

THAIS SANTOS CASTRO

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE SISTEMAS DE GERAÇÃO
ALTERNATIVA PARA SUPRIMENTO ENERGÉTICO DE CARROS ELÉTRICOS

Guaratinguetá

2018

THAIS SANTOS CASTRO

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DE SISTEMAS DE GERAÇÃO
ALTERNATIVA PARA SUPRIMENTO ENERGÉTICO DE CARROS ELÉTRICOS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista, para a Qualificação de Pesquisa como
processo de obtenção do título de Doutora em
Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Coorientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá

2018

Castro, Thais Santos
C355a Análise econômica e ambiental de sistemas de geração alternativa para
suprimento energético de carros elétricos / Thais Santos Castro –
Guaratinguetá, 2018
147 f. : il.
Bibliografia: f. 135-146

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
Co-orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Biogás. 3. Automóveis elétricos.
I. Título.

CDU 620.91(043)



Luciana Máximo
Bibliotecária-CRB-8-3595

THAÍS SANTOS CASTRO

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

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr.ª Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Coorientador / UNESP/FEG


Prof.ª Dr.ª IVONETE ÁVILA
UNESP/FEG


Prof. Dr. FRANCISCO JOSÉ GRANDINETTI
UNESP/FEG


Prof. Dr. MÁRCIO ZAMBOTI FORTES
UFF


Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU

Março de 2018

DADOS CURRICULARES

THAIS SANTOS CASTRO

NASCIMENTO	25-nov-1979 – Guaratinguetá, SP
FILIAÇÃO	Leopoldo Urbano dos Santos Elizabeth da Silva Santos
2001 / 2008	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – UNESP / FEG
2011 / 2013	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado – UNESP / FEG
2013 / 2017	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado – UNESP / FEG

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, autor e consumidor da minha fé, por me sustentar ao longo desses anos de luta.

Ao meu esposo, que com todo carinho me apoiou e me ajudou em todas as fases deste trabalho, sendo compreensivo nos momentos de ausência, sendo responsável pelos 16 anos de companheirismo, amor, sabedoria e, acima de tudo, baseado no amor de Cristo.

Aos meus filhos, Davi e Samuel, alegria da minha vida, razão da minha busca e com certeza o meu melhor trabalho, vivo para que eles vivam bem. Amor incondicional.

À minha mãe, que se alegrou e vibrou com cada conquista, sendo um exemplo de amor e servidão, um amor genuíno, onde o retorno é desnecessário.

Ao meu orientador Teófilo de Souza, que com toda paciência, dedicação e disposição sempre foi presente nas dúvidas e obstáculos do estudo.

Ao meu co-orientador José Luz, que sempre incentivou e apoiou nos tempos difíceis.

Aos meus amigos, que de perto ou de longe, sempre puderam me apoiar, e nos momentos de alta tensão, foram uma válvula de escape, para poder rir e recarregar a energia para a longa caminhada.

Aos meus colegas do Centro de Energias Renováveis e do IPBEN – UNESP, com os quais dividi momentos de aflições, questionamentos e que sempre tiveram dispostos a ajudar, em especial a Maria Cláudia Costa de Oliveira Botan, que viveu simultaneamente todo este aprendizado e com quem pude dividir meus momentos de fraquezas, sempre encontrando uma palavra de apoio e motivação.

À CAPES, pela bolsa de estudos, que permitiu dedicar-me de maneira exclusiva ao desenvolvimento deste trabalho.

Pai...

Seu olhar,
Seu sorriso,
Seu chamado,
Sua prontidão,
Sua servidão,
Seu amor,
Seu conhecimento...

Que saudade de tudo,
Que vontade de te ouvir me chamar,
De dizer que tudo vai dar certo,
De te ver brincar com as crianças,
De dar o que você não tem, só para me ver sorrir...

Mas posso dizer que sou o que você construiu...
E com muito orgulho digo que consegui....
A luta foi grande, mas como você nos ensinou a lutar...
Aqui estou terminando mais uma etapa...

Gostaria de te dizer que consegui,
Mas me alegro com a certeza que você estaria vibrando com esta vitória...
Eu te amo... para sempre...
Pai.

in memoriam

“O medo é a razão mais prevalecente que leva alguém a parar; a fé é o que leva alguém a iniciar.”

