

JORGE MARIO AVELLA RUIZ

**ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA
IMPLEMENTAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA E SOLAR
FOTOVOLTAICA EM EDIFÍCIOS**

**Guaratinguetá, SP, Brasil
2016**

JORGE MARIO AVELLA RUIZ

ASPECTOS TÉCNICOS, ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DA
IMPLEMENTAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA EM
EDIFÍCIOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Co-orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

**Guaratinguetá, SP, Brasil
2016**

A949a	Avella Ruiz, Jorge Mario Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da implementação de energia eólica e solar fotovoltaica em edifícios / Jorge Mario Avella Ruiz – Guaratinguetá, 2016. 117 f. : il. Bibliografia: f. 103-110 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira Coorientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna 1. Energia - Fontes alternativas 2. Geração de energia fotovoltaica 3. Energia eólica 4. Energia solar I. Título CDU 620.91(043)
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

JORGE MARIO AVELLA RUIZ

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

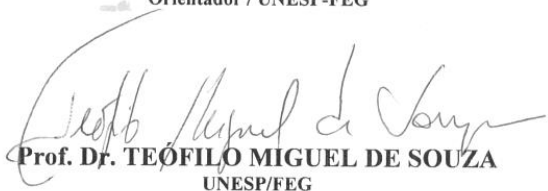
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP/FEG


Prof. Dr. EDERALDO GODOY JUNIOR
UNITAU

Agosto de 2016

DADOS CURRICULARES

JORGE MARIO AVELLA RUIZ

NASCIMENTO	30.06.1990 – BOGOTÁ, COLÔMBIA
FILIAÇÃO	Daniel Alfonso Avella Campos Elsa Maria Ruiz Maldonado
2006/2011	Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica Escola Colombiana de Engenharia Julio Garavito Bogotá, Colômbia
2014/2016	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, Brasil
05-2015/08-2015	Bolsista Projeto ELECON – Dep. de Engenharia Elétrica. Otto-von-Guericke Universität, Magdeburgo, Alemanha

de modo especial, a meu pai, minha mãe e minhas irmãs, que sempre me motivaram e apoiaram nesta aventura, e a minha avô Teresa por tudo o que ela nós têm amado.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai *Daniel*, minha mãe *Elsa Maria*, minhas irmãs *Paola* e *Daniela* e a minha família, que sempre me acompanharam apesar da distância, sempre me ajudando em tudo.

A minha *Cintia*, que desde que conheci ela sempre acredito em mim, me apoiando muito no final do meu mestrado.

Aos meus amigos da Colômbia, especialmente *Carlos*, *Juan Camilo*, *Marco* e *Daniela*, que me incentivaram com a sua alegria.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. José Luz Silveira* e ao meu co-orientador *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna* que me incentivaram e auxiliaram com as minhas dúvidas.

As secretarias da pós-graduação *Renata* e *Cristina* pela sua gentileza e alegria no atendimento.

“Whatever you do will be insignificant, but it is very important that you do it.”
Mahatma Gandhi

AVELLA R., J. M. **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da implementação de energia eólica e solar fotovoltaica em edifícios.** 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Atualmente, governos de todo o mundo estão se preocupando pelos efeitos das economias, indústrias e políticas no meio ambiente, criando regulações para fomentar a utilização de tecnologias menos poluidoras. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o ente federal de promover a implementação de fontes renováveis para a geração de eletricidade. A ANEEL mediante a resolução Nº 482/2012 permite aos usuários finais a instalação de tecnologias renováveis para produzir eletricidade para suas cargas elétricas, incrementando assim a porcentagem de energias alternativas na matriz energética nacional, considerando também os projetos renováveis de grande escala. Neste trabalho, realizou-se um estudo para conhecer a viabilidade da implementação de sistemas híbridos de geração de energia elétrica (SHGEEE) em edifícios, utilizando energia eólica e solar fotovoltaica. A metodologia para a análise técnica consistiu em obter o consumo de energia elétrica de edifícios residenciais de baixa, média e alta renda no Brasil, para assim com base nos recursos eólicos e solares de Fortaleza (CE) e Lagoa Santa (MG), realizar o balanço energético anual e desta forma dimensionar os SHGEE para seis cenários estudados. Baseado nos resultados técnicos, a metodologia econômica analisou a viabilidade financeira de implementar no Brasil os seis SHGEE dimensionados utilizando engenharia econômica para conhecer o investimento dos projetos, os custos da energia elétrica gerada pelas plantas híbridas e o período de retorno do investimento. A análise ambiental fundamentou-se em determinar a quantidade de dióxido de carbono economizado e a eficiência ecológica de cada cenário estudado considerando as fontes de energia da rede elétrica. Os resultados obtidos mostraram que os SHGEE são capazes de fornecer a eletricidade para as cargas do edifício. Os períodos de retorno do investimento dos seis SHGEE dimensionados se encontram dentro da vida útil das plantas. Em termos ambientais, as tecnologias utilizadas nos SHGEE não são totalmente não poluentes, no entanto, comparando com outras fontes de energia, estas têm baixo impacto ambiental. Conclui-se, que as aplicações de energia renováveis para edifícios são viáveis técnica, econômica e ambientalmente no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica. Energia Solar Fotovoltaica. Energias Renováveis. Geração Distribuída. Sistemas Híbridos.

AVELLA R., J. M. **Technical, economical and environmental aspects of the implementation of wind energy and solar photovoltaics energy in buildings.** 2016. 111 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) – Faculty of Engineering of Guaratingueta, São Paulo State University, Guaratingueta, 2016.

ABSTRACT

Nowadays, governments around the world are worried about the effects of economies, industries and environment policies, making them to create regulations to encourage the use of less polluting technologies. In Brazil, the National Electric Energy Agency (ANEEL) is the federal entity to promote the implementation of renewable sources for generating electricity. ANEEL Resolution No. 482/2012 allows end users to install renewable energy sources to produce electricity for their electrical charges, increasing the percentage of alternative energy in the national energy matrix, in addition of renewable projects of large scale. In this work was made a study to know the feasibility of implementing hybrid electricity generation systems SHGEE in buildings, using wind power and solar photovoltaic energy. The methodology for the technical analysis consisted in obtaining the electricity consumption of a low, medium and high income residential building in Brazil, thus based on wind and solar resources in Fortaleza (Ceara State) and Lagoa Santa (Minas Gerais State), performing annual energy balance for dimensioning SHGEE for six scenarios studied. Considering the technical results, the economic methodology analyzed the financial feasibility of implementing in Brazil six SHGEE sized applying economic engineering and determining the project investments, the costs of electricity generated by hybrid plants and the payback period of the investment. In the environmental analysis determined the amount of carbon dioxide saved and the ecological efficiency of each scenario studied considering the sources of utility grid. The results showed that SHGEE are capable of supplying electricity to loads of the building. It is not generated electricity in all months of the year, however, with the normativity, it compensates with the months of surplus production of electricity. The return period of the investment of the six scaled SHGEE are within the lifetime of the plants. In environmental terms, the technology used in SHGEE are not completely non-polluting, nevertheless, compared with other energy sources, they have low environmental impact. In general, renewable energy applications for buildings are feasible technically, economically and environmentally in Brazil.

KEYWORDS: Wind Energy. Solar Photovoltaic Energy. Renewable Energy. Distributed Generation. Hybrid Systems.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	13
LISTA DE TABELAS.....	15
LISTA DE ABREVIATURAS.....	16
LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	17
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 ESTRUTURA DE DISSERTAÇÃO.....	21
2 ENERGIA RENOVÁVEL	23
2.1 ENERGIA EÓLICA	23
2.1.1 Tipos de turbinas eólicas.....	25
2.1.2 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal HAWT	26
2.1.3 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical VAWT	27
2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	30
2.2.1 Tipos de Painéis Solares Fotovoltaicos	31
2.3 SISTEMAS EÓLICOS E SOLARES EM EDIFÍCIOS	33
2.3.1 Energia Solar Fotovoltaica em Edifícios	33
2.3.2 Energia Eólica em Edifícios.....	34
2.3.3 Estudos Realizados Anteriormente.....	35
2.4 LEGISLAÇÃO NO BRASIL	40
3 ANÁLISE TÉCNICA.....	42
3.1 CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO RESIDENCIAL.....	42
3.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO EDIFÍCIO RESIDENCIAL	43
3.3 RECURSO EÓLICO EM FORTALEZA.....	45
3.4 RECURSO EÓLICO EM LAGOA SANTA.....	48
3.5 POTÊNCIA ELÉTRICA EM PLANTA EÓLICA.....	48
3.6 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA WEIBULL E RAYLEIGH	49
3.6.1 Distribuição de Frequência dos Ventos para Fortaleza	50
3.6.2 Distribuição de Frequência dos Ventos para Lagoa Santa.....	51
3.7 RECURSO SOLAR EM FORTALEZA	52
3.8 RECURSO SOLAR EM LAGOA SANTA	55
3.9 POTÊNCIA ELÉTRICA EM PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA	56
3.10 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	56
4 ANÁLISE ECONÔMICA.....	68

4.1	CUSTO DA ELETRICIDADE GERADA PELA PLANTA.....	68
4.1.1	Custo de Manutenção e Operação	68
4.1.2	Fator de Anuidade.....	69
4.2	RENDIMENTO ANUAL ESPERADO	69
4.3	TARIFAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	70
4.3.1	Bandeiras Tarifárias.....	72
4.4	RESULTADOS	72
4.4.1	Resultados para o cenário 1.....	75
4.4.2	Resultados para o cenário 2.....	77
4.4.3	Resultados para o cenário 3.....	80
4.4.4	Resultados para o cenário 4.....	82
4.4.5	Resultados para o cenário 5.....	84
4.4.6	Resultados para o cenário 6.....	87
5	ANÁLISE AMBIENTAL.....	90
5.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	90
5.1.1	Matéria Prima e Fabricação.....	91
5.1.2	Construção.....	91
5.1.3	Operação e Manutenção	91
5.1.4	Reutilização e Reciclagem	92
5.2	IMPACTOS AMBIENTAIS DA ENERGIA EÓLICA	92
5.3	IMPACTOS AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	93
5.4	COMPARAÇÃO AMBIENTAL DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS.....	94
5.5	CO ₂ ECONOMIZADO	95
5.6	EFICIÊNCIA ECOLÓGICA.....	96
5.7	EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DO SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	98
6	CONCLUSÕES.....	100
	REFERÊNCIAS	103
	ANEXO A - Ficha técnica do aerogerador Aeolos-V 10 kW	111
	ANEXO B - Ficha técnica do painel solar fotovoltaico <i>Canadian Solar CS6P-265P</i>.....	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Componentes de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal.....	24
Figura 2.2. HAWT de uma pá, de duas pás e de três pás	27
Figura 2.3. Área transversal dos aerogeradores HAWT e VAWT.....	29
Figura 2.4. VAWT Darreaus, Gorlov (Helicoidal), GiroMill (tipo H) e Savonius	29
Figura 2.5. Componentes do Sistema Solar Fotovoltaico	31
Figura 2.6. Tipos de painéis solares fotovoltaicos: Monocristalino, Policristalino, Fita e CPV.....	32
Figura 2.7. Vista do World Trade Center de Barein.....	35
Figura 2.8. Energia elétrica gerada pelo SHGEE eólico-solar fotovoltaico em um dia típico do mês de Janeiro em Fortaleza.....	37
Figura 3.1. Mapa Eólico do Brasil.....	46
Figura 3.2. Velocidade média mensal dos ventos de Fortaleza para uma altura 50 m.....	47
Figura 3.3. Velocidade média mensal dos ventos de Fortaleza para uma altura 50 m.....	47
Figura 3.4. Velocidade média mensal dos ventos de Lagoa Santa para uma altura 50 m.....	48
Figura 3.5. Densidade de probabilidade de Weibull e Rayleigh	50
Figura 3.6. Densidade de probabilidade de Weibull e Rayleigh para Fortaleza	51
Figura 3.7. Densidade de probabilidade de Weibull e Rayleigh para Lagoa Santa	52
Figura 3.8. Irradiação Solar em Fortaleza	53
Figura 3.9. Mapa Solar do Brasil.....	54
Figura 3.10. Irradiação Solar em Lagoa Santa	55
Figura 4.1. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 1.....	75
Figura 4.2. Período de payback do SHGEE com tarifa convencional cenário 1 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	76
Figura 4.3. Período de payback do SHGEE com tarifa branca média cenário 1 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	77
Figura 4.4. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 2.....	78
Figura 4.5. Período de payback do SHGEE com tarifa convencional cenário 2 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	79
Figura 4.6. Período de payback do SHGEE com tarifa branca média cenário 2 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	79

Figura 4.7. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 3.....	80
Figura 4.8. Período de payback do SHGEE com tarifa convencional cenário 3 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	81
Figura 4.9. Período de payback do SHGEE com tarifa branca média cenário 3 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	81
Figura 4.10. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 4.....	83
Figura 4.11. Período de payback do SHGEE com tarifa convencional cenário 4 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	83
Figura 4.12. Período de payback do SHGEE com tarifa branca média cenário 4 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	84
Figura 4.13. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 5.....	85
Figura 4.14. Período de payback do SHGEE com tarifa convencional cenário 5 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	86
Figura 4.15. Período de payback do SHGEE com tarifa branca média cenário 5 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	86
Figura 4.16. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 6.....	87
Figura 4.17. Período de payback do SHGEE com tarifa convencional cenário 6 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	88
Figura 4.18. Período de payback do SHGEE com tarifa branca média cenário 6 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)	88
Figura 5.1. Emissões produzidas nas etapas do ciclo de vida do SE e SSF	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Eficiência em módulos solares fotovoltaicos	33
Tabela 3.1. Consumo de eletricidade do edifício residencial de baixa renda.....	44
Tabela 3.2. Consumo de eletricidade do edifício residencial de média renda.....	44
Tabela 3.3. Consumo de eletricidade do edifício residencial de alta renda.....	44
Tabela 3.4. Turbinas eólicas VAWT comerciais.....	57
Tabela 3.5. Painéis solares fotovoltaicos comerciais	58
Tabela 3.6. Especificações da turbina eólica Aeolos 10 kW	59
Tabela 3.7. Especificações do módulo Canadian Solar CS6P-265P	59
Tabela 3.8. Número de aerogeradores e painéis solares fotovoltaicos para cada cenário	60
Tabela 3.9. Balanço energético para o cenário 1	61
Tabela 3.10. Balanço energético para o cenário 2	62
Tabela 3.11. Balanço energético para o cenário 3	63
Tabela 3.12. Balanço energético para o cenário 4	64
Tabela 3.13. Balanço energético para o cenário 5	64
Tabela 3.14. Balanço energético para o cenário 6	65
Tabela 3.15. Eletricidade total gerada e créditos de energia por ano para todos os cenários...	66
Tabela 4.1. Tarifas de eletricidade grupo B1 em Fortaleza.....	71
Tabela 4.2. Tarifas de eletricidade grupo B1 em Lagoa Santa.....	71
Tabela 4.3. Investimento em cada cenário (US\$).....	74
Tabela 5.1. Redução Emissões de CO ₂	96
Tabela 5.2. Principais gases de efeito estufa	96
Tabela 5.3. Eficiência ecológica dos cenários estudados	98
Tabela 5.4. Eficiência ecológica dos edifícios estudados.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	Corrente Alternada
ACEE	American Council for an Energy-Efficient Economy
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AWEA	American Wind Energy Association
a-Si	painel solar fotovoltaico de silício amorfo
c-Si	painel solar fotovoltaico monocristalino
CdTe	painel solar fotovoltaico de telureto de cádmio
CIGS	painel solar fotovoltaico de Seleneto - Cobre – Índio – Gálio
CIS	painel solar fotovoltaico de Seleneto - Cobre – Índio – Gálio
COELCE	Companhia Energética do Ceará
CO ₂	dióxido de carbono
(CO ₂) _e	dióxido de carbono equivalente
C _p	coeficiente da potência da eficiência aerodinâmica do rotor.
CPV	painel solar fotovoltaico concentrado
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DC	Corrente Contínua
EEIOA	Extended input-output analysis
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileira
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GWP	Global Warming Potential
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
INMET	Instituto de Meteorologia Brasileiro
LCA	Life Cycle Assessment
MP	Material Particulado
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
p-Si	painel solar policristalino
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia
r-Si	painel solar fotovoltaico de cinta de silício cristalina
SE	Sistema Eólico
SHGEE	Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica
SO ₂	dióxido de enxofre
SSF	Sistema Solar Fotovoltaico
SWEA	Solar Wind Electron Analyzer
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

A	área transversal do rotor	[m ²]
A	área do painel solar fotovoltaico	[m ²]
c	parâmetro de escala na distribuição de probabilidade de Weibull	[m/s]
C_{Elet}	custo da eletricidade da concessionária	[US\$/kWh]
C_{ge}	custo energia gerada pela planta de geração	[US\$/kWh]
$C_{ge_{SE}}$	custo energia gerada pelo SE	[US\$/kWh]
$C_{ge_{SHGE}}$	custo energia gerada pelo SHGEE	[US\$/kWh]
$C_{ge_{SSF}}$	custo energia gerada pelo SSF	[US\$/kWh]
C_{Man}	custo de manutenção da planta de geração	[US\$/kWh]
C_{Ope}	custo de operação da planta de geração	[US\$/kWh]
E_{GSE}	energia elétrica gerada pelo SE	[kWh]
E_{GSHGEE}	energia elétrica gerada pelo SHGEE	[kWh]
E_{GSSF}	energia elétrica gerada pelo SSF	[kWh]
E_{SE}	energia elétrica anual gerada pelo SE	[kWh/ano]
E_{SHGEE}	energia elétrica anual gerada pelo SHGEE	[kWh/ano]
E_{SSF}	energia elétrica anual gerada pelo SSF	[kWh/ano]
f	fator de anuidade	[1/ano]
G_{el}	rendimento anual	[US\$/ano]
H	período equivalente de utilização	[h/ano]
Inv	investimento da planta ou projeto	[US\$]
I_T	irradiância solar	[kWh/m ²]
k	quantidade de anos	[anos]
k	parâmetro de forma na distribuição de probabilidade de Weibull	[-]
P	potência elétrica	[W]
$P_{sec(cons)}$	potência elétrica consumida pelos componentes secundários do SHGEE	[kW]
$P_{Sistema}$	potência elétrica do sistema híbrido	[kW]
Q_i	poder calorífico inferior do combustível PCI	[MJ/kg]
r	taxa anual de juros	[%]
V	velocidade do vento	[m/s]
v	velocidade do vento estimada	[m/s]
$\bar{V}$	velocidade média do vento	[m/s]
v_0	velocidade do vento medida ou de referência	[m/s]
V_{Cin}	velocidade de Partida	[m/s]
z	altura do aerogerador	[m]
z_0	altura de referência	[m]

Símbolos Gregos

α	coeficiente de fricção com a superfície terrestre	[-]
ε	eficiência ecológica	[%]
ε_{SE}	eficiência ecológica do SE	[%]

ε_{SHGE}	eficiência ecológica do SHGEE	[%]
ε_{SSF}	eficiência ecológica do SSF	[%]
ρ	massa específica do ar	[kg/m ³]
σ	parâmetro da distribuição de Rayleigh	[-]
η_p	eficiência de geração de energia elétrica no painel fotovoltaico	[%]
Π_g	indicador de poluição	[kg/MJ]

1 INTRODUÇÃO

A alta demanda energética necessária para a continuidade das atividades industriais, comerciais e residenciais, e a consequente poluição ambiental causada pelas emissões de gases do efeito estufa, têm incentivado estudos na área de geração de energia elétrica a partir de recursos renováveis. Dentre as fontes renováveis de energia mais implementadas atualmente são a energia eólica e solar fotovoltaica. Estas tecnologias estão sendo analisadas para melhorar e aumentar a eficiência energética, assim como a redução dos custos envolvidos.

Em consequência das características de inconstância das fontes renováveis de geração de energia, os sistemas híbridos são implementados com duas ou mais fontes renováveis ou convencionais de energia para fornecer eletricidade o maior tempo possível. As micro redes são ligadas nas linhas de distribuição de energia elétrica para usá-la como armazenamento, em vez de utilizar um sistema de baterias as quais elevam os custos de investimento e manutenção.

A energia solar é considerada a principal fonte de energia não convencional, e a partir desta com ajuda de fenômenos físicos, obtêm-se a energia eólica, energia das marés e da biomassa. Pesquisadores ao redor do mundo têm realizado estudos para melhorar a eficiência de geração de energia elétrica utilizando fontes não convencionais, de forma a desenvolver novas metodologias que auxiliem a expansão das energias renováveis. Em relação à energia eólica, o vento se comporta de forma intermitente, fazendo com que as turbinas eólicas gerem eletricidade em períodos de tempo e não constantemente. A partir da energia solar fotovoltaica, pode ser gerada eletricidade apenas quando houver luz solar (normalmente 6 horas por dia são consideradas nos projetos deste tipo), porém depende de outros fatores, como a cobertura de nuvens, a temperatura ambiente, entre outros, que tornam a geração de eletricidade descontinuada, afetando ao usuário final, em caso da não existência de um sistema de armazenamento de energia como as baterias. Isso também acontece com outras fontes de energias não convencionais. A solução mais rápida seria adicionar um sistema de armazenamento de energia, mas, no entanto, considerando o aspecto econômico, o uso de baterias aumenta significativamente o custo de investimento e de manutenção. Uma alternativa para garantir que o consumidor não tenha intervalos de tempo sem energia elétrica, em consequência da utilização de sistemas renováveis (eólico e solar fotovoltaico) é a concepção de Sistemas Híbridos de Geração de Eletricidade (SHGEE), aumentando a confiabilidade no fornecimento de eletricidade. Para

aplicações em edifícios, tanto a tecnologia de aerogeradores, como a de painéis fotovoltaicos são adequados, pois ambos têm uma adaptação melhor, quando comparado com outras alternativas de energia.

Para o sistema eólico, estudou-se o tipo de aerogeradores com melhores características técnicas a serem implementadas nos terraços e fachadas dos edifícios. Da mesma forma, para o sistema solar, diferentes tipos de painéis fotovoltaicos serão considerados para selecionar a melhor opção para o edifício de estudo.

A implementação de sistemas não convencionais que operem em SHGEE permite a geração descentralizada, melhorando a oferta de distribuição em caso de falha na geração de energia nas grandes usinas e na própria rede elétrica.

Atualmente vem aumentando o interesse dos governos e empresas na geração distribuída usando fontes alternativas de energia para tornar a rede elétrica mais independente e descentralizada. O consumo de combustíveis tradicionais tem causado danos irreparáveis ao meio ambiente, e os recursos hidrelétricos estão cada dia mais escassos em consequência da falta de chuvas, o que tem levado ao aumento de aplicações de energia renovável com vantagens sobre o meio ambiente.

Por outro lado, a alta demanda de eletricidade em edifícios residenciais, comerciais, industriais, governamentais, entre outros, tem indicado a importância da implementação do SHGEE, o que justifica o impacto dessa pesquisa para a dissertação de mestrado.

O SHGEE aqui estudado inclui duas tecnologias, Eólica e Solar Fotovoltaica, que foram analisadas em conjunto, buscando estudos técnicos, econômicos e ambientais, de modo a conhecer a viabilidade da aplicação em edifícios. Neste trabalho a sigla SHGEE referencia-se ao sistema híbrido de geração de energia elétrica composto por aerogeradores eólicos e painéis solares fotovoltaicos. A energia eólica tem um potencial interessante no panorama brasileiro, principalmente para aplicações nas regiões do Nordeste, Sul, e no litoral do país, onde a média da velocidade dos ventos é relativamente alta, sendo capaz de gerar energia limpa. Por outro lado, a energia solar fotovoltaica é muito promissora para o Brasil, por ter altos índices de irradiação em todo o país durante o ano todo.

Ambas as fontes alternativas têm grande potencial para reduzir as emissões de dióxido de carbono equivalente na atmosfera, e, portanto, contribuem para a redução do aquecimento global. O desenvolvimento de SHGEE nessa modalidade (Eólico – Solar Fotovoltaico) para

aplicações em edifícios tem alto grau de importância para o Brasil, contribuindo para o desenvolvimento de edificações que buscam o “zero em emissões”, de forma a contribuir para a diminuição real das emissões de poluentes e prover de energia elétrica de forma autossustentável.

Nesse trabalho, pretende-se efetuar estudo de viabilidade da implantação de SHGEE com aplicação de energia eólica e solar fotovoltaica para edifícios residenciais, onde as plantas híbridas estarão interligadas à rede local de distribuição. Em caso de geração excedente ou déficit de eletricidade, o SHGEE pode vender ou comprar para a concessionária, dependendo da necessidade. As localizações consideradas para o edifício em estudo serão Fortaleza no estado de Ceará, e Lagoa Santa no estado de Minas gerais tendo em vista que os recursos eólicos e solares são significativos durante todo ano, nestes locais.

1.1 ESTRUTURA DE DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em seis capítulos. Na introdução é apresentada uma descrição mais detalhada dos objetivos de estudo deste trabalho, a justificativa pela escolha do tema, e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo encontra-se a descrição das energias renováveis estudadas neste trabalho, sendo a energia eólica e energia solar fotovoltaica, focalizando nos tipos de turbinas eólicas e painéis solares fotovoltaicos que podem ser implementados em edifícios. Posteriormente, é apresentado alguns edifícios no mundo que já dispõem de plantas de eletricidade com fontes de energia não convencional.

No capítulo três encontra-se a análise técnica dos sistemas híbridos incluindo o desenho realizado a partir da estimação do consumo energético de edifícios residenciais de baixa, mediana e alta renda de 10 andares. Adicionalmente, são apresentadas as características dos recursos eólicos e solares de Fortaleza e Lagoa Santa, para finalmente dimensionar o SHGEE mais adequado para cada edificação.

O capítulo quatro, baseia-se na análise econômica dos SHGEE, uma vez escolhido o tipo e quantidade de turbinas eólicas e painéis solares fotovoltaicos. Aplicando a metodologia de engenharia econômica no SHGEE, pretende-se conhecer os custos de investimento, o custo da

eletricidade gerada pelo SHGEE, e o período de retorno do investimento, para assim determinar a viabilidade econômica do projeto.

O capítulo cinco tem como objetivo analisar os impactos ambientais do SHGEE. Utilizando os estudos ambientais para o cálculo da eficiência ecológica, determinando quão poluidor são as tecnologias eólicas e solares fotovoltaicas que compõem os sistemas híbridos, comparando com outras fontes de geração de eletricidade.

E por último, no capítulo seis são apresentadas as conclusões finais do estudo para a dissertação, mostrando em forma geral os resultados desenvolvidos em cada uma das análises realizadas dos SHGEE.

2 ENERGIA RENOVÁVEL

As fontes de energia renovável estão sendo cada vez mais exploradas em zonas urbanas. Um SHGEE combina duas ou mais fontes de eletricidade, normalmente fontes de energia solar e eólica com um sistema de armazenamento adicional. Uma vantagem do SHGEE é o aumento da confiabilidade na geração de energia elétrica. A combinação de energia solar com energia eólica é um dos mais atraentes SHGEE para a produção de eletricidade com sua baixa contaminação ambiental (comparando com os combustíveis fósseis) e sua economia promissora. A manutenção e boas condições técnicas são de grande importância na implementação do sistema (ABARKAN et al., 2013).

Estes dois tipos de fontes renováveis são os mais adequados para ser implementados em comunidades isoladas como para áreas urbanas. A pesquisa desenvolvida foi realizada para áreas urbanas, mais específica para edifícios residenciais com o objetivo de fornecer a demanda de eletricidade requisitada, ligados diretamente à rede de distribuição.

2.1 ENERGIA EÓLICA

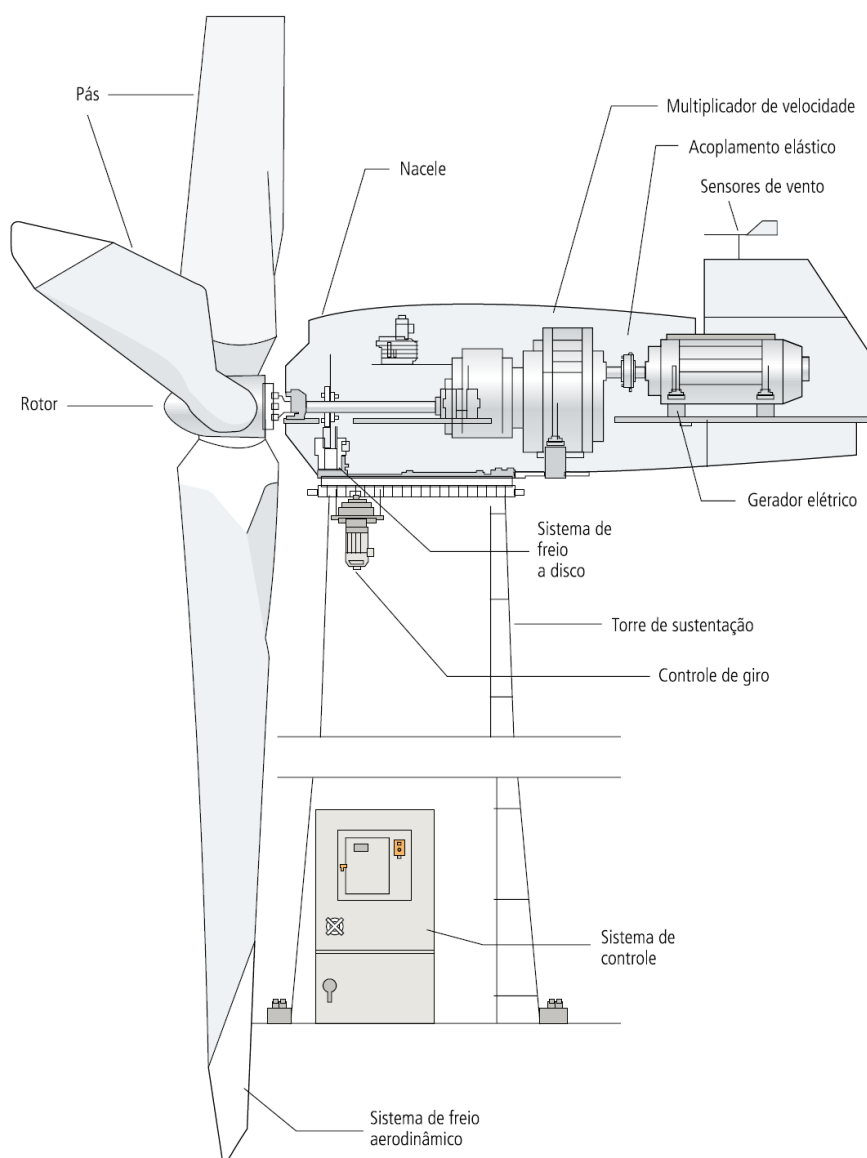
A energia eólica, assim como a energia solar, são exemplos de energias renováveis em ascensão. Em consequência da diferença de temperaturas no centro do planeta e nos polos, causada pela diferença da irradiação solar, criam-se as correntes de ar que se movem de lugares de maior temperatura a lugares mais frios. A energia eólica consiste em duas etapas. A primeira etapa é a conversão de energia cinética do vento em energia mecânica usando as pás da turbina, para que na segunda etapa, através de um gerador elétrico, converta a energia mecânica em energia elétrica. A energia eólica é amplamente disponível no mundo. Este tipo de energia possui uma poluição significativamente menor que uma usina termoeletrica, em consequência das zero emissões de gases de efeito estufa na geração de eletricidade, e também não produz outros poluentes que causem chuva ácida e radioatividade. (BOYLE, 2004).

Um sistema de energia eólica utiliza um aerogerador para produzir a energia elétrica. A turbina eólica (eixo horizontal) possui três partes que são a torre, o rotor, e a nacelle (os aerogeradores de eixo vertical possuem uma torre e rotor onde se encontram as pás). Cada um

deles tem uma função específica e importante para o funcionamento de todo o sistema eólico. A torre é o suporte do rotor e da nacela. Já em relação ao rotor, ele contém as pás que aproveitam a energia cinética do ar para seu movimento. E por último, na gôndola ou nacela, encontram-se principalmente a caixa de velocidades, o gerador elétrico, os sistemas de controle, os sensores de velocidade e direção do ar e os freios. Na

Figura 2.1 podem-se observar os componentes descritos acima de uma turbina eólica de eixo horizontal.

Figura 2.1. Componentes de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal



2.1.1 Tipos de turbinas eólicas

Existem dois tipos de turbinas eólicas segundo o tipo de eixo de rotação: turbinas de eixo horizontal e de turbinas de eixo vertical, cada uma com suas vantagens e desvantagens. As turbinas de eixo horizontal são as mais usadas no mundo, conhecidas por terem três pás. Elas são implementadas em projetos de grande escala, pois podem utilizar ventos mais fortes em grandes altitudes. Porém, as turbinas de eixo horizontal são de difícil instalação e transporte devido a seu grande tamanho. Este tipo de turbinas requer um sistema de posicionamento do rotor para situar-se diretamente ao vento fazendo possível a rotação. Para turbinas de eixo horizontal de pequena escala o sistema de posicionamento é uma aleta e para as de grande tamanho utiliza-se um motor que dependendo dos sensores de direção do vento ajustam a posição do rotor. Por outro lado, as turbinas de eixo vertical são usadas em aplicações de média e de pequena escala, sendo possível a instalação em edifícios. Em detrimento da não necessidade da instalação diretamente ao vento, as turbinas de eixo vertical podem girar recebendo correntes de ar em qualquer direção (BOYLE, 2004).

