista para SIN do Brasil em 2020. Esta usina é do tipo *rooftop*, e está situado em um local com irradiação média anual de 2039 kWh/m².year. Estas condições favoráveis contribuíram significativamente nos seus resultados.

Em uma análise comparativa com estudos anteriores aqui apresentados, é possível inferir que os resultados obtidos estão aderentes com os valores médios relatados nos estudos que utilizaram parâmetros técnicos e condições de instalação semelhantes, como pode ser visto na (Tabela 46). A exemplo do estudo realizado por YUE e colab. (2014), com painéis fabricados na China e instalados na Europa, não considerando a energia necessária para o BOS, que obteve resultados de $\text{GHG}_{e\text{-rate}}$ no intervalo de 69,2-72,2 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ /kWh, com 30 anos de vida útil, valores aproximados a faixa de 58,38-73,33 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ /kWh, com 25 anos de vida útil, calculados neste trabalho de pesquisa. A UFV4 com taxa de emissão de 81,92 g $\text{CO}_2\text{-eq}$ /kWh não está incluída neste intervalo apresentado, por revelar particularidades com relação as condições técnicas de sua instalação (orientação e inclinação dos painéis e irradiação do local). E a sua inclusão poderia distorcer a análise conjunta das usinas nesta comparação.

As emissões provenientes da energia requerida na fabricação e instalação da UFV representam em média 84% do total de emissões de $\text{CO}_2\text{-eq}$ dos sistemas FV estudados. Isto ocorre devido à alta influência do fator de emissão da matriz elétrica do país de fabricação dos painéis, a China, estabelecendo assim, espaço para reflexões sobre a importância de se avaliar a matriz energética do país de origem. Devendo tais análises

serem determinantes no processo de tomada de decisão, quando da situação de importação dos sistemas

Os resultados obtidos com relação as emissões evitadas durante a vida útil declarada para as usinas do fornecedor 01, UFV 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, não são suficientes para compensar as emissões geradas durante o ciclo de vida das usinas. Deve-se destacar o fato da existência de uma concentração das emissões de CO₂-eq no ano de fabricação e instalação dos painéis. Ademais, no processo de fabricação do alumínio que compõe os sistemas fotovoltaicos, a literatura indica que ocorre emissão de perfluorcarbonetos (PFCs): o tetrafluorometano (CF₄) e o hexafluoroetano (C₂F₆) (LEBER e colab., 2016). A Figura 78 mostra uma comparativo das emissões acumuladas de GEE.

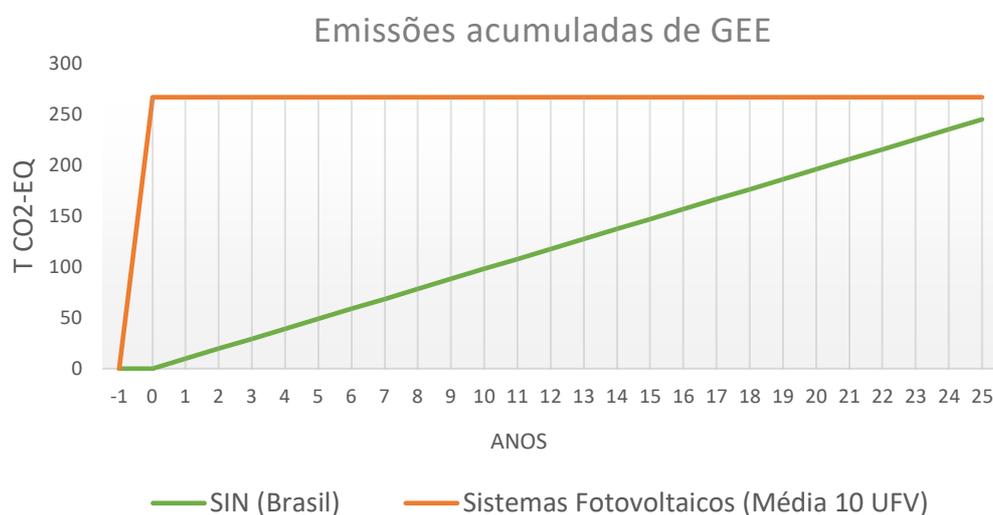


Figura 78- Comparativo de Emissões de GEE dos sistemas Fotovoltaicos com o SIN

Na Tabela 46 se pode realizar um comparativo entre os resultados desta pesquisa com os encontrados na literatura.

Tabela 46 - Análise comparativa dos resultados com estudos anteriores

Ano	Refs	Irrad. Sollar (kW/m ² /yr)	Eficiência do módulo (%)	Taxa de performance	Vida útil (anos)	EPBT (anos)	Taxa de emissões GHG (g-CO ₂ -eq/kWh)	Tipo de monstagem	Região	observação
2000	(ALSEMA, E. A., 2000)	1700	15	0,75	30	3,2	60	solo	Europa ocidental	
2002	(PEHNT e colab., 2003)	1700	13.4	0,85	25		57	telhado	Norte da África	
2005	(HONDO, 2005)	1314	14	0,77	30	N/A	53	telhado	Japão	
2006	(FTHENAKIS, Vasilis e ALSEMA, 2006)	1700	13.2	0,75	30	1,9	36	telhado	Europa	
2006	(LENZEN, 2008)	2060	13	0,85	25		106	telhado	Austrália	
2008	(STOPPATO, 2008)	1697	16	0,83	28	3,5	20	solo	Turquia	
2009	(ITO e colab., 2010)	1117	13.2	0,75	30	2,9	62	telhado	Suíça	
2013	(WILD-SCHOLTEN, M.J., 2013)	1700	14.1	0,75	30	1,2	27,2	telhado	Sul da Europa	
2014	(YUE e colab., 2014)	1700	13.2	0,75	30	2,3	31,8 - 37,3		Europa	Fabricado na Europa
2014	(YUE e colab., 2014)	1700	13.2	0,75	30	1,6	69,2 - 72,2		Europa	Fabricado na China
2015	(BREYER e colab., 2015)	1222		0,82	30		55	telhado	Alemanha	Fabricado na Europa
2015	(BREYER e colab., 2015)	2100		0,80	30		53	telhado	Turquia	Fabricado na China
2014	(HOU e colab., 2016)	1600	15	0,75	25		60,1-87,3		China	Fabricado na China
		1925	14.4		25	3,54	70,91	telhado		
		1932	14.4		25	3,66	73,33	telhado		
		1928	14.4		25	3,56	71,47	telhado		
		1881	14.4		25	5,16	81,92	solo		
		2013	14.4		25	4,60	73,05	solo		
2017	Este estudo	1924	14.4		25	4,04	64,34	estacionamento	Nordeste do Brasil	Fabricado na China
		1925	14.4		25	3,22	64,49	telhado		
		2039	16.16		25	2,91	58,38	telhado		
		2060	16.16		25	4,00	63,61	estacionamento		
		1940	16.16		25	3,90	62,05	estacionamento		

Já na Figura 79 é apresentado um resumo comparativo dos resultados GHGe-rate de alguns estudos de LCA mais recentes realizados por outros autores em outros países. Reforçando a validade dos resultados encontrados nessa pesquisa.

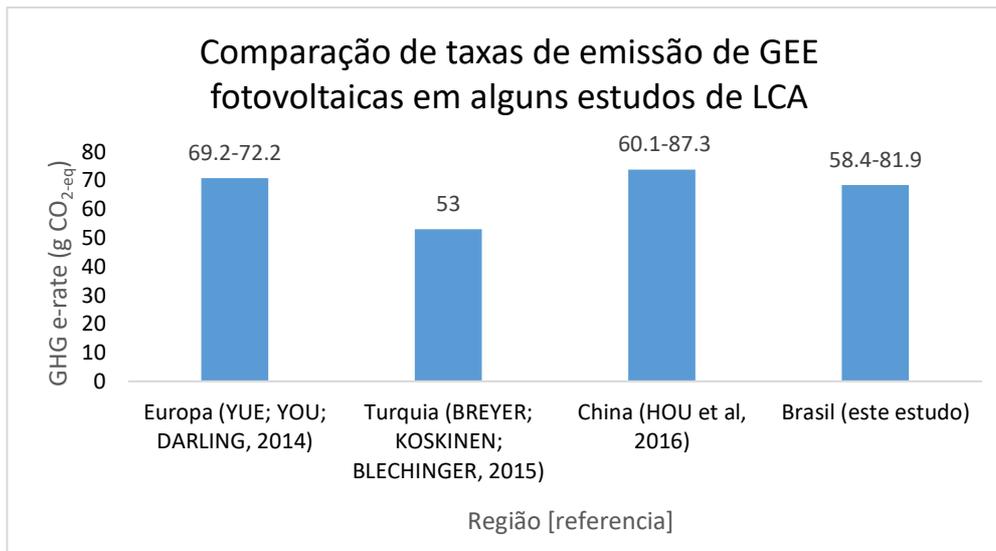


Figura 79 - Comparativo de taxas de emissão em fotovoltaicas de estudos de LCA no mundo (2014 a 2018)

Uma análise de sensibilidade foi realizada para verificar a influência nos resultados provocadas pela variação dos seguintes parâmetros: vida útil, GHG_{e-rate} do grid onde foram fabricados os painéis, geração de eletricidade e energia requerida para fabricação. Os resultados foram sintetizados na tabela 9. Esta análise é relevante devido ao grau de incerteza presente em estudos de LCA.