John Maxwell

“Todo progresso acontece fora da zona de conforto.”

Michael John Bobak

CASTRO, T.S. **Análise Econômica e Ambiental de Sistemas de Geração Alternativa para Suprimento Energético de Carros Elétricos**. 2018. 153 folhas. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente e com a qualidade do ar tem sido o foco de vários trabalhos nos meios acadêmico e governamental, sabendo-se que um dos grandes fatores dessa degradação é o meio de transporte. O poder aquisitivo do cidadão brasileiro unido à facilidade da compra de novos carros está crescendo a cada ano, com isso o número de veículos por habitante também tem aumentado; nesse sentido, é essencial que novas tecnologias mais eficientes e com melhor rendimento sejam estudadas e analisadas. Partindo deste conceito, nota-se que os carros elétricos são uma alternativa inteligente para diminuir a degradação provocada pelos combustíveis fósseis. A produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis tais como fotovoltaica, biogás, etc., aliada ao baixo custo de manutenção e à longa vida útil, está se tornando uma alternativa atrativa. Neste trabalho são aplicadas metodologias para dimensionamento e análise do custo da geração de energia elétrica através de fontes renováveis: fotovoltaicas e biogás. Considera-se também o custo operacional do carro elétrico sendo abastecido com a eletricidade fornecida por essas fontes e pela energia da concessionária rede, comparado ao custo operacional de um carro de motor de combustão interna. Também é determinado o CO_{2eq} emitido pela utilização da usina fotovoltaica, usina a biogás, energia da rede e pela gasolina e etanol utilizado no carro de MCI. Foi ainda calculado o passivo ambiental associado a cada tipo de tecnologia de geração de eletricidade renovável. Conclui-se que o retorno de investimento para a energia gerada pelo biogás é menor do que para a energia fotovoltaica, porém as duas opções apresentam viabilidade econômica, considerando ainda que a agressão ao meio ambiente é baixa para ambas as tecnologias. Tais fatores propiciam uma alternativa de estudo eficaz afim de customizar o sistema e diminuir o custo de geração de eletricidade e gerar alternativas de redução de CO_{2eq} .

PALAVRAS-CHAVE: Veículo Elétrico. Fotovoltaico. Biogás Eficiência energética. CO_2 Equivalente.

CASTRO, T.S. **Economic and Environmental Analysis of Alternative Generation Systems for the Energy Supply of Electric Cars**. 2018. 153 sheets. Qualifying Thesis (Doctorate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

ABSTRACT

The concern about the environment and the quality of the air has been the focus of several studies in both academic and government fields, showing that one of the main responsible ones for the degradation of the environment is transportation. The acquisition power of Brazilian people coupled with the ease of buying new vehicles is growing every year; as a result, the rate of vehicles per inhabitant has also increased; in this sense, it is of essence that new and more efficient technologies be studied and analyzed. Starting from this concept, electric vehicles are a smart alternative to reduce the degradation caused by fossil fuels. The production of electricity from renewable sources such as photovoltaic, biogas, etc., combined with the fact that those systems have low maintenance costs and long service life is becoming an attractive alternative. In this study, methodologies are applied to calculate and analyze the costs of electricity generation by renewable sources: solar and biomass energy. It is also considered the operating cost of the electric car being fed with the electricity provided by these sources and by grid energy, compared to the operating cost of an internal combustion engine car. The CO_{2eq} emitted by the use of the photovoltaic plant, the biogas plant, the grid energy and the gasoline and ethanol used in the ICE car is also determined. It was also calculated the environmental liabilities associated with each type of renewable electricity generation technology. As a conclusion, this study shows that the return of investment considering the energy generated by biogas systems is lower than the one required to generate photovoltaic energy, but both options present good return of investment, considering also the low level of aggression to the environment. These factors provide an effective option for a study aiming to customize the system and to reduce the electricity generation costs, decreasing CO₂ equivalent levels.