Existe outro tipo de classificação para as turbinas eólicas que depende do local da instalação. Quando o equipamento é localizado sobre terra firme denominam-se *on-shore*. Quando o aerogerador é instalado em plataforma marítima a planta recebe o nome de *off-shore*. As turbinas eólicas *off-shore* podem gerar maior quantidade de eletricidade dado que o recurso eólico no mar é melhor que em terra. Por outro lado os aerogeradores *off-shore* apresentam maiores custos de produção, transporte e de instalação (BOYLE, 2004).

De acordo com Roberts (2012), segundo a capacidade de geração de potência elétrica, as turbinas eólicas são classificadas em pequeno, médio e grande porte. Os aerogeradores de pequeno porte têm uma potência elétrica até 20 kW e são utilizadas em residências, fazendas e aplicações isoladas. As turbinas eólicas de médio porte produzem entre 20 e 250 kW, sendo caracterizado pela utilização em sistemas híbridos e de geração distribuída. Por fim, turbinas de grande porte têm uma capacidade maior que 250 kW, sendo instaladas em parques eólicos interligados normalmente na rede de transmissão de eletricidade.

2.1.2 Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal HAWT

As turbinas eólicas de eixo horizontal ou *Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)*, são as mais utilizadas em todo mundo. A rotação de eixo do aerogerador é horizontal e paralelo com o chão. É capaz de gerar mais eletricidade por uma dada quantidade de vento. É adequada para aplicações de maior escala. As turbinas HAWT possuem um peso elevado, sendo inconveniente a implementação em locais com ventos de alta velocidade e provenientes de todas as direções. As HAWT só são propulsadas por ventos em uma direção específica. Não é apropriada para gerar eletricidade com velocidade de vento menor a 6 m/s e geralmente tem uma velocidade máxima de corte de 25 m/s. Este tipo de aerogeradores não podem resistir a condições extremas meteorológicas como o gelo, a chuva congelada, a neve pesada, como também a ventos fortes acima de 50 m/s. Quase todas são de auto partida. O transporte e a instalação são as etapas de maior trabalho devido ao tamanho dos componentes da turbina eólica (ISLAM; MEKHILEF; SAIDUR, 2013).

É comum encontrar aerogeradores HAWT de três pás. No final da década de 1980 e começo da década de 1990, era normal encontrar turbinas eólicas no mercado com uma pá e duas pás. O desenho de uma lâmina caracteriza-se por ser o mais eficiente em termos estruturais para a pá do rotor, tem a maior dimensão de secção com toda a superfície de área instalada em uma única parte. No entanto, é necessário um contrapeso para balancear o rotor. A eficiência aerodinâmica é melhorada ao aumentar o número de pás. Quando se adiciona uma pá ao aerogerador de uma pá, a eficiência aerodinâmica aumenta em 6%, porém aumentando de duas pás para três a eficiência incrementa só 3%. Atualmente no mercado comercial, não existem aerogeradores de uma pá ou duas pás pelos impactos visuais. A turbina eólica de três pás é um bom desenho, porque as pás não produzem muitas perturbações aerodinâmicas para a pá seguinte e captura uma quantidade considerável de energia dos ventos (ISLAM; MEKHILEF; SAIDUR, 2013). Na Figura 2.2, observa-se os aerogeradores HAWT de uma pá, duas e três pás.

Figura 2.2. HAWT de uma pá, de duas pás e de três pás



Fonte: Elaboração própria, com adaptação de imagens da internet¹.

2.1.3 Turbinas Eólicas de Eixo Vertical VAWT

As turbinas eólicas de eixo vertical ou *Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)*, são caracterizadas por terem a rotação do eixo na posição vertical e perpendicular com o solo. Este tipo de turbina eólica gera até 50% mais eletricidade no ano em comparação com os aerogeradores convencionais com a mesma área transversal do rotor. As VAWT são adequadas para aplicações de pequena escala e residenciais. São leves e tem um bom funcionamento tanto para baixas velocidades de vento como para ventos de altas velocidades. As VAWT são aerodinamicamente mais eficientes que as HAWT (ISLAM; MEKHILEF; SAIDUR, 2013).

Os aerogeradores deste tipo são acionados por ventos que chegam de todas as direções, inclusive as turbinas podem funcionar quando os ventos sopram de cima para baixo, o que as tornam perfeitas para aplicações urbanas (ISHUGAH et al., 2014). Este tipo de aerogerador não precisa de mecanismo para direcionar-se segundo o vento (ISLAM; MEKHILEF; SAIDUR,

¹TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE UMA PÁ. Disponível em: <<http://www.wind-energy-the-facts.org/images/3-4.jpg>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE DOIS PÁS. Disponível em: <<http://www.windenergysolutions.nl/sites/default/files/Glaick-Farm,-WES250-%285%29.jpg>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE TRÊS PÁS. Disponível em: <http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/variable-speed-wind-turbine-20877-2843369.jpg>. Acesso em: 13 ago. 2015.

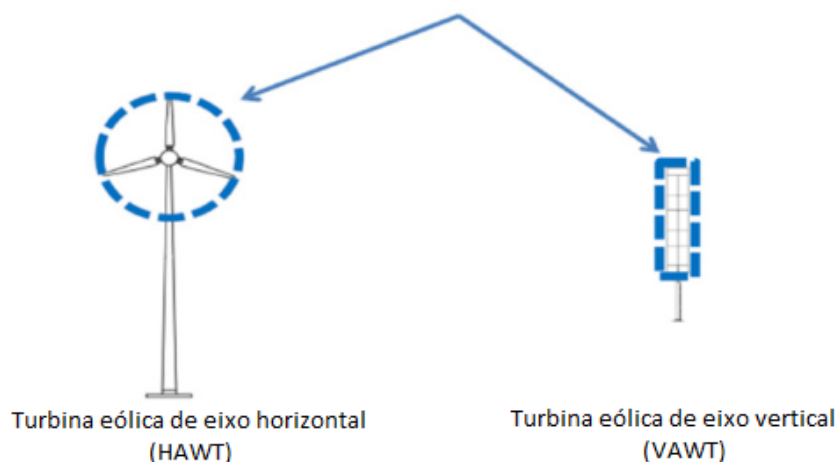
2013). As turbinas VAWT são capazes de gerar eletricidade em ventos baixos com 2 m/s, e continua gerando eletricidade com velocidades de vento altas, até 65 m/s segundo o tipo de modelo.

As turbinas de eixo vertical resistem à condições extremas meteorológicas como o gelo, chuva congelada, neve pesada, assim como a ventos acima de 60 m/s. Uma característica importante é que as turbinas possuem baixo torque de partida e pode requerer energia para começar a girar, além do baixo custo de produção e de transporte (ISLAM; MEKHILEF; SAIDUR, 2013). Uma vantagem para este tipo de aerogerador é que o gerador elétrico e a caixa de velocidades normalmente são instaladas no nível do solo facilitando a instalação, manutenção e serviço, adequando-se a implementações em edifícios para ambientes urbanos (ISHUGAH et al., 2014). De acordo com Islam, Mekhilef e Saidur (2013), as VAWT podem dominar o mercado de energia eólica por necessitarem de um espaço menor para instalação e produzirem maior quantidade de eletricidade comparada com as HAWT.

A densidade de potência das VAWT é maior que as HAWT por causa que as dimensões da turbina (largura e altura) não estão distribuídas de igual forma, o que significa que aumentar a área transversal do rotor depende somente da altura, na maioria dos casos, enquanto que nas HAWT, é necessário aumentar a área transversal do rotor para melhorar a densidade de potência, na qual incrementa também a poluição causada pela energia utilizada na etapa de produção do aerogerador (ISLAM; MEKHILEF; SAIDUR, 2013).

A Figura 2.3 apresenta a diferença entre as áreas transversais dos dois tipos de aerogeradores. Nota-se que a área transversal das HAWT representa a área de uma circunferência, e a área transversal das VAWT um retângulo. Ao aumentar a área transversal de um aerogerador é possível incrementar a produção de eletricidade, em virtude de que a turbina eólica vai captar maior quantidade de fluxo de ar.

Figura 2.3. Área transversal dos aerogeradores HAWT e VAWT



Fonte: Adaptado de (ISLAM; MEKHILEF; SAIDUR, 2013).

Os principais tipos de turbinas eólicas VAWT são a Darrieus, Gorlov (Helicoidal), GiroMill, Savonius. Na Figura 2.4, observa-se os aerogeradores VAWT principais.

Figura 2.4. VAWT Darreaus, Gorlov (Helicoidal), GiroMill (tipo H) e Savonius



Fonte: Elaboração própria, com adaptação de imagens da internet².

²TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL: DARRIEUS. Disponível em: <http://data.wind-turbine-models.com/fotos/800/turbine-Dornier_Darrieus55_565.jpg>. Acesso em: 17 ago. 2015.
 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL: GORGLOV-HELICOIDAL. Disponível em: <<http://winddose.com/images/turbine%20technologies/gorlov.jpg>>. Acesso em: 17 ago. 2015.
 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL: GIROMILL-TIPO H. Disponível em: <<http://www.2020solar.co.uk/uploads/WG-1K5/WG-1K5.jpg>>. Acesso em: 17 ago. 2015.
 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL: SAVONIUS. Disponível em: <http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/vertical-axis-small-wind-turbine-onshore-savonius-rotor-62275-8011231.jpg>. Acesso em: 17 ago. 2015.

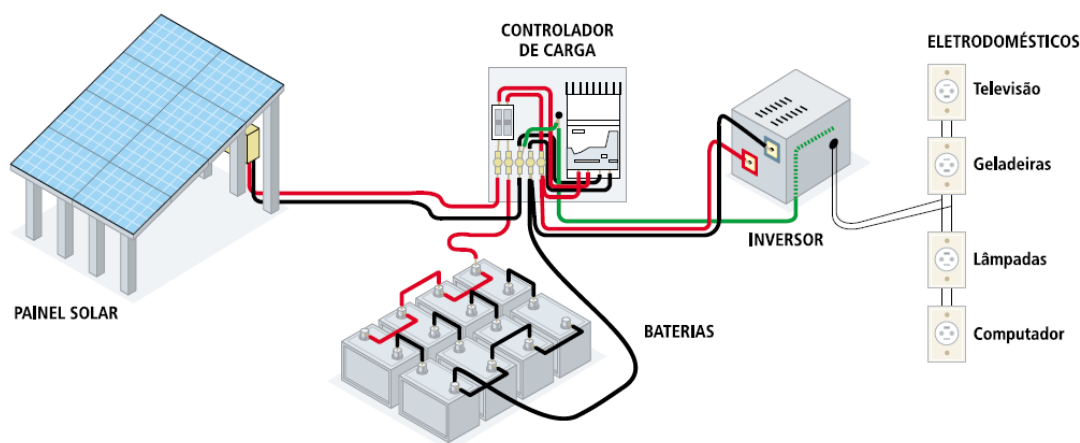
2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar é a principal fonte de energia renovável. Esta fonte de energia é transmitida desde o sol pela radiação produzida pelas fusões químicas a aproximadamente 6000 °C dos átomos de hidrogênio formando hélio (BOYLE, 2004). A radiação solar pode ser aproveitada com diferentes tecnologias, sendo as mais importantes os coletores solares e os painéis fotovoltaicos.

Os coletores solares são utilizados para a calefação de líquidos, em sua maioria água, para aplicações de geração de vapor, que pode ser utilizado para mover uma turbina de vapor e gerar eletricidade, entre outras aplicações.

Os painéis fotovoltaicos são compostos pela união de células fotovoltaicas. Uma pequena placa de material semicondutor é tratada cuidadosamente para formar um campo elétrico, com um lado positivo (semicondutor tipo P) e o outro negativo (semicondutor tipo N). Quando a energia da luz em forma de fótons colide com a célula solar, os elétrons são deslocados dos átomos no material semicondutor. Esse movimento de elétrons gera uma corrente elétrica ou eletricidade (KNIER, 2002). Um sistema fotovoltaico, além de ter painéis fotovoltaicos, precisa de outros componentes para poder fornecer eletricidade aos dispositivos ou cargas. Na Figura 2.5, observa-se que é necessário um controlador de carga para administrar o carregamento e o descarregamento do sistema de armazenamento de energia. O inversor é um componente crítico nos sistemas solares fotovoltaicos. Este é utilizado para a conversão de energia elétrica em corrente contínua DC a corrente alternada AC, na qual pode ser injetada na rede elétrica comercial, ou consumida localmente (CUCCHIELLA; D'ADAMO, 2012).

Figura 2.5. Componentes do Sistema Solar Fotovoltaico



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil da ANEEL (2005).

2.2.1 Tipos de Painéis Solares Fotovoltaicos

Os sistemas solares fotovoltaicos podem ser classificados pelo tipo de célula. O primeiro tipo é baseado em silício, onde estão presentes a monocristalina (c-Si), policristalina (p-Si), a fita de silício cristalina (r-Si), silício amorfo (a-Si). O segundo tipo não é baseado em silício como o telureto de cádmio (CdTe), Cobre – Índio – Gálio selenide ou disselenide (CIS ou CIGS). O último tipo de sistemas fotovoltaicos são os novos conceitos de dispositivos como os painéis solares concentrados (CPV).

Atualmente, existem no mercado quatro tipos de módulos fotovoltaicos (Figura 2.6). Os quais são de monocristalino de silício, policristalino de silício (multicristalino), a película fina, e do tipo de concentrador solar (CUCCHIELLA; D'ADAMO, 2012).

A primeira geração de painéis fotovoltaicos foram os de silício cristalino. As tecnologias baseadas em silício são confiáveis, e têm obtido sucesso na inserção do mercado tanto para aplicações isoladas como para aplicações ligadas na rede de eletricidade. As placas de silício necessárias para produzir os painéis fotovoltaicos são muito delicadas, revelando a fragilidade do processo, além do consumo de energia, incrementando o custo de produção (CUCCHIELLA; D'ADAMO, 2012).

A segunda geração, foi desenvolvida com o intuito da diminuição de custos de fabricação. Aqui encontra-se as películas finas. Esta tecnologia é elaborada por camadas finas de material foto-

ativo sobre vidro ou uma película flexível com silício amorfo, seleneto – cobre – índio – gálio ou telureto de cádmio como semicondutor. A película fina tem menor probabilidade de quebrar devido a sua flexibilidade. No entanto, este tipo de tecnologia fotovoltaica tem uma menor eficiência de conversão de energia se comparada com a primeira geração (CUCCHIELLA; D'ADAMO, 2012).

A terceira geração de tecnologia solar tem sido pesquisada e estudada com o objetivo de ter maior eficiência, com menores custos em relação aos da primeira e segunda geração. As células fotovoltaicas orgânicas e tinturas sensíveis solares fazem parte desta família (CUCCHIELLA; D'ADAMO, 2012).

O desempenho dos painéis solares fotovoltaicos é normalmente descrito em termos da eficiência de conversão de energia. A eficiência de uma célula solar relaciona a porcentagem de energia solar incidente que a célula converte em eletricidade sobre condições padrões. A eficiência elétrica pode variar com relação à temperatura do módulo fotovoltaico. A Tabela 2.1 apresenta as eficiências de conversão de energia dos tipos de módulos anteriormente explicados.

Figura 2.6. Tipos de painéis solares fotovoltaicos: Monocristalino, Policristalino, Fita e CPV



Fonte: Elaboração própria, com adaptação de imagens da internet³.

³PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO: CPV. Disponível em: <http://solartribune.com/wp-content/uploads/2012/05/credited_SolFocus_CPV-zoom.jpg>. Acesso em: 25 ago. 2015.
PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO: FILME FINO. Disponível em: <http://www.unimaxpower.com/wp-content/uploads/2014/12/Thin_Film_Solar_Panel_UMP.jpg>. Acesso em: 25 ago. 2015.

Tabela 2.1. Eficiência em módulos solares fotovoltaicos

Tipo de módulo	Eficiência da célula [%]	Eficiência de módulo [%]
Silício Monocristalino	14-19	16
Silício Policristalino	13-17	14
Silício Amorfo	6-8	6
Telureto de Cádmio	7-11	8
Cobre-Índio-Gálio Selenide	8-13	10

Fonte: EPIA. Solar generation 6 - Solar photovoltaic electricity empowering the world (2011).

Os diferentes tipos de células fotovoltaicas anteriormente descritas são de junção simples, o que significa que possuem somente um tipo de material semicondutor. Estas células solares tem uma eficiência teórica máxima de 34%. Existem também as células solares com muitas junções, que se denominam multi-junção. Cada junção trabalha com um diferente comprimento de onda, reduzindo assim as perdas na conversão de energia (CUCCHIELLA; D'ADAMO, 2012). A *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)* calcula que as células de multi-junção podem chegar a ter uma eficiência maior de 42%, o qual é muito maior que as placas solares de primeira e segunda geração.

2.3 SISTEMAS EÓLICOS E SOLARES EM EDIFÍCIOS

2.3.1 Energia Solar Fotovoltaica em Edifícios

Os sistemas de geração fotovoltaicos podem ser tanto isolados, instalados em áreas remotas e longe das linhas de distribuição elétrica como em postes, torres de comunicação e comunidades sem acesso à eletricidade; como conectados à rede, que pode ser tanto em usinas centralizadas ou em ambientes urbanos, próximo ao ponto de consumo. Esta última modalidade é uma forma de geração distribuída e recebe o nome de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Por estar conectados à rede, não precisam de baterias para armazenar a eletricidade, já que essa pode ser obtida da própria rede. E o excesso de energia produzido poderá ser injetado na rede,

PAINEL	SOLAR	FOTOVOLTAICO:	MONOCRISTALINO.	Disponível	em:
http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/monocrystalline-photovoltaic-module-standard-54792-5002765.jpg . Acesso em: 25 ago. 2015.					
PANEIL	SOLAR	FOTOVOLTAICO:	POLICRISTALINO.	Disponível	em:
https://www.solarquotes.com.au/img/polycrystalline-solar-array.jpg . Acesso em: 25 ago. 2015.					

gerando créditos que poderão ser utilizados quando o consumo for superior à geração (RÜTHER, 2004).

Uma das vantagens da utilização da energia fotovoltaica é a integração dos painéis com edifícios, através do conceito de Building Integrated Photovoltaics (BIPV) e Building Adapted Photovoltaics (BAPV), nos quais os painéis desempenham um papel duplo, sendo tanto geradores de eletricidade, como item estrutural do edifício, como em partes do telhado ou da fachada, reduzindo custos de materiais, sendo ideais para a geração de energia em edifícios com SHGEE. (LIMA, 2012).

2.3.2 Energia Eólica em Edifícios

A integração de turbinas eólicas em edifícios pode ser classificada em três tipos (MÜLLER, JENTSCH e STODDART, 2009):

- Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal Integradas à Edificação;
- Turbinas Eólicas de Eixo Vertical Integradas à Edificação;
- Turbinas Eólicas Adicionadas na Edificação (do inglês, *Building Augmented Wind Turbines*).

Os dois primeiros tipos são os mais comuns, e podem ser instaladas em edifícios existentes, como no caso de pequenas turbinas instaladas no telhado de edifícios. No caso de turbinas incrementadas pela edificação, estas devem fazer parte do edifício, desde a sua concepção, pois utilizam o projeto arquitetônico para aumentar sua geração, através de um formato do edifício que canalize o vento para as turbinas. Este efeito, associado à altura do edifício pode aumentar consideravelmente a geração de energia das turbinas instaladas em ambiente urbano.

O projeto WINEUR levantou uma série de recomendações para a utilização de turbinas eólicas em edifícios. Além da velocidade média dos ventos acima de 5,5 m/s, ele sugere que:

- O mastro da turbina ou o telhado do edifício deve ser 50% mais alto do que os objetos vizinhos;
- As turbinas devem ser posicionadas próximo ao centro do telhado e do lado da direção predominante dos ventos;

- A parte mais baixa do rotor deve estar ao menos 30% acima do telhado do edifício;
- Se possível, orientar o edifício para a direção predominante do vento e com este lado inclinado de forma a aumentar a velocidade do vento (utilizando o conceito de Turbinas Eólicas Adicionadas na Edificação).

Atualmente, alguns edifícios dispõem de tecnologias para geração de eletricidade por meio de energias renováveis em seus telhados, fachadas e arquitetura, ou mesmo em áreas planas do condomínio. Um exemplo é o World Trade Center de Barein, o qual possui duas torres que foram desenhadas aerodinamicamente para concentrar o fluxo de ar para as três turbinas eólicas HAWT de 29 m de diâmetro que unem as torres (Figura 2.7) (MÜLLER; JENTSCH; STODDART, 2009).

Figura 2.7. Vista do World Trade Center de Barein



Fonte: www.layoverguide.com⁴.

2.3.3 Estudos Realizados Anteriormente

Al-Salaymeh et. al. (2010) realizam um estudo técnico e econômico da utilização de sistemas solares fotovoltaicos em edifícios residenciais na Jordânia, especificamente para um apartamento residencial na cidade de Amam. A metodologia empregada por eles consiste em

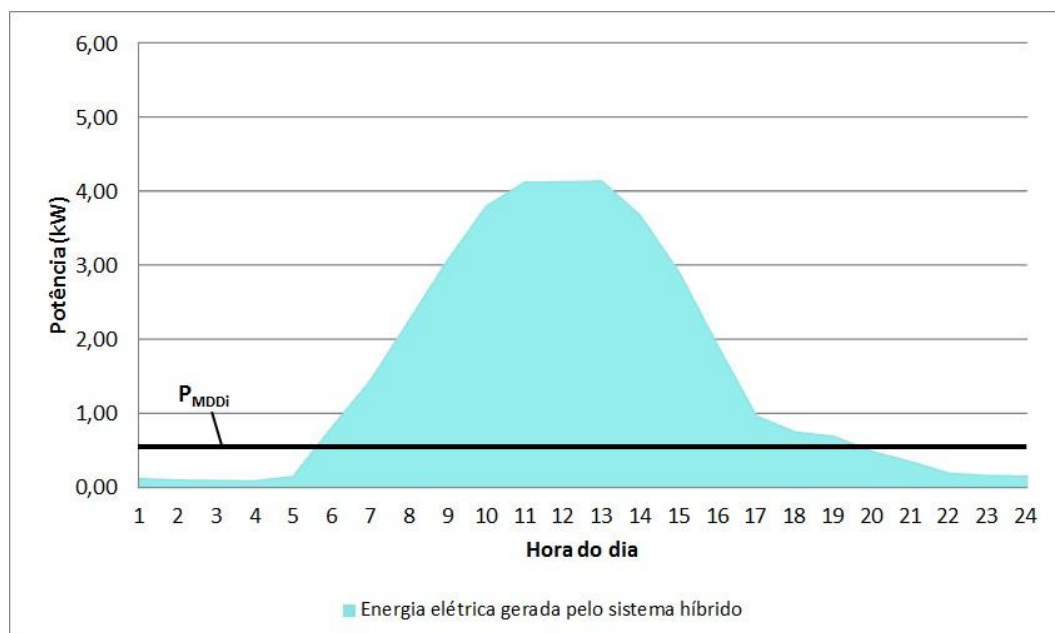
⁴BAHRAIN WORLD TRADE CENTER BUILDING. Disponível em: <<http://www.layoverguide.com/wp-content/uploads/2011/12/Bahrain-World-Trade-Center-in-Bahrain.jpg>>. Acesso em: 2 oct. 2015.

obter o consumo médio mensal de eletricidade do apartamento, o qual está ao redor de 392,6 kWh. Foram coletados dados por três anos da irradiação solar global, temperatura, e horas de sol da cidade de Amam para conhecer o potencial solar no local. Consequentemente, os autores explicam a tarifação de Aman a qual varia dependendo do consumo mensal de eletricidade. Para o dimensionamento, Al-Salaymeh et. al. (2010) começam calculando a energia gerada pelo sistema solar e a quantidade de módulos fotovoltaicos baseados na carga diária do apartamento e nas perdas do inversor. O sistema solar fotovoltaico neste caso é isolado, sendo necessário baterias, onde os autores calculam a corrente elétrica para carregar as baterias. Com base nesses cálculos, os autores escolhem os componentes do sistema de geração. Na estimativa econômica, os autores calculam o *payback* dividindo o investimento total no preço anual da eletricidade consumida, resultando em 51 anos o tempo para recuperar a inversão. Os autores incluem na análise econômica a variação do preço da energia elétrica, reduzindo assim o *payback* até 17 anos para um incremento do 3% da taxa de inflação da eletricidade. Al-Salaymeh et. al. (2010), concluem que um sistema fotovoltaico por enquanto não é economicamente viável pelo preço alto dos componentes fotovoltaicos, e que este tipo de sistema pode ser implementado em comunidades isoladas onde ainda não existe rede de eletricidade.

Matos (2013) realiza um estudo de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento de energia elétrica através do hidrogênio e banco de baterias. A metodologia desenvolvida por Matos consiste em coletar os dados eólicos e solares para a cidade de Fortaleza do Atlas Solarimétricos do Brasil, do Atlas Eólico do Brasil, de CRESEBS, SWEA (NASA), EMBRAPA e FUNCEME, utilizando unicamente os dados da CRESEBS para determinar a eletricidade produzida pelos SHGEE. A autora recolhe dados dos fabricantes de aerogeradores, de painéis fotovoltaicos e de eletrizador para depois escolher o componente para o sistema híbrido e assim poder calcular a energia gerada pela turbina eólica, pelos módulos solares, e a energia necessária para produzir hidrogênio e a energia armazenada pelo banco de baterias. Matos também calcula as toneladas de CO₂ evitadas com a utilização do sistema híbrido e as quantidades de casas que podem ser fornecidas com a planta de geração. A autora adotou o consumo residencial médio mensal de 60 kWh do Estado do Ceará segundo a COELCE. Matos escolheu o aerogerador de eixo horizontal de potência elétrica de 5 kW o modelo GRW555 da Enersud e o painel solar fotovoltaico de 260 Wp da empresa *Yingli Solar* comercializados no Brasil. Para o sistema de armazenamento, Matos (2013) realizou um balanço energético diário,

obtendo dados diários dos recursos eólicos e solares do software *HOMER*, e assim calculando a energia elétrica gerada cada hora (Figura 2.8), onde a linha de P_{MDDi} representa a potência média diária disponibilizada para uso. A área abaixo da linha P_{MDDi} é a energia que deve ser fornecida pelo sistema de armazenamento (baterias ou hidrogênio). A autora considerou que o balanço energético diário é igual a zero, isto quer dizer que a eletricidade excedente diária vai ser consumida. Os resultados apresentados por Matos, mostram que o aerogerador de 6 kW de potência nominal produz uma média mensal de 378,8 kWh, e que o subsistema solar fotovoltaico tem uma potência de 5 kWp, sendo necessários 20 módulos de 260 Wp da *Yingli Solar*, gerando uma média mensal de 881,0 kWh. Assim o SHGEE produz uma média mensal de 1259,8 kWh de eletricidade. Esta energia elétrica pode atender aproximadamente a 17 famílias quando o sistema de armazenamento é um banco de baterias. No caso do sistema de armazenamento composto por tanques de hidrogênio, o SHGEE fornece eletricidade à 11 famílias. A utilização deste tipo de tecnologia pode evitar 12,1 e 18,7 ton CO₂ para o armazenamento com o sistema de hidrogênio e banco de baterias respectivamente.

Figura 2.8. Energia elétrica gerada pelo SHGEE eólico-solar fotovoltaico em um dia típico do mês de Janeiro em Fortaleza



Fonte: (MATOS, 2013).

Rohani e Nour (2014) elaboram um estudo para modelar e desenhar um sistema híbrido com fontes renováveis para uma área isolada em Ras Musherib em Abu Dhabi. O sistema desenhado é composto por um arranjo de painéis solares fotovoltaicos, turbinas eólicas, geradores à diesel e baterias. A metodologia aplicada neste estudo consistiu em adquirir os dados do recurso eólico, solar e o consumo de eletricidade das cargas que são de 500 kW, 1 MW e 5 MW para 250, 500 e 2500 casas respectivamente. Uma vez obtido os dados dos recursos e consumo de eletricidade, os autores apresentam os aerogeradores, o módulo solar fotovoltaico e o gerador diesel escolhido, além das equações para cada subsistema, onde é importante ressaltar que para a determinação da energia gerada pela turbina eólica é incluído o cálculo da massa específica do ar que depende da altitude do local de instalação. Rohani e Nour optam por turbinas eólicas de eixo horizontal, o modelo V82 de 1.65 MW da *Vestas* para as cargas 1 MW e 5 MW, e o aerogerador de 250 kW da *Furlander* para a carga de 500 kW. Para o painel solar fotovoltaico utilizaram o módulo da *Sharp* de 240 W, o gerador diesel da série *Cummins* de 1 MW de potência, e as baterias de referência 4KS 25P de *Rolls Surrete* com uma capacidade máxima de 1877 Ah. Os autores utilizam o software *HOMER* para otimizar a operação do SHGEE com base nos custos dos componentes da planta, a velocidade dos ventos e a irradiação solar para garantir eletricidade para as cargas. Para o sistema com carga de 500 kW, o SHGEE é composto por dois geradores diesel de 500 kW, três aerogeradores *Furlander*, um arranjo de 500 kW de painéis fotovoltaicos, um banco de baterias de 100 kW e um inversor de 250 kW para produzir 5.005,98 MWh/ano. O SHGEE para a carga de 1MW inclui duas turbinas eólicas *Vestas*, um gerador diesel de 1500 kW e um de 500 kW, gerando 13.421,97 MWh/ano. Por último, o SHGEE com carga de 5 MW consiste em dez aerogeradores *Vestas*, um gerador diesel de 6000 kW e um de 4000 kW obtendo um total de 66.497,28 MWh/ano. Cabe ressaltar que unicamente na configuração para uma carga de 500 kW é utilizado um arranjo de módulos solares fotovoltaicos. Nos três casos analisados se reduzem as emissões de CO₂ em 37%, 46% e 45% para o SHGEE com carga de 500 kW, 1 MW e 5 MW respectivamente. Somente é apresentado o *payback* para o SHGEE com carga de 500 kW, sendo 8 anos. Os autores determinam que o período de retorno do investimento não é afetado com a quantidade de cargas, porém o *payback* aumenta quando se tem maior presença de painéis solares fotovoltaicos que turbinas eólicas. Rohani e Nour concluem que é requerido fazer uma revisão nas políticas e regulamentações para incrementar os incentivos para que os setores particulares invistam na indústria de energia renovável.

Ngan e Tan (2012) estudaram o potencial de implementação e a viabilidade econômica do emprego de um sistema híbrido fotovoltaico – eólico – diesel para uma cidade no sul da Malásia. A metodologia adotada pelos autores baseou-se na utilização do software *HOMER* para fazer a simulação dos diferentes cenários estudados. Para isso, os autores disponibilizaram a curva de carga diária do edifício da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica da Malásia, com a qual se obteve que o consumo diário de eletricidade é de 763 kWh ou o equivalente de 278,495 MWh/ano. A seguir, Ngan e Tan (2012) coletaram os dados solarimétricos e eólicos da base de dados da NASA para a cidade de Johor Bahru, além do preço do diesel nesse país. Uma vez com esses dados, os autores selecionaram os componentes do SHGEE, sendo o módulo fotovoltaico policristalino de referência PV-MF100EC4 com uma potência pico de 100 Wp, para ter um arranjo de painéis solares de 80 kWp, para o aerogerador foi escolhido o modelo *BWC Excel-S* de 10 kW de potência nominal, para as baterias o tipo *Surrette 6CS25P* foi utilizado, para o inversor decidiram o modelo *Solectria PVI-80kW-480V* e para o gerador diesel o *Cummins* de 80 kW foi escolhido. Os autores optaram como estratégia que unicamente os painéis fotovoltaicos e as turbinas eólicas pudessem carregar as baterias, além de utilizar o gerador diesel somente nos momentos quando as fontes renováveis não conseguissem fornecer a carga total do sistema. Para a análise econômica empregaram o custo presente neto (NPC, por suas siglas em inglês) com os juros reais anuais e o custo de eletricidade gerada. Ngan e Tan (2012) testaram e compararam sete diferentes plantas de geração: 1) sistema diesel isolado, 2) sistema híbrido fotovoltaico - diesel sem baterias, 3) sistema híbrido fotovoltaico - diesel com baterias, 4) sistema híbrido eólico - diesel sem baterias, 5) sistema híbrido eólico - diesel com baterias, 6) sistema híbrido fotovoltaico – eólico - diesel sem baterias, e 7) sistema híbrido fotovoltaico – eólico - diesel com baterias. Os autores concluíram que a configuração de um sistema híbrido fotovoltaico – eólico - diesel com baterias com 80 kW de energia solar fotovoltaica, 8 aerogeradores, 50 baterias e um gerador diesel, tem o melhor potencial para competir com um sistema de geração diesel por causa desse sistema híbrido provê um custo de eletricidade gerada e custo do sistema razoável, além de reduzir significativamente as emissões de dióxido de carbono (34,5% com respeito ao sistema de geração diesel).