Os valores de referência iniciais das variáveis simuladas foram: vida útil (25 anos), GHG_{e-rate} do grid onde foram fabricados os painéis (911 CO_{2-eq}/kWh), geração de eletricidade para cada UFV, como mostrado na (Tabela 43), energia requerida para fabricação (3418,20 MJ_p/m²). Nesta análise de sensibilidade foram simulados dois cenários adicionais, nos quais os sistemas FV seriam fabricados no Brasil ou no Canadá, países com matriz elétrica com baixo fator de emissão.

Tabela 47 - Análise de sensibilidade para parâmetros chave para sistemas fotovoltaicos com módulos Multi-Si.

Parâmetros	Valor suposto	GHG e-rate (g CO _{2-eq} /kWh)									
		UFV 1	UFV 2	UFV 3	UFV 4	UFV 5	UFV 6	UFV 7	UFV 8	UFV 9	UFV 10
Energia primária necessária para fabricação (MJ/m²) (+ 5%)	3.589,11	73,73	76,24	74,30	85,09	75,88	66,81	67,04	60,68	66,05	64,43
	(- 5%)	68,10	70,42	68,63	78,75	70,22	61,86	61,95	56,09	61,16	59,66
Tempo de vida do sistema fotovoltaico (anos)	20	87,56	90,54	88,24	101,14	90,20	79,44	79,63	72,09	78,54	76,61
	30	59,82	61,86	60,29	69,10	61,63	54,27	54,41	49,25	53,66	52,34
Energia gerada (MWh)											
(- 5%)		74,65	77,19	75,23	86,23	76,89	67,72	67,89	61,46	66,95	65,31
(+ 5%)		67,54	69,84	68,06	78,02	69,57	61,27	61,42	55,60	60,58	59,09
Taxa de emissão de GHG do Grid nacional (g CO_{2-eq}/kWh)											
Fabricado China											
(+ 5%)	956	73,84	76,35	74,42	85,22	75,99	66,93	67,16	60,80	66,17	64,55
(- 5%)	865	67,99	70,30	68,52	78,62	70,11	61,74	61,83	55,97	61,04	59,54
(- 10%)	819	65,06	67,27	65,57	75,32	67,17	59,15	59,16	53,56	58,47	57,04
Fabricado Brasil											
	82	17,63	18,23	17,77	21,87	19,51	17,11	15,98	14,44	16,90	16,48
Fabricado Canadá											
	200	24,92	25,77	25,11	30,09	26,83	23,57	22,62	20,46	23,29	22,72

Da análise de sensibilidade se pode inferir que países cuja matriz elétrica tem participação elevada de fontes renováveis se mostram atraentes para a produção de sistemas FV, uma vez que, neles as GHG_{e-rate} encontradas para estes sistemas mostram-se inferiores do que as taxas do próprio grid do país. Por outro lado, quando os sistemas advêm de países de matriz elétrica predominantemente fóssil, os resultados são antagônicos, como é o caso da China. Neste sentido, como desdobramento dos resultados apresentados, cabe apontar como estratégia de longo prazo o fomento a cadeia produtiva em território nacional, possibilitando a manutenção das características da matriz brasileira de baixas emissões GHG, de forma alinhada ao Acordo de Paris.

4.8.4. Outro Cenário Analisado – Simulação das Usinas Fotovoltaicas Instaladas em um Único Local

Foram também calculados os valores de geração de energia elétrica pelos sistemas fotovoltaicos das 10 usinas estudadas na condição de que estas tivessem a sua instalação concentrada em único local. Em seguida foram calculados o EPBT e GHGe-rate desta usina de 1,1 MWp.

Foram estudadas três alternativas para a instalação dos sistemas fotovoltaicos:

- a) Local de instalação: Cidade com maior irradiação solar (Caicó);
 Tipo de instalação: no solo; (UFV 11)
- b) Local de instalação: Cidade com usina que apresentou melhor resultado de produtividade anual (Pau dos Ferros); (UFV 12)
 Tipo de instalação: no solo;
- c) Local de instalação: Cidade com usina que apresentou melhor resultado de produtividade anual (Pau dos Ferros);
 Tipo de instalação: no telhado; (UFV 13)

Nas três simulações os seguintes parâmetros foram utilizados:

1. Foram considerados os diferentes valores de E_{BOS} para os dois tipos de instalações dos sistemas (no telhado e no solo);
2. A potência total instalada em kWp foi a soma das potências em kWp das 10 usinas, totalizando 1,1 MWp;
3. O fato da existência ou não de área suficiente disponível para a instalação de todos os painéis em um único local não foi considerado como fator limitador para simulação.

As 3 alternativas simuladas foram: UFV 09 – Caicó (no solo), UFV 08 - Pau dos Ferros (no solo) e UFV 08 - Pau dos Ferros (no telhado). A seguir na Tabela 48 e na Figura 80 são apresentados os resultados dessas simulações.

Tabela 48- EPBT para casos alternativos simulados

UFV	Energia						Energia Gerada vida útil
	Energia Primária				Gerada	Pay back Energia	
	Einput Produção	E BOS (Estrutura)	E BOS (Inversores)	E. Total Requerida			
(GJp)	(GJp)	(GJp)	(GJp)	(MJp)	Anos	(MWh)	
UFV 11	25.267,51	12.812,89	1.131,10	39.211,49	9.244.915,79	4,24	40.125,52
UFV 12	25.267,51	12.812,89	1.131,10	39.211,49	9.827.288,59	3,99	42.653,18
UFV 13	25.267,51	3.942,43	1.131,10	30.341,03	9.827.288,59	3,09	42.653,18

Dentre os três casos alternativos simulados, o melhor resultado de EPBT foi para a UFV 13 – Pau dos Ferros (no telhado) que registrou 3,09 anos para produzir toda a energia que foi demanda durante o seu processo de produção e instalação. Entretanto, vale ressaltar que não foi considerado como limitante dessa simulação a inexistência de área de telhado suficiente para instalar todos os sistemas fotovoltaicos neste local. Por outro lado, existe área disponível para instalação de todos os sistemas no solo, que neste caso resultaria em um EPBT de 3,99 anos (UFV 12), como mostrado na Figura 80.

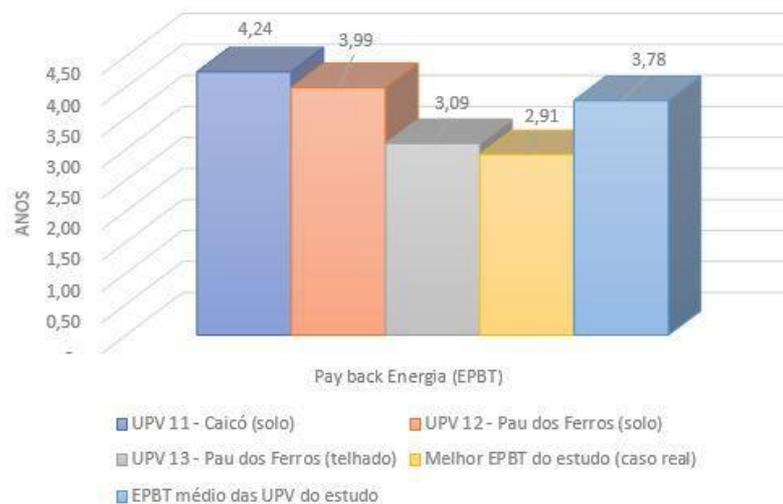


Figura 80- Comparativo de EPBT das alternativas simuladas com o caso real

O EPBT de 3,99 anos é 37% superior ao melhor resultado encontrado no estudo real, que foi de 2,91 anos para uma usina instalada no telhado no local de melhor produtividade anual. Isto pode ser justificado pelo fato de a instalação no solo demandar cerca de 29% mais energia do que a instalação no telhado. O maior responsável pelo aumento da energia demandada total para a instalação no solo é a parcela do EBOS, que neste caso representa cerca 33% da energia total enquanto que para a instalação no telhado representa apenas 13% , como apresentado na Figura 81.

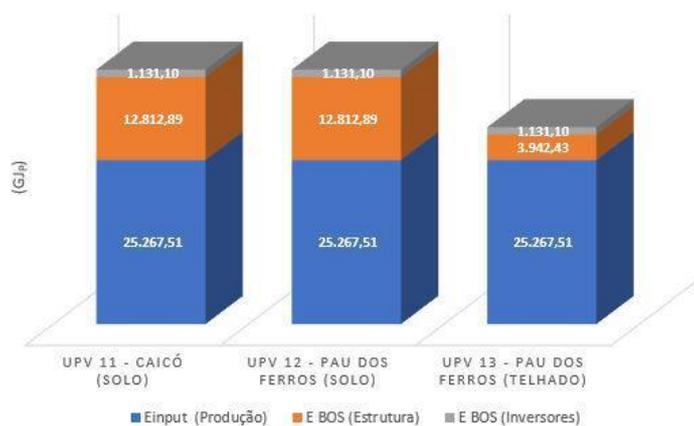


Figura 81- Energia primária requerida (Produção + BOS) das alternativas simuladas

Caso todos os sistemas fotovoltaicos do IFRN analisados neste estudo, que totalizam 1,1 MWp, fossem instalados no solo e na cidade de Pau dos Ferros, na mesma inclinação e orientação que a UFV 08 está instalada, a energia gerada em toda vida útil iria dos atuais 39.458,72 MWh para 42.653,18 MWh. Este aumento na geração de energia elétrica representaria um ganho de cerca 8%.