KEYWORDS: Electric Vehicle. Photovoltaics. Biogas Energy efficiency. CO₂ equivalent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição setorial do consumo de derivados de petróleo	28
Figura 2 – Evolução da frota por combustível	29
Figura 3 – Veículos por habitantes no Brasil	31
Figura 4 – Consumo de energia nos transportes.....	31
Figura 5 – Carro elétrico Jamais Contente (1899).....	33
Figura 6 – Gurgel Itaipu E150.....	34
Figura 7 – Veículo elétrico conceitual.....	35
Figura 8 – Curvas de potência do motor elétrico e motor de combustão interna.....	36
Figura 9 – Evolução da produção de energia mundial de células fotovoltaicas.....	42
Figura 10 – Potência em MW de painéis fotovoltaicos fabricados por países	43
Figura 11 – Irradiação Normal Direta no Brasil – Média anual	44
Figura 12 – Irradiação Normal Direta na Alemanha – Média anual	45
Figura 13 – Sistema fotovoltaico autônomo <i>off-grid</i>	46
Figura 14 – Estrutura de banda de energia	47
Figura 15 – Distribuição das tecnologias usadas na produção industrial de células fotovoltaicas	48
Figura 16 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício	49
Figura 17 – Efeito fotovoltaico na junção pn	50
Figura 18 – Aproveitamento da radiação solar por células fotovoltaicas.....	51
Figura 19 – Influência da variação da irradiância solar na curva característica <i>I-V</i> de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C.....	51
Figura 20 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva <i>I-V</i> , para irradiância de 1000 W/m ²	52
Figura 21 – Rendimento dos materiais utilizados na confecção de células.....	53
Figura 22 – Curva <i>I-V</i> de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectada em série.....	54
Figura 23 – Curva <i>I-V</i> de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectada em paralelo	55
Figura 24 - Associação em série – paralelo.....	55
Figura 25 – Processo de digestão anaeróbica	57
Figura 26 – Histórico da concentração de dióxido de carbono e de metano na atmosfera	59
Figura 27 – Biodigestor modelo indiano	60
Figura 28 – Biodigestor modelo chinês.....	61

Figura 29 – Participação nas emissões de CH ₄	62
Figura 30 – Fases de formação do biogás de aterro	63
Figura 31 – Potencial de energia disponível no Brasil a partir de RSU	65
Figura 32 – Ligação dos Paineis Solares: Série / Paralelo	67
Figura 33 – Ligação das Baterias: Série / Paralelo	70
Figura 34 – Potência energética fornecida por três diferentes biomassas	73
Figura 35 – Metodologia de Boehm (1987) para determinação do custo de investimento no MCI.....	78
Figura 36 – Smart Forfour elétrico	82
Figura 37 – Interior dos carros da montadora Daimler	82
Figura 38 – Itens de manutenção do carro MCI	83
Figura 39 – Itens de manutenção do carro elétrico.....	83
Figura 40 – Variação do custo de eletricidade produzida pelo SGF com subsídio	98
Figura 41 – Custo da eletricidade produzida pelo SGF – Região Norte (5 horas diárias)	100
Figura 42 – Custo da eletricidade produzida pelo SGF – Região Sul, Sudeste e Centro-Oeste	100
Figura 43 – Custo de eletricidade produzida pelo SGF – Região Nordeste	101
Figura 44 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Norte.....	102
Figura 45 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Sul	102
Figura 46 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Sudeste	103
Figura 47 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Centro-Oeste	103
Figura 48 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Nordeste ..	104
Figura 49 – Receita anual com 30% de subsídio e 4% de juros anual em função do período	105
Figura 50 – Variação do custo de eletricidade produzida pelo SGB – <i>payback</i> 10 anos	106
Figura 51 – Custo de eletricidade produzida pelo SGB – Região Norte.....	108
Figura 52 – Custo de eletricidade produzida pelo SGB – Região Sul, Sudeste e Centro-Oeste	108
Figura 53 – Custo de eletricidade produzida pelo SGB – Região Nordeste.....	109
Figura 54 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Norte.....	110
Figura 55 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Sul	110
Figura 56 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Sudeste	111
Figura 57 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Centro-Oeste	111