Silveira, Tuna e Lamas (2013) realizaram estudos econômicos para avaliar a viabilidade da utilização de uma planta fotovoltaica de 15 kW de potência aplicado em uma comunidade rural. Os autores determinaram o custo de produção de eletricidade compararam com os custos do

atendimento via rede de distribuição convencional e também considerando o custo marginal de expansão do setor elétrico Brasileiro. Para a implementação de sistemas fotovoltaicos no Brasil é necessário ter subsídio do governo para que as plantas solares sejam economicamente atrativas, sem levar em consideração os benefícios ambientais desta tecnologia renovável. O Brasil possui altos níveis de radiação solar (1000 W/m^2), com o que pode ser esperado que este tipo de fonte renovável de energia se torne competitiva no cenário energético nacional.

2.4 LEGISLAÇÃO NO BRASIL

A Agência Nacional de Energia Elétrica estabeleceu a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, a qual tem como objetivo fomentar a utilização de fontes renováveis de energia, entre as que se encontram a energia hidráulica, eólica, biomassa e cogeração. Esta resolução permite que o consumidor brasileiro possa gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes não convencionais, sendo possível vender o excedente de eletricidade para a concessionária da rede de distribuição (ANEEL, 2012). Em novembro do 2015, a ANEEL realizou uma atualização da Resolução Normativa nº 482/2012 com a Resolução Normativa nº 687/2015.

Os consumidores geradores são classificados em dois grupos. O primeiro grupo é conformado pelos micros geradores, os quais tem uma potência instalada menor ou igual a 75 kW. No segundo grupo estão os minis geradores, caracterizados por ter uma potência instalada entre 76 kW e 3 MW para fontes híbridas e 5 MW para as outras fontes de geração de eletricidade. A potência instalada nas plantas de micro geração e mini geração é limitada à potência disponibilizada para a unidade consumidora ou carga instalada onde a fonte de geração está instalada (ANEEL, 2015).

No momento que a planta gera mais energia necessária para as cargas, a potência elétrica ativa será inserida para vender à distribuidora de eletricidade por meio de créditos de energia, participando no sistema de compensação de energia elétrica. Os créditos de energia serão o resultado do balanço da energia elétrica ativa comprada e vendida à concessionária. Tendo meses onde este balanço pode ser positivo ou negativo para o consumidor. No caso de ser positivo, o consumidor terá disponível créditos de energia, os quais podem ser usados nos sessenta meses seguintes na sua conta de eletricidade e pagará unicamente o custo de disponibilidade. O custo de disponibilidade é o valor equivalente de 30 kWh para sistemas monofásico, 50 kWh para

sistemas bifásico e 100 kWh para instalações trifásicas. Em caso de ser negativo, o consumidor pagará na sua conta de eletricidade o saldo a favor da distribuidora (ANEEL, 2012), (ANEEL, 2015).

Atualmente, mais de 1000 consumidores tem instalado sua própria planta de geração de eletricidade, destacando-se os sistemas de energia solar fotovoltaica, seguido de sistemas eólicos (ANEEL, 2015).

A distribuidora é responsável técnica e financeiramente pelo sistema de medição para micro geração distribuída. Os custos de adequação do sistema de medição para a conexão de mini geração distribuída é de responsabilidade do consumidor interessado na instalação da central mini geradora de energia (ANEEL, 2015).

3 ANÁLISE TÉCNICA

Neste capítulo é desenvolvida a análise técnica para dimensionar os sistemas híbridos de geração de energia elétrica SHGEE, com base no consumo de eletricidade de um edifício residencial. A metodologia aplicada nesta etapa do estudo consistiu primeiramente em estimar o consumo de eletricidade de edifícios residenciais nas cidades de Fortaleza e Lagoa Santa, Brasil. Uma vez obtido os consumos de energia elétrica, continuou-se a obter os dados do recurso eólico e solar. O desenho do SHGEE foi realizado com base nos recursos eólicos e solares para satisfazer a demanda de eletricidade de acordo com os consumos do edifícios.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO EDIFÍCIO RESIDENCIAL

O edifício residencial estudado é constituído de 10 andares, com 4 apartamentos por andar, para um total de 40 de apartamentos. O edifício residencial não possui porão, os estacionamentos situam-se fora do edifício. Os edifícios ao redor do condomínio são no máximo 8 andares, beneficiando o recurso eólico no terraço do prédio.

As turbinas eólicas serão instaladas no terraço do prédio para aproveitar a altura e gerar mais eletricidade, onde tenham os menores obstáculos possíveis, e considerando a rosa dos ventos do local de instalação. Os painéis solares estão analisados para serem distribuídos no teto dos estacionamentos onde não existe sombra pelo edifício, garantindo assim uma grande área para sua instalação. O ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos será 10 graus maior que a latitude do local, orientados em direção ao norte em virtude de que Brasil situa-se no hemisfério sul do planeta (ROBERTS, 2012).

Serão analisados seis possíveis cenários:

- Cenário 1: O edifício está localizado na cidade de Fortaleza, Ceará. E as famílias moradoras são de baixa renda.
- Cenário 2: O edifício está localizado na cidade de Fortaleza, Ceará. E as famílias moradoras são de média renda.
- Cenário 3: O edifício está localizado na cidade de Fortaleza, Ceará. E as famílias moradoras são de alta renda.

- Cenário 4: O edifício está localizado na cidade de Lagoa Santa, Minas Gerais. E as famílias moradoras são de baixa renda.
- Cenário 5: O edifício está localizado na cidade de Lagoa Santa, Minas Gerais. E as famílias moradoras são de média renda.
- Cenário 6: O edifício está localizado na cidade de Lagoa Santa, Minas Gerais. E as famílias moradoras são de alta renda.

Segundo a Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso da PROCEL e ELETROBAS (2005) classificou-se a renda assim:

- Baixa renda: Consumo de eletricidade médio mensal de 80 kWh por apartamento;
- Média renda: Consumo de eletricidade médio mensal de 250 kWh por apartamento;
- Alta renda: Consumo de eletricidade médio mensal de 400 kWh por apartamento.

3.2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO EDIFÍCIO RESIDENCIAL

Segundo o Relatório da Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil da PROCEL e ELETROBRAS (2007), na região do Nordeste, a média de quantidades de moradores por domicílio é de 3,54 pessoas. Para a região do Sudeste, a média de quantidade de moradores por domicílio é de 3,39 pessoas. Para este estudo estimou-se que em cada apartamento moram 3 pessoas, para as duas regiões estudadas.

Neste trabalho, o consumo de eletricidade considera a média mensal anual. Calculou-se o consumo de eletricidade para os três tipos de edifícios (baixa, média e alta renda), incluindo dois elevadores, duas bombas d'água e as perdas de eletricidade pelo inversor, segundo a eficiência do inversor dada pelos fabricantes (95%). Para o edifício residencial de baixa renda o consumo total mensal de eletricidade é de 5361,06 kWh (Tabela 3.1). Para o edifício residencial de média renda o consumo total mensal de eletricidade é de 14037,19 kWh (Tabela 3.2). Por último, o edifício residencial de alta renda tem um consumo total mensal de eletricidade de 21789,33 kWh (Tabela 3.3).

Tabela 3.1. Consumo de eletricidade do edifício residencial de baixa renda.

Descrição	Energia elétrica kWh/mês
Consumo eletricidade área privada	3200,00
Iluminação área comum no edifício	18,00
Subtotal	3218,00
Elevadores	321,80
Bombas d'água	1565,97
Consumo do Edifício sem perdas dos inversores	5105,77
Perdas dos inversores	255,29
Consumo Total do Edifício	5361,06

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3.2. Consumo de eletricidade do edifício residencial de média renda

Descrição	Energia elétrica kWh/mês
Consumo eletricidade área privada	10000,00
Iluminação área comum no edifício	18,00
Subtotal	10018,00
Elevadores	1001,80
Bombas d'água	2348,96
Consumo do Edifício sem perdas dos inversores	13368,76
Perdas dos inversores	668,44
Consumo Total do Edifício	14037,19

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3.3. Consumo de eletricidade do edifício residencial de alta renda

Descrição	Energia elétrica kWh/mês
Consumo eletricidade área privada	16000,00
Iluminação área comum no edifício	18,00
Subtotal	16018,00
Elevadores	1601,80
Bombas d'água	3131,94
Consumo do Edifício sem perdas dos inversores	20751,74
Perdas dos inversores	1037,59
Consumo Total do Edifício	21789,33

Fonte: Elaboração própria.

3.3 RECURSO EÓLICO EM FORTALEZA

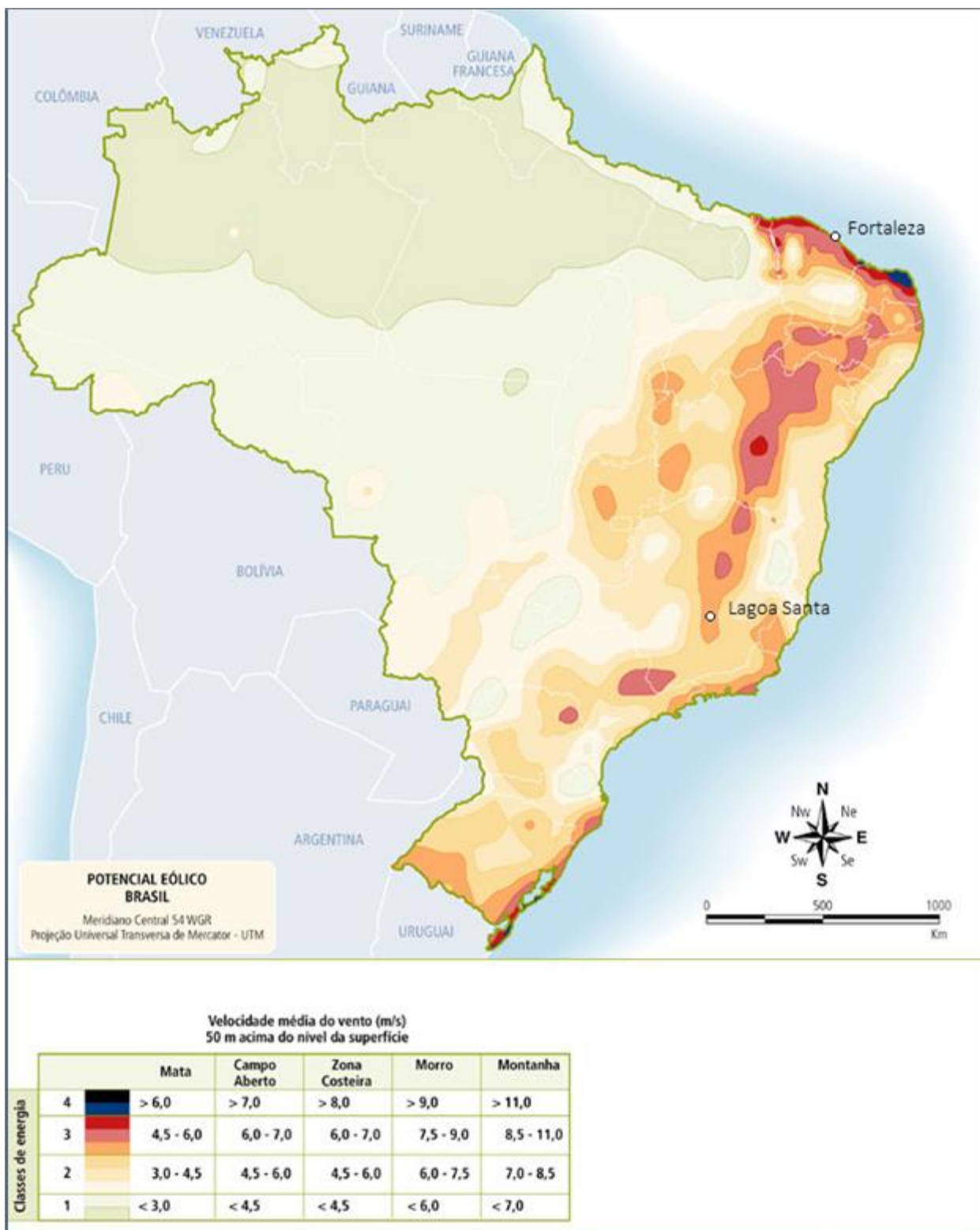
Fortaleza é localizada no litoral nordeste do Brasil, no estado de Ceará. Para uma estimativa do potencial eólico desta região do Brasil, utilizou-se o Mapa Eólico do Brasil da Figura 3.1, onde observa-se que a velocidade média anual dos ventos em Fortaleza se encontra entre 4,5 – 6 m/s a uma altura de 50 metros.

Para esse estudo foi pesquisado na base de dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica CRESESB e do Instituto de Meteorologia Brasileiro INMET. A Figura 3.2 apresenta os valores das velocidades médias de vento mensal fornecidos pelo CRESESB para uma altura de 50 metros. Observe-se que a velocidade média anual é de 5,12 m/s e tem uma velocidade média máxima de 6,69 m/s no meses de Setembro, Outubro e Novembro. A Figura 3.3 apresenta os valores médios da velocidade de vento medidos pela estação do INMET a uma altura de 50 metros. A velocidade média anual é de 3,42 m/s, tendo o mês de Outubro a velocidade média máxima de 4,82 m/s. A estação de medição do INMET encontra-se a uma altitude de 26,45 metros sobre o nível do mar. Foi utilizada a Equação(3.1) (LU; SUN, 2014), onde por meio de interpolação se estima a velocidade do vento para uma altura de 50 metros.

$$v = v_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

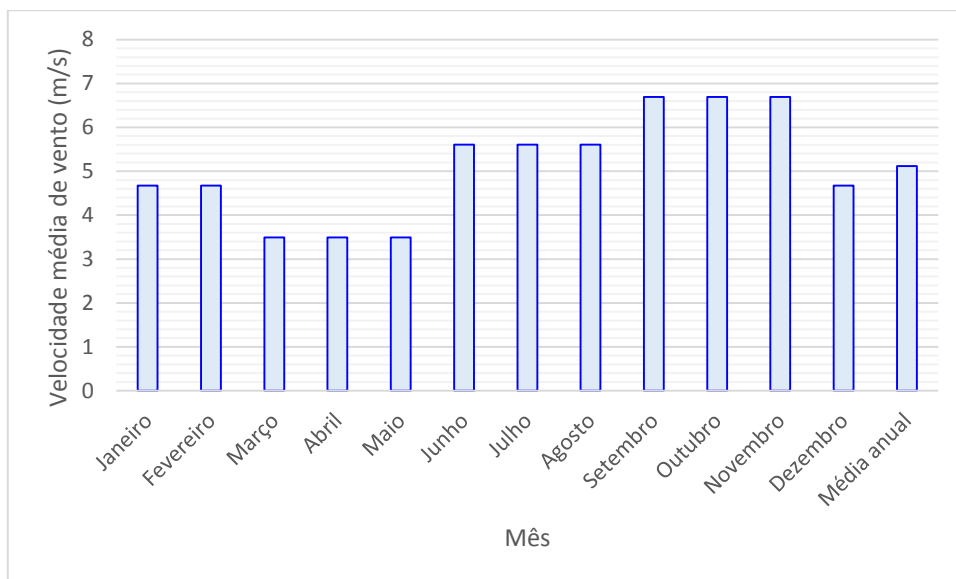
Sendo v a velocidade do vento [m/s] à altura do aerogerador, z a altura do aerogerador [m]; v_0 a velocidade do vento medida [m/s] à altura de referência, e z_0 a altura de referência [m]; α o coeficiente de fricção com a superfície terrestre, o qual é 0,143 para baixa rugosidade ou lugares com poucos obstáculos ao redor e 0,23 para áreas urbanas densas (LU; SUN, 2014).

Figura 3.1. Mapa Eólico do Brasil



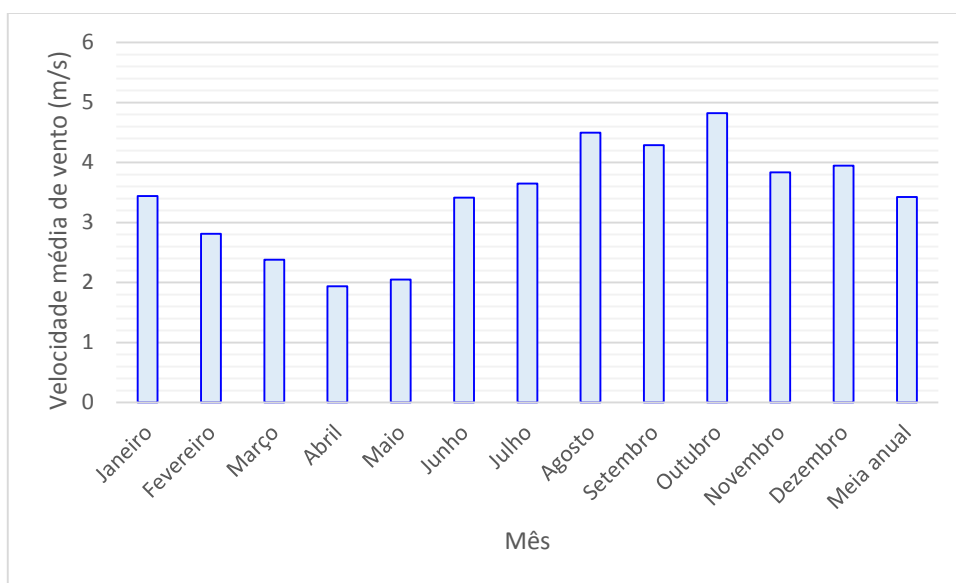
Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil da ANEEL (2005).

Figura 3.2. Velocidade média mensal dos ventos de Fortaleza para uma altura 50 m



Fonte de dados: CRESESB. Fonte: Elaboração própria

Figura 3.3. Velocidade média mensal dos ventos de Fortaleza para uma altura 50 m



Fonte de dados: INMET. Fonte: Elaboração própria

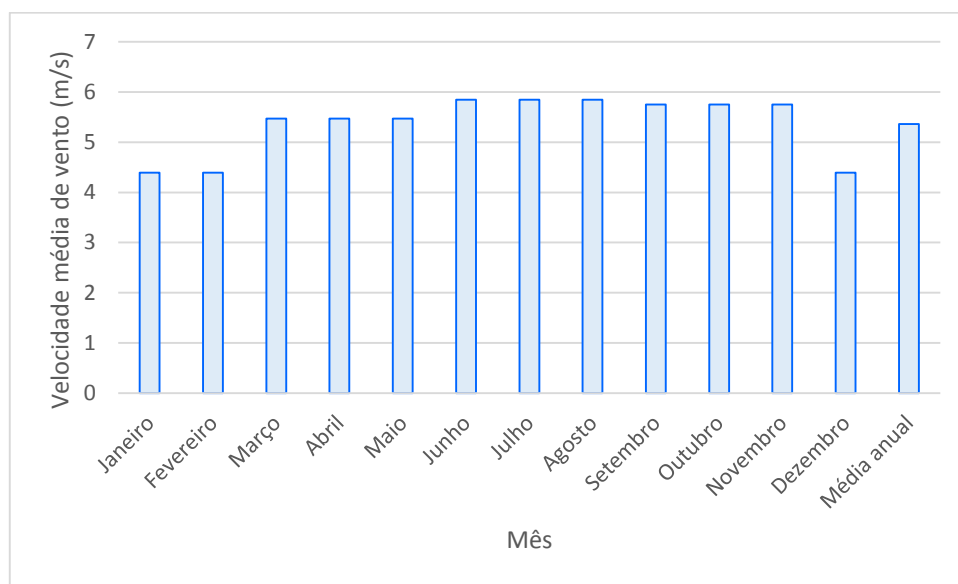
Para esta dissertação foram utilizados os dados do CRESESB para o dimensionamento dos SHGEE, dado que esta base de dados inclui os recursos eólicos e solares das duas cidades analisadas.

3.4 RECURSO EÓLICO EM LAGOA SANTA

Lagoa Santa está situada na região sudeste do Brasil, no estado de Minas Gerais. De acordo com o Mapa Eólico do Brasil da Figura 3.1, em Lagoa Santa a velocidade média anual dos ventos se encontra entre 4,5 – 6 m/s a uma altura de 50 metros.

Na base de dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica CRESESB existe o recurso eólico mensal desta cidade mineira. A Figura 3.4 apresenta os valores das velocidades médias de vento mensal fornecidos pelo CRESESB para uma altura de 50 metros. Tem-se que a velocidade média anual é de 5,37 m/s e com uma velocidade média máxima de 5,85 m/s no meses de Junho, Julho e Agosto.

Figura 3.4. Velocidade média mensal dos ventos de Lagoa Santa para uma altura 50 m



Fonte de dados: CRESESB. Fonte: Elaboração própria

3.5 POTÊNCIA ELÉTRICA EM PLANTA EÓLICA

A produção de eletricidade por uma turbina eólica está altamente relacionada com a velocidade do vento que passa por suas pás. A seguinte equação (3.2) do Freris e Infield (2008) é usada para calcular a potência elétrica gerada por uma turbina eólica, a qual é diretamente proporcional à velocidade do vento ao cubo:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (3.2)$$

Sendo, ρ a massa específica do ar [kg/m^3], A a área transversal do rotor [m^2], V a velocidade do vento [m/s], e C_p o coeficiente da potência do rotor. A massa específica do ar utilizada foi de $1,168 kg/m^3$ para Fortaleza e de $1,191 kg/m^3$ para Lagoa Santa, para temperatura média em Fortaleza de $26,3^\circ C$ e em Lagoa Santa $21,6^\circ C$, aplicando o standard CIPM-2007 revisado por Picard et al. (2008).

Como pode-se observar, a velocidade do vento é o fator mais importante, motivo pelo qual, deve ser estimado ou medido com muita precaução para diminuir o erro dos cálculos. A área transversal do rotor também é significativa, grandes rotores sobre grandes torres usam as correntes de ar de modo mais eficiente do que pequenas turbinas.

3.6 DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA WEIBULL E RAYLEIGH

Devido ao fato da velocidade do vento variar, é necessário conhecer a frequência das velocidades dos ventos para ter uma melhor estimativa da energia elétrica possivelmente gerada pelo SHGEE. As distribuições de frequência desenvolvidas por Weibull e Rayleigh são consideradas as mais compatíveis com as velocidades de vento reais. Por isto, elas são muito aplicadas como funções de distribuição de velocidade de vento (KO; JEONG; KIM, 2015).

De acordo com Ko, Jeong e Kim (2015), a função de distribuição de Weibull expresada pela equação (3.3).

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right] (k > 0, V > 0, c > 1) \quad (3.3)$$

Sendo, k o parâmetro de forma, c o parâmetro de escala [m/s], e V a velocidade do vento [m/s].

Quando os valores dos parâmetros da função de distribuição de Weibull são modificados $ac = \sqrt{2\sigma}$ e $k = 2$, se tem um caso especial da função de distribuição de Weibull, conhecida como a função de distribuição de Rayleigh, conforme a equação (3.4).

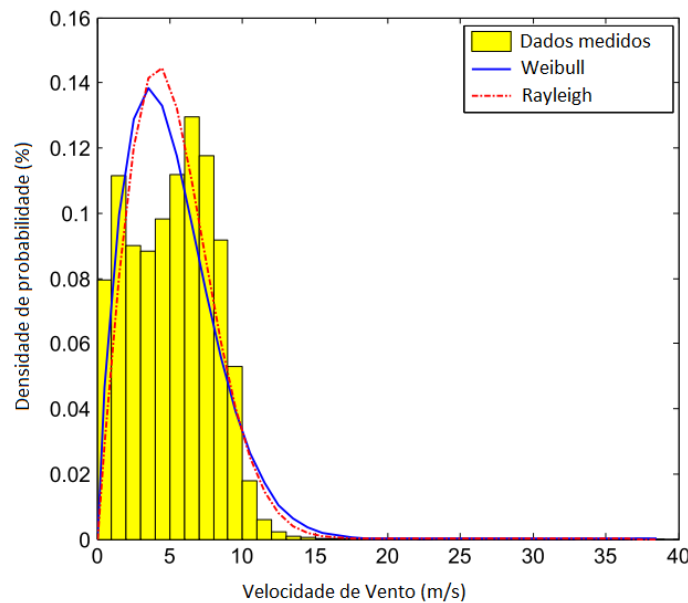
$$f(V) = \frac{k}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{V^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3.4)$$

Sendo, σ o parâmetro da distribuição de Rayleigh, o qual é expressado como $\sigma^2 = 2\bar{V}^2 / \pi$. Substituindo se tem:

$$f(V) = \frac{\pi V}{2\bar{V}^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

Sendo, $\bar{V}$ a velocidade média do vento [m/s]. A Figura 3.5 apresenta um exemplo da aplicação das funções de distribuição de Weibull e Rayleigh.

Figura 3.5. Densidade de probabilidade de Weibull e Rayleigh



Fonte: Adaptado de (KO; JEONG; KIM, 2015).

Sabendo a distribuição de frequência de ventos, pode-se identificar a quantidade de horas diárias, mensais ou anuais que dispõem um local para serem aproveitadas por um sistema eólico de geração de eletricidade.

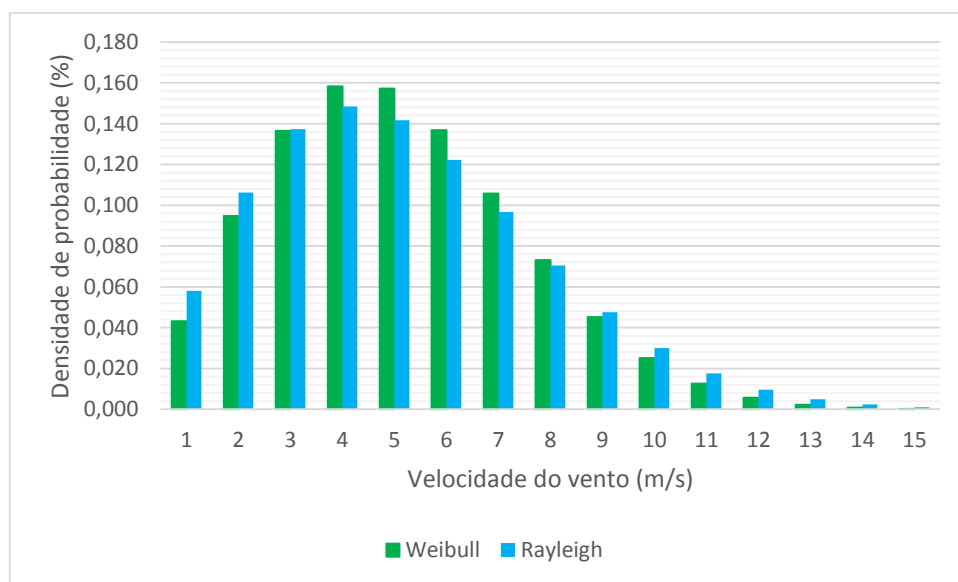
3.6.1 Distribuição de Frequência dos Ventos para Fortaleza

Aplicando as Equações (3.3), (3.4) e (3.5) se obteve a Figura 3.6, a qual apresenta a distribuição de frequência de Weibull e Rayleigh das velocidades dos ventos em Fortaleza. A maior frequência de 15,8% e 14,8% foi observada entre 4 - 5 m/s do modelo de Weibull e

Rayleigh respectivamente. De acordo com Islam, Saidur e Rahim (2011), a distribuição de frequência de Weibull é mais aproximada dos dados reais. Para este estudo utilizou-se o modelo de Weibull, com o qual se tem uma melhor estimativa das horas de vento no local para a geração de energia elétrica com o SE aplicando a Equação(3.2).

Segundo a Figura 3.6, com a distribuição de frequência de Weibull, determinou-se as horas anuais em que os ventos podem gerar eletricidade com o aerogerador selecionado, que sucede quando os ventos têm velocidade maior que a velocidade de partida, normalmente 3,5 m/s para turbinas eólicas de eixo vertical (Tabela 3.4). Encontrou-se que as velocidades maiores a 3,5 m/s têm uma probabilidade de 72,3%, isto significa que Fortaleza tem 6333 horas/ano de ventos com velocidades que podem fazer girar as turbinas eólicas. Esta quantidade de horas vai ser utilizada como as horas de operação para o subsistema eólico.

Figura 3.6. Densidade de probabilidade de Weibull e Rayleigh para Fortaleza



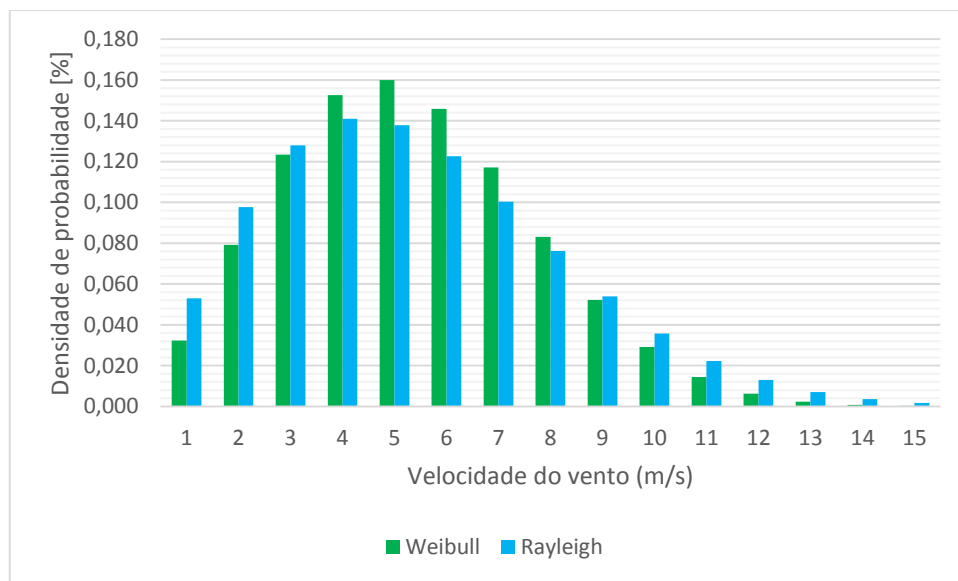
Fonte: Elaboração própria

3.6.2 Distribuição de Frequência dos Ventos para Lagoa Santa

De igual forma que em Fortaleza, para os dados da cidade de Lagoa Santa em Minas Gerais, se obteve a Figura 3.7, mostrando a distribuição de frequência de Weibull e Rayleigh das velocidades dos ventos. A maior frequência das distribuições foi de 16,0% e 14,1% para ventos com velocidade entre 4 - 5 m/s do modelo de Weibull e Rayleigh respectivamente.

Identificou-se que as velocidades maiores à 3,5 m/s têm uma probabilidade de 76,4%, o que significa que Lagoa Santa dispõe de 6692 horas/ano de ventos com velocidades maiores que a velocidade de partida dos aerogeradores.

Figura 3.7. Densidade de probabilidade de Weibull e Rayleigh para Lagoa Santa



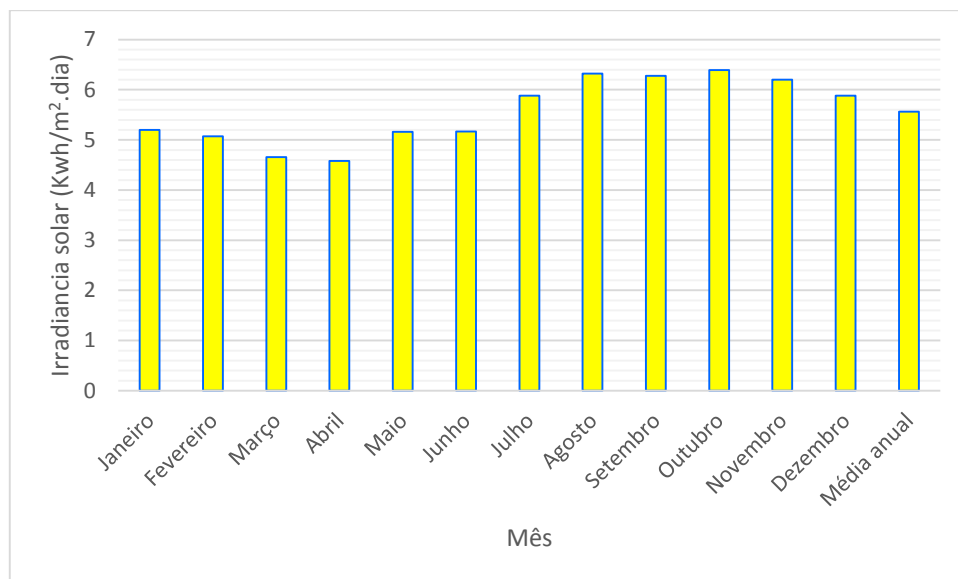
Fonte: Elaboração própria

3.7 RECURSO SOLAR EM FORTALEZA

A cidade de Fortaleza (CE), por sua localização perto da linha do Equador, recebe boa radiação solar. No mapa de radiação solar do Brasil apresentado na Figura 3.9 pode-se observar que a região do Nordeste possui irradiação solar entre 5,25 e 5,60 kWh/m².