Já com relação com relação GHGe-rate os resultados nas três alternativas simuladas mostraram que as UFV11, UFV12 e UFV13 obtiveram taxas de emissão menores que o SIN em 2018. Porém, quando se comparam os esses resultados com o SIN projetado para o ano de 2020 a UFV12 e UFV13 apresentam resultados inferiores, porém, enquanto a UFV13 apresenta uma taxa de 61,89 g CO₂/KWh (-3,14%) a UFV 12 alcançou 63,43 g CO₂/KWh (-0,7%), como apresentado na Tabela 49.

Tabela 49- GHGe-rate para casos alternativos simulados

UFV	Emissões				Taxas de Emissão			
	Evitadas Vida útil	Geradas			Pay back CO2	Fotovoltaica	SIN	
		Produção (eletricidade)	Produção (emissões diretas)	Totais			2018	2020
t CO2e	t CO2e	t CO2e	t CO2e	Anos	gCO2e/kwh			
UFV 11	2.578,84	2.276,38	429,27	2.705,65	26,23	67,43	73,98	63,90
UFV 12	2.741,29	2.276,38	429,27	2.705,65	24,67	63,43		
UFV 13	2.741,29	2.210,37	429,27	2.639,64	24,07	61,89		

Levando em consideração que existe a disponibilidade de área para a instalação de todos os sistemas no solo conforme simulado para a UFV012, quando se compara o resultado da sua taxa de emissão que foi 63,43 g CO₂/KWh com a taxa de emissão média das usinas UFV01 a UFV10 anteriormente calculada, que foi de 67,69 g CO₂/KWh, constata-se que existe uma redução de 6,29% na taxa de emissão do complexo de 1,1 MWp caso este fosse instalado na cidade de Pau dos Ferros com o tipo de instalação no solo e nas mesmas condições de inclinação e orientação da UFV08 desse mesmo estudo.

5. Conclusões e Recomendações

Na atualidade, face ao desafio de proporcionar às condições necessárias ao estabelecimento de um desenvolvimento que ocorra em uma base sustentável, se confere um ambiente propício à adoção de ações de eficiência energética, e associado a estes determinantes, adere-se o desenvolvimento das denominadas fontes renováveis de energia, em destaque a energia eólica e solar fotovoltaica. Este processo responde a uma abrangente transformação por que vem passando diferentes setores da economia que tem a indústria de energia elétrica como insumo vital ao seu funcionamento. Supera, portanto, os atrativos advindos dos progressos técnicos e seus rebatimentos na economia, adiciona valores culturais e responsabilidades sócio ambientais aos interesses gerados pelo sistema produtivo.

Nesse ambiente, a discussão atinente à conformação de uma política e adoção de ações de apoio a promoção da eficiência energética, dialogando com seus enlaces na expansão do uso de fontes renováveis de energia, nessa tese, encontra-se inserida em um ambiente de análise que contempla o processo de ocupação do espaço pelas edificações: concepções; intervenções físicas, adoção de certificados de eficiência; e a inserção de fontes renováveis de energia processo.

A dinâmica de ocupação do espaço credita às edificações – construção, uso e atualizações técnicas - importante destaque no cenário de crescimento da demanda por eletricidade, por consequência no volume de emissões de GEE, nestes termos o IPCC (2007, p. 11) considera que o setor de edificações oferece o maior potencial econômico de mitigação global de GEE. No Brasil, as edificações (comercial, poder público e residencial)

representaram juntas, em 2017, 50,9% de toda a demanda elétrica nacional em 2017 (EPE, 2018a).

Para fundar a base de análise necessária ao estudo, assinalou-se as referências que estruturaram às ações de políticas, planos e programas orientados a promoção da eficiência energética, certificados verdes para edificações e adoção de tecnologias renováveis de geração de energia no Mercado mundial e em destaque suas repercussões no Brasil. Fez-se uso, como estudo orientador, do processo de expansão da Rede Federal de Educação Profissional, por este, condicionado por lei, a adoção a eficiência energética enquadrando suas novas edificações em padrões estabelecidos por certificações, além da inserção em seus espaços de Sistemas de Geração Solar Fotovoltaica.

A Rede Federal de Educação Profissional vem vivenciando desde a década de 2000 um robusto processo de expansão, como consequência, se consolidou no cenário educacional brasileiro como um importante ator no processo de transformação da sociedade. Este cenário tem se mostrado propício ao desenvolvimento de ações que busquem contribuir para um desenvolvimento sustentável.

Nessa linha de atuação, iniciativas como o Projeto IF SOLAR e IFRN Solar - que tem o objetivo de implementar a eficiência energética e a geração de energia a partir de fontes renováveis no ambiente de ensino e aprendizagem da Rede Federal - foram viabilizadas. Essas iniciativas têm potencial de contribuir de forma positiva para a economia dos gastos públicos. No que tange às suas contribuições à sustentabilidade, via mitigação de GEE pela adoção de Sistema Solar Fotovoltaica, seus números, conforme apresentados ao longo do estudo, não se mostram atrativos.

Os atrativos socioambientais do emprego de políticas e programas de incentivo a eficiência energética e expansão das fontes renováveis de energia no Brasil são indiscutíveis. Estes têm a competência de oferecer condições efetivas para a conservação do caráter limpo da matriz elétrica nacional. Por outro lado, cabe dar acento ao que foi destacado na tese, isto é, a maioria das nações opera um parque gerador elétrico fortemente demandante de combustíveis fósseis para alimentar seus parques termoelétricos. Em contra ponto, o Brasil, possui uma matriz elétrica de elevada participação renovável. Dessa forma, é imperativo avaliar a real contribuição das fontes renováveis de energia às emissões nacionais de GEE.

O aumento do compromisso e da busca pela eficiência energética em prédios públicos sem dúvida será favorecido pela IN n.º.2/2014, que tornou obrigatório a obtenção da ENCE Nível A para novas obras e ou que passem por *retrofit* com área superior a 500 m². Caso a expansão realizada na Rede Federal, em particular no caso estudado do IFRN, já atendessem essas exigências, seria gerada uma economia significativa de recursos públicos com a redução do consumo de energia elétrica.

A qualificação do corpo técnico responsável pela elaboração, especificação e execução dos novos projetos de construção ou ampliações dos *campi*, em conjunto com as revisões e melhorias que estão em curso no sistema de etiquetagem do PBE Edifica gera uma expectativa de maior contribuição para redução do consumo de energia elétrica e contribuirá para uma redução das emissões de GEE relacionadas a geração de energia elétrica.

A utilização da simulação energética em edificações como ferramenta de otimização de resultados, dando agilidade, gerando diminuição de custos e maior assertividade nas escolhas arquitetônicas para projetos de edificações, se consolida como uma iniciativa acertada e poderosa, que deve ser incentivada tanto no setor público quanto no privado pois tem grande potencial de gerar excelentes resultados.

Neste trabalho, foi conduzido um estudo de LCA em 10 usinas solares fotovoltaicas em operação no NE do Brasil, no IFRN, no Rio Grande do Norte onde foi calculado o EPBT e GHGe-rate. Vale destacar que os sistemas fotovoltaicos são de origem Chinesa.

Do ponto de vista da viabilidade econômica, as UFV apresentaram o custo da energia gerada durante sua vida útil significativamente inferiores aos preços contratados à distribuidora de eletricidade. Isto implica em um retorno do investimento em curto intervalo de tempo.

Com relação ao balanço de energia nos sistemas FV, onde foi calculado o EPBT, os resultados ficaram no intervalo de 2,91-5,16 anos. Indicando um retorno relativamente rápido da energia requerida para fabricação e instalação dos sistemas FV quando comparado a vida útil de 25 dos sistemas FV deste estudo. Este tempo representa em média apenas 16% da sua vida útil.

No que concerne a emissões de CO_{2-eq} e a sua respectiva contribuição para o aquecimento global - destacando que as usinas analisadas, são fabricadas na China, país com alto fator de emissão na matriz elétrica, surge um alerta importante. A GHGe-rate média dos

sistemas FV instalados foram maiores do que o fator de emissão projetado para o grid brasileiro. Ou seja, com o objetivo de aumentar a participação de energias renováveis na matriz elétrica brasileira, a importação de sistemas de energia FV de países de base fóssil precisa ter uma análise mais criteriosa, ou até deve ser repensada. Cabe ponderar que existem vários programas governamentais de incentivo e subsídios ao fomento da tecnologia no país, abrindo espaço para a reflexão de incorporar métricas de produção nacional crescente no médio prazo, como instrumento de regulação de mercado.

Por outro lado, com base no cenário proposto e simulado na análise de sensibilidade, verifica-se:

i) Caso os países de origem das UFV fossem o Brasil ou Canadá, países de matriz elétrica com baixo fator de emissão, os resultados de emissões associadas a produção de eletricidade decorrentes da implantação das UFV no Brasil, mostram-se atrativos. As taxas de emissões nestes dois cenários apresentaram resultados bem menores que as taxas do SIN brasileiro projetado para 2020.