Figura 58 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Nordeste ..	112
Figura 59 – Receita anual com 30% de subsídio e 4% de juros anual em função do período de <i>payback</i> para o SGB	113
Figura 60 – Custo de eletricidade produzida pelo SGB e SGF	114
Figura 61 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> – Região Nordeste ..	115
Figura 62 – Custo da distância percorrida do carro elétrico.....	117
Figura 63 – Custo de utilização para autonomia de 150 km diário em 1 ano	118
Figura 64 – Custo de combustível para 200.000 km	119
Figura 65 – Itens de manutenção do carro MCI	119
Figura 66 – Itens de manutenção do carro elétrico.....	120
Figura 67 – Emissão de CO _{2eq} [tCO _{2eq}] para 150 kW diário.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frota circulante no Brasil – 2016.....	28
Tabela 2 – Balanço energético nacional	30
Tabela 3 – Projeção do veículo elétrico no Brasil	34
Tabela 4 – Emissões brasileiras de gases de efeito estufa Período 1990-2010 em CO _{2e}	40
Tabela 5 – Emissão de CO ₂ pelo setor de transportes no Brasil.....	40
Tabela 6 – Emissão de CO ₂ por veículo no Brasil	41
Tabela 7 – CO _{2eq} da geração de eletricidade	44
Tabela 8 – Eficiência das células fotovoltaicas por tecnologia	52
Tabela 9 – Composição do biogás	57
Tabela 10 – Comparação do potencial de aquecimento global	58
Tabela 11 – Tempo típico de cada fase da biomassa de aterro sanitário.....	64
Tabela 12 – Fator de descarga da bateria	69
Tabela 13 – Tabela de custo para o sistema fotovoltaico – Ano 2016	74
Tabela 14 – Dados de catálogo dos MCI.....	76
Tabela 15 – Dados técnicos do carro de MCI e elétrico.....	81
Tabela 16 – Energia primária de fabricação total das placas fotovoltaicos.....	84
Tabela 17 – Massa molar dos elementos do biogás.....	86
Tabela 18 – Concentração admissível de gases prejudiciais à qualidade do ar.....	87
Tabela 19 – Fatores de emissão da energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN)...	88
Tabela 20 – Massa molar dos elementos da gasolina.....	89
Tabela 21 – Características do painel fotovoltaico 260 W – Irradiância 1000 W/m ² , temperatura 25°C	91
Tabela 22 – Distribuição por peso de um módulo fotovoltaico	92
Tabela 23 – Distribuição por gasto energético de um módulo fotovoltaico.....	92
Tabela 24 – Peso dos materiais utilizados em automóveis.....	94
Tabela 25 – Análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos	95
Tabela 26 – Dimensionamento da usina fotovoltaica.....	96
Tabela 27 – Dimensionamento da usina biogás	97
Tabela 28 – Dados para o calculo do custo da produção de energia por região.....	99
Tabela 29 – <i>Payback</i> do SGF	101
Tabela 30 – Receita anual esperada em função do período de <i>payback</i> para as regiões.....	104
Tabela 31 – <i>Payback</i> do SGB	109