De acordo com a base de dados da CRESESB, a irradiação solar média anual em Fortaleza é de 5,56 kWh/m² no plano com ângulo igual a latitude. O mês que tem maior irradiação solar média é Outubro com 6,47 kWh/m². A Figura 3.8 apresenta a irradiação solar média mensal na Cidade de Fortaleza, CE.

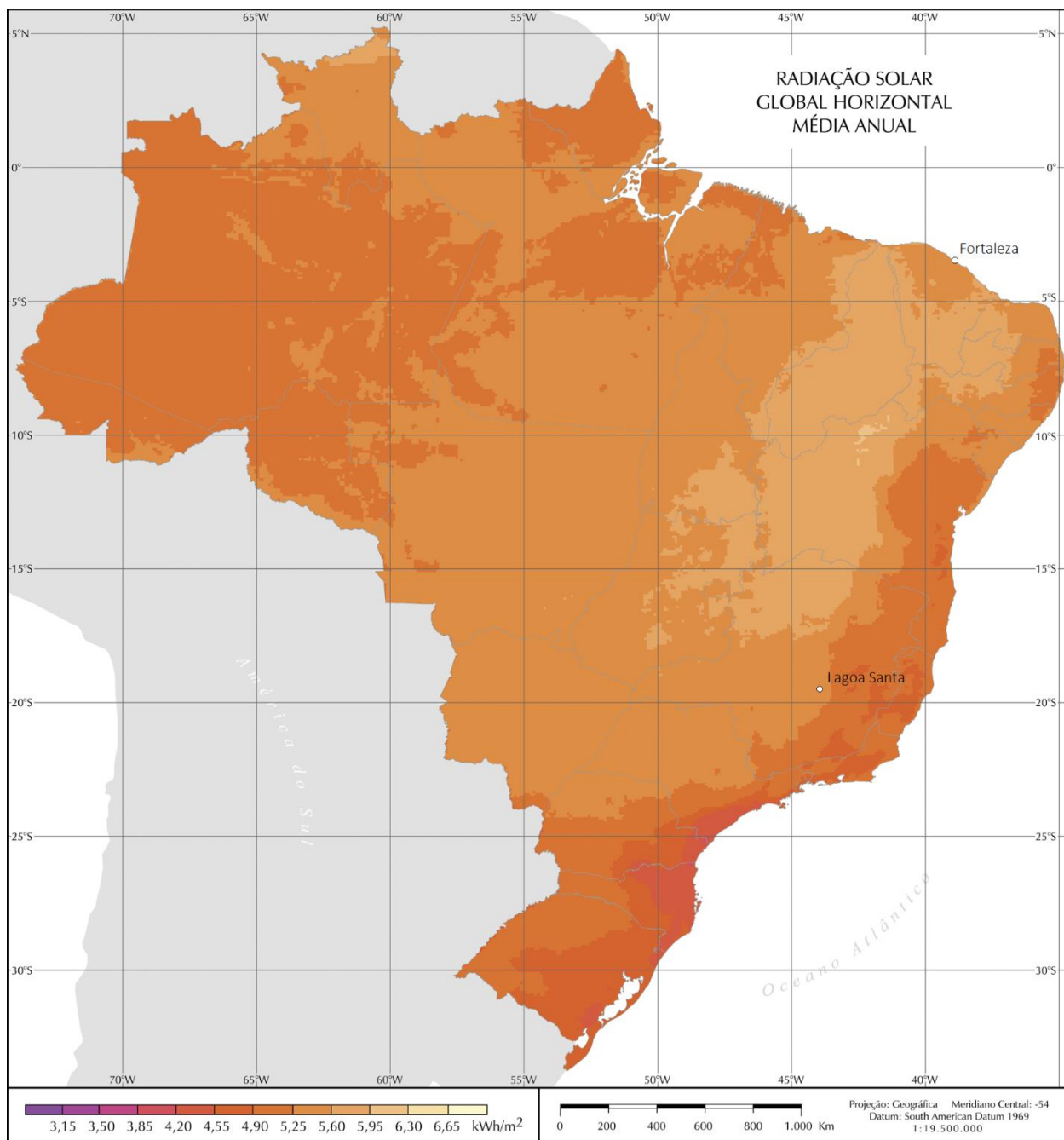
Figura 3.8. Irradiação Solar em Fortaleza



Fonte de dados: CRESESB. Fonte: Elaboração própria

Outro parâmetro importante para levar em consideração em sistemas fotovoltaicos é a quantidade de horas de sol no lugar onde estará o sistema. Consideram-se “horas de sol” aquelas que tem irradiação solar significativa, ao redor de 1000 W/m^2 para que os painéis gerem quantidade suficiente de eletricidade. Em consequência do movimento da Terra em torno do Sol, as primeiras horas da manhã e as últimas horas antes do escurecer, não possuem muita radiação solar. Sendo entre as 12:00 e 14:00 o intervalo de tempo onde tem-se a maior radiação solar no dia, quando o Sol se encontra no ponto mais alto e os raios solares viajam perpendicular na superfície da Terra. Este parâmetro varia também de lugar para lugar e é muito importante na hora de estimar a eletricidade gerada pelo sistema fotovoltaico. Normalmente, são usadas 5 ou 6 horas de sol por dia para os cálculos. De acordo com o Atlas de Energia Elétrica desenvolvido pela ANEEL (2005), em Fortaleza se tem 7 horas de radiação solar. Para este estudo, foram utilizadas 7 horas de sol para a realização dos cálculos para esta cidade estudada.

Figura 3.9. Mapa Solar do Brasil



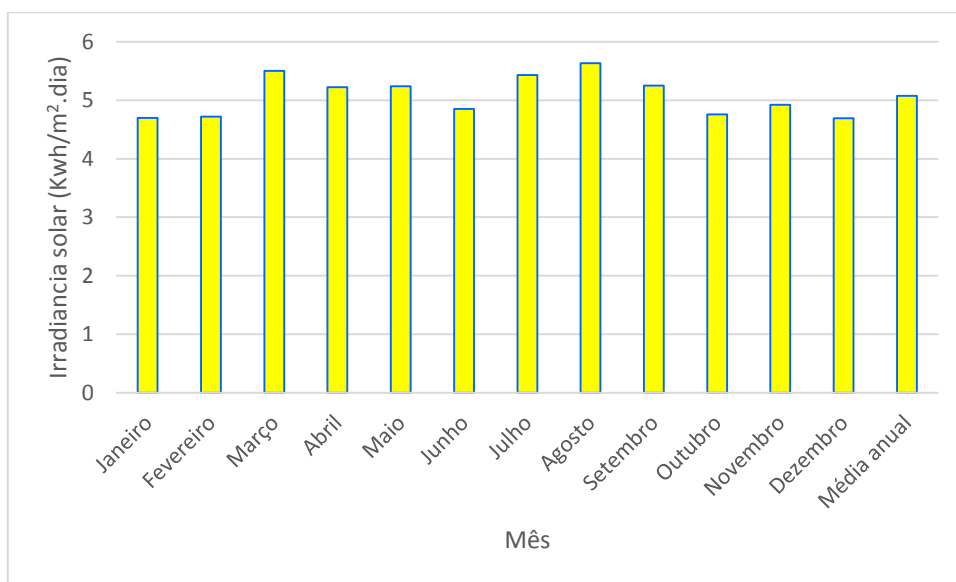
Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006).

3.8 RECURSO SOLAR EM LAGOA SANTA

A cidade de Lagoa Santa (MG), apesar de estar situada a uma latitude de $19,6^\circ$, possui bom recurso solar. No mapa de radiação solar do Brasil apresentado na Figura 3.9 pode-se observar que o estado de Minas Gerais possui irradiação solar entre $4,20$ e $5,60 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$.

De acordo com a base de dados da CRESESB, a irradiação solar média anual em Lagoa Santa é de $5,08 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ no plano com ângulo igual a latitude. O mês que tem maior irradiação solar média é Agosto com $5,63 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$. A Figura 3.10 apresenta a irradiação solar média mensal na Cidade de Lagoa Santa.

Figura 3.10. Irradiação Solar em Lagoa Santa



Fonte de dados: CRESESB. Fonte: Elaboração própria

Segundo o Atlas de Energia Elétrica desenvolvido pela ANEEL (2005), ao igual que em Fortaleza, na cidade de Lagoa Santa recebe 7 horas de radiação solar por dia. Para os cálculos da eletricidade gerada pelo subsistema solar fotovoltaico foram utilizadas 7 horas de recurso solar diário para a cidade mineira.

3.9 POTÊNCIA ELÉTRICA EM PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA

De acordo com Roberts (2012), a energia gerada por uma série de painéis fotovoltaicos é diretamente proporcional à radiação solar, conforme a Equação (3.6).

$$P = \eta N A I_T \quad (3.6)$$

Sendo, η a eficiência do painel fotovoltaico [%], N o número de painéis fotovoltaicos, A a área de um painel fotovoltaico [m^2], I_T a radiação solar [W/m^2]. A eficiência do painel fotovoltaico depende do tipo e da pureza do material semicondutor utilizado.

3.10 DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para o dimensionamento do sistema híbrido eólico – solar fotovoltaico, nos 6 cenários estudados, tomou-se a média da demanda de energia elétrica mensal do edifício das Tabelas (3.1), (3.2) e (3.3), baseando-se na resoluções de ANEEL nº 482 do ano 2012 e nº 687 do ano 2015, as quais possibilitam a implementação de geração distribuída e a venda de excedente de energia para a empresa distribuidora por parte dos consumidores finais.

Aplicando as equações de potência elétrica (3.2) e (3.6) para sistemas eólicos e solares fotovoltaicos, calculou-se a eletricidade gerada por um aerogerador e um painel solar por mês, e desta forma obter a média mensal de eletricidade gerada. Manualmente, foram testadas diferentes quantidades de aerogeradores e painéis fotovoltaicos para que a média anual de energia elétrica produzida fosse dividida 50% para o subsistema eólico e o outro 50% para o subsistema solar, e desta forma fornecer a toda a demanda de eletricidade dos edifícios. Realizou-se o balanço energético mensal para identificar em que meses se ganham créditos de energia e em que meses é necessário comprar eletricidade da concessionária, em razão dos recursos renováveis não serem constantes ao longo do tempo. O balanço energético mensal foi calculado com base ao consumo de eletricidade mensal menos a energia elétrica produzida pelo SHGEE eólico-solar fotovoltaico no mês. Quando o balanço é positivo, a diferença de quilowatts hora é comprada da distribuidora para garantir o fornecimento de energia para as cargas. Se o balanço energético é igual a zero, significa que o SGHE está gerando a quantidade exata de eletricidade requerida pelas unidades

consumidoras. No caso que o valor do balanço é negativo, obtém-se créditos de energia pelo sistema de compensação de energia elétrica, os quais podem ser usados nos sessenta meses seguintes. A soma dos balanços energéticos mensais em um ano é o balanço energético anual do sistema. Nos dimensionamentos do SHGEEs, procurou-se sempre que o balanço energético anual fosse negativo perto de zero, para desta forma minimizar o número de turbinas eólicas e módulos solares fotovoltaicos. Levou-se em consideração o limite permitido da potência elétrica instalada dos sistemas de geração pelas regulações da ANEEL nº 482 e nº 687, onde está não pode ser maior ao consumo elétrico do local.

De acordo com a secção 2.1.3, as turbinas eólicas de eixo vertical VAWT tem melhor desempenho para aplicações urbanas. Neste trabalho escolheu-se este tipo de aerogerador, o fator econômico não foi considerado para a decisão do tipo de aerogerador para os SHGEE. Na Tabela 3.4 observam-se diferentes tipos de turbinas eólicas VAWT comerciais e de baixa potência, as quais foram encontradas nos catálogos dos fabricantes.

Tabela 3.4. Turbinas eólicas VAWT comerciais

Fabricante	Modelo	Tipo de VAWT	Potência Elétrica (kW)	Velocidade de Partida Vcin (m/s)	Área transversal (m ²)
<i>UGE</i>	Vision AIR 3	Helicoidal	1	<4	5,76
	UGE EDDY		1	3,5	4,62
<i>UGE</i>	GT	Helicoidal			
<i>UGE</i>	UGE-4K	Helicoidal	4	3,5	13,80
<i>UGE</i>	UGE-9M	Helicoidal	9	3,5	61,40
<i>Aeolos</i>	Aeolos-V 1kW	GiroMill	1	2,0	5,60
<i>Aeolos</i>	Aeolos-V 3kW	GiroMill	3	2,5	8,64
<i>Aeolos</i>	Aeolos-V 5kW	GiroMill	5	2,5	22,50
<i>Aeolos</i>	Aeolos-V 10kW	GiroMill	10	3,0	32,50
<i>HEOS</i>	H line	Darrieus	75	3,0	232,50
<i>Helix Wind</i>	S322	Savonius	2	5,0	3,19
<i>Helix Wind</i>	S594	Savonius	4,5	5,0	5,88
<i>Ropatec AG</i>	Tvision	GiroMill	3	3,0	7,26
<i>Ropatec AG</i>	SA-40	GiroMill	10	3,0	39,90
<i>Ropatec AG</i>	SA-70	GiroMill	10	3,0	70,20
		Darrieus-			
<i>Typmar</i>	CXF-1000W	Savonius	1	3,5	3,60
		Darrieus-			
<i>Typmar</i>	CXF-3000W	Savonius	3	3,5	7,02

Fonte: Elaboração própria.

Em relação com os painéis solares fotovoltaicos, os modelos de tipo monocristalino e policristalino, são os mais fabricados no mundo. Consequentemente, estes possuem uma maior eficiência de conversão de energia comparada com as películas finas. Na Tabela 3.5 observam-se diferentes tipos de painéis solares fotovoltaicos, as quais foram encontradas nos catálogos dos fabricantes.

Tabela 3.5. Painéis solares fotovoltaicos comerciais

Fabricante	Modelo	Tipo PV	Potência Elétrica (W)	Eficiência de Conversão (%)	Dimensões (mmXmmXmm)
<i>Yingli Solar</i>	YL270C-30b	Monocristalino	270	16,5	1650X990X40
<i>Yingli Solar</i>	YL270P-29b	Multicristalino	270	16,6	1640X990X40
<i>Yingli Solar</i>	YL290P-35b	Multicristalino	290	14,9	1970X990X40
<i>Sunpower</i>	X21-335-BL	Monocristalino	335	21,1	1559X1046X46
<i>Sunpower</i>	SPR-E19-320	Monocristalino	320	19,9	1558X1046X46
<i>Seraphim power</i>	SRP-5MA 270W	Monocristalino	270	16,0	1580X1064X40
<i>Seraphim power</i>	SRP-6MB-270 W	Monocristalino	270	16,5	1640X992X40
<i>Seraphim power</i>	SRP-6PB-265 W	Policristalino	265	16,3	1580X1064X40
<i>Kyocera</i>	KK255P-3CB2CG	Policristalino	255	15,4	1662X990X46
<i>Kyocera</i>	KD255GH-4FB2	Policristalino	255	15,4	1662X990X46
<i>Kyocera</i>	KT265-6MCA	Policristalino	265	16,1	1662X990X46
<i>Tamesol</i>	TMM660255	Monocristalino	255	15,57	1640X992X40
<i>Tamesol</i>	TMM672290	Monocristalino	290	14,94	1956X992X50
<i>Tamesol</i>	TMP660250	Policristalino	250	15,37	1640X992X40
<i>Tamesol</i>	TMP672280	Policristalino	280	14,50	1956X992X50
<i>Atersa</i>	A-260P ULTRA	Policristalino	250	15,97	1645X990X40
<i>Atersa</i>	A-270M GSE	Monocristalino	270	16,57	1638X995X40
<i>Canadian Solar</i>	CS6K-275M	Monocristalino	275	16,8	1650X992X40
<i>Canadian Solar</i>	CS6P-265P	Policristalino	265	16,47	1638X982X40
<i>Canadian Solar</i>	CS6X-315	Policristalino	315	16,42	1954X982X40

Fonte: Elaboração própria.

Com base nos recursos eólicos e solares, além dos modelos de turbinas eólicas e painéis solares fotovoltaicos apresentados anteriormente, foram levados em conta os parâmetros da velocidade de partida e a área transversal do aerogerador, a eficiência de conversão dos módulos

solares, o preço e a disponibilidade no mercado. Foi escolhida a turbina eólica Aeolos-V 10 kW da empresa *Aeolos* com uma potência nominal de 10 kW e para o módulo fotovoltaico escolheu-se o modelo CS6P-265P da empresa *Canadian Solar* com uma potência máxima 265 Wp. As Tabelas 3.6 e 3.7 mostram as principais características do aerogerador *Aeolos* e do painel solar fotovoltaico da *Canadian Solar*. As fichas técnicas do aerogerador e painel solar fotovoltaico encontra-se no anexo A e B respectivamente.

Tabela 3.6. Especificações da turbina eólica *Aeolos* 10 kW

Especificações técnicas	
Tipo de aerogerador	VAWT
Potência elétrica nominal	10 kW
Altura do rotor	6,5 m
Largura do rotor	5,0 m
Área transversal	32,5 m
Velocidade de arranque	2,5 m/s
Velocidade de vento nominal	12,0 m/s
Tipo de gerador elétrico	Imãs permanentes de três fases
Tipo de freio	Mecânico Manual/Auto
Vida útil	20 Anos

Fonte: Adaptado do catalogo do fabricante.

Tabela 3.7. Especificações do módulo *Canadian Solar* CS6P-265P

Especificações técnicas	
Tipo de célula	Policristalino
Potência elétrica nominal	265 W*
Tensão ótima de operação	30,6 V*
Corrente ótima de operação	8,66 A*
Tensão de circuito aberto	37,7 V*
Corrente de curto circuito	9,23 A*
Eficiência	16,47%
Área do módulo	1,609 m ²
Vida útil	25 Anos

* Sob condições padrões de teste: Irradiação de 1000 W/m², Espetro AM 1,5 e temperatura ambiente 20 °C.

Fonte: Adaptado do catalogo do fabricante.

A Tabela 3.8 apresenta a quantidade de turbinas eólicas e módulos solares fotovoltaicos que são requeridos para cada cenário nos dois locais propostos, as quais foram calculadas de acordo com a metodologia explicada no início desta seção em relação com o balanço energético

anual. Observa-se que o número de aerogeradores em Lagoa Santa é menor que em Fortaleza para as três rendas em consequência que na cidade mineira dispõe de melhor recurso eólico que em Fortaleza de acordo com os dados utilizados da CRESESB. Também se observa que o número de painéis solares é maior em Lagoa Santa que em Fortaleza para todas as rendas em virtude de que o recurso solar é melhor em Fortaleza.

Tabela 3.8. Número de aerogeradores e painéis solares fotovoltaicos para cada cenário

Cenário	Cidade/Renda	Quantidade de turbinas eólicas	Quantidade de painéis solares fotovoltaicos	Potência Instalada (kW)
1	Fortaleza/Baixa Renda	6	58	75,4
2	Fortaleza/Média Renda	17	138	206,6
3	Fortaleza/Alta Renda	27	208	325,1
4	Lagoa Santa/Baixa Renda	6	56	74,8
5	Lagoa Santa/Média Renda	16	143	197,9
6	Lagoa Santa/Alta Renda	23	245	294,9

Fonte: Elaboração própria.

Realizou-se uma análise energética para os seis cenários estudados. Os resultados são apresentados nas Tabelas (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13) e (3.14). As tabelas contêm a eletricidade mensal gerada por o sistema eólico E_{GSE} , a eletricidade mensal gerada por o sistema solar fotovoltaico E_{GSSF} , a eletricidade mensal gerada pelo sistema híbrido eólico – solar fotovoltaico E_{GSHGEE} , e o balanço energético. Para o balanço energético, se utilizou a média do consumo de eletricidade do edifício residencial apresentado na seção 3.2, este valor foi subtraído à eletricidade mensal gerada pelo sistema híbrido eólico – solar fotovoltaico E_{GSHGEE} . Quando o balanço é positivo, significa que os proprietários dos apartamentos devem comprar eletricidade da concessionária, o qual se observa na última coluna com a palavra Compra. No caso contrário, se o balanço energético é negativo, os proprietários vão obter créditos de energia, explicado na última coluna com a palavra Venda. Este balanço energético é variável devido as alterações dos recursos eólico e solar para cada mês, o que significa que alguns meses o sistema híbrido pode gerar mais energia elétrica necessária pelas cargas, como também fornecer menos quantidade de eletricidade requerida para a demanda do edifício. No final de cada tabela, encontra-se a energia elétrica média mensal e a total gerada pelo sistema híbrido eólico – solar em um ano, o balanço

energético anual que é o total de créditos de energia ganhados em um ano, e o total de créditos de energia recebidos para cada apartamento.

A Tabela 3.9 indica os resultados do cenário 1, localização Fortaleza com baixa renda. O mês de Outubro foi o de maior geração de eletricidade pelo sistema híbrido eólico – solar fotovoltaico, com 8347,54 kWh. O mês de menor produção de energia elétrica foi em Abril, com 2878,65 kWh. De Junho até Novembro, o SHGEE gera mais eletricidade que a requerida pela demanda do prédio. Nos outros meses do ano, o SHGEE produz menor quantidade de energia elétrica, indicando que a eletricidade faltante para as cargas deve ser comprada na empresa distribuidora. Anualmente, cada proprietário das residências do edifício vai obter 0,86 créditos de energia.

Tabela 3.9. Balanço energético para o cenário 1

Mês	E_{GSE} (kWh)	E_{GSSF} (kWh)	E_{GSHGEE} (kWh)	Balanço energético (kWh)	Compra / Venda
Janeiro	1837,19	2397,74	4234,93	1126,13	Compra
Fevereiro	1837,19	2337,80	4174,98	1186,07	Compra
Março	766,79	2148,74	2915,54	2445,52	Compra
Abril	766,79	2111,86	2878,65	2482,41	Compra
Mai	766,79	2379,30	3146,09	2214,97	Compra
Junho	3184,87	2383,91	5568,77	-207,72	Venda
Julho	3184,87	2711,29	5896,16	-535,10	Venda
Agosto	3184,87	2914,18	6099,04	-737,99	Venda
Setembro	5401,08	2895,73	8296,82	-2935,76	Venda
Outubro	5401,08	2946,45	8347,54	-2986,48	Venda
Novembro	5401,08	2858,84	8259,93	-2898,87	Venda
Dezembro	1837,19	2711,29	4548,48	812,58	Compra
		Média Total kWh/ano	5363,91 64366,93		
			Total créditos de energia (kWh)	-34,23	
			Créditos de energia por residência (kWh)	-0,86	

Fonte: Elaboração própria.

O sistema híbrido do cenário 2, mostrado na Tabela 3.10, com Fortaleza como local e com média renda, vai gerar um total de 168390,37 kWh por ano. O comportamento é similar com o cenário 1, nos meses de Dezembro até Maio vai faltar eletricidade a qual deve ser comprada à concessionária. Outubro é o mês com maior geração de eletricidade com 22313,60 kWh. Por outro lado, o mês de menor conversão de energia é Abril com 7197,35 kWh. Neste cenário, o edifício não vai obter créditos de energia, pelo contrario deve comprar à concessionária 55,94 kWh.

Tabela 3.10. Balanço energético para o cenário 2

Mês	E_{GSE} (kWh)	E_{GSSF} (kWh)	E_{GSHGEE} (kWh)	Balanço energético (kWh)	Compra / Venda
Janeiro	5205,36	5704,97	10910,33	3126,86	Compra
Fevereiro	5205,36	5562,35	10767,71	3269,49	Compra
Março	2172,58	5112,53	7285,11	6752,08	Compra
Abril	2172,58	5024,76	7197,35	6839,85	Compra
Maio	2172,58	5661,09	7833,67	6203,52	Compra
Junho	9023,79	5672,06	14695,84	-658,65	Venda
Julho	9023,79	6451,00	15474,79	-1437,60	Venda
Agosto	9023,79	6933,73	15957,52	-1920,33	Venda
Setembro	15303,07	6889,85	22192,92	-8155,73	Venda
Outubro	15303,07	7010,53	22313,60	-8276,41	Venda
Novembro	15303,07	6802,08	22105,15	-8067,96	Venda
Dezembro	5205,36	6451,00	11656,37	2380,83	Compra
Média			14032,53		
Total kWh/ano			168390,37		
Total créditos de energia (kWh)				55,94	
Créditos de energia por residência (kWh)				1,40	

Fonte: Elaboração própria.

Para a alta renda a Tabela 3.11 expõe os resultados do cenário 3 em Fortaleza, o sistema híbrido eólico – solar fotovoltaico comporta-se similar ao cenário 2, sendo Abril o mês de menor produção de eletricidade (11024,13 kWh), e Outubro o mês de maior geração com 34871,48

kWh. A obtenção de créditos de energia e compra de eletricidade é dividida em 6 meses para cada um, sendo de Junho até Novembro os meses de aquisição de créditos energéticos.

Tabela 3.11. Balanço energético para o cenário 3

Mês	E_{GSE} (kWh)	E_{GSSF} (kWh)	E_{GSHGEE} (kWh)	Balanço energético (kWh)	Compra / Venda
Janeiro	8267,34	8598,79	16866,13	4923,19	Compra
Fevereiro	8267,34	8383,82	16651,16	5138,16	Compra
Março	3450,57	7705,84	11156,42	10632,91	Compra
Abril	3450,57	7573,55	11024,13	10765,20	Compra
Maio	3450,57	8532,65	11983,22	9806,10	Compra
Junho	14331,90	8549,19	22881,09	-1091,76	Venda
Julho	14331,90	9723,25	24055,15	-2265,82	Venda
Agosto	14331,90	10450,84	24782,74	-2993,41	Venda
Setembro	24304,88	10384,70	34689,58	-12900,25	Venda
Outubro	24304,88	10566,60	34871,48	-13082,15	Venda
Novembro	24304,88	10252,41	34557,29	-12767,96	Venda
Dezembro	8267,34	9723,25	17990,59	3798,73	Compra
		Média Total kWh/ano	21792,42 261508,99		
			Total créditos de energia (kWh)	-37,06	
			Créditos de energia por residência (kWh)	-0,93	

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 3.12 apresenta os resultados do cenário 4, o qual tem como local a cidade de Lagoa Santa com baixa renda. Para este cenário, o sistema híbrido eólico – solar fotovoltaico desempenha-se de outro modo por causa de que os recursos renováveis variam de um local a outro. O mês em que a planta híbrida de geração produz mais eletricidade é Agosto com 6398,20 kWh. O mês com menor produção de energia elétrica é Dezembro com 3732,63 kWh. Segundo o balanço energético, neste cenário é requerido comprar eletricidade à concessionária em Dezembro, Janeiro e Fevereiro unicamente, obtendo 0,62 kWh de crédito de energia para cada apartamento.

Tabela 3.12. Balanço energético para o cenário 4

Mês	E_{GSE} (kWh)	E_{GSSF} (kWh)	E_{GSHGEE} (kWh)	Balanço energético (kWh)	Compra / Venda
Janeiro	1644,62	2092,46	3737,08	1623,98	Compra
Fevereiro	1644,62	2101,36	3745,98	1615,08	Compra
Abril	3181,51	2323,96	5505,48	-144,42	Venda
Maio	3181,51	2332,87	5514,38	-153,32	Venda
Junho	3891,70	2159,24	6050,94	-689,88	Venda
Julho	3891,70	2417,46	6309,16	-948,10	Venda
Agosto	3891,70	2506,50	6398,20	-1037,14	Venda
Setembro	3695,52	2337,32	6032,84	-671,78	Venda
Outubro	3695,52	2119,17	5814,69	-453,63	Venda
Novembro	3695,52	2190,40	5885,92	-524,86	Venda
Dezembro	1644,62	2088,01	3732,63	1628,43	Compra
		Média Total kWh/ano	5363,12 64357,42		
			Total créditos de energia (kWh)	-24,72	
			Créditos de energia por residência (kWh)	-0,62	

Fonte: Elaboração própria.

Para o cenário 5, a Tabela 3.13 mostra os resultados obtidos. O SHGEE eólico – solar fotovoltaico vai gerar um total de 168552,95 kWh por ano. Tendo como maior geração de eletricidade o mês de Agosto com 16778,39 kWh. Tem-se um comportamento similar ao cenário 4, onde desde o mês de Março até Novembro, o sistema híbrido eólico – solar fotovoltaico vai gerar maior quantidade de energia elétrica que a requerida pelas cargas do prédio, ganhando assim um total de 106,64 kWh de créditos de energia num ano.

Tabela 3.13. Balanço energético para o cenário 5

(continua)					
Mês	E_{GSE} (kWh)	E_{GSSF} (kWh)	E_{GSHGEE} (kWh)	Balanço energético (kWh)	Compra / Venda
Janeiro	4385,65	5343,24	9728,89	4308,30	Compra
Fevereiro	4385,65	5365,98	9751,63	4285,56	Compra
Março	8484,04	6252,73	14736,77	-699,57	Venda
Abril	8484,04	5934,41	14418,45	-381,25	Venda

Tabela 3.13. Balanço energético para o cenário 5

(conclusão)					
Mês	E_{GSE} (kWh)	E_{GSSF} (kWh)	E_{GSHGEE} (kWh)	Balanço energético (kWh)	Compra / Venda
Maio	8484,04	5957,15	14441,18	-403,99	Venda
Junho	10377,87	5513,77	15891,64	-1854,45	Venda
Julho	10377,87	6173,15	16551,02	-2513,82	Venda
Agosto	10377,87	6400,52	16778,39	-2741,20	Venda
Outubro	9854,72	5411,45	15266,17	-1228,98	Venda
Novembro	9854,72	5593,35	15448,07	-1410,87	Venda
Dezembro	4385,65	5331,87	9717,52	4319,67	Compra
		Média	14046,08		
		Total			
		kWh/ano	168552,95		
			Total créditos de energia (kWh)	-106,64	
			Créditos de energia por residência (kWh)	-2,67	

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3.14. Balanço energético para o cenário 6

(continua)					
Mês	E_{GSE} (kWh)	E_{GSSF} (kWh)	E_{GSHGEE} (kWh)	Balanço energético (kWh)	Compra / Venda
Janeiro	6304,37	9154,50	15458,88	6330,45	Compra
Fevereiro	6304,37	9193,46	15497,83	6291,49	Compra
Março	12195,80	10712,72	22908,52	-1119,19	Venda
Abril	12195,80	10167,34	22363,15	-573,82	Venda
Maio	12195,80	10206,30	22402,10	-612,77	Venda
Junho	14918,19	9446,67	24364,86	-2575,53	Venda
Julho	14918,19	10576,37	25494,56	-3705,23	Venda
Agosto	14918,19	10965,93	25884,11	-4094,79	Venda
Setembro	14166,15	10225,78	24391,93	-2602,60	Venda
Outubro	14166,15	9271,37	23437,52	-1648,20	Venda
Novembro	14166,15	9583,01	23749,17	-1959,84	Venda
Dezembro	6304,37	9135,03	15439,40	6349,93	Compra
		Média	21782,67		
		Total			
		kWh/ano	261392,03		

Tabela 3.14. Balanço energético para o cenário 6

		(conclusão)
	Total créditos de energia (kWh)	79,89
	Créditos de energia por residência (kWh)	2,00

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados do último cenário testado na cidade de Lagoa Santa são mostrados na Tabela 3.14. O balanço energético realizado indica que cada apartamento do edifício deve comprar à empresa distribuidora de energia elétrica 2 kWh de créditos energéticos por ano. O SGHEE não forneceria de eletricidade ao edifício residencial por três meses, tendo a necessidade de comprar eletricidade da concessionária. Acontece o mesmo nos cenários 4, o mês de Agosto e de Dezembro são os períodos onde o sistema híbrido gera maior e menor quantidade de eletricidade, respectivamente.

Comparando os cenários 1, 2 e 3 de Fortaleza com os cenários 4, 5 e 6 de Lagoa Santa se tem que os SHGEE eólico – solar fotovoltaico baixa e alta renda da cidade de Fortaleza gera mais eletricidade que as plantas de eletricidade de Lagoa Santa. No entanto, para média renda o comportamento é o contrário, o sistema híbrido da cidade de Lagoa Santa produz maior quantidade de energia elétrica que a planta de geração de Fortaleza. Em geral, os valores de eletricidade gerada para todas as rendas são semelhantes entre si.