A estratégia de alguns fabricantes de painéis fotovoltaicos de abrir unidades fabris em nações que tem matriz elétrica com baixo fator de emissão, somente trará relevante contribuição para a mitigação das emissões de GEE, se nestas novas unidades forem realizadas as etapas mais energo intensivas do processo de produção dos painéis. Por outro lado, se apenas parte do processo, como a montagem dos sistemas FV, forem realizadas nestas fábricas, esta iniciativa se caracterizará apenas como uma estratégia para obter benefícios fiscais e vantagens comerciais, mas não contribuirá significativamente para a redução das emissões de GHG.

O governo brasileiro busca replicar o modelo de geração a partir de fontes renováveis na maioria dos prédios do setor de educação federal, o que representa aproximadamente 500 novas UFV. Nesse contexto, é essencial que sejam desenvolvidos estudos e estabelecidos critérios para escolha e contratação de soluções que atendam, simultaneamente, a viabilidade técnica, econômica e ambiental. Ademais, que os resultados desta pesquisa foram para UFV instaladas no NE, que tem a maior média de irradiação do país, portanto para futuras UFV instaladas em outras regiões do país, os resultados tendem a ser mais desfavoráveis.

A legislação (IN02/2014) obriga que os prédios construídos com recursos federais sejam certificados pelo PBE Edifica com etiqueta ENCE tipo A, isto busca melhorar a eficiência

energética dessas edificações e por consequência, promover a redução do consumo de energia elétrica. Esta ação tem subjacente a expectativa de que se esteja também reduzindo as emissões de GEE, uma vez que bonifica o uso da geração própria de energia a partir de fontes renováveis. Os resultados apresentados nesta tese apontam o necessário aprimoramento dos critérios de bonificação.

Nesse contexto, comprovadamente quando se trata da utilização de energia fotovoltaica, o estudo de LCA precisa ser inserido na análise para que se verifique, quando da avaliação dos resultados referentes à mitigação de emissões de GEE, a pertinência ou não de se proceder a bonificação pela adoção da geração própria na edificação. Dessa forma, é possível evitar que uma edificação não classificada como A, ao instalar usinas fotovoltaicas, obtenha por bonificação a etiqueta A, embora faça uso de painéis fabricados em países com alto fator de emissão na sua matriz, podendo assim apresentar uma GHGerate maior que a do SIN local. Nesse caso, na prática se estaria bonificando por emitir maiores quantidades de GEE do que aquelas que seriam contabilizadas caso a edificação se mantivesse unicamente conectada ao grid.

A estratégia de escolha do local e das condições técnicas (inclinação, orientação, tipo de instalação, capacidade da rede de transmitir essa energia, dentre outros) nas quais as usinas fotovoltaicas serão instaladas devem buscar a melhor produtividade do sistema, isso vai gerar melhor retorno do capital investido, além de um melhor resultado do ponto de vista da tentativa de redução das emissões de GEE. Dessa forma, a priorização de divulgar ou expor a usina fotovoltaica gerando eletricidade no local onde é consumida precisa ser muito bem avaliada, propiciando melhores decisões de caráter técnico, econômico e ambiental.

O projeto de edificações integrado com o uso de sistemas fotovoltaicos que contemplem o uso da inclinação do telhado e orientação da edificação de maneira que otimizem o uso de energia fotovoltaica pode contribuir para redução de emissões de GEE.

O caráter pedagógico e disseminador de conhecimentos que pode ocorrer com a instalação de sistemas fotovoltaicos em unidades de ensino podem e devem ser melhor explorados e avaliados em trabalhos futuros, sem deixar de lado nesta pesquisa as comprovações técnicas já encontradas na literatura.

Em países com grande participação de fontes renováveis na sua matriz elétrica, como Brasil, Canadá, Noruega, dentre outros, a importação de sistemas FV deve ser analisada

com especial atenção. Isto, tem a finalidade de evitar que se importe sistemas provenientes de países de matriz elétrica com alta GHGe-rate, fruto de uma elevada participação de combustíveis fósseis, que no caso chinês representam 72,8%, dos quais 70% é carvão. O que pode configurar de certa forma, em importação de “carvão” embutido em sistemas de energia renovável.

A energia solar fotovoltaica no Brasil pode perseguir a estratégia bem-sucedida observada no segmento eólico, buscando ganhos de escala na promoção da geração de energia distribuída e na participação de leilões de energia solar, o que pode levar à redução de custos. No entanto, outras variáveis devem ser incorporadas no processo de financiamento subsidiado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), como as avaliações do ciclo de vida em termos de emissões e geração de empregos no país. Esta abordagem pode alavancar maior sustentabilidade ambiental, com geração de emprego e desenvolvimento tecnológico nacional

A estratégia de adoção de fontes renováveis sem o criterioso planejamento e análise que considere os impactos socioeconômico e ambiental, poderá antecipar as emissões de toda vida útil dos sistemas FV para um período curto, o tempo de produção. O que teria resultados que são antagônicos a intenção que se busca ao utilizar fontes renováveis, ou seja promover a redução das emissões de GEE.

As limitações vivenciadas durante a pesquisa se vinculam as incertezas em relação aos dados municiados pelos diferentes fornecedores e obtidas da literatura, principalmente quando se trata de informações sobre a demanda de energia primária para os diferentes estágios de produção do painel e o processo de instalação apresentado nas Tabela 28 e Tabela 29.

Os fatores de emissão da matriz elétrica apresentados pelos países que fornecem os sistemas fotovoltaicos apresentam um impacto significativo nos resultados do estudo de LCA. Estes dados são disponibilizados voluntariamente por cada nação, com base em informações internas sobre o mix de tecnologias utilizadas em sua matriz elétrica.

O cálculo das emissões evitadas de GEE devido à produção de energia dos sistemas fotovoltaicos instalados considera a projeção do fator de emissão do Brasil. Os valores declarados pelo governo até 2017 foram considerados, enquanto os valores de 2018 a 2020 foram projetados. A partir de 2020, foi considerado que o fator de emissão permanecerá estável como esta assumido nas metas prevista pelo governo brasileiro.

Um diferencial deste estudo é o uso de dados reais de geração por um período de dois anos. No entanto, para a projeção de energia gerada em painel durante toda a sua vida útil, a taxa de degradação desses sistemas foi levada em consideração, conforme relatado na literatura. Além disso, incertezas quanto à variabilidade climática também estão presentes, o que se refletirá na futura geração de energia elétrica.

A partir desse trabalho pode ser desenvolvido um estudo que analise o impacto com relação a emissões de GEE para as alterações construtivas propostas nas edificações durante o processo de certificação energética. Este pode considerar não apenas a redução dos níveis de consumo de energia, mas analisar a quantidade de carbono embutida nos materiais utilizados para obter a certificação durante todo o seu ciclo de vida. Também é recomendado confrontar, em estudos futuros os dados das simulações com dados de campo. Isso seria possível com a instalação de medidores individualizados de consumo por área e por tipo de uso (ar condicionado, iluminação e equipamentos), além de medidores de temperatura do ambiente. Isso viabilizaria aferir melhor os resultados e evoluir nas análises.

Outra sugestão seria elaborar um estudo que classifique todos os *campi* com relação a ENCE do PBE Edifica a partir de simulações energéticas, desenvolvendo em conjunto com a análise econômica da implementação das soluções propostas para adequar a edificação para atender a ENCE Nível A.

Referências

ABNT, Associação Brasileiro de Normas Técnicas. **NBR- 15220-3- Desempenho térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** . Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.

AKINYELE, D.O. e RAYUDU, R.K. e NAIR, N.K.C. **Global progress in photovoltaic technologies and the scenario of development of solar panel plant and module performance estimation – Application in Nigeria.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, p. 112–139, 1 Ago 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001744>>. Acesso em: 15 set 2018.

ALSEMA, E. A. **Energy pay-back time and CO2 emissions of PV systems.** *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 8, n. 1, p. 17–25, 1 Jan 2000. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/%28SICI%291099-159X%28200001/02%298%3A1%3C17%3A%3AAID-PIP295%3E3.0.CO%3B2-C>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ALSEMA, E.A e NIEUWLAAR, E. **Energy viability of photovoltaic systems.** *Energy Policy*, v. 28, n. 14, p. 999–1010, 1 Nov 2000. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421500000872>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ALSEMA, E A e FRANKL, P e KATO, K. **ENERGY PAY-BACK TIME OF PHOTOVOLTAIC ENERGY SYSTEMS: PRESENT STATUS AND PROSPECTS.** p. 6–10, 1998. Disponível em: <<https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/7943/98053.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ALSEMA, E A e WILD-SCHOLTEN, M.J. **REDUCTION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACTS IN CRYSTALLINE SILICON MODULE MANUFACTURING.** 2007. Disponível em: <<https://www.ecn.nl/publicaties/PdfFetch.aspx?nr=ECN-M--07-027>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ALSEMA, Erik. **Energy requirements of thin-film solar cell modules—a review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 2, n. 4, p. 387–415, 1 Dez 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032198000197>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ALSEMA, Erik A e DE WILD-SCHOLTEN, Mariska J. **Environmental Impacts of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production.** 2006, Leuven: [s.n.], 2006. Disponível em: <<https://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-RX--06-041>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ALSEMA, Erik e DE WILD, Mariska J. **Environmental Impact of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production.** *MRS Proceedings*, v. 895, p. 0895-G03-05, 26 Jan 2005. Disponível em: <http://journals.cambridge.org/abstract_S1946427400044985>. Acesso em: 11 abr 2018.