Em relação aos créditos de energia obtidos por ano, a Tabela 3.15 apresenta os créditos de energia para cada cenário estudado. O cenário 5 dispõe da maior quantidade de créditos de energia por ano, e nos cenários 2 e 6 não se obtém créditos de energia no ano.

Tabela 3.15. Eletricidade total gerada e créditos de energia por ano para todos os cenários

Cenário	Cidade/Renda	E_{SHGE} (kWh/ano)	Créditos de energia (kWh/ano)
1	Fortaleza/Baixa Renda	64366,93	34,23
2	Fortaleza/Média Renda	168390,37	0
3	Fortaleza/Alta Renda	261508,99	37,06
4	Lagoa Santa/Baixa Renda	64357,42	24,72
5	Lagoa Santa/Média Renda	168552,95	106,64
6	Lagoa Santa/Alta Renda	261392,03	0

Fonte: Elaboração própria.

Os cenários 1, 2 e 3 tem um comportamento muito similar entre eles (meses de compra e ganho de créditos de energia), em consequência que os recursos eólicos e solar utilizados são os mesmos. De igual forma, nos cenários 4, 5 e 6 acontecem a mesma conduta pela mesma justificação.

4 ANÁLISE ECONÔMICA

Neste capítulo, foi desenvolvida a análise econômica das tecnologias envolvidas no SHGEE. A metodologia para a análise econômica é baseada no valor presente líquido para obter o custo da eletricidade gerada pelos SHGEE para os diferentes cenários estudados e esta metodologia foi desenvolvida por Laranci, Silveira e Lamas (2012).

4.1 CUSTO DA ELETRICIDADE GERADA PELA PLANTA

De acordo com Laranci, Silveira e Lamas (2012) o custo da energia elétrica gerada por uma planta está definido conforme a Equação (4.1).

$$C_{ge} = \frac{Inv \cdot f}{H \cdot P_{Sistema}} + C_{Man} + C_{Ope} \quad (4.1)$$

Sendo, Inv o investimento da planta [US\$], f o fator de anuidade[1/ano], H o período de operação da planta [h/ano], $P_{Sistema}$ a potência do sistema [kW], C_{Man} o custo de manutenção [US\$/kWh], e C_{Ope} o custo de operação do SGHE [US\$/kWh].

4.1.1 Custo de Manutenção e Operação

Segundo Braga (2014), o custo de manutenção é 3% do custo de investimento, onde está incluído o salário do operário de manutenção. O custo de operação está definido pela Equação (4.2), onde considerou-se a energia consumida pelos componentes auxiliares do sistema híbrido.

$$C_{Ope} = \frac{P_{sec(cons)} \cdot C_{Elet}}{P_{Sistema}} \quad (4.2)$$

Sendo, $P_{sec(cons)}$ a potência elétrica consumida pelos demais componentes do sistema [kW] (principalmente os inversores), C_{Elet} o custo da eletricidade da concessionária [US\$/kWh], e $P_{Sistema}$ a potência do sistema [kW].

4.1.2 Fator de Anuidade

O fator de anuidade é o valor de um fluxo de rendimentos que produz um lucro em um período determinado. O fator de anuidade está definido pela Equação (4.3) e (4.4) (SILVEIRA et al.; 2012):

$$f = \frac{q^k(q - 1)}{q^k - 1} \quad (4.3)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (4.4)$$

Sendo, f o fator de anualidade [1/ano], k o número de anos [anos], e r a taxa anual de juros [%]. As taxas anuais de juros utilizadas nesta análise são de 4%, 8% e 12%.

Sabendo-se o custo da eletricidade gerada por cada tecnologia utilizada (SE e SSF), é aplicada uma média ponderada para calcular o custo da energia elétrica produzida pelo SHGEE:

$$C_{ge_{SHGE}} = \frac{E_{SE} \cdot C_{ge_{SE}} + E_{SSF} \cdot C_{ge_{SSF}}}{E_{SE} + E_{SSF}} \quad (4.6)$$

Sendo, E_{SE} a energia elétrica gerada pelo SE [kWh], $C_{ge_{SE}}$ o custo de eletricidade gerada pelo SE [kWh/US\$], E_{SSF} a energia elétrica gerada pelo SSF [kWh], e $C_{ge_{SSF}}$ o custo de eletricidade gerada pelo SSF [kWh/US\$].

4.2 RENDIMENTO ANUAL ESPERADO

Para conhecer o período de retorno do investimento ou *payback*, é utilizada a equação (4.5), a qual define o rendimento anual esperado (G_{el}) (LARANCI; SILVEIRA; LAMAS, 2002):

$$G_{el} = P_{Sistema} \cdot H (C_{Elet} - C_{ge_{SHGE}}) \quad (4.5)$$

Sendo, $P_{Sistema}$ a potência do sistema [kW], H o período de operação da planta [h/ano], C_{Elet} o custo da eletricidade da concessionária [US\$/kWh], e $C_{ge_{SHGE}}$ o custo de eletricidade gerada pela planta [US\$/kWh].

4.3 TARIFICAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

De acordo com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL, 2011), os consumidores estão divididos em dois grupos. No grupo A encontram-se os consumidores atendidos em alta tensão (acima de 2300 volts). Neste grupo estão as indústrias, shopping centers, entre outros. No grupo B é composto por consumidores residenciais ou de baixa tensão (menor de 2300 volts). Este grupo é dividido em quatro subgrupos.

- Subgrupo B1: residencial e residencial baixa renda;
- Subgrupo B2: rural e cooperativa de eletrificação rural;
- Subgrupo B3: demais classes;
- Subgrupo B4: iluminação pública.

No grupo B utiliza-se a tarifa monômnia. A tarifa monômnia é constituída por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa (kWh). O subgrupo está dividido em tarifa convencional, convencional de baixa renda e tarifa branca. A tarifa convencional de baixa renda aplica-se à consumidores com consumo de até 200 kWh/mês, e a tarifa convencional para consumidores maiores a este valor. Estes dois tipos de tarifas são constante ao longo do dia, o que significa que não varia segundo as horas de ponta ou não ponta do dia. A tarifa branca foi implementada para diminuir o consumo de eletricidade no horário de ponta e aumentar o consumo no horário vale ou fora de ponta, para desta forma ter um consumo de eletricidade mais equilibrado. A tarifa branca possui três grupos horários os quais tem diferentes preços na venda de energia elétrica, o grupo horário de fora de ponta, intermediário, e de horário de ponta. A tarifa de fora de ponta é bem menor que a tarifa de ponta e intermediário, a tarifa de ponta é a maior por cada kWh consumido.

Os preços de energia elétrica variam para cada distribuidora. Estes preços podem ser encontrados no site de internet da ANEEL. É importante ressaltar que os preços publicados na ANEEL não são inclusos os tributos. Para o setor elétrico são aplicáveis os seguintes tributos:

- PIS: Programas de Integração Social = 1,65%;
- COFINS: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social = 7,6%;

- ICMS: Imposto sobre a Circulação de Mercadoria e Serviços. Este imposto é estadual, variando de estado para estado. Para o estado de Ceará, o ICMS é 17%. Para o estado de Minas Gerais, o ICMS é 18%.

Para a cidade de Fortaleza, no estado de Ceará, as tarifas de eletricidade para o grupo B1, aplicando os impostos anteriormente descritos, são apresentadas na Tabela 4.1, coletadas da Resolução da ANEEL No. 1.882 de 14 de Abril de 2015. Para a cidade de Lagoa Santa, localizada no estado de Minas Gerais, as tarifas de eletricidade encontram-se na Tabela 4.2, segundo a Resolução da ANEEL No. 1.872 de 7 de Abril de 2015. A taxa de cambio de Reais (R\$) para Dólares Estadunidenses (US\$) escolhida foi de 1 US\$ = 3,5 R\$, a qual foi obtida fazendo uma média por dois valores históricos (Fev. 2015 – Fev. 2016) do Portal de Internet UOL Brasil (2016).

Tabela 4.1. Tarifas de eletricidade grupo B1 em Fortaleza

Tarifas de eletricidade	Em R\$/kWh sem impostos	Em R\$/kWh com impostos PIS, COFINS e ICMS para Fortaleza	Em US\$/kWh
Convencional	0,4180	0,5667	0,1619
Fora de Ponta	0,3478	0,4715	0,1347
Intermediária	0,5251	0,7120	0,2034
Ponta	0,8355	1,1329	0,3237
Convencional baixa renda	0,4130	0,5599	0,1600

Fonte: (ANEEL, 2015).

Tabela 4.2. Tarifas de eletricidade grupo B1 em Lagoa Santa

Tarifas de eletricidade	Em R\$/kWh sem impostos	Em R\$/kWh com impostos PIS, COFINS e ICMS para Lagoa Santa	Em US\$/kWh
Convencional	0,5097	0,7007	0,2002
Fora de Ponta	0,4240	0,5828	0,1665
Intermediária	0,6130	0,8426	0,2407
Ponta	0,9401	1,2923	0,3692
Convencional baixa renda	0,5034	0,6920	0,1977

Fonte: (ANEEL, 2015).

Para os cenários estudados, utilizou-se as tarifas de eletricidade convencional de baixa renda para os casos de baixa renda, a tarifa convencional para os casos de mediana renda e alta renda e adaptou-se a média das três modalidades de tarificação branca para os três tipos de renda para calcular o rendimento anual esperado.

4.3.1 Bandeiras Tarifárias

A ANEEL nos primeiros meses de 2015, implementou-se as bandeiras tarifárias (ANEEL, 2015). As bandeiras tarifárias alteram o preço da eletricidade dependendo das condições de geração de eletricidade. As bandeiras tarifárias são:

- A bandeira verde significa que as condições de geração de energia elétrica são favoráveis. Quando se tem esta bandeira a tarifa não aumenta.
- A bandeira amarela representa condições de geração menos favoráveis. O custo de eletricidade aumenta R\$ 0,025 para cada quilowatt-hora (kWh) consumido.
- A bandeira vermelha apresenta condições mais caras de geração. A tarifa aumenta R\$ 0,045 para cada quilowatt-hora consumido.

Para esses valores deve-se incluir os impostos vigentes. As bandeiras tarifárias variam mensalmente. O operador nacional do sistema elétrico escolhe a melhor estratégia de geração de energia baseado na demanda, sendo definido as plantas termoeletricas que devem ser acionadas. A ideia principal das bandeiras tarifárias é apresentar um preço mais transparente para que o consumidor tenha melhor utilização da eletricidade.

Utilizou-se somente a bandeira verde na análise econômica. No entanto as três bandeiras foram utilizadas na análise ambiental.

4.4 RESULTADOS

Com base nas equações anteriormente descritas, é possível a determinação da viabilidade da implementação do SHGEE em um edifício residencial em Fortaleza e em Lagoa Santa. A vida útil do SHGEE pode alcançar os 25 anos, no entanto, para este estudo a vida útil é de 20 anos (ARVESEN; HERTWICH, 2012).

Lembrando que os cenários 1, 2 e 3 estão localizados em Fortaleza e os cenários 4, 5 e 6 em Lagoa Santa, a Tabela 4.3 mostra o investimento total de cada um dos casos estudados. O investimento total tem contemplado os custos dos equipamentos, custo da instalação dos equipamentos, e o custo da importação dos equipamentos. De acordo Goodrich, James e Woodhouse (2012), o custo da instalação nos Estados Unidos é 5% do custo dos equipamentos, este inclui o preço do pessoal instalando, os equipamentos alugados e outros materiais para fazer a implementação do sistema de geração de eletricidade. Segundo Laranci (2002) o custo de instalação de sistemas de geração de eletricidade solares fotovoltaicos é 20% do total do custo dos equipamentos. De acordo com o *Energy Informative*, *Rocky Mountain Institute* e *Green tech media* o custo de instalação é 15% do investimento. Para este estudo, utilizou-se um custo de instalação de 30%, o qual inclui as obras civis, equipamentos necessários para a instalação, mão de obra e materiais. Utilizou-se custo de importação de 40% do custo dos equipamentos. Nos resultados da Tabela 4.3 pode-se observar que os investimentos nos casos de Fortaleza são maiores que os cenários em Lagoa Santa, isto em consequência de que na cidade de Minas Gerais apresenta melhores recursos renováveis, o que se traduz com uma menor quantidade de aerogeradores e painéis solares fotovoltaicos. O investimento total da planta híbrida para cada apartamento se encontra entre US\$ 6925 – 6945 para famílias de baixa renda, entre US\$ 16868 e 17766 para famílias de média renda, e por último entre US\$ 24414 e 27542 para famílias de alta renda.

Tabela 4.3. Investimento em cada cenário (US\$)

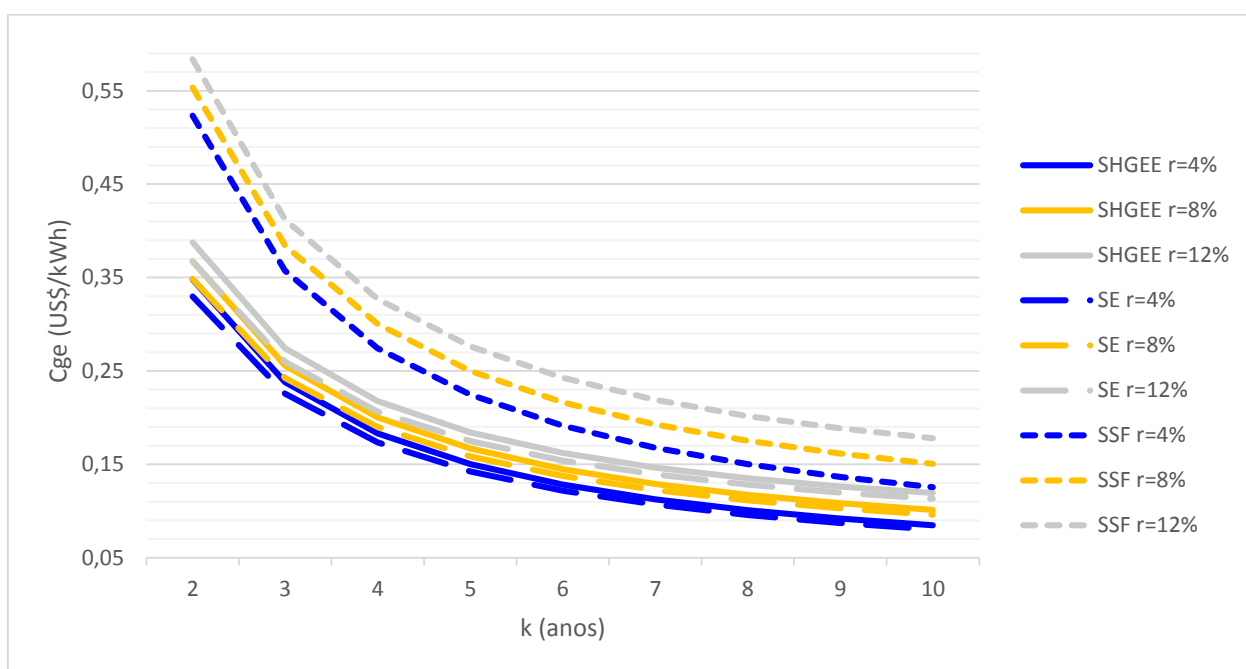
Descrição	Cenário 1 Fortaleza Baixa Renda	Cenário 2 Fortaleza Média Renda	Cenário 3 Fortaleza Alta Renda	Cenário 4 Lagoa Santa Baixa Renda	Cenário 5 Lagoa Santa Média Renda	Cenário 6 Lagoa Santa Alta Renda
Turbinas eólicas <i>Aeolos</i> 10kW	119880,00	339660,00	539460,00	119880,00	319680,00	459540,00
Módulos Fotovoltaicos <i>Canadian Solar</i> CS6P-265P	13525,60	32181,60	48505,60	13059,20	33347,60	57134,00
Inversores SE20000US-480	9260,00	25465,00	39355,00	9260,00	23150,00	37040,00
Medidores de Eletricidade Bidirecional GE kV2	20727,96	20727,96	20727,96	20727,96	20727,96	20727,96
Subtotal	163393,56	418034,56	648048,56	162927,16	396905,56	574441,96
Custo da Instalação (30%)	49018,07	125410,37	194414,57	48878,15	119071,67	172332,59
Custo da Importação (40%)	65357,42	167213,82	259219,42	65170,86	158762,22	229776,78
Investimento Total (US\$)	277769,05	710658,75	1101682,55	276976,17	674739,45	976551,33

Fonte: Elaboração própria.

4.4.1 Resultados para o cenário 1

O primeiro cenário corresponde a um edifício de baixa renda situado em Fortaleza. A Figura 4.1 apresenta o custo de eletricidade gerada pelo SHGEE com horas de operação do SE de 6336 h/ano, e do SSF de 2520 h/ano. Observa-se que na Figura 4.1 os custos de eletricidade no segundo ano são de 0,3477, 0,3675 e de 0,3875 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. No décimo ano, os custos de eletricidades são de 0,0845, 0,1012 e de 0,1193 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. Pode-se observar que o custo de eletricidade decresce consideravelmente desde o primeiro ano até o décimo ano. Observa-se também que os custos de eletricidade gerada pelo SSF são maiores que os custos de eletricidade gerada pelo SE.

Figura 4.1. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 1

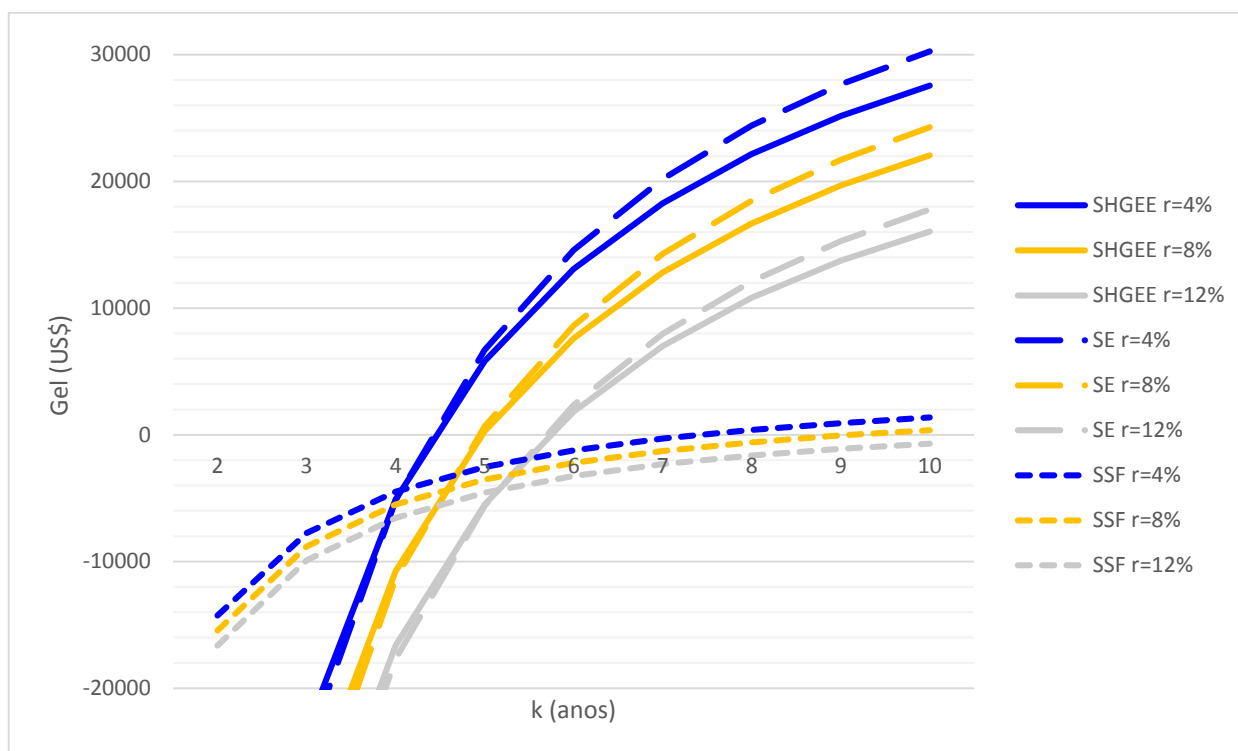


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.2 mostra o benefício econômico recebido anualmente por 10 anos utilizando a tarifa convencional de baixa renda. Com esta figura pode-se conhecer o período de retorno do investimento. Para uma taxa de juros de 4%, o período de *payback* é ao redor de 4 anos e meio. Para a taxa de juros de 8%, o retorno do investimento é maior que 5 anos. Com a taxa maior de juros (12%), é necessário aguardar perto de 6 anos para recuperar o investimento do SHGEE.

Com uma vida útil do SHGEE de 20 anos, e as taxas de juros empregadas, é possível recuperar o investimento antes de atingir a vida útil do SHGEE. Os períodos de retorno do investimento são maiores para o SSF que para o SE.

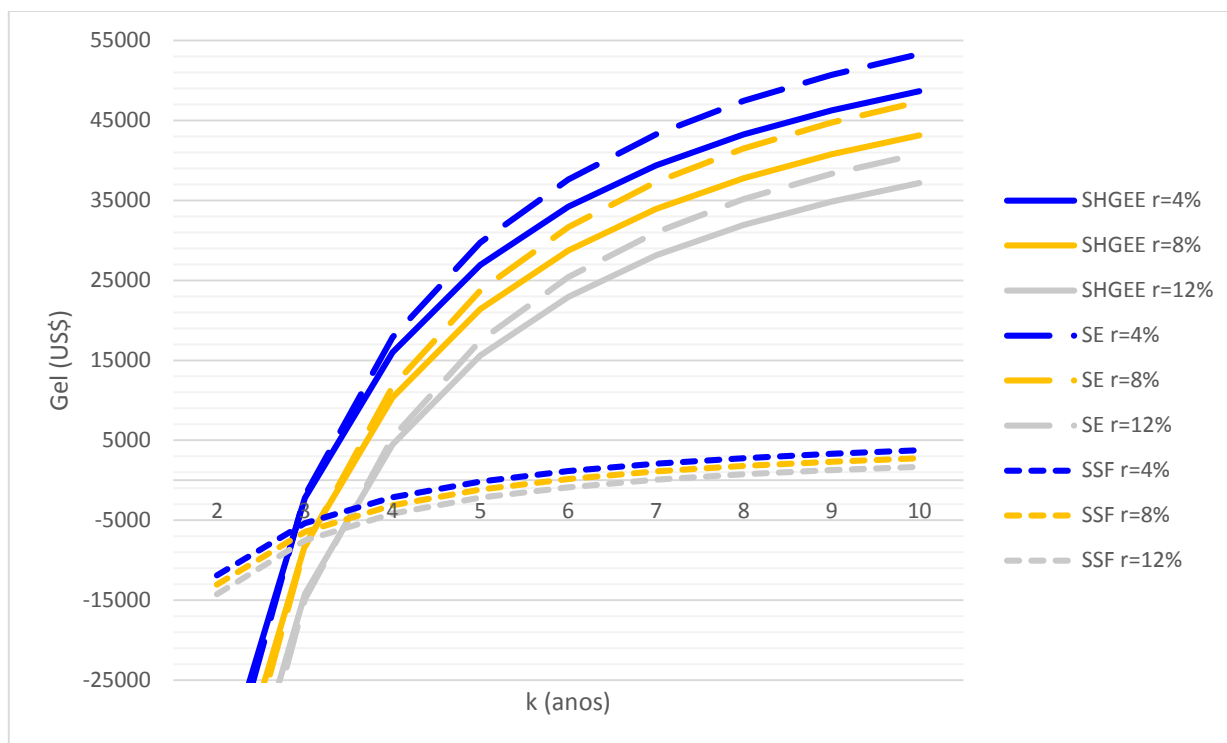
Figura 4.2. Período de *payback* do SHGEE com tarifa convencional cenário 1 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.3 mostra a receita anual esperada em 10 anos utilizando a tarifa branca média. O período de retorno do investimento encontra-se entre o terceiro e quarto ano, para as taxas de juros de 4%, 8% e 12%. Nota-se que com um preço maior de eletricidade da concessionária, o período *payback* diminui. Os períodos de *payback* para o SSF encontram-se entre 5 a 7 anos.

Figura 4.3. Período de *payback* do SHGEE com tarifa branca média cenário 1 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)

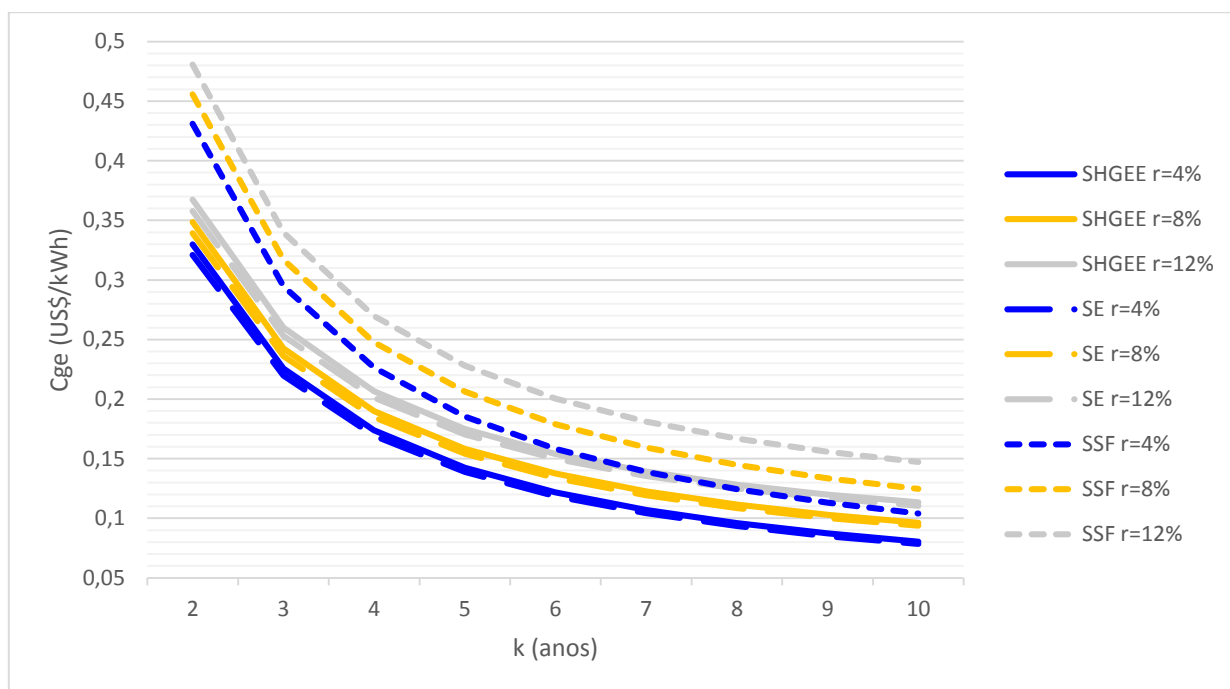


Fonte: Elaboração própria.

4.4.2 Resultados para o cenário 2

O segundo cenário corresponde a um edifício de média renda localizado em Fortaleza. A Figura 4.4 apresenta o custo de eletricidade gerada pelo SHGEE com igual horas de operação que o caso anterior (SE de 6336 h/ano, e SSF de 2520 h/ano). Observa-se na Figura 4.4 que os custos de eletricidade no segundo ano são de 0,3298, 0,3485 e de 0,3675 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. No décimo ano, os custos de eletricidade são de 0,0804, 0,0962 e de 0,1133 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. Os custos de eletricidade gerada pelo SE são muito próximos do custo de eletricidade gerada pelo SHGEE.

Figura 4.4. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 2

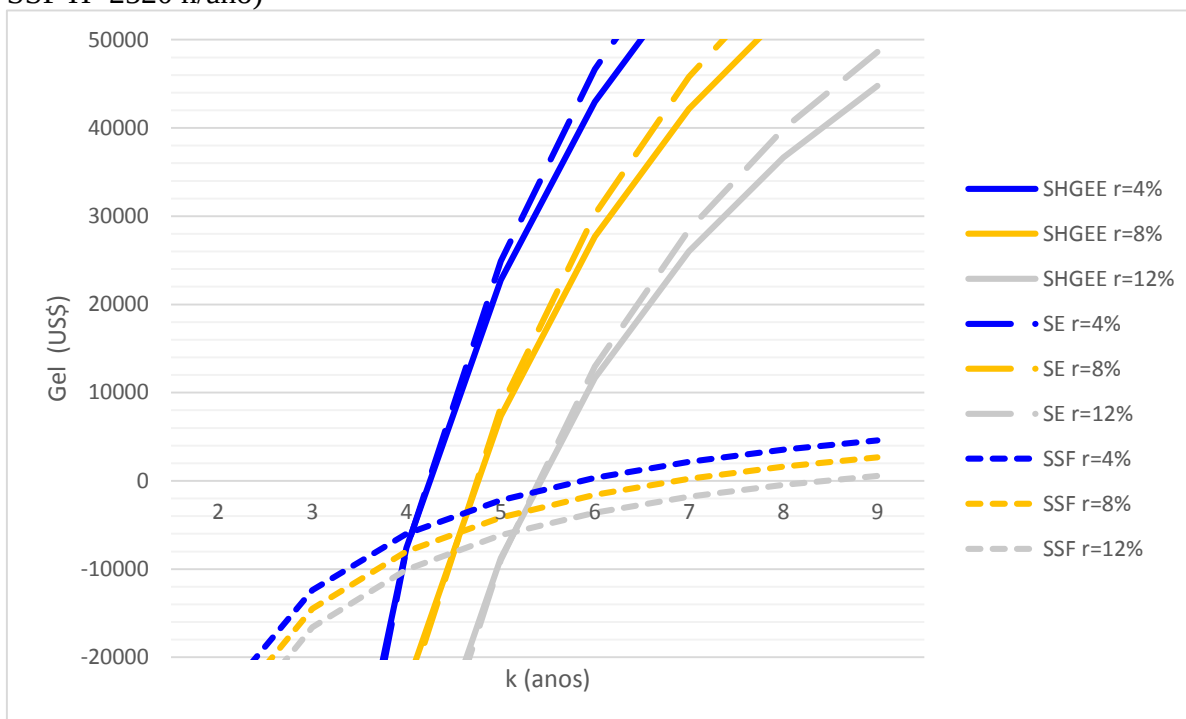


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.5 mostra o benefício econômico recebido anualmente por 10 anos utilizando a tarifa convencional. Para uma taxa de juros de 4%, o período de *payback* é maior que 4 anos. Para a taxa de juros de 8%, o retorno do investimento é maior que 4 anos e meio. Com a taxa maior de juros de 12%, é necessário esperar 5 anos e meio para recuperar o investimento do SHGEE. O período de retorno do investimento encontra-se dentro da vida útil do SHGEE. Cabe ressaltar que os período de *payback* do SE situam-se perto dos períodos de recuperação do investimento do SHGEE.

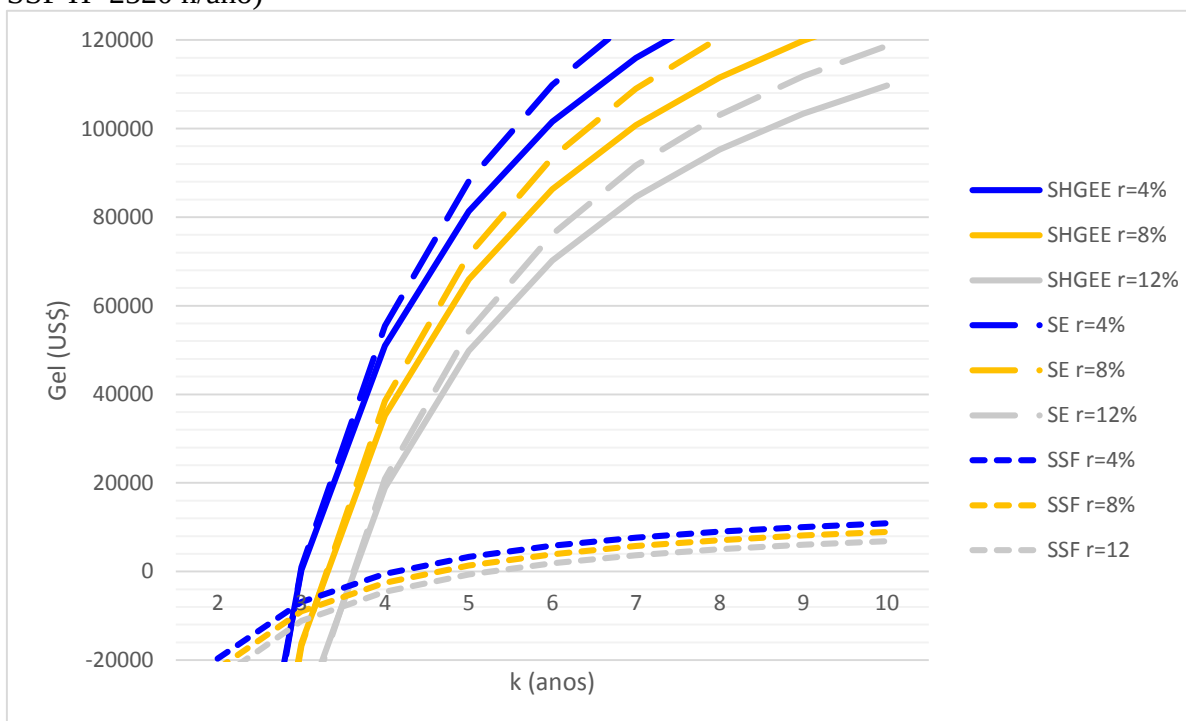
A Figura 4.6 mostra a receita anual esperada dos primeiros 10 anos utilizando a tarifa branca média. O período de retorno do investimento encontra-se entre o início e o meio do terceiro ano, para as taxas de juros de 4%, 8% e 12%. Para o SSF, os períodos de retorno do investimento situam-se entre o quarto ano e o médio do quinto ano para as três taxas de juros analisadas.