ALTOMONTE, S.; SCHIAVON, S. **Occupant satisfaction in LEED and non-LEED certified buildings.** *Building and Environment*, v. 68, p. 66–76, 2013.

ANEEL. **Dados de Geração Distribuída**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 26 fev 2019.

ANEEL. **Nota Técnica nº 0056/2017**. . [S.l: s.n.], 2017. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica_0056_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9>. Acesso em: 27 mar 2018.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**. . [S.l: s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 27 mar 2018.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687**. . [S.l: s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 27 mar 2018.

ARDENTE, Fulvio e colab. **Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances**. *Renewable Energy*, v. 30, n. 2, p. 109–130, 1 Fev 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148104001855>>. Acesso em: 11 abr 2018.

AZEVEDO, LUIZ ALBERTO; COAN, Marival. **O Ensino Profissional no Brasil: Atender “os pobres desvalidos da sorte” e Inclu-i-los na Sociedade de Classes - Uma Ideologia que Perpassa os Séculos XX e XXI**. *Revista Trabalho Necessário*, v. 11, n. 16, p. 28 Jun 2018. Disponível em: <<http://periodicos.uff.br/trabalhonecessario/article/view/8449/6049>>. Acesso em: 5 abr 2019.

BAÑOS, R. e colab. **Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 4, p. 1753–1766, 1 Maio 2011. Disponível em: <<https://www-sciencedirect-com.ez29.capes.proxy.ufrj.br/science/article/pii/S1364032110004430?via%3Dihub>>. Acesso em: 27 mar 2018.

BATTISTI, Riccardo e CORRADO, Annalisa. **Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology**. *Energy*, v. 30, n. 7, p. 952–967, 1 Jun 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544204003251>>. Acesso em: 11 abr 2018.

BAVARESCO, Vinícius Mateus e GHISI, Enedir. **Métodos de avaliação de eficiência energética por consumo global e energia primária**. . Florianópolis: [s.n.], 2016. Disponível em: <www.cb3e.ufsc.br>. Acesso em: 8 mar 2019.

BORSARI, Vanderli. **Caracterização das emissões de gases de efeito estufa por veículos automotores leves no Estado de São Paulo**. [S.l: s.n.], 2009.

BRASIL. **Decreto nº 6.095/2017 de 24 de abril de 2017**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Decreto/D6095.htm>. Acesso em: 5 abr 2019.

BRASIL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 2, DE 04 DE JUNHO DE 2014**. . Brasília: [s.n.], 2014. Disponível em: <<https://www.comprasgovernamentais.gov.br/index.php/legislacao/instrucoes-normativas/304-instrucao-normativa-n-2-de-04-de-junho-de-2014>>. Acesso em: 14 jan 2019.

BRASIL. **Lei 10.295 de 17 de outubro de 2001**. . Brasília: [s.n.], 2001. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10295.htm>. Acesso em: 8 mar

2019.

BRASIL. **Lei no 10.438 de 26 de abril de 2002.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/2002/L10438.htm>. Acesso em: 27 mar 2018.

BRASIL. **Lei no 10.848 de 15 de março de 2004.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Lei/L10.848.html>. Acesso em: 25 ago 2017.

BRASIL. **PRETENDIDA CONTRIBUIÇÃO NACIONALMENTE DETERMINADA para Consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre o Clima.** . Brasília: [s.n.], 2016.

BRASIL, Ministério do desenvolvimento. **Portaria n. 372 - Requisitos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de serviços e Públicos.** . Brasília: [s.n.], 2010.

BREYER, Christian e KOSKINEN, Otto e BLECHINGER, Philipp. **Profitable climate change mitigation: The case of greenhouse gas emission reduction benefits enabled by solar photovoltaic systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015.

BROWN, Halina Szejnwald e VERGRAGT, Philip J. **Bounded socio-technical experiments as agents of systemic change: The case of a zero-energy residential building.** Technological Forecasting and Social Change, v. 75, n. 1, p. 107–130, 1 Jan 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162506000886>>. Acesso em: 8 mar 2019.

CARLO, Joyce Correna. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais.** Florianópolis: [s.n.], 2008.

CARLO, Joyce Correna e LAMBERTS, Roberto. **Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios: parte 1: método prescritivo.** Ambiente Construído, v. 10, n. 2, p. 7–26, Jun 2010a. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212010000200001&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 8 mar 2019.

CARLO, Joyce Correna e LAMBERTS, Roberto. **Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios: parte 2: método de simulação.** Ambiente Construído, v. 10, n. 2, p. 27–40, Jun 2010b. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212010000200002&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 8 mar 2019.

CARVALHO, Márcia Marques de Queiroz. **Alternativas arquitetônicas para o aumento da eficiência no uso de energia elétrica por edifícios comerciais.** Rio de Janeiro: [s.n.], 2011.

CATTO, Ivor. **Carbon zero homes UK style.** Renewable Energy Focus, v. 9, n. 1, p. 28–29, 1 Jan 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471084608700209>>. Acesso em: 8 mar 2019.

CHARRON, Rémi e ATHIENITIS, Andreas. **Design and Optimization of Net Zero Energy Solar Homes.** American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2006. Disponível em: <http://www.hme.ca/reports/Design_and_Optimisation_of_Net_Zero_Energy_Solar_H

omes.pdf>. Acesso em: 27 mar 2018.

CLARK, J.A. **Energy Simulation in Building Design**. Oxford-Butterworth-Heinemann, 2001.

CONIF, Conselho Nacional das Instituições da Rede Federal de Educação Tecnológica. **Conselho Nacional das Instituições da Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica - Conif**. Disponível em: <<http://portal.conif.org.br/br/component/content/article/84-ultimas-noticias/2593-rede-federal-cumpre-papel-de-levar-educacao-profissional-a-todo-o-pais-aponta-plataforma-do-mec?Itemid=609>>. Acesso em: 6 abr 2019.

COSTA, Claudia do Valle. **POLÍTICAS DE PROMOÇÃO DE FONTES NOVAS E RENOVÁVEIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: LIÇÕES DA EXPERIÊNCIA EUROPÉIA PARA O CASO BRASILEIRO**. 2006. 233 f. UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/costacv.pdf>>. Acesso em: 27 mar 2018.

DALL'AGNOL, F., CACCIA, L.S. e MACKRS, E., YU, A. **ACELERANDO A EFICIÊNCIA DAS EDIFICAÇÕES NO BRASIL: Ações Prioritárias para Líderes Urbanos**. . Porto Alegre: [s.n.], 2018.

EIA. **Annual Energy Outlook 2012**. . [S.l: s.n.], 2012. Disponível em: <www.eia.gov>. Acesso em: 7 mar 2019.

EIA. **Annual Energy Review 2003**. . [S.l: s.n.], 2003. Disponível em: <<https://www.osti.gov/servlets/purl/1184624>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ELETROBRAS. **Resultados PROCEL 2017 - Ano base 2016**. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2017. Disponível em: <www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 2 maio 2019.

EPE. **2016 Statistical Yearbook of electricity 2015 baseline year**. . Brasília: [s.n.], 2016a.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 (ano base 2017)**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/Paginas/Anuario-Estatistico.aspx>>. Acesso em: 15 jan 2019a.

EPE. **Balço Energético Nacional 2018 (BEN 2018)**. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2018b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf>. Acesso em: 7 mar 2019.

EPE. **BEN 2014 - Relatório Síntese | ano base 2013 |**. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-128/topico-98/Relatório_Síntese_2014.pdf>. Acesso em: 7 mar 2019.

EPE. Cartilha EPE - Riomais20. 2012, Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. p. 4.

EPE. **PDE2026 - Plano Decenal de Energia**. . Brasília: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2026>>. Acesso em: 27 mar 2018.

EPE. **PNE- Plano Nacional de Energia 2050**. . Rio de Janeiro: [s.n.], 2016b. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-202/DEA_13-15_Demanda_de_Energia_2050.pdf>. Acesso em: 27 mar 2018.

EPE. **Sumário Executivo do PDE 2024**. . Brasília: [s.n.], 2015.

FOELKEL, Celso. **Selos Verdes - Conceitos Básicos**. Disponível em: <http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/Palestras/RotulagemAmbiental/02_Conceitos_b%E1sicos_eco-label_Celso_Foelkel.pdf>.

FRANKL, P e colab. **Simplified Life-Cycle Analysis of PV Systems in Buildings: Present situation and future trends**. 1997. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.471.2336&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 11 abr 2018.

FREITAS, Eduardo De. **Urbanização no mundo. Processo de urbanização no mundo - Brasil Escola**. Disponível em: <<https://brasile scola.uol.com.br/geografia/urbanizacao-no-mundo.htm>>. Acesso em: 15 jan 2019.

FTHENAKIS, V.M. e KIM, H.C. **Photovoltaics: Life-cycle analyses**. Solar Energy, v. 85, n. 8, p. 1609–1628, 1 Ago 2011. Disponível em: <<https://www-sciencedirect-com.ez29.capes.proxy.ufrj.br/science/article/pii/S0038092X09002345?via%3Dihub>>. Acesso em: 4 abr 2018.

FTHENAKIS, Vasilis e ALSEMA, Erik. **Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs: 2004–early 2005 status**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 14, n. 3, p. 275–280, 1 Maio 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/pip.706>>. Acesso em: 11 abr 2018.

FTHENAKIS, Vasilis e KIM, Hyung Chul. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in the Life Cycle of CdTe Photovoltaics. 26 Jan 2005, [S.l.]: Cambridge University Press, 26 Jan 2005. p. 0895-G03-06. Disponível em: <http://journals.cambridge.org/abstract_S1946427400044997>. Acesso em: 11 abr 2018.

FUNDAÇÃO VANZOLINI. **Fundação Vanzolini- PBE Edifica**. Disponível em: <<https://vanzolini.org.br/pbe-edifica/>>. Acesso em: 2 maio 2019.

GBC BRASIL. **GBC Brasil | Construindo um Futuro Sustentavel | Noticia - Brasil mantém a 4ª posição no Ranking de Países com maior número de projetos LEED**. Disponível em: <<http://www.gbcbrazil.org.br/detalhe-noticia.php?cod=287>>. Acesso em: 2 maio 2019.

GELLER, Howard. **O uso eficiente da eletricidade - Uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1994.

GHAFFARIANHOSEINI, AmirHosein. **The Concept of Zero Energy Intelligent Buildings (ZEIB): A Review of Sustainable Development for Future Cities**. British Journal of Environment and Climate Change, p. 339–367, 19 Jan 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedomain.org/abstract.php?iid=180&id=10&aid=851>>. Acesso em: 8 mar 2019.

GÓES, Heloisa Cronemberger de Araujo. **Análise Comparativa De Instrumentos Para Avaliação Da**. 2015. 189 f. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2015. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/images/publicações/doutorado/Heloisa_Cronemberger_de_Araujo_Góes.pdf>. Acesso em: 26 nov 2018.

GOMES, Anderson F. **Instrução Normativa de Eficiência Energética IN SLTI-MP Nº 02-2014**. . Brasília: [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://cpsustentaveis.planejamento.gov.br/assets/conteudo/uploads/instrucao-normativa-de-eficiencia-energetica-nº-02-2014.pdf>>. Acesso em: 8 mar 2019.

GOULART, Solange. **Sustentabilidade nas Edificações e no Espaço Urbano**. Florianópolis: [s.n.], 2008. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV5161_Sustentabilidade_a_postila_0_0.pdf>. Acesso em: 7 mar 2019.

HANSEN, J. e colab. **Earth's energy imbalance and implications**. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 11, n. 24, p. 13421–13449, 22 Dez 2011. Disponível em: <<https://www.atmos-chem-phys.net/11/13421/2011/>>. Acesso em: 30 abr 2019.

HONDA, Wilson Saburo. **Certificação da Sustentabilidade de Edifícios de Escritórios Corporativos no Brasil**. p. 189 p, 2016. Disponível em: <http://www.realestate.br/dash/uploads/sistema/Dissertacoes/tese_wilsonhonda.pdf>.

HONDO, Hiroki. **Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case**. Energy, v. 30, n. 11–12, p. 2042–2056, 1 Ago 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544204003652>>. Acesso em: 11 abr 2018.

HOU, Guofu e colab. **Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China**. Applied Energy, v. 164, p. 882–890, 15 Fev 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915014646>>. Acesso em: 4 maio 2018.

ICLEI. **Instrumentos de classificação e certificação de edifícios**. Disponível em: <<http://archive.iclei.org/index.php?id=8375>>. Acesso em: 7 maio 2017.

IEA. **CO 2 emissions from fuel combustion 2016 H I G H L I G H T S**. . França: [s.n.], 2016.

IEA. **CO2 Emissions by sector 2016**. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>>. Acesso em: 16 abr 2019a.

IEA. **Electricity Information: overview**. . [S.l: s.n.], 2018b.

IEA. **Photovoltaic Power Systems Programme - International statistics**. Disponível em: <<http://www.iea-pvps.org/>>. Acesso em: 17 abr 2018.

IFRN. **Cursos — Portal IFRN**. Disponível em: <<http://portal.ifrn.edu.br/ensino/cursos>>. Acesso em: 7 abr 2019a.

IFRN. **Energia Solar no IFRN**. . [S.l: s.n.], 2019b.

IFRN. **Histórico — Portal IFRN**. Disponível em: <<http://portal.ifrn.edu.br/institucional/historico>>. Acesso em: 6 abr 2019c.

IFRN. **Observatório da Energia — Portal IFRN**. Disponível em: <<http://portal.ifrn.edu.br/campus/natalcentral/observatorio-da-energia>>. Acesso em: 30 abr 2019d.

IFRN. **PDI 2014-2018**. . Natal: [s.n.], 2014. Disponível em: <[file:///C:/Users/Gabriel/Downloads/Plano de Desenvolvimento Institucional 2014-2018 - atualizado 2016.pdf](file:///C:/Users/Gabriel/Downloads/Plano%20de%20Desenvolvimento%20Institucional%202014-2018%20-%20atualizado%202016.pdf)>.

IFSULDEMINAS. **Projeto IF Solar - IFSULDEMINAS**. Disponível em: <<https://portal.ifsuldeminas.edu.br/index.php/ultimas-noticias-ifsuldeminas/624-projeto-if-solar>>. Acesso em: 7 abr 2019.

INMETRO. **Tabela de edificações comerciais, de serviços e Públicas**. . [S.l: s.n.], 2019.

Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabelas-comerciais.pdf>>. Acesso em: 3 maio 2019.

INTERNATIONAL, Solar Energy. **Photovoltaics - Design and installation manual**. 3a. Edição ed. [S.l: s.n.], 2009.

IPCC. **Climate Change 2001: Synthesis Report. A contribution of Working Group I, II, and III to the Third Assessment Report of the IPCC**. . Cambridge: [s.n.], 2001. Disponível em: <<http://www.grida.no/publications/267>>. Acesso em: 15 jan 2019.

IPCC. **Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change**. . Canada: [s.n.], 2007. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg3_full_report-1.pdf>. Acesso em: 14 jan 2019.

IPCC. **Fifth Assessment Report - Climate Change - Synthesis Report**. . Geneva, Switzerland: [s.n.], 2014a. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>. Acesso em: 27 mar 2018.

IPCC. **Fifth Assessment Report - Climate Change 2013**. . Cambridge and New York: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>. Acesso em: 27 mar 2018.

IPCC. **Fifth Assessment Report - Mitigation of Climate Change**. . Londres e New York: [s.n.], 2014b. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>>. Acesso em: 27 mar 2018.

IPCC. **Global Warming of 1.5 °C - SR15**. Geneva, Switzerland: [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/sr15/>>.

IPCC. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. . [S.l: s.n.], 2012. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf>. Acesso em: 15 set 2018.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014 Synthesis Report - IPCC**. Geneva, Switzerland: [s.n.], 2014c.

IRENA. **Data and Statistics - IRENA Resource**. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=3&subTopic=32>>. Acesso em: 27 mar 2018.

ISO. **Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework**. . Genebra: [s.n.], 1997.

ITO, Masakazu e colab. **A comparative study on life cycle analysis of 20 different PV modules installed at the Hokuto mega-solar plant**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 19, n. 7, p. 878–886, 1 Nov 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/pip.1070>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ITO, Masakazu e KOMOTO, Keiichi e KUROKAWA, Kosuke. **Life-cycle analyses of very-large scale PV systems using six types of PV modules**. Current Applied Physics, v. 10, n. 2, p. S271–S273, 1 Mar 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1567173909005240>>. Acesso em: 11 abr 2018.

KENNEDY, Christopher e colab. **Greenhouse Gas Emissions from Global Cities**. Environmental Science & Technology, v. 43, n. 19, p. 7297–7302, Out 2009. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es900213p>>. Acesso em: 18 jan 2019.

KRONER, Walter M. **An intelligent and responsive architecture**. Automation in Construction, v. 6, n. 5–6, p. 381–393, 1 Set 1997. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580597000174>>. Acesso em: 8 mar 2019.

LA ROVERE, Et Al. **IMPLICAÇÕES ECONÔMICAS E SOCIAIS DE CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE NO BRASIL ATÉ 2030 (IES-BRASIL)**. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <https://forumbrasilclima.files.wordpress.com/2017/05/ies-brasil_2030.pdf>. Acesso em: 18 jan 2019.

LABEEE. **Simulação Termo-energética de Edificações | Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/simulacao-termo-energetica-de-edificacoes>>. Acesso em: 4 maio 2019.

LABREN. **Banco de Dados**.

LAMBERTS, ROBERTO; DUTRA, LUCIANO; PEREIRA, Fernando O R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: [s.n.], 1997.

LAMBERTS ET AL, Roberto; **Sustentabilidade nas edificações: contexto internacional e algumas referências brasileiras na área**. Florianópolis: [s.n.], 2008.

LAMBERTS, Roberto. **Desempenho Térmico de edificações**. Florianópolis: [s.n.], 2014. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Aula 14-Simulacao Energia-S3E.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Aula%2014-Simulacao%20Energia-S3E.pdf)>. Acesso em: 3 maio 2019.

LEBER, Bernard P. e colab. Perfluorocarbon (PFC) Generation at Primary Aluminum Smelters. Essential Readings in Light Metals. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 1015–1023. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-48156-2_150>. Acesso em: 9 jun 2019.

LEE, W; BURNETT, J. **Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM, BREEAM and LEED**. Building and Environment, v. 43, p. 1882–1891, 2013.

LENZEN, M. **Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia**. 2008. Disponível em: <http://www.isa.org.usyd.edu.au/publications/documents/ISA_Nuclear_Report.pdf>. Acesso em: 11 abr 2018.