Figura 4.5. Período de *payback* do SHGEE com tarifa convencional cenário 2 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.6. Período de *payback* do SHGEE com tarifa branca média cenário 2 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)

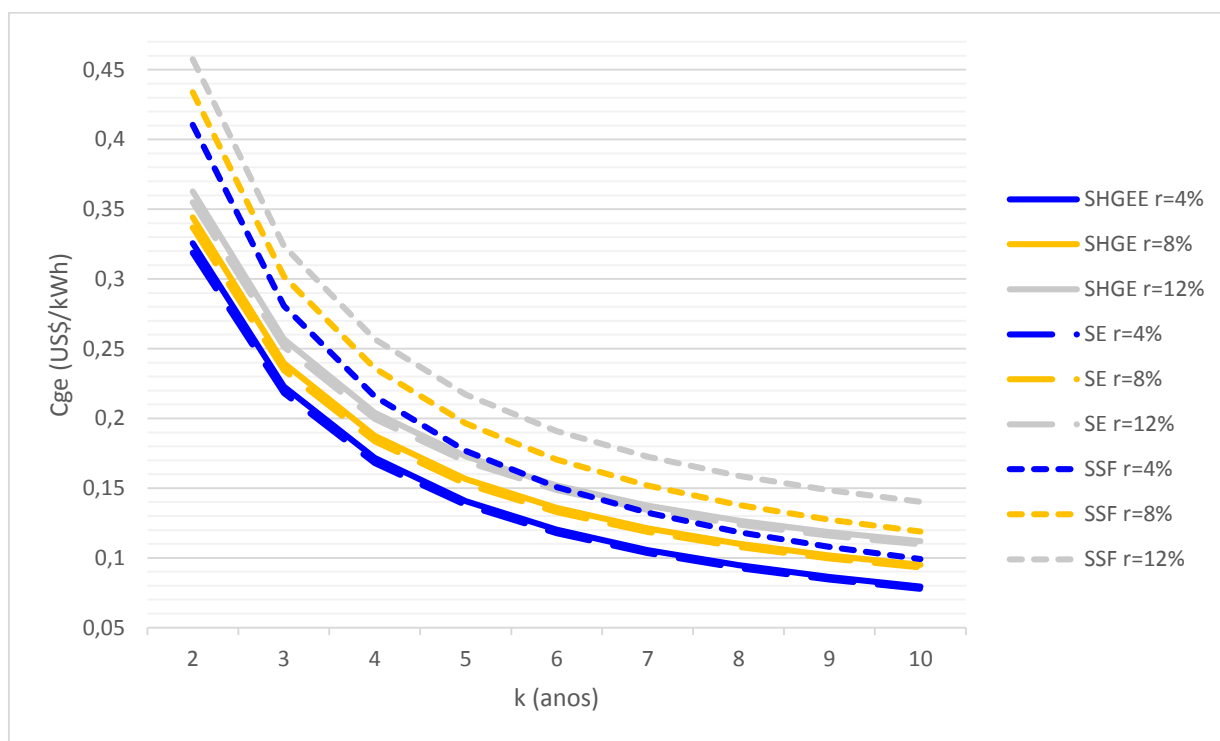


Fonte: Elaboração própria.

4.4.3 Resultados para o cenário 3

O terceiro cenário corresponde a um edifício de alta renda também situado em Fortaleza. A Figura 4.7 apresenta o custo de eletricidade gerada pelo SHGEE com horas de operação para o SE de 6336 h/ano, e para o SSF de 2520 h/ano. Na Figura 4.7, percebe-se que os custos de eletricidade no segundo ano são de 0,3257, 0,3442 e de 0,3629 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. No décimo ano, os custos de eletricidade são de 0,0794, 0,0950 e de 0,1119 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. Igualmente como nos cenários anteriores o custo da eletricidade gerada pelo SSF é mais custosa que a gerada pelo SE.

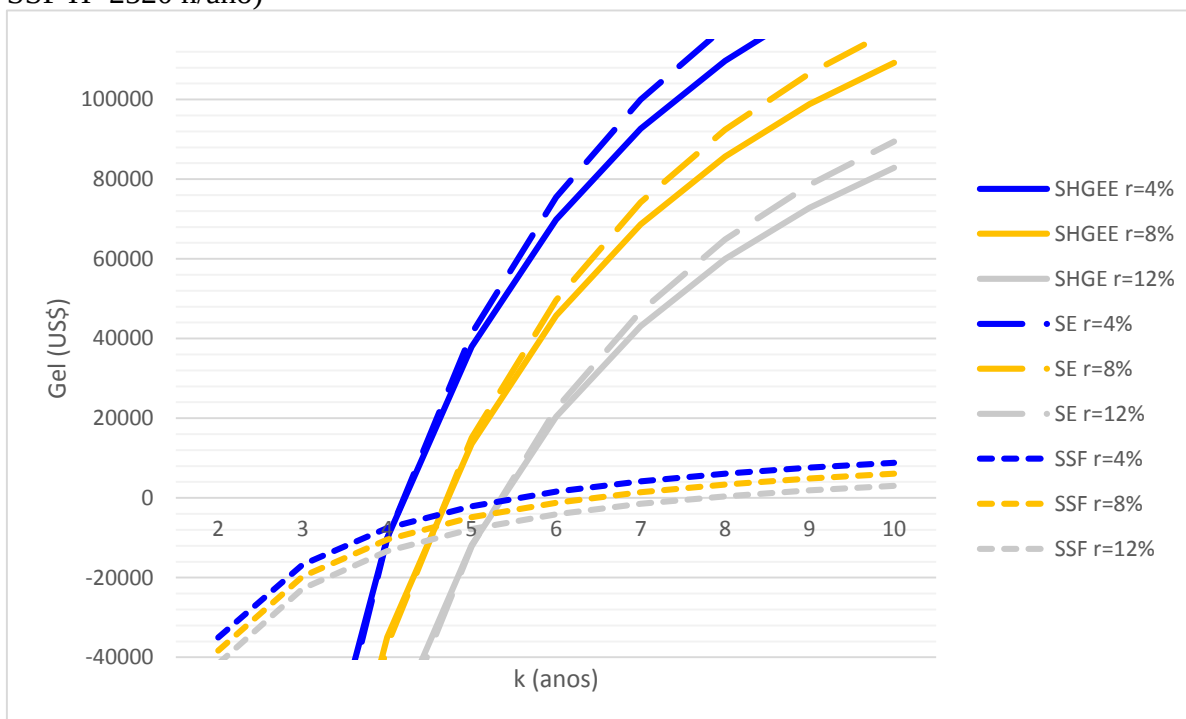
Figura 4.7. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 3



Fonte: Elaboração própria.

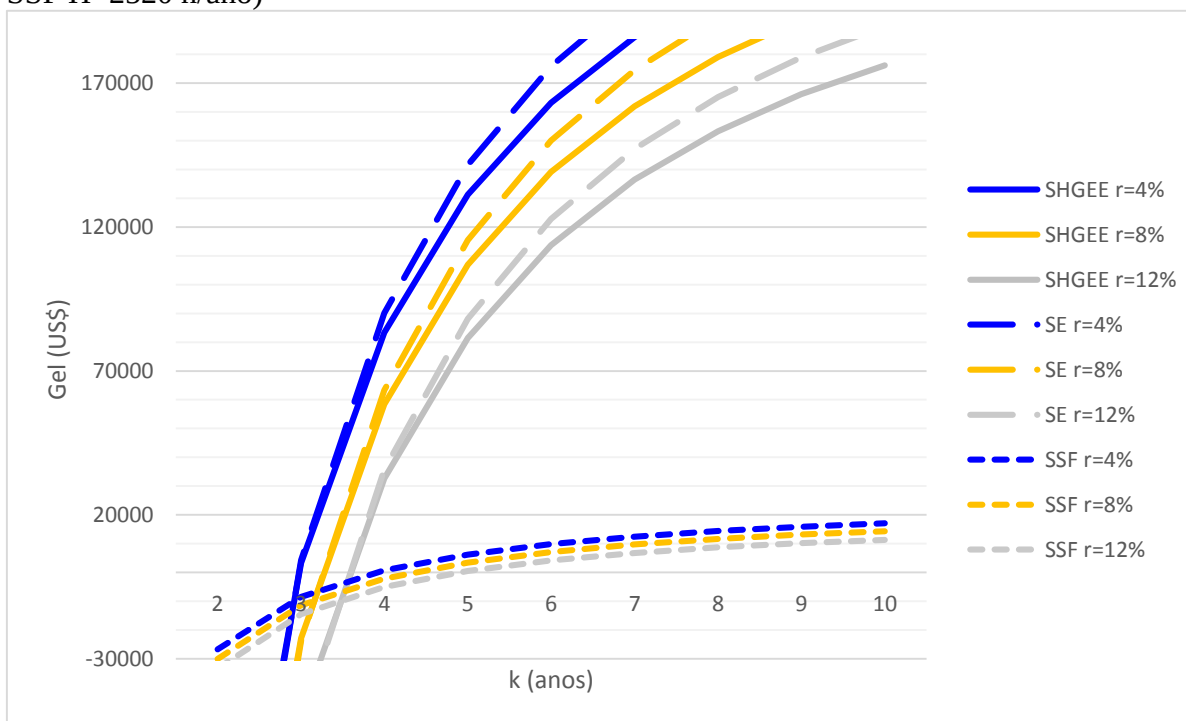
A Figura 4.8 mostra o benefício econômico recebido em 10 anos utilizando a tarifa convencional. Para uma taxa de juros de 4%, o período de *payback* está no primeiro trimestre do quarto ano. Para a taxa de juros de 8%, o retorno do investimento encontra-se no segundo semestre do quarto ano. Com a taxa maior de juros de 12%, é necessário esperar até o fim do primeiro semestre do quinto ano para recuperar o investimento do SHGEE.

Figura 4.8. Período de *payback* do SHGEE com tarifa convencional cenário 3 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.9. Período de *payback* do SHGEE com tarifa branca média cenário 3 (SE H=6336 h/ano, SSF H=2520 h/ano)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.9 mostra o benefício econômico recebido nos primeiros 10 anos utilizando a tarifa branca média. O período de retorno do investimento encontra-se entre o começo e a metade do terceiro ano, para as taxas de juros de 4%, 8% e 12%.

Nota-se que o período de *payback* dos SHGEE para os três cenários na cidade de Fortaleza aplicando a tarifa convencional situa-se entre o quarto e sexto ano, e empregando a tarifa branca média no terceiro ano. Conclui-se também que o preço de eletricidade gerada pelos SHGEE não tem uma variação muito significativa entre os três primeiros cenários, a causa de que os SHGEE foram dimensionados, com os mesmos dados eólicos e solares, para ter uma potência instalada igual à potência total das cargas dos edifícios e desta forma cumprir as resoluções da ANEEL n° 482 e 687.

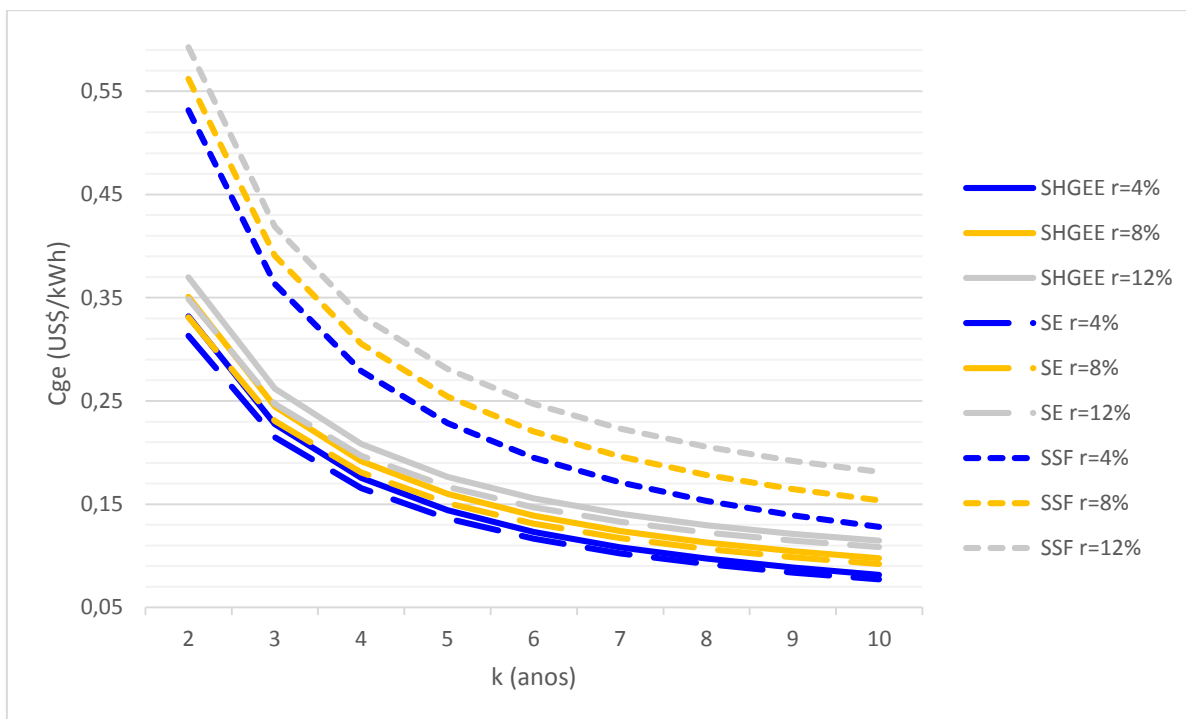
4.4.4 Resultados para o cenário 4

Este cenário corresponde a um edifício de baixa renda localizado em Lagoa Santa. A Figura 4.10 apresenta o custo de eletricidade gerada pelo SHGEE com horas de operação do SE de 6692 h/ano, e do SSF de 2520 h/ano. Observa-se que na Figura 4.10 os custos de eletricidade no segundo ano são de 0,3320, 0,3508 e de 0,3899 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. No décimo ano, os custos de eletricidades são de 0,0817, 0,0975 e de 0,1147 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente.

A Figura 4.11 mostra o benefício econômico recebido anualmente por 10 anos utilizando a tarifa convencional de baixa renda. Para uma taxa de juros de 4%, o período de *payback* é de 3 anos e meio. Para a taxa de juros de 8%, o retorno do investimento encontra-se no fim do terceiro ano. Com a taxa maior de juros (12%), é necessário esperar ao redor de 4 anos e dois meses para recuperar o investimento do SHGEE.

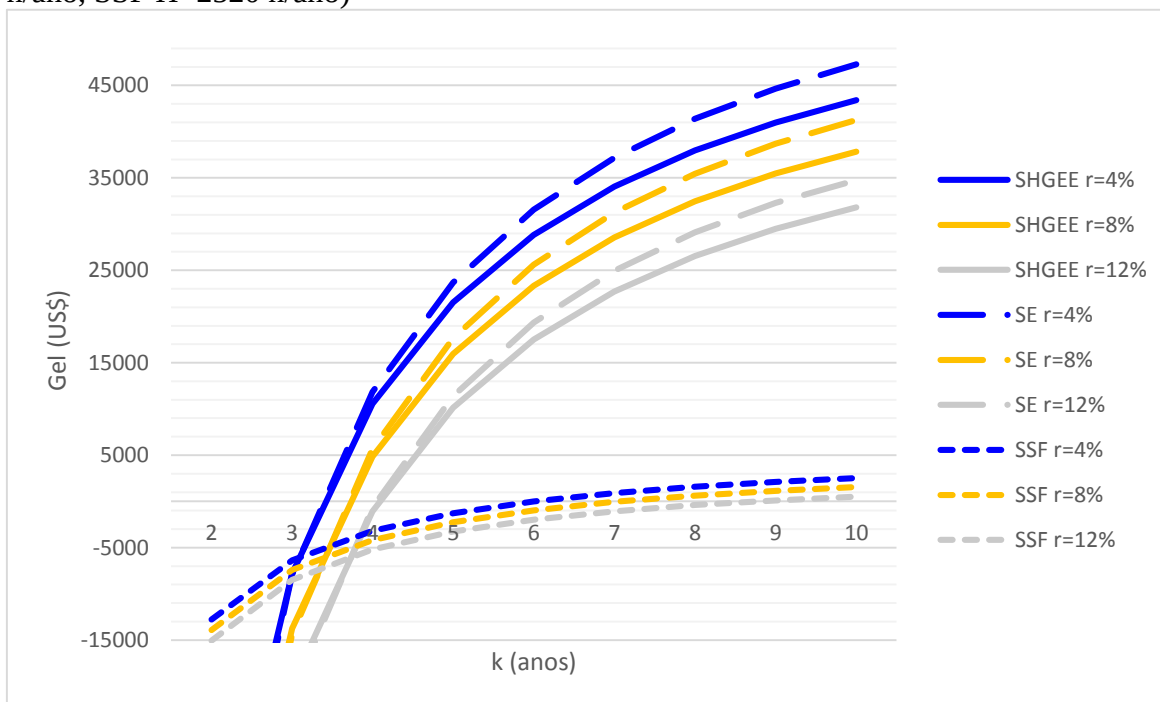
A Figura 4.12 mostra o benefício econômico recebido anualmente por 10 anos utilizando a tarifa branca média. O período de retorno do investimento encontra-se no segundo semestre do segundo ano, para as taxas de juros de 4%, 8% e 12%. Os períodos de *payback* do SSF são maiores que para os SE.

Figura 4.10. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 4



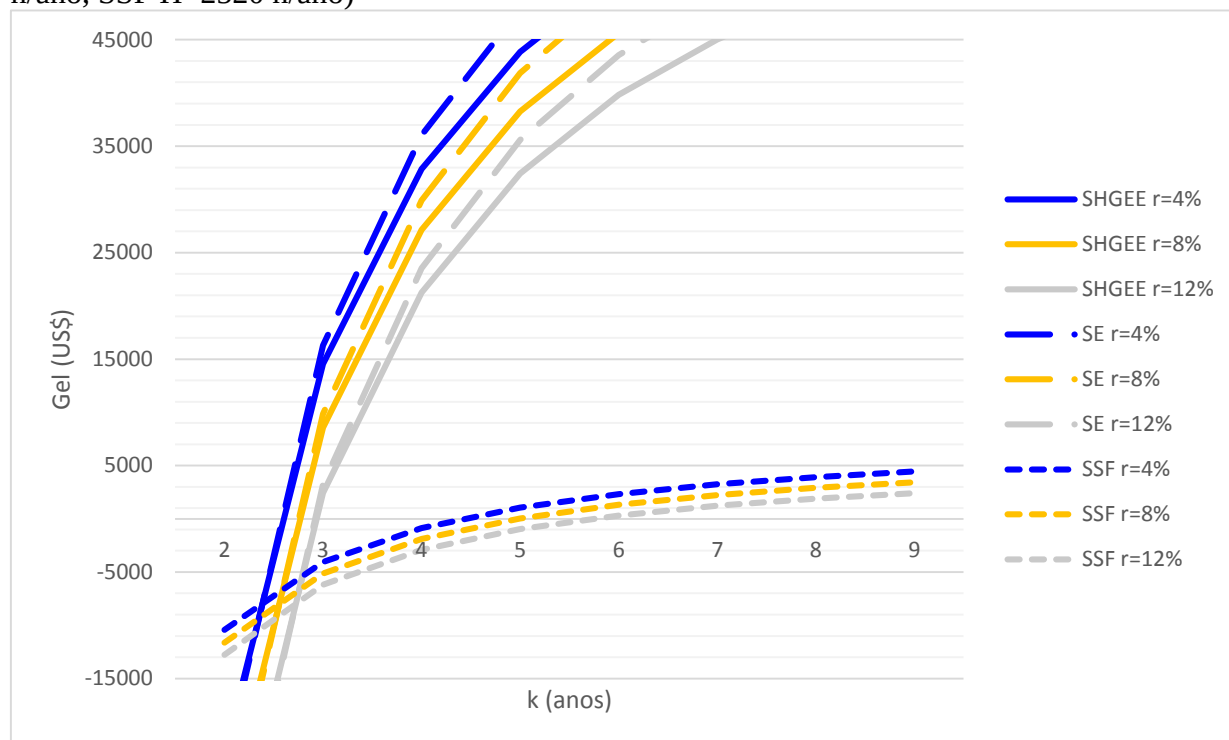
Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.11. Período de *payback* do SHGEE com tarifa convencional cenário 4 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.12. Período de *payback* do SHGEE com tarifa branca média cenário 4 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)

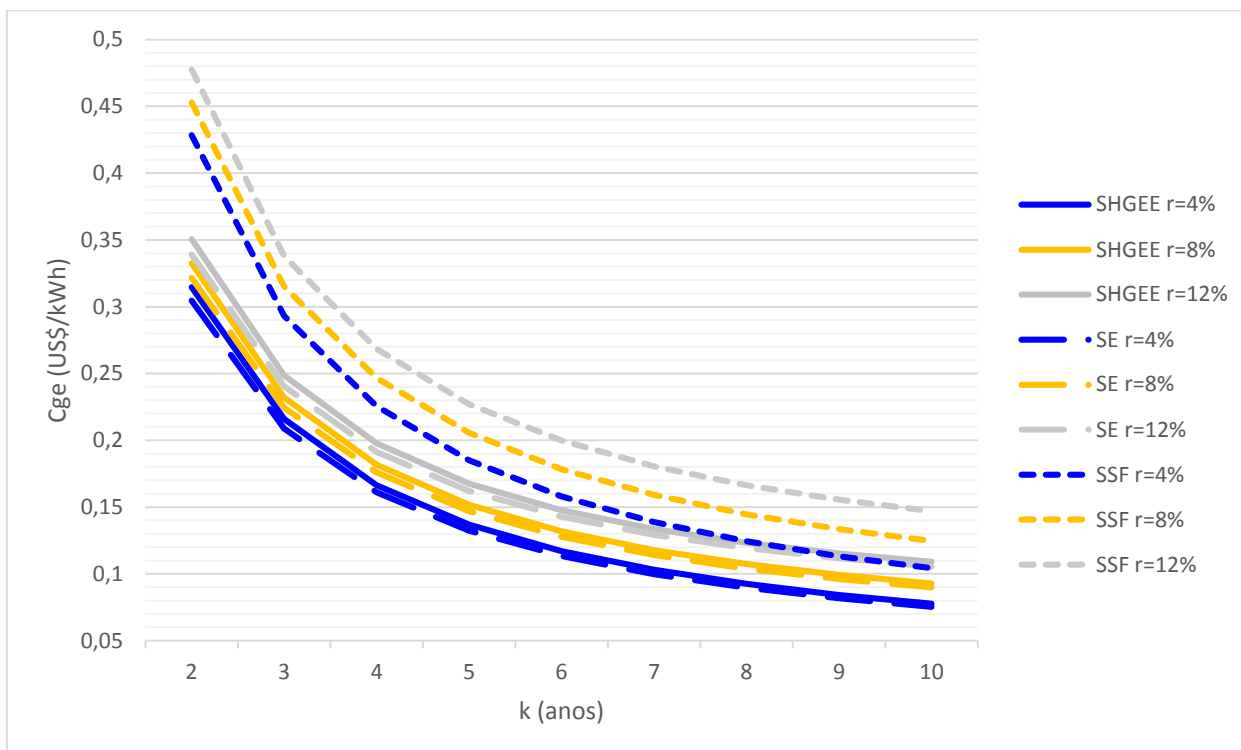


Fonte: Elaboração própria.

4.4.5 Resultados para o cenário 5

O quinto cenário corresponde a um edifício de média renda situado em Lagoa Santa. A Figura 4.13 apresenta o custo de eletricidade gerada pelo SHGEE com igual horas de operação que o cenário anterior (SE de 6692 h/ano, e SSF de 2520 h/ano). Observa-se na Figura 4.13 que os custos de eletricidade no segundo ano são de 0,3147, 0,3325 e de 0,3506 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. No décimo ano, os custos de eletricidade são de 0,0777, 0,0927 e de 0,1090 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. Os custos de eletricidade gerada pelo SE encontram-se perto dos custos do SHGE. No entanto, os custos de eletricidade gerada pelo SSF são maiores que os custos do SE.

Figura 4.13. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 5

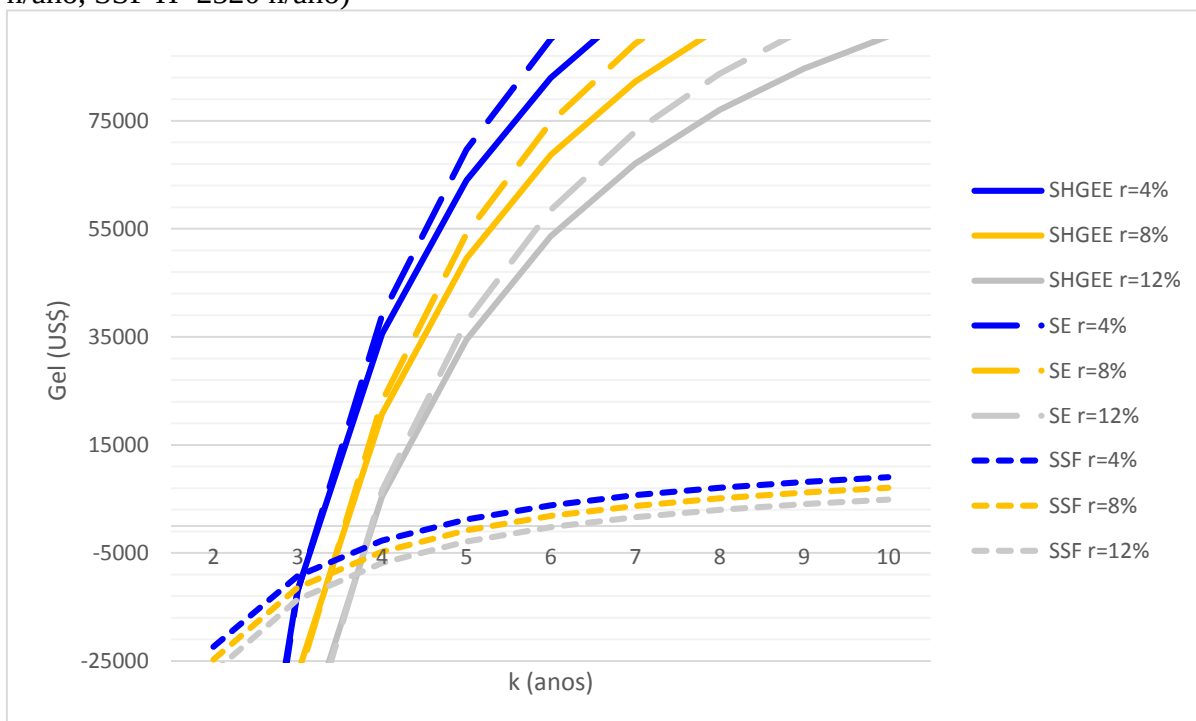


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.14 mostra o benefício econômico recebido anualmente por 10 anos utilizando a tarifa convencional. Para uma taxa de juros de 4%, o período de *payback* é menor que 3 anos e meio. Para a taxa de juros de 8%, o retorno do investimento é maior que 3 anos e meio. Com a taxa maior de juros de 12%, é necessário esperar cerca de 4 anos para recuperar o investimento do SHGEE.

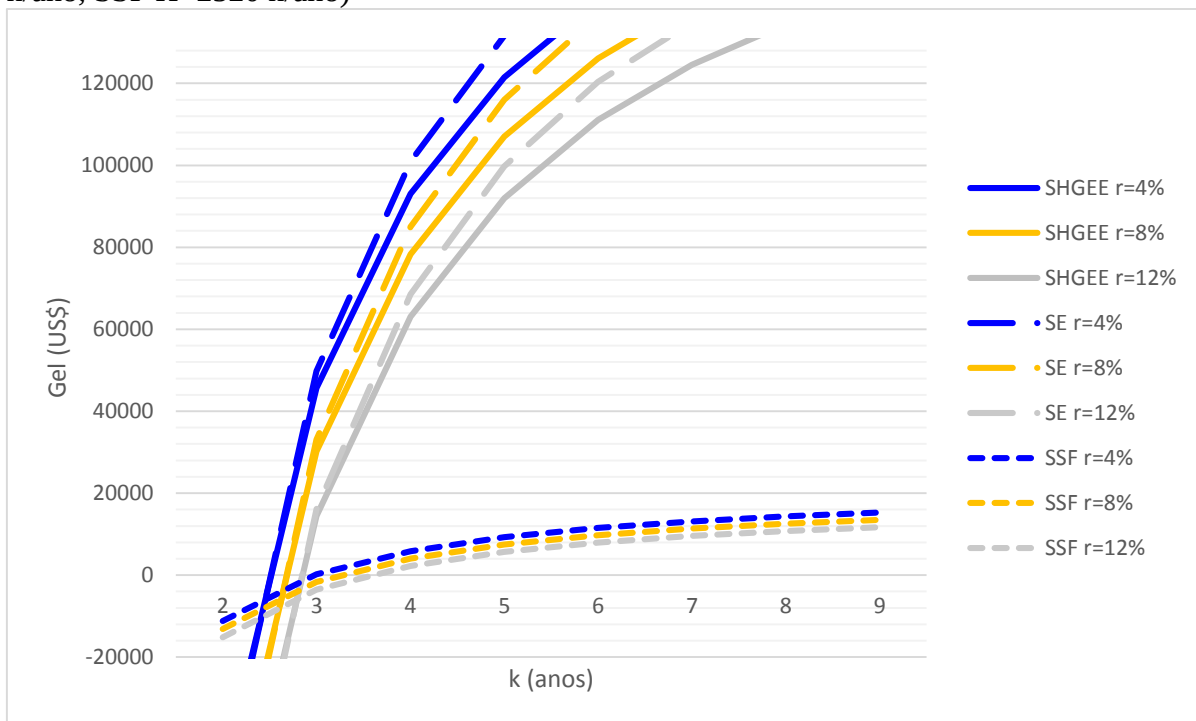
A Figura 4.15 mostra a receita anual recebida nos primeiros 10 anos utilizando a tarifa branca média. O período de retorno do investimento encontra-se entre a metade e o fim do segundo ano, para as taxas de juros de 4%, 8% e 12%.

Figura 4.14. Período de *payback* do SHGEE com tarifa convencional cenário 5 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.15. Período de *payback* do SHGEE com tarifa branca média cenário 5 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)

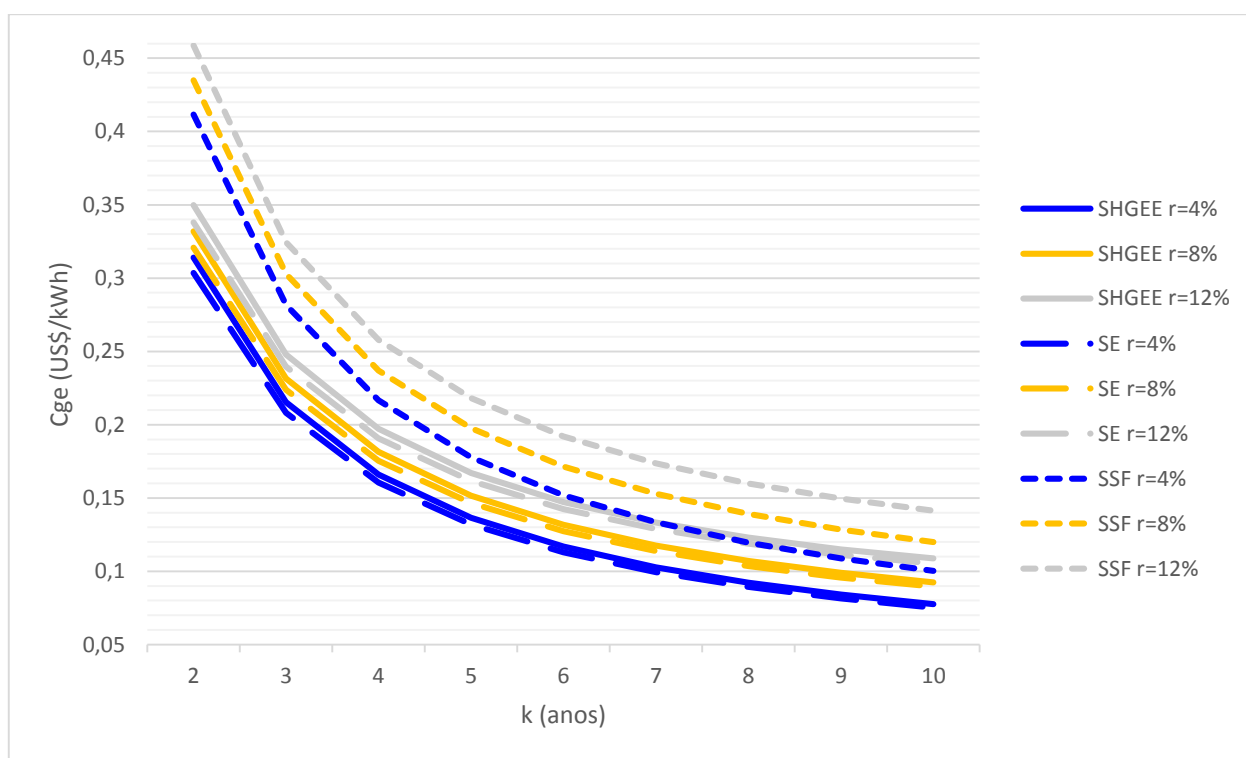


Fonte: Elaboração própria.