LI, Jun. **Towards a low-carbon future in China's building sector—A review of energy and climate models forecast**. Energy Policy, v. 36, n. 5, p. 1736–1747, Maio 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421508000311>>. Acesso em: 8 mar 2019.

LIMA, Raoni Venância do Santos. **A influência de decisões arquitetônicas na eficiência energética do campus/UFRN**. Natal: [s.n.], 2007.

MANN, Sander A. e colab. **The energy payback time of advanced crystalline silicon PV modules in 2020: a prospective study**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 22, n. 11, p. 1180–1194, 1 Nov 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/pip.2363>>. Acesso em: 8 maio 2018.

MARIMUTHU, C. e KIRUBAKARAN, V. **Carbon pay back period for solar and wind energy project installed in India: A critical review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 23, p. 80–90, 1 Jul 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113001470>>. Acesso em:

23 jan 2018.

MARSH, George. **Zero energy buildings: Key role for RE at UK housing development**. Refocus, v. 3, n. 3, p. 58–61, 1 Maio 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1471084602800452>>. Acesso em: 8 mar 2019.

MCTIC. **2a. Comunicação do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. . Brasília: [s.n.], 2010.

MCTIC. **3a. Comunicação Sobre Mudanças Climáticas**. . Brasília: [s.n.], 2016. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>>.

MCTIC. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. . Brasília: [s.n.], 2017. Disponível em: <http://sirene.mctic.gov.br/portal/export/sites/sirene/backend/galeria/arquivos/2018/10/11/Estimativas_4ed.pdf>. Acesso em: 1 maio 2019.

MCTIC. **Fatores de Emissão de CO2 do Sistema Interligado Nacional do Brasil**. Disponível em: <<http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/index.html>>. Acesso em: 27 mar 2018.

MEC. **Comitê debate oferta de cursos na área de energia renovável - MEC**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/ultimas-noticias/209-564834057/45681-comite-debate-oferta-de-cursos-na-area-de-energia-renovavel>>. Acesso em: 6 abr 2019.

MEC. **Comitê discute qualificação profissional na área de energia - MEC**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/ultimas-noticias/209-564834057/30221-comite-discute-qualificacao-profissional-na-area-de-energia>>. Acesso em: 6 abr 2019.

MEC. **Expansão da Rede Federal - Ministério da Educação**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/setec-programas-e-acoes/expansao-da-rede-federal>>. Acesso em: 5 abr 2019.

MEC. **Instituições da Rede Federal - Ministério da Educação**. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/rede-federal-inicial/instituicoes>>. Acesso em: 5 abr 2019.

MEC. **Instituto Federal - Histórico**. Disponível em: <<http://redefederal.mec.gov.br/historico>>. Acesso em: 5 abr 2019.

MEC. **Parecer CNE/CES no. 277**. . Brasília: [s.n.], 2006. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/pces277_06.pdf>. Acesso em: 30 abr 2019.

MEDEIROS, Y.M. **A Contribuição das Certificações como Instrumentos Voluntários para a Avaliação da Sustentabilidade de Projetos Urbanos**. 2013. 139 f. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

MELO, Ana Paulo e WESTPHAL, Fernando Simon e MATOS, Michele. **APOSTILA DO CURSO BÁSICO DO PROGRAMA ENERGYPLUS**. . Florianópolis: [s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/telefones>>. Acesso em: 30 maio 2019.

MMA. **Discussões para implementação da NDC do Brasil**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/ndc-do-brasil>>. Acesso em: 27 mar 2018a.

MMA. **Eficiência Energética: Guia para etiquetagem de edifícios**. Brasília: [s.n.], 2015.

MMA, Ministério do Meio ambiente. **A Política Nacional sobre Mudança do Clima**.

Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima>>. Acesso em: 7 mar 2019b.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional 2003 (BEN 2003)**. [S.l.: s.n.], 2003. Disponível em: <http://www.agg.ufba.br/ben2003/BEN2003_port.pdf>. Acesso em: 7 mar 2019.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Global Solar Atlas**. Disponível em: <<http://globalsolaratlas.info/>>. Acesso em: 4 abr 2018.

NEAMA, W. **Protect the Planet through sustainability rainting systems with local environmental criteria – LEED in the middle-east**. Procedia – Social and Behavioral Science, v. 68, p. 752–766, 2012.

NIEUWLAAR, E e ALSEMA, E. Environmental aspects of PV power systems. 1997, Utrecht: [s.n.], 1997. p. 25–27.

NISHIMURA, A. e colab. **Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system**. Applied Energy, v. 87, n. 9, p. 2797–2807, 1 Set 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com.ez29.capes.proxy.ufrj.br/science/article/pii/S0306261909003274>>. Acesso em: 8 maio 2018.

NUNES, Willian. **10 anos de certificação AQUA-HQE no Brasil, conheça a história**. Disponível em: <<http://goinggreen.com.br/2018/10/10/10-anos-de-certificacao-aqua-hqe-no-brasil-conheca-a-historia/>>. Acesso em: 2 maio 2019.

PACCA, Sergio e SIVARAMAN, Deepak e KEOLEIAN, Gregory A. **Parameters affecting the life cycle performance of PV technologies and systems**. Energy Policy, v. 35, n. 6, p. 3316–3326, 1 Jun 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421506003715>>. Acesso em: 11 abr 2018.

PARO, Vitor Henrique. **Progressão continuada, supervisão escolar e avaliação externa: implicações para a qualidade do ensino***. Revista Brasileira de Educação, v. 16, p. 696–815, 2011. Disponível em: <<http://www.vitorparo.com.br/wp-content/uploads/2014/06/progressaocontinuadasupervisaoescolareavaliacaoexterna.pdf>>. Acesso em: 30 abr 2019.

PBE EDIFICA. **ST edificações – Secretaria Técnica de edificações | PBE EDIFICA**. Disponível em: <<http://www.pbeedifica.com.br/node/25>>. Acesso em: 2 maio 2019.

PEHNT, M. e BUBENZER, A. e RÄUBER, A. Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems — Trying To Fight Deep-Seated Prejudices. Photovoltaics Guidebook for Decision-Makers. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 179–213. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-05140-5_4>. Acesso em: 11 abr 2018.

PENG, Jinqing e LU, Lin e YANG, Hongxing. **Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 19, p. 255–274, 1 Mar 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006478>>. Acesso em: 27 mar 2018.

PEREIRA, E. **Atlas Brasileiro Energia Solar 2a Edicao**. 2a. ed. ed. São José dos Campos: [s.n.], 2017.

PHYLIPSEN, G J M e ALSEMA, E A. **Environmental life-cycle assessment of**

multicrystalline silicon solar cell modules. 1995. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.126.292&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 11 abr 2018.

POMPERMAYER, Máximo Luiz. O que muda com a nova lei de eficiência energética? 2016, São Paulo: PAINEL 4: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL, 2016.

PROCEL. **Selo Procel Edificações.** Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C%7D>>. Acesso em: 2 maio 2019.

PROCLIMA. **Programa Estadual de Mudanças Climáticas.** Disponível em: <<http://proclima.cetesb.sp.gov.br/material-de-apoio/efeito-estufa/gases-do-efeito-estufa/>>. Acesso em: 1 dez 2016.

PRODANOV, C. e FREITAS, C. **Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** Novo Hamburgo: [s.n.], 2013.

RAUGEL, Marco e BARGIGLI, Silvia e ULGIATI, Sergio. **Life cycle assessment and energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdTe and CIS compared to poly-Si.** Energy, v. 32, n. 8, p. 1310–1318, 1 Ago 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544206002799>>. Acesso em: 11 abr 2018.

REED, R. et al. **International Comparison of Sustainable Rating Tools.** Journal of Sustainable Real State, v. 1, 2009.

RUPP, Ricardo Forgiarini e LAMBERTS, Roberto. **Relatório: Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações.** Florianópolis: [s.n.], 2017. Disponível em: <http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/RI_61_2017_RelatorioFatoresDeConversaoEnergiaEletricaTermica_EnergiaPrimaria_EmissoesCO2_paraPBEEdificacao%28corrigido%29_0.pdf>. Acesso em: 11 abr 2018.

SAUAIA, Rodrigo Lopes. **Geração Distribuída Solar Fotovoltaica: Benefícios Líquidos ao Brasil.** [S.l: s.n.], 2018. Disponível em: <www.absolar.org.br/processo-associativo.html>. Acesso em: 5 maio 2019.

SAVIANI, Demerval. **Pedagogia histórico-crítica: primeiras aproximações.** 3a. ed. São Paulo: [s.n.], 1992.

SEEG BRASIL. **Emissões no Rio Grande do Norte por Setor.** Disponível em: <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission>. Acesso em: 18 jan 2019.

SHINE, Keith P. e colab. **Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases.** Climatic Change, v. 68, n. 3, p. 281–302, Fev 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10584-005-1146-9>>. Acesso em: 18 jan 2019.

SILVA, Arthur Santos e ALMEIDA, Laiane Susan Silva e ANDREASI, Wagner Augusto. **AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO PÚBLICA DE ENSINO SUPERIOR DE ACORDO COM O RTQ-C E PROPOSTA DE SOLUÇÕES EFICIENTES TECNICAMENTE.** 2012, Juiz de Fora: [s.n.], 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/259149060_AVALIACAO_DA_EFICIENC>

IA_ENERGETICA_DE_UMA_EDIFICACAO_PUBLICA_DE_ENSINO_SUPERIOR_DE_ACORDO_COM_O_RTQ-C_E_PROPOSTA_DE_SOLUCOES_EFICIENTES_TECNICAMENTE>. Acesso em: 8 mar 2019.

SILVA, Neilton Felis Da. **Energias Renováveis na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro**. 1 edição ed. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.saraiva.com.br/energias-renovaveis-na-expansao-do-setor-eletrico-brasileiro-8973838.html>>. Acesso em: 7 maio 2018.

STEPHANIE, B. **CARBON FOOTPRINT OF ELECTRICITY GENERATION**. . [S.l.: s.n.], 2006. Disponível em: <<https://www.parliament.uk/documents/post/postpn268.pdf>>. Acesso em: 27 mar 2018.

STOPPATO, A. **Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation**. Energy, v. 33, n. 2, p. 224–232, Fev 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544207002137>>. Acesso em: 11 abr 2018.

TAVARES, S. e LAMBERTS, F. Estudos comparativos sobre consumo energético no ciclo de vida de edificações residenciais do Brasil, Austrália e Suécia. In X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, ENTAC 2004. São Paulo, SP. Julho de 2004. C. 2004, São Paulo: [s.n.], 2004.

TAVARES, Sérgio Fernandes. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. Florianópolis: UFSC, 2006.

THORMARK, Catarina. **Building and environment**. [S.l.]: Elsevier Science, 2002. v. 37. Disponível em: <<https://lup.lub.lu.se/search/publication/4f6755a5-eaef-427c-add9-90441500a0ee>>. Acesso em: 8 mar 2019.

TIBA, C. **Banco de dados terrestres: Atlas Solarimétrico do Brasil**. Recife: [s.n.], 2000.

TSAI, C. Y.; CHANG, A. S. **Framework for developing construction sustainability items: the example of highway design**. Journal of Cleaner Production, v. 20, p. 127–136, 2012.

TURMENA, LEANDRO; AZEVEDO, Mário Luiz Neves De. **expansão da Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica: os Institutos Federais em questão**. Rev. Diálogo Educ., v. 17, p. 1067–1084, 2017. Disponível em: <<https://periodicos.pucpr.br/index.php/dialogoeducacional/article/viewFile/21938/21079>>.

UFSC/LABEEE. **Relatório do Laboratório de Eficiência Eenergética em Edificações**. . [S.l.: s.n.], 2015.

UN-HABITAT. **United Nations Human Settlements Programme n C i t i e s a n d C l i m a t e C h a n g e Hot Cities: battle-ground for Climate CHange**. . New York: [s.n.], 2011. Disponível em: <www.unhabitat.org>. Acesso em: 15 jan 2019.

UN-HABITAT III. **21 – Cidades Inteligentes**. . [S.l.: s.n.], 2015.

UN. **World Urbanization Prospect: The 2014 Revision**. . New York: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-report.pdf>>. Acesso em: 15 jan 2019.

UNFCCC. **Draft decision-/CP.17 Revision of the UNFCCC reporting guidelines on**

annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention. . [S.l: s.n.], 2011. Disponível em: <http://unfccc.int/files/meetings/durban_nov_2011/decisions/application/pdf/cop17_annual_inventories.pdf>. Acesso em: 16 jan 2019.

VARUN e BHAT, I.K. e PRAKASH, Ravi. **LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 5, p. 1067–1073, 1 Jun 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001093>>. Acesso em: 26 fev 2019.

VENANCIO, Raoni. **Modos Projetuais de Simulação: Uso de ferramentas de simulação térmica no processo projetual de arquitetura.** 2012. 256 f. UFRN, 2012.

VLLALVA, M. G.; GAZOLI, J.F. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações.** 1a. edição ed. [S.l: s.n.], 2012.

WANDERLEY, Augusto César Fialho e JÚNIOR, Franclin Róbias da Silva. **Energia Solar Fotovoltaica no Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN).** p. 31, 2018.

WANDERLEY, Augusto Fialho. **Energia Solar Fotovoltaica no Instituto Federal do RN(IFRN).** 2017, [S.l: s.n.], 2017.

WILD-SCHOLTEN, M.J. **Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems.** Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 119, p. 296–305, 1 Dez 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024813004455>>. Acesso em: 11 abr 2018.

WILD-SCHOLTEN, Mariska. **Energy payback times of PV modules and systems.** 2009, Köln: [s.n.], 2009. p. 26–27. Disponível em: <http://www.solaik.ch/_downloads/EnergyPaybackTime.pdf>. Acesso em: 11 abr 2018.

YUE, Dajun e YOU, Fengqi e DARLING, Seth B. **Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis.** Solar Energy, v. 105, p. 669–678, 1 Jul 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14001935>>. Acesso em: 11 abr 2018.

ZHANG, Hua e WU, Jinxiu e LU, Peng. **A study of the radiative forcing and global warming potentials of hydrofluorocarbons.** Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, v. 112, n. 2, p. 220–229, Jan 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022407310001810>>. Acesso em: 18 jan 2019.

Anexos

Tabela 50- Resumo sobre os regulamentos de países que avaliam a eficiência energética das edificações considerando o consumo de energia primária

País (Energia Primária)	Classes de eficiência	Indicador de consumo
Alemanha	A+, A, B, C, D, E, F, G e H	kWh/m ² .ano
Áustria	A++, A+, A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Bélgica (Bruxelas)	A+, A, A-, B+, B, B-, C+, C, C-, D+, D, D-, E+, E, E-, F e G	kWh/m ² .ano
Bélgica (Flandres e Valônia)	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Bulgária	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Chile	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Chipre	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Coreia	1+++, 1++, 1+, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7	kWh/m ² .ano
Croácia	A+, A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Dinamarca	A1, A2, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Espanha	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Eslováquia	A0, A1, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Eslovênia	A1, A2, B1, B2, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Estônia	A, B, C, D, E, F, G e H	kWh/m ² .ano
EUA	A+, A, A-, B, C, D, E, F e G	kBtu/pe ² .ano
Finlândia	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
França	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Holanda	A++, A+, A, B, C, D, E, F e G	MJ
Hungria	A+, A, B, C, D, E, F, G, H e I	kWh/m ² .ano
Irlanda	A1, A2, A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3, D1, D2, E1, E2, F e G	kWh/m ² .ano
Itália	A+, A, B, C, D, E, F e G	Resid: kWh/m ² .ano Não resid.: kWh/m ³ .ano
Japão	As edificações são classificadas com estrelas e indicador numérico	Não é apresentado
Luxemburgo	A, B, C, D, E, F, G, H e I	kWh/m ² .ano
Malta	Escala numérica relacionada a cores	kWh/m ² .ano
Polônia	Indicador consumo relacionado a cores	kWh/m ² .ano
Portugal	A+, A, B, B-, C, D, E, F e G	kgep/m ² .ano
Reino Unido (Escócia, Inglaterra, Irlanda do Norte e País de Gales)	Residenciais: A, B, C, D, E, F e G Não residenciais: A+, A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Singapura	4 classes qualitativas: platina, ouro, ouroplus e certificado	Não é apresentado
Turquia	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano

Fonte: (ICLEI, 2016, p. 120-121)

Tabela 51- Resumo sobre os regulamentos de países que avaliam a eficiência energética das edificações considerando o consumo de energia final

País (Consumo final)	Classes de eficiência	Indicador de consumo
Austrália	As edificações são classificadas com estrelas	MJ/m ² .ano
Argentina	A, B, C, D, E, F, G e H	Não é apresentado
Canadá	Escala numérica que varia de 0 a 100	Varia conforme a fonte energética
Cazaquistão	A, B, C, D e E	Não possui – é necessário comprovar economia em relação a um modelo de referência
China	Escala de cores (vermelho a verde) e estrelas para edificações mais eficientes	kWh/m ² .ano
Egito	Pirâmides verde, dourada e prata	Não possui – são avaliados alguns tópicos referentes ao desempenho ambiental da edificação
Emirados Árabes Unidos	As edificações são classificadas com estrelas (a escala varia de uma a cinco)	Não é apresentado
Equador	Não possui classes	W/m ² (iluminação)
Grécia	A+, A, B+, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Hong Kong	A, B e C	kWh/m ² .ano
Índia	Estrelas, variando a quantidade de 1 a 5	kWh/m ² .ano

Letônia	Escala numérica que varia de 0 a 400 e é relacionada a cores – que vão de verde a vermelho	kWh/m ² .ano (indicador parcial) MWh/ano (indicador global)
Lituânia	A++, A+, A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Malásia	4 classes qualitativas: platina, ouro, prata e certificado	Não é apresentado
México	É apresentada a porcentagem de ganhos térmicos do edifício em relação a um modelo virtual	Não é apresentado
Noruega	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Nova Zelândia	As edificações são classificadas com estrelas	MJ/m ² .ano
República Tcheca	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Romênia	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Rússia	A++, A+, A, B+, B, C+, C, C-, D e E	% de redução do consumo
Suécia	A, B, C, D, E, F e G	kWh/m ² .ano
Taiwan	Cinco classes qualitativas: Certificado, Bronze, Prata, Ouro e Diamante	Não é apresentado

Fonte: (ICLEI, 2016, p. 122-123)