4.4.6 Resultados para o cenário 6

O último cenário corresponde a um edifício de alta renda também localizado em Lagoa Santa. A Figura 4.16 apresenta o custo de eletricidade gerada pelo SHGEE com horas de operação para o SE de 6692 h/ano, e para o SSF de 2520 h/ano. Na Figura 4.16 percebe-se que os custos de eletricidades no segundo ano são de 0,3140, 0,3318 e de 0,3498 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. No décimo ano, os custos de eletricidades são de 0,0776, 0,0925 e de 0,1088 US\$/kWh para as taxas de juros de 4%, 8% e 12% respectivamente. Ocorre o mesmo que nos cenários anteriores, os custos da eletricidade gerada pelo SSF é maior que os custos da eletricidade produzida pelo SE para as três taxas de juros consideradas.

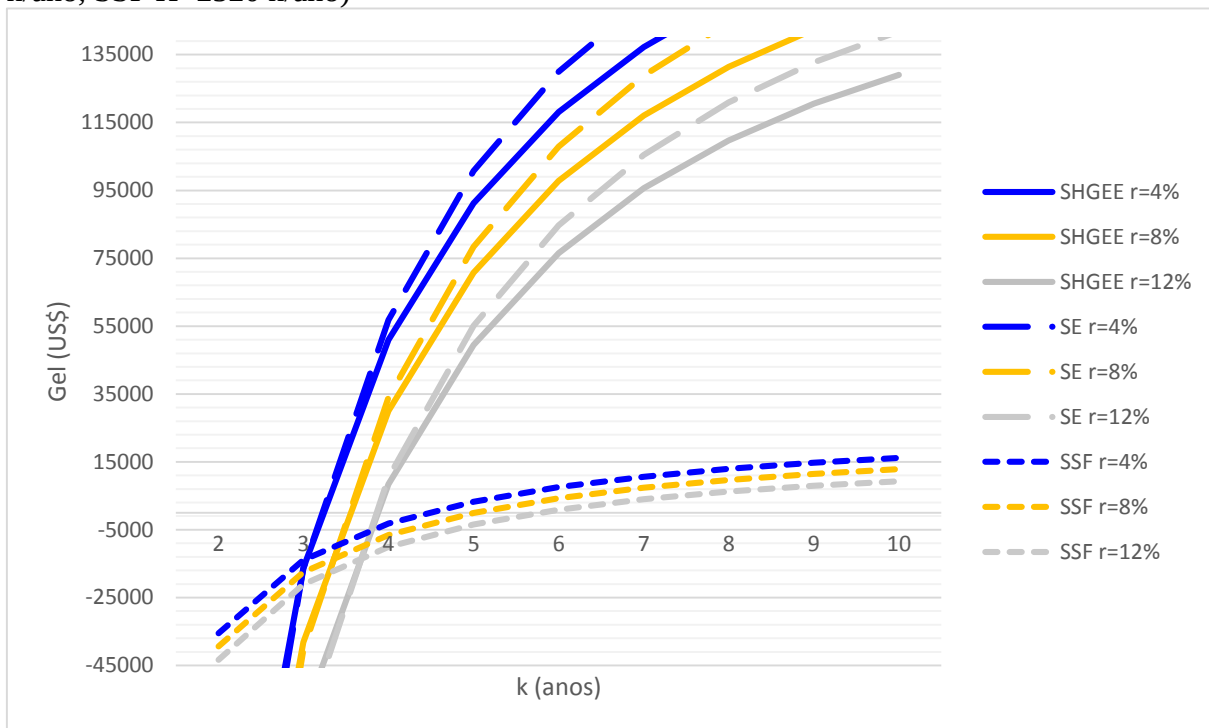
Figura 4.16. Custo de eletricidade gerada pelo SHGEE cenário 6



Fonte: Elaboração própria.

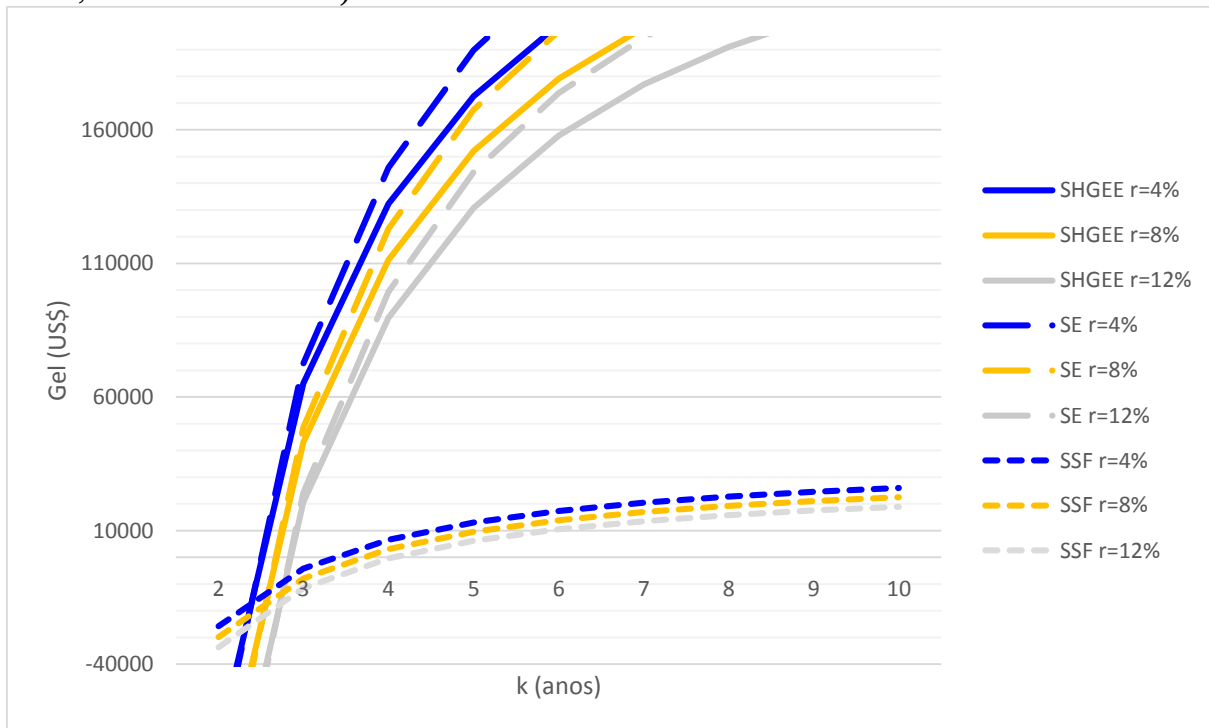
A Figura 4.17 mostra o benefício econômico recebido em 10 anos utilizando a tarifa convencional. Para uma taxa de juros de 4%, o período de *payback* é maior que 3 anos. Para a taxa de juros de 8%, o retorno do investimento é de 3 anos e meio. Com a taxa maior de juros de 12%, é necessário esperar quase 4 anos para recuperar o investimento do SHGEE.

Figura 4.17. Período de *payback* do SHGEE com tarifa convencional cenário 6 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4.18. Período de *payback* do SHGEE com tarifa branca média cenário 6 (SE H=6692 h/ano, SSF H=2520 h/ano)



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 4.18 mostra o benefício econômico recebido nos primeiros 10 anos utilizando a tarifa branca média. O período de retorno do investimento encontra-se entre a metade e o fim do segundo ano, para as taxas de juros de 4%, 8% e 12%.

Percebe-se que o período de *payback* dos três cenários na cidade de Lagoa Santa aplicando a tarifa convencional situa-se entre o terceiro e quarto ano, e empregando a tarifa branca média entre o segundo e terceiro ano. Comparando os cenários de Fortaleza com os de Lagoa Santa, os resultados econômicos são mais favoráveis para os casos de Lagoa Santa, em causa de que a tarifa de eletricidade é mais cara em Lagoa Santa que em Fortaleza. No entanto, os casos de Fortaleza também são viáveis economicamente.

Em consequência que as horas de operação dos SSF de todos os cenários estudados são menor que as horas de operação dos SE, nota-se que os custos de eletricidade gerada pelo SSF é maior que os custos de eletricidade produzida pelo SE e pelo SHGEE.

Para pequenas turbinas eólicas o custo de eletricidade gerada, segundo a *American Wind Energy Association AWEA*, encontra-se entre 0,15 a 0,20 US\$/kWh (AWEA, 2010). De acordo com a *European Photovoltaic Industry Association EPIA*, para usinas solares fotovoltaicas, o preço da eletricidade produzida oscila entre 0,15 e 0,36 US\$ por cada quilowatt-hora (EPIA, 2011) (LIMA, 2012). Comparando estes preços com os custos de energia elétrica gerada em cada cenário analisado, observa-se que estes apresentam coerência com os preços de produção de eletricidade fornecidos pela AWEA e a EPIA.

5 ANÁLISE AMBIENTAL

Neste capítulo foi desenvolvida a análise das emissões ambientais das tecnologias envolvidas no SHGEE. O primeiro passo tomado pelos governos de países desenvolvidos foi o tratado de Kyoto, onde foi concordado reduzir as emissões limitando a utilização das fontes convencionais de energia entre o ano 2000 e 2012 (CUCCHIELLA et al., 2012).

O desenvolvimento do mercado de painéis solares fotovoltaicos na atualidade tem mostrado a necessidade de desenvolver um método sustentável para tratamento dos resíduos dos módulos fotovoltaicos, uma vez terminada sua vida útil. As indústrias têm desenvolvido estratégias e técnicas para recuperar os materiais valiosos contidos nos produtos fotovoltaicos para ter um impacto ambiental positivo (CUCCHIELLA et al., 2012).

5.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A avaliação do ciclo de vida ou *life cycle assessment* (LCA por suas siglas em inglês) é um método para explorar como a entrega ou a demanda de um produto ou serviço específico, envolve processos que podem causar impactos ambientais. A LCA ajuda a ter uma imagem completa da responsabilidade ambiental causada por um produto (ARVESEN; HERTWICH, 2012). A LCA leva em consideração os impactos diretos e indiretos através do ciclo de vida do produto, incluindo as fontes de materiais, a fabricação, a operação, o transporte e a reciclagem (YUE; YOU; DARLING, 2014).

Existem dois métodos que são utilizados para conhecer o valor de LCA. O primeiro método é o convencional, o qual é conhecido como processo LCA. Este método define e descreve as operações em termos físicos, utilizando informação que é específica para os processos envolvidos, tornando os resultados altamente detalhados e precisos. No entanto, a utilização deste método, exclui as operações que tem pouca contribuição.

O segundo método, chamado análise de *input-output* (EEIOA por suas siglas em inglês), utiliza dados monetários dos setores econômicos. Este método não exclui operações como o processo LCA. Entretanto, a análise EEIOA é muito geral, o qual tem dificuldades com produtos específicos. O método mais utilizado na literatura é o processo LCA (ARVESEN; HERTWICH, 2012).

Segundo o Nugent e Sovacool (2014), existem quatro fases de ciclo de vida: a obtenção da matéria prima e fabricação, a construção, a operação, a reutilização e a reciclagem.

5.1.1 Matéria Prima e Fabricação

A fase de obtenção da matéria prima e fabricação representa toda a extração da matéria prima, o processo dos materiais e a união do produto final. Dentro da obtenção do material estão os processos de mineração, refinação e purificação do silício e outros metais ou materiais requeridos na fabricação de células fotovoltaicas, vidro, estruturas, inversores e outros equipamentos eletrônicos. Adicionalmente, a extração de petróleo para a produção de plásticos e a extração de gás natural para processos de aquecimento dos materiais é incluída também nesta fase. Para a energia eólica o conceito é igual, a extração de metais e outros materiais para a fabricação do aço, plástico e cabos (NUGENT; SOVACOOOL, 2014).

5.1.2 Construção

As emissões de gases de efeito estufa nesta fase incluem a queima de combustíveis fósseis no transporte e na montagem do sistema no local, além das estruturas de suporte dos sistemas, cabos e subestações em alguns casos (NUGENT; SOVACOOOL, 2014).

5.1.3 Operação e Manutenção

No caso da energia solar fotovoltaica, a operação inclui a manutenção, com a reposição de peças quando se precisa, limpeza dos módulos, entre outros processos. Para a energia eólica, também se encontra a manutenção regular, limpeza, lubrificação e a substituição de partes como pás, ou engrenagens da caixa de velocidades (NUGENT; SOVACOOOL, 2014).

5.1.4 Reutilização e Reciclagem

A reutilização e reciclagem é a fase final do ciclo de vida do produto. Esta etapa envolve os processos de desconstrução, refugo, reciclagem, entre outros (NUGENT; SOVACOOOL, 2014).

5.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA ENERGIA EÓLICA

A turbina eólica é desenhada para converter energia limpa sem produzir emissões de CO₂ durante a operação. No entanto, poluentes são emitidos e energia elétrica de fontes convencionais é usada através dos processos de fabricação, de construção e de reutilização e reciclagem. Isto significa, que a energia eólica não é completamente livre de emissões de gases de efeito estufa (ASO; CHEUNG, 2015). Segundo Nugent e Sovacool (2014), não existe uma tecnologia totalmente livre de emissões de poluentes.

De acordo com Aso e Cheung (2015), muitos autores chegam à conclusão que a etapa onde é mais notável o impacto ambiental é na manufatura, e as emissões dependem dos métodos de produção de cada turbina. Tanto Arvesen e Hertwich (2012) como Aso e Cheung (2015), explicam que quanto maior o tamanho da turbina eólica, menor a quantidade de emissões produzidas. O local de instalação onde possui uma considerável média de ventos também influencia, reduzindo o impacto ambiental das turbinas eólicas (DEMIR; TASKIN, 2013).

Uddin e Kummar (2014) compararam os efeitos no ambiente dos dois tipos de turbinas eólicas, HAWT e VAWT. Segundo eles, as VAWT podem produzir mais poluentes que as HAWT.

A etapa de reutilização e reciclagem é a única fase do ciclo de vida em que é possível reduzir as emissões e uso de recursos. Depois da fase de operação, os componentes dos sistemas eólicos são reciclados ou incinerados para obter matéria-prima (ARVESEN; HERTWICH, 2012).

De acordo com Boyle (2004), existem outros impactos ambientais das turbinas eólicas que são: o ruído gerado pelas turbinas, aspectos visuais para as pessoas e impactos na fauna.

Atualmente, os fabricantes de turbinas eólicas reduziram a emissão de ruído com multiplicadores de velocidades e geradores silenciosos. No entanto, o ruído causado pela aerodinâmica do vento quando passa pelas pás das turbinas é muito notável quando a turbina eólica é de grande tamanho. O impacto visual é o maior incômodo em comunidades locais

(AHMED; CAMERON, 2014), porém atualmente as pessoas acostumaram-se ver as turbinas eólicas nas paisagens. A respeito da fauna, as aves podem ser prejudicadas pelos aerogeradores. No entanto, de acordo com o estudo de Brinckerhoff (2010), poucos pássaros colidem com as pás dos aerogeradores, causando a morte de 4 pássaros por cada MW de capacidade instalada. Segundo Boyle (2004), as aves têm mais risco de bater em um carro do que em um aerogerador.

Segundo a pesquisa realizada por Nugent e Sovacool (2014), os quais estudaram e revisaram 153 artigos científicos publicados (no mundo) sobre o ciclo de vida e emissões de gases de efeito estufa para turbinas eólica e painéis solares. Os resultados apresentados pelos autores Nugent e Sovacool (2014) mostram que o intervalo de emissões de gases de efeito estufa sobre o ciclo de vida da energia eólica encontra-se entre 0,4 e 364,8 g CO₂-eq/kWh, com um valor médio de 34,1 g CO₂-eq/kWh. Esse intervalo de emissões tem uma variabilidade alta em consequência de diferentes fatores como podem ser a fonte de eletricidade utilizada nas etapas de matérias primas, fabricação e construção, o tipo de turbina eólica, o tamanho da turbina eólica, o local de instalação, entre outros (TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013). A obtenção de matérias primas e fabricação representam 71% das emissões, seguido da construção com 24%, e a operação e reutilização/reciclagem com a porcentagem restante de (5%).

5.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O ciclo de vida dos sistemas solares fotovoltaicos consiste nas seguintes fases: a primeira é a fase de fabricação ou manufatura, a segunda fase é de transporte, a terceira é a fase de operação e por última a fase de reciclagem (SENG; LALCHAND; LIN, 2008). Como acontece na tecnologia eólica, a energia solar fotovoltaica não produz poluentes na fase de operação. Os impactos ambientais ocorrem nas etapas de fabricação e de transporte.

Segundo Boyle (2004), na fase de manufatura, o processo de extração de silício e fabricação das células de silício consomem eletricidade, dependendo da matriz energética do país, e assim pode-se variar a quantidade de emissões. Na fase de reutilização/reciclagem, o autor aponta que a reciclagem diminui consideravelmente o impacto ambiental, já que pode recuperar-se a matéria prima para reutilizar na indústria eletrônica. No entanto, é necessária a energia elétrica para realizar a reciclagem dos materiais. Esta eletricidade pode ser fornecida pela

concessionária, tendo uma porcentagem de utilização de combustíveis fósseis para a geração (SENG; LALCHAND; LIN, 2008).

Quando as plantas solares fotovoltaicas são instaladas no campo, a indústria agrícola perde terreno para utilizar na plantação de alimentos porque os painéis solares criam sombra no chão, o qual faz com que a terra não receba radiação solar, dificultando o processo de fotossíntese na vegetação. No entanto, quando os módulos fotovoltaicos são instalados nos telhados dos edifícios e casas, não é necessário terreno adicional. Esta escolha de locação depende do tamanho do sistema fotovoltaico.

De acordo com o estudo realizado por Nugent e Sovacool (2014), o intervalo de emissões de gases de efeito estufa sobre o ciclo de vida da energia solar fotovoltaica está entre 1 e 218 g CO₂-eq/kWh, com um valor médio de 49,9 g CO₂-eq/kWh. Esta variação é causada pelos fatores como fontes da matriz energética do país, o tipo de painel fotovoltaico, o tamanho do módulo solar, o local de instalação (TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013). A obtenção de matérias primas e fabricação representam 71% das emissões, seguido da construção com 19%, a operação com 13% e reutilização/reciclagem com a porcentagem restante (3,3%).

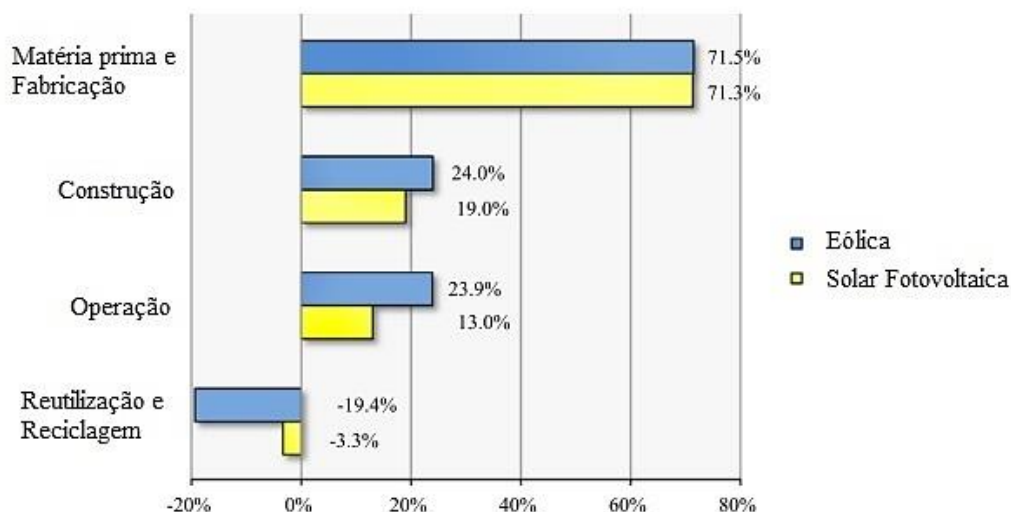
5.4 COMPARAÇÃO AMBIENTAL DAS TECNOLOGIAS UTILIZADAS

Os autores Nugent e Sovacool (2014), comentam que o transporte é uma etapa que produz a maior quantidade de emissões dentro da fase de construção, tanto para a energia solar fotovoltaica como para a eólica. A etapa de fabricação e manufatura envolvem processos que utilizam combustíveis fósseis para processos de aquecimento e energia elétrica. A Figura 5.1 apresenta as emissões em cada etapa do ciclo de vida para a energia eólica e solar fotovoltaica. Observa-se que a etapa de obtenção da matéria prima e fabricação contribui com 71,5% e 71,3% dos poluentes produzidos pela energia eólica e solar fotovoltaica, respectivamente, seguido da etapa de construção com 24% e 19% da etapa de operação com 23,9% e 13%, e da etapa de reutilização e reciclagem com -19,4% e -3,3%.

A última etapa do ciclo de vida tem valores negativos por motivo que nesta fase a reciclagem produz matéria prima, a qual pode ser utilizada em outras indústrias. De acordo com Reich et al. (2012), as fontes convencionais ou não convencionais da matriz energética do país, afetam a intensidade dos poluentes, de zero g CO₂-eq/kWh quando a matriz energética está

composta por energia renovável e nuclear a 200 g CO₂-eq/kWh para uma matriz energética de unicamente combustíveis fósseis.

Figura 5.1. Emissões produzidas nas etapas do ciclo de vida do SE e SSF



Fonte: Adaptado de (NUGENT; SOVACOOOL, 2014).

A eficiência ambiental depende dos recursos eólicos e solares do local. Quanto maior os recursos renováveis, maior geração de energia elétrica, ocasionando menores quantidades de emissões. O mesmo fenômeno acontece com o tamanho dos sistemas eólicos, quanto maior tamanho das turbinas eólicas, menores serão as quantidades de poluentes produzidas. Para os painéis solares esta tendência não é de todo verdadeira. Em termos da vida útil das duas tecnologias, mostra-se que quanto maior a expectativa de duração da tecnologia, menores as quantidades de poluentes emitidos (NUGENT; SOVACOOOL, 2014).

5.5 CO₂ ECONOMIZADO

Segundo Cucchiella et al. (2012) para produzir 1 kWh de eletricidade é necessário queimar 2,56 kWh de combustíveis fósseis, os quais emitem 0,53 kg de CO₂ na atmosfera. Isso significa que cada kWh produzido por um sistema eólico ou sistema fotovoltaico evita a emissão de 0,53 kg de dióxido de carbono. A Tabela 5.1 apresenta a quantidade de dióxido de carbono economizado para os seis cenários estudados num ano. Observa-se que a quantidade de CO₂

poupada dos cenários de Fortaleza é semelhante que os cenários de Lagoa Santa em consequência que os SHGEE geram uma quantidade similar de eletricidade entre as mesmas rendas.

Tabela 5.1. Redução Emissões de CO₂

Cenário	Cidade/Renda	ton CO ₂ /ano
1	Fortaleza/Baixa Renda	34,11
2	Fortaleza/Média Renda	89,25
3	Fortaleza/Alta Renda	138,60
4	Lagoa Santa/Baixa Renda	34,11
5	Lagoa Santa/Média Renda	89,33
6	Lagoa Santa/Alta Renda	138,54

Fonte: Elaboração própria.

5.6 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

O estudo ambiental é muito importante no momento de dimensionar um projeto para conhecer os impactos ao meio ambiente, na saúde dos animais e humanos (BRAGA, 2014). Os principais gases de efeito estufa estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Principais gases de efeito estufa

Nome do Poluente	Símbolo
Dióxido de Carbono	CO ₂
Dióxido de Enxofre	SO ₂
Óxidos de Nitrogênio	NO _x
Material Particulado	MP

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Cardu e Baica (1999), a eficiência ecológica avalia o quanto poluidor é uma tecnologia ou sistema, considerando a combustão de 1kg de combustível e não a quantidade de gases liberados por unidade de energia gerada. O CO₂ em kg/kg_c equivalente está descrito pelas equações (5.1) e (5.2).

$$(CO_2)_e = CO_2 + (SO_2)_e + (NO_x)_e + (MP)_e \quad (5.1)$$

$$(CO_2)_e = CO_2 + 80(SO_2) + 50(NO_x) + 67(MP) \quad (5.2)$$

Segundo Silveira et al. (2012), a eficiência ecológica é um indicador adimensional que permite avaliar o impacto ambiental das emissões gasosas de uma planta de geração de energia,

mediante uma comparação entre emissões de poluentes integrados hipoteticamente (emissões equivalente de CO_2) com os padrões existentes de qualidade do ar. A Equação (5.3) é a definição da eficiência ecológica:

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204\eta_p}{\eta_p + \Pi_g} \ln(135 - \Pi_g) \right]^{0,5} \times 100 \quad (5.3)$$

Sendo, ε a eficiência ecológica [%], η_p a eficiência da tecnologia [%], e Π_g o indicador de poluição [kg/MJ], o valor da eficiência ecológica está dentro do intervalo de 0 a 100%. Inclusive, quando ε é igual a zero, o sistema é muito poluidor. Quando ε é igual a 100%, o sistema não tem poluição. O valor crítico da eficiência ecológica é 50%. O indicador de poluição para plantas termoelétricas está definido conforme a equação (5.4) (CARDU e BAICA, 1999), (SILVEIRA et al., 2012).

$$\Pi_g = \frac{(CO_2)_e}{Q_i} \quad (5.4)$$

Sendo, Q_i o poder calorífico inferior do combustível queimado PCI [MJ/kg]. As tecnologias utilizadas nos SHGEE estudados não precisam de combustíveis fósseis para gerar eletricidade. A energia eólica e energia solar fotovoltaica utilizam os recursos naturais que possui o local de instalação da planta de geração. O indicador de poluição ou de emissões Π_g está definido como a quantidade de quilogramas de CO_2 equivalente por energia consumida (MJ). Este é empregado em LCA para quantificar o impacto ambiental da produção e implementação de um tipo de tecnologia (BRAGA, 2014). Para os cálculos da eficiência ecológica utilizou-se os valores médios apresentados por Nugent e Sovacool (2014) do indicador de emissões para turbinas eólicas que é de $0,0341 \text{ kg}(CO_2)_e/kWh$ ou $0,00948 \text{ kg}(CO_2)_e/MJ$. O indicador de emissões para painéis solares fotovoltaicos é de $0,0499 \text{ kg}(CO_2)_e/kWh$ ou $0,01386 \text{ kg}(CO_2)_e/MJ$.

Aplicando a Equação (5.3) e (5.4) com a eficiência de conversão de energia e o indicador de poluição das tecnologias utilizadas obtêm-se a eficiência ecológica para cada uma. A eficiência ecológica para as turbinas eólicas é de 98,5% e para os painéis solares é de 96,1%. Observa-se que os aerogeradores são menos poluentes que os módulos fotovoltaicos.

5.7 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DO SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Conhecendo a eficiência ecológica para cada tecnologia utilizada no SHGEE, pode-se calcular a eficiência ecológica para cada planta híbrida dos cenários estudados pela equação (5.5).

$$\varepsilon_{SHGE} = \frac{E_{SE} \cdot \varepsilon_{SE} + E_{SSF} \cdot \varepsilon_{SSF}}{E_{SE} + E_{SSF}} \quad (5.5)$$

Sendo, E_{SE} a energia elétrica gerada pelo SE [kWh], ε_{SE} a eficiência ecológica do SE [%], E_{SSF} a energia elétrica gerada pelo SSF[kWh], e ε_{SSF} a eficiência ecológica do SSF [%].

A Tabela 5.3 apresenta a eficiência ecológica dos SHGEE dimensionados para Fortaleza e Lagoa Santa. Em termos ambientais, as plantas híbridas configuradas possuem um bom desempenho. No entanto, é confirmado o encontrado na literatura de que as energias renováveis não são completamente limpas e que os baixos impactos ambientais são a consequência dos processos e materiais utilizados na fabricação das tecnologias (NUGENT; SOVACOO, 2014) (TURCONI; BOLDRIN; ASTRUP, 2013). Os seis cenários apresentam uma eficiência ecológica na faixa de 97%.

Tabela 5.3. Eficiência ecológica dos cenários estudados

Cenário	Cidade/Renda	ε_{SHGE}
1	Fortaleza/Baixa Renda	97,33%
2	Fortaleza/Média Renda	97,44%
3	Fortaleza/Alta Renda	97,47%
4	Lagoa Santa/Baixa Renda	97,47%
5	Lagoa Santa/Média Renda	97,50%
6	Lagoa Santa/Alta Renda	97,39%

Fonte: Elaboração própria.

Segundo Villela e Silveira (2007) a eficiência ecológica para uma planta termoeletrica queimando gás natural é de 94,4% e utilizando combustível diesel é de 91,4%. Em relação com plantas hidroelétricas, de acordo com Siqueira (2015), uma usina deste tipo com uma potência instalada de 260 MW, um volume do reservatório de $2,7 \times 10^9 \text{ m}^3$ e uma vazão média de $330 \text{ m}^3/\text{s}$ tem uma eficiência ecológica de 86%.

Tabela 5.4. Eficiência ecológica dos edifícios estudados

Cenário	Cidade/Renda	$\varepsilon_{\text{Edifícios}}$ considerando a proporção atual da geração de eletricidade no Brasil
1	Fortaleza/Baixa Renda	88,18%
2	Fortaleza/Média Renda	88,28%
3	Fortaleza/Alta Renda	88,31%
4	Lagoa Santa/Baixa Renda	88,31%
5	Lagoa Santa/Média Renda	88,33%
6	Lagoa Santa/Alta Renda	88,24%

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 5.4 mostra a eficiência ecológica para cada edifício de cada cenário, considerando a energia elétrica comprada da rede e três possíveis fontes de geração: termelétrica utilizando gás natural, termelétrica queimando diesel e hidrelétrica. Segundo a ANEEL, quando tem bandeira vermelha significa que as plantas térmicas têm maior participação na geração de eletricidade na matriz brasileira energética e a bandeira verde representa uma maior produção de energia elétrica de usinas hidrelétricas. Na Tabela 5.4, contempla-se a eficiência ecológica dos edifícios ao utilizar energia elétrica dos SHGEE e comprando eletricidade da rede de distribuição quando tem-se déficit de energia no SHGEE. Utilizou-se os valores de eficiência ecológica das tecnologias térmicas (com queima de gás natural e diesel) e hidrelétricas de grande reservatórios para determinar a eficiência ecológica do sistema nacional brasileiro. Os resultados mostram a eficiência ecológica dos edifícios situam-se na faixa de 88%.

6 CONCLUSÕES

Considerando as resoluções normativas da ANEEL nº 482/2012 e 687/2015 foram dimensionados seis SHGEE para ser implementados em 6 edifícios residenciais aplicados para duas cidades brasileiras. Foram então, selecionados recursos eólicos e solares das cidades de Fortaleza (Ceará) e Lagoa Santa (Minas Gerais). Os SHGEE operam para produzir a eletricidade (total e parcial) dos edifícios e em caso de operação em déficit é adquirida via rede. Inicialmente determinou-se as potências instaladas dos três edifícios considerados para cada localidade.

As duas cidades brasileiras foram escolhidas por apresentarem recursos eólicos e solares semelhantes. Em Fortaleza, a média mensal da velocidade de vento é de 5,12 m/s e a média diária de irradiação solar é de 5,33 kWh/m². Por outro lado, em Lagoa Santa, a velocidade média mensal do vento é 5,37 m/s e a irradiação solar média diária é 5,08 kWh/m².

Da análise técnica, observa-se que todos os cenários apresentam períodos onde os SHGEE's geram menor quantidade de eletricidade que a demanda total dos edifícios. Os créditos de energia gerados nos meses onde se produz mais eletricidade, de acordo com a ANEEL, serão utilizados nos meses de menor geração.

Verifica-se que os casos de SHGEE de Lagoa Santa requerem menor quantidade de aerogeradores do que os sistemas de Fortaleza, em consequência de que o recurso eólico é mais favorável para a cidade mineira, aproveitando melhor a alta eficiência de conversão de energia das turbinas eólicas. Por outro lado, a quantidade de painéis solares fotovoltaicos é menor nos SHGEE de Fortaleza do que os de Lagoa Santa, visto que a radiação solar é melhor na primeira cidade.

O custo da eletricidade gerada pelos SHGEE eólicos – solares fotovoltaicos depende da quantidade de turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos utilizados em cada cenário considerado. O investimento pode ser alto para cada apartamento e pode ser recuperado no máximo em 6 anos, sem subsídio governamental.

As comparações entre as tarifas convencionais e a tarifas brancas (que considera valores fora de ponta, intermediário e de ponta) mostraram que utilizando a última, o investimento se recupera em menos anos, em relação à primeira. Os períodos de amortização de capital investido ou *payback*, para os seis cenários se situam entre 2,5 e 6 anos, os quais são bem razoáveis se consideramos a vida útil da planta híbrida. Comparando os SGHEE's das duas cidades, os cenários de Lagoa Santa apresentam melhores resultados econômicos, em vista dos menores custos de produção de eletricidade, o que indica maior viabilidade de investimento.

Analizou-se o ciclo de vida das duas tecnologias empregadas nos SGHEE's, determinando-se que tanto para os aerogeradores como para os painéis solares, a fabricação é a etapa onde se tem maior impacto ao meio ambiente, em razão do consumo de energéticos associados. Verificou-se que com as implementações dos seis SHGEE's pode-se economizar entre 34 e 139 tonCO₂/ano. No caso de Fortaleza, as reduções de emissões, considerando as três plantas são de 34,11 ton CO₂/ano (potência elétrica 75,4 kW), 89,25 ton CO₂/ano (potência elétrica 206,6 kW) e 138,60 ton CO₂/ano (potência elétrica 325,1 kW) e para Lagoa Santa é de 34,11 ton CO₂/ano (potência elétrica 74,8 kW), 89,33 ton CO₂/ano (potência elétrica 197,9 kW) e 138,54 ton CO₂/ano (potência elétrica 294,9 kW).

A eficiência ecológica para os seis cenários indicou valores próximos de 97% quando as condições meteorológicas são favoráveis e os seis SGHEE's fornecem toda a demanda de eletricidade dos edifícios. Determinou-se as eficiências ecológicas dos edifícios quando a energia elétrica é fornecida pelos SGHEE e via rede, levando em conta as principais fontes de energia elétrica no Brasil, chegando a valores na faixa de 88%.

Dos resultados obtidos, os sistemas híbridos utilizando energia eólica e solar fotovoltaica, podem ser implementados em edifícios residenciais apresentando viabilidade técnica, econômica e ambiental, considerando os custos atuais de investimentos e os valores atuais de tarifas praticadas no Brasil.

As resoluções normativas ANEEL nº 482/2012 e 687/2015 estão ajudando a ampliar as aplicações de energias renováveis não convencionais no Brasil. No entanto, ainda há necessidade

de programas de capacitação e financiamento para a correta promoção do aumento da produção de energia elétrica, com baixos impactos ao meio ambiente e grande benefícios para a geração descentralizada no Brasil.

Como sugestões para trabalhos futuros têm-se:

- Estudar a utilização de baterias para o armazenamento de eletricidade;
- Estudar a possibilidade de armazenamento de eletricidade em forma de hidrogênio e seu posterior uso para sistemas híbridos;
- Estudar a incorporação de armazenamento por supercapacitores;
- Desenvolver um software para o dimensionamento e estudo de implementação de sistemas híbridos eólico – solar fotovoltaico;
- Estudar o uso de sistemas híbridos em edifícios governamentais, públicos, comerciais, entre outros;
- Estudar a eficiência ecológica considerando outras metodologias de análises.

REFERÊNCIAS

ABARKAN, M.; ERRAHIMI, F.; K.M'SIRDI, N.; NAAMANE, A. **Analysis of Energy Consumption for a Building Using Wind and Solar Energy Sources**. Energy Procedia, v. 42, p. 567–576, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213017608>>. .

Aeolos Wind Turbines. Disponível em: <<http://www.windturbinestar.com/products.html>>. Acesso em: 2 set. 2015.

Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. Ed. – Brasília, 2005. 243 p.

Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. **Tarifas Residenciais Vigentes de Eletricidade**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>>. Acesso em: 16 sep. 2015.

Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2016.

Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 24 mai. 2016.

AHMED, N. A.; CAMERON, M. **The challenges and possible solutions of horizontal axis wind turbines as a clean energy solution for the future**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 38, p. 439–460, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.004>>.

American Council for an Energy-Efficient Economy ACEEE. **Elevators**. Disponível em: <<http://aceee.org/topics/elevators>>. Acesso em: 11 oct. 2015.

AL-SALAYMEH, A.; AL-HAMAMRE, Z.; SHARAF, F.; ABDELKADER, M. R. **Technical and economical assessment of the utilization of photovoltaic systems in residential buildings: The case of Jordan**. Energy Conversion and Management, v. 51, n. 8, p. 1719–1726, 2010. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.026>>. .

ARVESEN, A.; HERTWICH, E. G. **Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 8, p. 5994–6006, 2012. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.023>>. .

ASO, R.; CHEUNG, W. M. **Towards greener horizontal-axis wind turbines: analysis of carbon emissions, energy and costs at the early design stage**. Journal of Cleaner Production, v.

87, p. 263–274, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614010610>>. .

AWEA. **AWEA Small Wind Turbine Global Market Study**. American Wind Energy Association. [S.l.], p. 32. 2010.

BAHRAIN WORLD TRADE CENTER BUILDING. Disponível em: <<http://www.layoverguide.com/wp-content/uploads/2011/12/Bahrain-World-Trade-Center-in-Bahrain.jpg>>. Acesso em: 2 oct. 2015.

BRAGA, L. B. **Aspectos Técnicos, Econômicos e Ecológicos de Processos de Produção de Hidrogênio**. 2014. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

BRINCKERHOFF P. **Update of UK shadow flicker evidence base for the Department of Energy and Climate Change**. 2010. <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/48052/1416-update-uk-shadow-flicker-evidence-base.pdf> Accessed on 29 Sept. 2015.

BOYLE G., et al. **Renewable Energy: Power for a Sustainable Future**. Second Edition. Oxford 18 University Press, May 6, 2004, 464 p.

Canadian Solar PV. Disponível em: <<http://www.canadiansolar.com/>>. Acesso em: 2 set. 2015.

Canadian Solar PV. Disponível em <<http://www.freecleansolar.com/315W-solar-panels-Canadian-CS6X-315P-poly-p/cs6x-315p.htm>>. Acesso em: 14 set. 2015.

CARDU, M.; BAICA, M. **Regarding a Global Methodology to Estimate the Energy-Ecologic Efficiency of Thermopower Plants**. Energy Conversion and Management, v.40, pp. 71-87, 1999.

CLIMA: FORTALEZA. Disponível em: <<http://pt.climate-data.org/location/2031/>> Acesso em: 24mai. 2016.

CLIMA: LAGOA SANTA. Disponível em: <<http://pt.climate-data.org/location/24953/>> Acesso em: 24mai. 2016.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; GASTALDI, M.; KOH, S. C. L. **Renewable energy options for buildings: Performance evaluations of integrated photovoltaic systems**. Energy and Buildings, v. 55, p. 208–217, 2012. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.029>>. .

CUCCHIELLA, F.; DADAMO, I. **Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 7, p. 5245–5259, 2012. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.034>>. .

Dados dos recursos eólicos e solares no Brasil. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito CRESESB. Disponível em: < <http://cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Acesso em: 17 mar. 2015.

DEMIR, N.; TAŞKIN, A. **Life cycle assessment of wind turbines in Pınarbaşı-Kayseri**. Journal of Cleaner Production, v. 54, p. 253–263, 2013. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261300231X>>. .

ELECTROBRAS - PROCEL. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil**. Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005. Classe Residencial Relatório Região Nordeste. Setembro, 2007.

Energy Informative – The Homeowner’s Guide to Solar Panels. **How Much Do Solar Panel Cost**. Disponível em: <<http://energyinformative.org/solar-panels-cost/#installation-costs%20acesso%20em%203%20dic.%202015>>. Acesso em: 3 dic. 2015.

EPIA. **Solar Generation 6 - Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World**. European Photovoltaic Industry Association. [S.l.], p. 100. 2011.

European Photovoltaic Industry Association EPIA - Greenpeace. Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World, 2011. Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf>>. Acesso em: 1 oct. 2015.

FRERIS L., INFELD D. **Renewable Energy in Power Systems**. First Edition. Wiley, September 2, 2008, 300 p.

Green Tech Media. **8 Solar Trends to Follow in 2015**. Disponível em: < <http://www.greentechmedia.com/articles/read/The-Most-Important-Trends-in-Solar-in-8-Charts>>. Acesso em: 3 dic. 2015.

How Much Power Do You Appliances Use? Disponível em: <<http://www.wholesalesolar.com/solar-information/how-to-save-energy/power-table>>. Acesso em: 26 ago. 2015.

Instituto de Energia e Ambiente IEE. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/>>. Acesso em: 14 oct. 2015.

Instituto de Pesquisa Espacial INPE. PEREIRA E. B., MARTINS F. R., ABREU S. L., RÜTHER R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 1. Ed. - São Jose dos Campos, 2006. 60 p.

Inversor SMA Sunny Boy 240-US. Disponível em: <<http://www.wholesalesolar.com/products.folder/inverter-folder/SMA-Sunny-Boy-240-US.html>>. Acesso em: 14 set. 2015.

ISHUGAH, T. F.; LI, Y.; WANG, R. Z.; KIPLAGAT, J. K. **Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 37, p. 613–626, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114003785>>. .

ISLAM, M. R.; MEKHILEF, S.; SAIDUR, R. **Progress and recent trends of wind energy technology**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 21, p. 456–468, 2013. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.007>>. .

ISLAM, M. R.; SAIDUR, R.; RAHIM, N. A. **Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan , Malaysia using Weibull distribution function**. Energy, v. 36, n. 2, p. 985–992, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.011>>. .

KNIER G. **How do photovoltaics works?** In: Science N, editor. <<http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>>: Nasa; 2002. Accessed on 29 Sept 2015.

KO, D. H.; JEONG, S. T.; KIM, Y. C. **Assessment of wind energy for small-scale wind power in Chuuk State, Micronesia**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 52, p. 613–622, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115008072>>. .

Laboratório de Eficiência Energética em Edificações LABEEE. Disponível em: <<http://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/fotov/blog/2014/10/03/2kwp-primeiro-sistema-interligado-a-rede-no-brasil/>>. Acesso em: 14 oct. 2015.

Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia LEPTEN. Disponível em: <<http://www.lepten.ufsc.br/home/solar.html>>. Acesso em: 14 oct. 2015.

Latitude, Longitude e Altitude das cidades Brasileiras. Disponível em: <<http://www.apolo11.com/latlon.php?uf=ce>>. Acesso em: 1 set. 2015.

LARANCI, P.; SILVEIRA J. L.; LAMAS W. Q. **SOLAR 1.1 software: a case study of a chicken farm illumination project**. Exacta, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 58-69, 2012.

LARANCI, P. **Development of SOLAR version 1.1: A software for selecting commercially available photovoltaic panels, including the economic analysis**. Paper originated by cooperation agreement between Università degli Studi di Perugia (Italy) e UNESP - São Paulo State University (Brazil), Guaratingueta, December 2002.

LIMA, B, W, F. **Geração Distribuída Aplicada à Edificações: Edifícios de Energia Zero e o caso do Laboratório de Ensino da FEC-Unicamp**. 2012. 170 f. Tese (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

LU, L.; SUN, K. **Wind power evaluation and utilization over a reference high-rise building in urban area**. Energy and Buildings, v. 68, n. PARTA, p. 339–350, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.029>>. .

MATOS M. B. **Análise Energética de um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico com Armazenamento de Energia Elétrica através do Hidrogênio e Banco de Baterias**. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na área de Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 114p. Campinas, 2009.

Medidor de Eletricidade Bidirecional General Electric GE KV2. Disponível em: <<http://www.cesco.com/b2c/product/GE-Meter-Sockets-787X900330-9S-Ge-KV2C-Meter/413942>>. Acesso em: 31 mai. 2016.

MÜLLER, G.; JENTSCH, M. F.; STODDART, E. **Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings**. Renewable Energy, v. 34, n. 5, p. 1407–1412, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.008>>. .

GOODRICH, A.; JAMES, T.; WOODHOUSE, M. **Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities**. Technical Report of National Renewable Energy Laboratory, February 2012. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/53347.pdf>>. .

NGAN, M. S.; TAN, C. W. **Assessment of economic viability for PV/wind/diesel hybrid energy system in southern Peninsular Malaysia**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 1, p. 634–647, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.028>>.

NUGENT, D.; SOVACOO, B. K. **Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey**. Energy Policy, v. 65, p. 229–244, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.048>>. .

REICH N.H., ALSEMA E.A., VAN SARK W. G. J. H. M., TURKENBURG W. C., SINKE W. C. **Greenhouse gas emissions associated with photovoltaic electricity from crystalline silicon modules under various energy supply options**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 20, n. 1, p. 6–11, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/pip.1160>>. .

ROHANI, G.; NOUR, M. **Techno-economical analysis of stand-alone hybrid renewable power system for Ras Musherib in United Arab Emirates**. Energy, v. 64, p. 828–841, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.10.065>>. .

ROBERTS J.J. **Análise de Desempenho de um Sistema Híbrido de Geração de Energia Solar-Eólico-Diesel Considerando Variações Probabilísticas da Carga e dos Recursos Renováveis**. 2012. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

PANEIL SOLAR FOTOVOLTAICO: CPV. Disponível em: <http://solartribune.com/wp-content/uploads/2012/05/credited_SolFocus_CPV-zoom.jpg>. Acesso em: 25 ago. 2015.

PANEIL SOLAR FOTOVOLTAICO: FILME FINO. Disponível em: <http://www.unimaxpower.com/wp-content/uploads/2014/12/Thin_Film_Solar_Panel_UMP.jpg>. Acesso em: 25 ago. 2015.

PANEIL SOLAR FOTOVOLTAICO: MONOCRISTALINO. Disponível em: <http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/monocrystalline-photovoltaic-module-standard-54792-5002765.jpg>. Acesso em: 25 ago. 2015.

PANEIL SOLAR FOTOVOLTAICO: POLICRISTALINO. Disponível em: <<https://www.solarquotes.com.au/img/polycrystalline-solar-array.jpg>>. Acesso em: 25 ago. 2015.

PICARD A., DAVIS R. S., GLASSER M., FUJII K. Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007). Metrologia, v. 45, p. 149-155, 2008. Disponível em: <<http://www.nist.gov/calibrations/upload/CIPM-2007.pdf>> Acesso em: 24 mai. 2016.

Rock Mountain Institute. **Lessons from Australia Reducing Solar PV Costs through Installation Labor Efficiency.** June 2014. Disponível em: <http://www.rmi.org/PDF_reducing_solar_pv_soft_costs_australia acesso em 3 dic. 2015>. Acesso em: 3 dic. 2015.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos.** Florianópolis: Editora UFSC/LABSOLAR, 2004.

SD Europe Solar Decathlon. Disponível em: <<http://www.sdeurope.org/competicion/?lang=en>>. Acesso em: 14 oct. 2015.

SENG, L. Y.; LALCHAND, G.; SOW LIN, G. M. **Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia.** Energy Policy, v. 36, n. 6, p. 2130–2142, 2008.

SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. D. Q.; TUNA, C. E.; VILLELA, I. A. D. C.; MIRO, L. S. **Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 5, p. 2894–2906, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.007>>. .

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. T.; LAMAS, W. D. Q. **The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 20, p. 133-141, April 2013, Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.054>>.

SIQUEIRA, R. B. P. **Emissões de poluentes em centrais hidrelétricas: Aspectos técnicos, econômicos e ecológicos.** 2015. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) –Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

Taxa Histórica de Cambio de Reais a Dólar Estadunidense de Fev. 2015 a Fev. 2016. Disponível em: < <http://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/dolar-comercial-estados-unidos/?historico>>. Acesso em: 9 fev. 2016.

The European Wind Energy Association EWEA. **Wind energy's frequently asked questions**. Disponível em: <<http://www.ewea.org/wind-energy-basics/faq/>>. Acesso em: 11 oct. 2015.

TURCONI, R.; BOLDRIN, A.; ASTRUP, T. **Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 28, p. 555–565, 2013. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.013>>. .

TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE UMA PÁ. Disponível em: <<http://www.wind-energy-the-facts.org/images/3-4.jpg>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE DUAS PÁS. Disponível em: <<http://www.windenergysolutions.nl/sites/default/files/Glaick-Farm,-WES250-%285%29.jpg>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE TRÊS PÁS. Disponível em: <http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/variable-speed-wind-turbine-20877-2843369.jpg>. Acesso em: 13 ago. 2015.

TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL: DARRIEUS. Disponível em: <http://data.wind-turbine-models.com/fotos/800/turbine-Dornier_Darrieus55_565.jpg>. Acesso em: 17 ago. 2015.

TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL: GORGLOV-HELICOIDAL. Disponível em: <<http://winddose.com/images/turbine%20technologies/gorlov.jpg>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL: GIROMILL-TIPO H. Disponível em: <<http://www.2020solar.co.uk/uploads/WG-1K5/WG-1K5.jpg>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL: SAVONIUS. Disponível em: <http://img.archiexpo.com/images_ae/photo-g/vertical-axis-small-wind-turbine-onshore-savonius-rotor-62275-8011231.jpg>. Acesso em: 17 ago. 2015.

UDDIN, M. S.; KUMAR, S. **Energy, emissions and environmental impact analysis of wind turbine using life cycle assessment technique**. Journal of Cleaner Production, v. 69, n. 2014, p. 153–164, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614000973>>. .

VILLELA, I. A. C. **Desenvolvimento de um Modelo Termoeconômico que considera os impactos ambientais**. 2007. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

VILLELA, I. A. C.; SILVEIRA, J. L. **Ecological efficiency in thermoelectric power plants.** Applied Thermal Engineering, v. 27 p. 840-847, April 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.09.019>>.

YUE, D.; YOU, F.; DARLING, S. B. **Domestic and overseas manufacturing scenarios of silicon-based photovoltaics: Life cycle energy and environmental comparative analysis.** Solar Energy, v. 105, p. 669–678, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.008>>. .

ANEXO A - Ficha técnica do aerogerador *Aeolos-V* 10 kW



Vertical Wind Turbine Brochure

*Aeolos wind turbine
SINCE 1986*

Aeolos-V 10kW

windturbinestar.com



Aeolos-V
windturbinestar.com

Aeolos wind turbine
SINCE 1986



Specification

Generator Type:	Three Phase Permanent Magnet
Rotor Height:	6.5m (21.33 ft)
Rotor Width:	5.0m (16.4 ft)
Turbine Weight:	680kg (1499.1 lbs)
Blades Material:	Aluminum Alloy
Blade Quantity:	3 pcs
Working Temperature:	-20 °C to 50 °C
Design Lifetime:	20 years

Performance

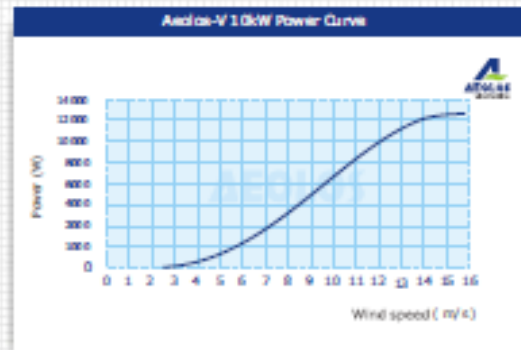
Rated Power:	10 kW
Max Output Power:	12 kW
Cut In Wind Speed:	2.5m/s (5.6 mph)
Rated Wind Speed:	12m/s (26.8 mph)
Survival Wind Speed:	55m/s (122.65 mph)
Generator Efficiency:	96%
Noise Level:	<38 dB(A)
Warranty:	5 year

Safety

Blades RPM Limitation:	150 RPM
PWM Dump Load:	12 kW Box
Mechanical Brake:	Manual/Auto

Optional

Remote Monitoring System	(Internet/Wireless)
Auto Hydraulic Brake System	(Unattended Site)
Off Grid :	48 V or 120 V
Grid Tie :	360 V



Aeolos-V 10kW Wind Turbine Annual Energy Output

Wind Speed(m/s)	Annual Energy Output (kWh)	Wind Speed(m/s)	Annual Energy Output (kWh)
3 m/s	1051 kWh	9 m/s	43000 kWh
4 m/s	3504 kWh	10 m/s	60440 kWh
5 m/s	7120 kWh	11 m/s	71832 kWh
6 m/s	10512 kWh	12 m/s	87600 kWh
7 m/s	16644 kWh	13 m/s	98988 kWh
8 m/s	32412 kWh	14 m/s	105966 kWh



5 YEAR WARRANTY



Aeolos Wind Energy Ltd (UK)
27 Old Gloucester Street, London WC1N 3AX
United Kingdom
Tel: +44 208 242 1898
E-mail: sales@windturbinestar.com





**Aeolos wind turbine
SINCE 1986**



Why Choose Aeolos V 10kW Wind Turbine?

Triple Safety Protection

Special Blade Design: Aeolos blades use the special aerodynamic design which limits the max rotating speed to 150 rpm even the wind speed is 30m/s or 40m/s. It is more safe and reliable than traditional vertical axis wind turbine.

PWM Dump Load: Aeolos-V 10kW wind turbine has the 1.2kW dump load box with PWM loading function. This will consume the over power output and control the voltage in strong wind speed.

Mechanical Brake: The manual mechanical brake can stop the wind turbine for maintenance or typhoon coming. We have the auto hydraulic brake system for remote installation site without people checking.



High Efficiency

Low Cut-in Wind Speed: Aeolos-V 10kW could start up with 2.5m/s wind speed and has the power output in 3.5m/s to inverter. This is more efficient than the vertical wind turbines with a 3.5m/s or even 4.5m/s cut in wind speed.

More Annual Output: According to the AWEA standard, Aeolos-V 10kW annual output is 7120 kWh at 5m/s wind speed. The annual output at 10m/s is 60440 kWh.

MPPT Charger For Off Grid: Aeolos-V 10kW use 48V MPPT charging controller to increase the charging efficiency to 94%. It can charge the battery bank when wind speed is above 3.5 m/s.



5 YEAR WARRANTY





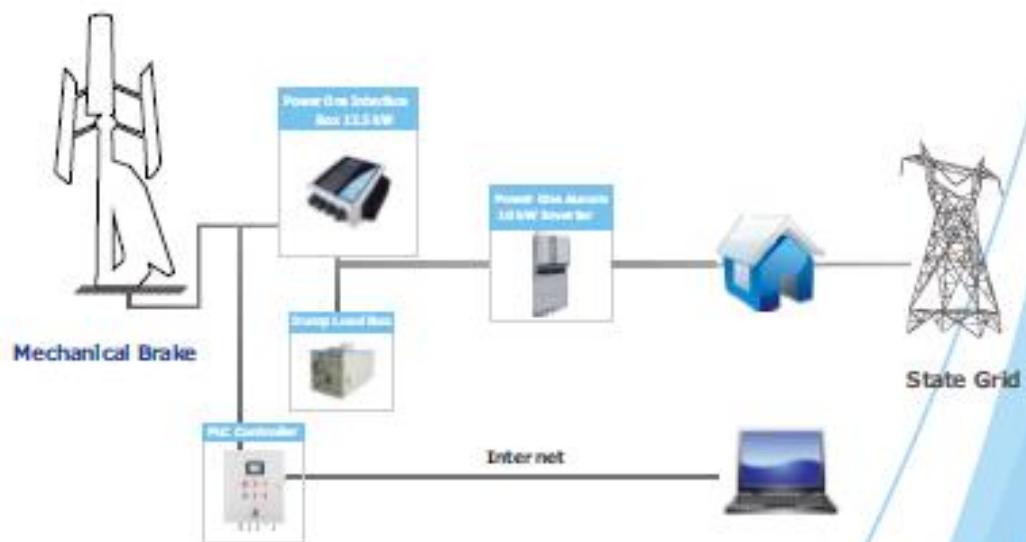
The screenshot displays the Aeolos software interface. At the top left is the Aeolos logo. The central part of the screen shows a 3D model of a wind turbine with a large circular gauge in the center. Surrounding this central gauge are four smaller circular gauges, each representing a different performance metric. Below the 3D model, there are two columns of data. The left column, titled 'Wind turbine control', includes a green dot for 'Wake' and a red dot for 'Reference'. The right column, titled 'Wind turbine status', includes 'Turbine Size' (100), 'Turbine Type' (100), 'Generator Size' (100), and 'Generator Type' (100). At the bottom right, there is a 'Summary' section with a list of performance metrics and their corresponding values.

Wind turbine control		Wind turbine status		Summary	
Wake	100	Turbine Size	100	Flow/Wind Speed Turbine	100
Reference	100	Turbine Type	100	Flow/Wind Speed Turbine	100
		Generator Size	100	Flow/Wind Speed Turbine	100
		Generator Type	100	Flow/Wind Speed Turbine	100
		Generator Type	100	Flow/Wind Speed Turbine	100

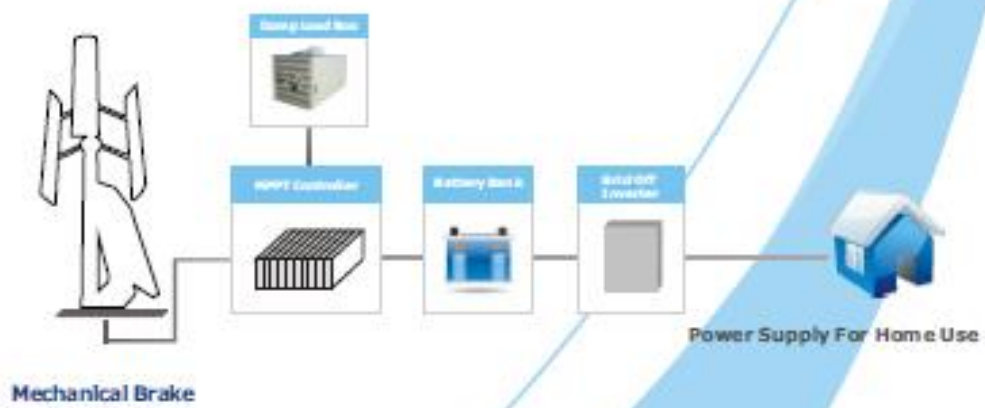


Wiring Diagram

Grid-on



Grid-off



5 YEAR WARRANTY



ANEXO B - Ficha técnica do painel solar fotovoltaico *Canadian Solar CS6P-265P*



QUARTECH CS6P-260 | 265P

Canadian Solar's new Quartech modules have significantly raised the standard of module efficiency in the solar industry. They introduced innovative four busbar cell technology, which demonstrates higher power output and higher system reliability. Worldwide, our customers have embraced this next generation of modules for their excellent performance, superior reliability and enhanced value.

NEW TECHNOLOGY

- Reduces cell series resistance
- Reduces stress between cell interconnectors
- Improves module conversion efficiency
- Improves product reliability

KEY FEATURES

-  Higher energy yield
 - Outstanding performance at low irradiance
 - Maximum energy yield at low NOCT
 - Improved energy production through reduced cell series resistance
-  Increased system reliability
 - Long-term system reliability with IP67 junction box
 - Enhanced system reliability in extreme temperature environment with special cell level stress release technology
-  Extra value to customers
 - Positive power tolerance up to 5 W
 - Stronger 40 mm robust frame to hold snow load up to 5400 Pa and wind load up to 2400 Pa
 - Anti-glare project evaluation
 - Salt mist, ammonia and blowing sand resistance apply to seaside, farm and desert environments

 **CanadianSolar**



*Black frame product can be provided upon request.

25
years

insurance-backed warranty
non-cancelable, immediate warranty insurance
linear power output warranty

10
years

product warranty on materials
and workmanship

MANAGEMENT SYSTEM CERTIFICATES

ISO 9001:2008 / Quality management system
ISO/TS 16949:2009 / The automotive industry quality management system
ISO 14001:2004 / Standards for environmental management system
OHSAS 18001:2007 / International standards for occupational health & safety

PRODUCT CERTIFICATES

IEC 61215 / IEC 61730: VDE/MCS/CE / JET/SEI/CEC AU/INMETRO/CQC
UL 1703 / IEC 61215 performance: CEC listed (US) / PSEC (US Florida)
UL 1703: CSA / IEC 61701 ED2: VDE / IEC 62716: VDE / IEC 60068-2-68: SGS
PV CYCLE (EU) / UNI 9177 Reaction to Fire: Class 1



CANADIAN SOLAR INC. is committed to providing high quality solar products, solar system solutions and services to customers around the world. As a leading manufacturer of solar modules and PV project developer with about 10 GW of premium quality modules deployed around the world since 2001, Canadian Solar Inc. (NASDAQ: CSIQ) is one of the most bankable solar companies worldwide.

CANADIAN SOLAR INC.

545 Speedvale Avenue West, Guelph, Ontario N1K 1E6, Canada, www.canadiansolar.com, support@canadiansolar.com

MODULE / ENGINEERING DRAWING (mm)

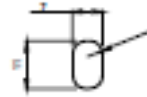
Rear View



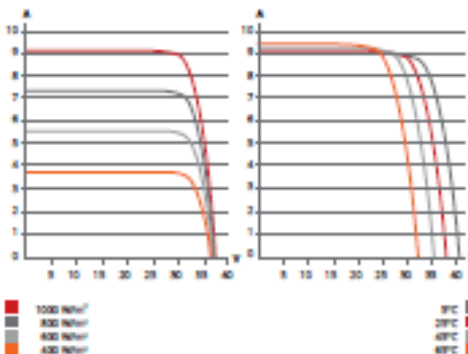
Frame Cross Section A-A



Mounting Hole



CS6P-260P / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA / STC*

Electrical Data CS6P	260P	265P
Nominal Max. Power (P _{max})	260 W	265 W
Opt. Operating Voltage (V _{mp})	30.4 V	30.6 V
Opt. Operating Current (I _{mp})	8.56 A	8.66 A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	37.5 V	37.7 V
Short Circuit Current (I _{sc})	9.12 A	9.23 A
Module Efficiency	16.16%	16.47%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C	
Max. System Voltage	1000 V (IEC) or 1000 V (UL)	
Module Fire Performance	TYPE I (UL 1703) or CLASS C (IEC61730)	
Max. Series Fuse Rating	15 A	
Application Classification	Class A	
Power Tolerance	0 ~ +5 W	

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

ELECTRICAL DATA / NOCT*

Electrical Data CS6P	260P	265P
Nominal Max. Power (P _{max})	189 W	192 W
Opt. Operating Voltage (V _{mp})	27.7 V	27.9 V
Opt. Operating Current (I _{mp})	6.80 A	6.88 A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	34.5 V	34.7 V
Short Circuit Current (I _{sc})	7.39 A	7.48 A

* Under Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), irradiance of 800 W/m², spectrum AM 1.5, ambient temperature 20°C, wind speed 1 m/s.

PERFORMANCE AT LOW IRRADIANCE

Industry leading performance at low irradiance, average +96.5% relative efficiency from an irradiance of 1000 W/m² to 200 W/m² (AM 1.5, 25°C).

The specification and key features described in this datasheet may deviate slightly and are not guaranteed. Due to on-going innovation, research and product enhancement, Canadian Solar Inc. reserves the right to make any adjustment to the information described herein at any time without notice. Please always obtain the most recent version of the datasheet which shall be duly incorporated into the binding contract made by the parties governing all transactions related to the purchase and sale of the products described herein.

Caution: For professional use only. The installation and handling of PV modules requires professional skills and should only be performed by qualified professionals. Please read the safety and installation instructions before using the modules.

MODULE / MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Poly-crystalline, 6 inch
Cell Arrangement	60 (5×10)
Dimensions	1638×982×40 mm (64.5×38.7×1.57 in)
Weight	18 kg (39.7 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass
Frame Material	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP67, 3 diodes
Cable	4 mm² (IEC) or 4 mm² & 12AWG 1000 V (UL), 1000 mm (39.4 in) (650 mm (25.6 in) is optional)
Connectors	Friends PV2a (IEC), Friends PV2b (IEC / UL)
Standard	26 pieces, 515 kg (1135.4 lbs)
Packaging	(quantity & weight per pallet)
Module Pieces per Container	728 pieces (40' HQ)

TEMPERATURE CHARACTERISTICS

Specification	Data
Temperature Coefficient (P _{max})	-0.41% / °C
Temperature Coefficient (V _{oc})	-0.31% / °C
Temperature Coefficient (I _{sc})	0.053% / °C
Nominal Operating Cell Temperature	45±2°

PARTNER SECTION



Scan this QR-code to discover solar projects built with this module