Tabela 32 – Receita anual esperada do SGB em função do período de payback para as regiões	112
Tabela 33 – Custo de 100 km rodados para o MCI e elétrico em US\$	117
Tabela 34 – Característica do painel solar	120
Tabela 35 – Energia primária utilizada nos painéis fotovoltaicos	121
Tabela 36 – Emissão de CO _{2eq} relacionado a construção dos painéis fotovoltaicos	121
Tabela 37 – Emissão de CO _{2eq} para o transporte dos PV	122
Tabela 38 – Emissões totais dos PV	122
Tabela 39 – Emissões totais considerando o tempo de vida útil dos PV	123
Tabela 40 – Emissões de CO ₂ , NO _x , SO ₂ , MP e CO _{2eq} da queima do biogás no MCI	123
Tabela 41 – Emissões de CO _{2eq} do biogás	124
Tabela 42 – Emissões de CO _{2eq} da rede elétrica	124
Tabela 43 – Emissões de CO _{2eq} da gasolina premium	125
Tabela 44 – Emissões de CO _{2eq} do etanol anidro	126
Tabela 45 – Gasto energético dos componentes do sistema fotovoltaico	127
Tabela 46 – Energia gerada por painel durante 1 ano	128
Tabela 47 – Cálculo do equilíbrio energético da produção do módulo fotovoltaico	128
Tabela 48 – Energia para a produção de materiais	129
Tabela 49 – Gasto energético da fabricação dos materiais do RSU	130
Tabela 50 – Cálculo do equilíbrio energético da produção do biogás	131
Tabela 51 – Passivo ambiental	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira de Veículo Elétrico
AC	Alternada
ácido-Pb	Ácido-chumbo (ácido-Pb)
ACV	Análise do Ciclo de Vida
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício amorfo hidrogenado
a-Si:H	Silício amorfo hidrogenado
BC	Bateria do carro elétrico
BI	Banco de bateria independente
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CIGS	Gálio e índio
CIS	Disseleneto de cobre e índio
CO	Região Centro-Oeste
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
c-Si	Silício cristalino
CV	Cavalo-Vapor
DC	Contínua
Eg	Diferença de potencial
EPBT	Energy Pay-Back Time
EPE	Empresa de Pesquisa ENERGÉTICA
EUA	Estados Unidos da América
eV	Elétron-Volt
GEE	Gases do Efeito Estufa
GN	Gás natural
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
ion-Li	Íon-lítio
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IND	Irradiação Normal Direta
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPI	Imposto sobre produtos industrializados
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
K	Kelvin

MCI	Motor de Combustão Interna
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MIT	Motor de indução trifásico
mono-Si	Mono Silício
MP	Materiais particulados
m-Si	Monocristalina
n	Neutron
N	Região Norte
NE	Região Nordeste
Ni-Cd	Níquel-cádmio (Ni-Cd).
Ni-MH	Hidreto de níquel-metal (Ni-MH)
Nox	Óxido de nitrogênio
p	Próton
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PIB	Produto Interno Bruto
PLs	Projeto de Leis
pn	próton neutron
poli-Si	Poli Silício
ppm	Partes por milhão
p-Si	Policristalina
PV	Painéis Fotovoltaicos
RPM	Rotação por Minuto
RSU	Resíduo Sólido Urbano
S	Região Sul
SAE	<i>Society of Automotive Engineering</i>
SE	Região Sudeste
SF6	Hexafluoreto de enxofre
SGB	Sistema de Geração Biogás
SGF	Sistema de Geração Fotovoltaico
SIN	Sistema Interligado Nacional
UNDP	<i>United Nations Development Program</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista
VE	Veículos elétricos

VEB

Veículo Elétrico a Bateria

LISTA DE SÍMBOLOS

(CO ₂) _e	Emissão anual	tCO ₂
C	Consumo de energia elétrica	MWh.ano-1
CB	Capacidade de carga de cada bateria	Ah
C _{bio}	Custo do biogás	US\$/kW
CC	Capacidade de carga de cada módulo fotovoltaico	Ah
C _{el}	Custo de produção de eletricidade	US\$/kWh
C _{ele}	Tarifa da eletricidade fornecida pela rede	US\$/kWh
C _{man}	Custo de manutenção do sistema	US\$/kWh
CMCI	Investimento do motor de combustão interna	US\$
CMD	Consumo médio diário	Ah
CMCI	Custo de manutenção do MCI	US\$/kW
CO ₂	Massa de CO ₂ no gás de exaustão por unidade de massa de combustível	kgCO ₂ /kgcomb
C _{op}	Custo de operação	US\$/kWh
CR	Custo do equipamento para uma grandeza de referência SSr	US\$
CTB	Capacidade de carga total da bateria	Ah
CTF	Consumo total para fabricação da bateria	kWh/kg
D	Distância percorrida pelo veículo transportador	km
DSS	Dias sem sol	dias
E	Energia elétrica gerada	kW
E _{comb}	Potência energética fornecida pelo combustível	kW
E _{economizada}	Economia de energia devido	W
EMG	Potência elétrica produzida no sistema	kW
emissões _{comb}	Emissões quilométricas do combustível utilizado	kg de CO ₂ /L
Ep	Eletricidade produzida	kW
EPBT	Tempo de reembolso de energia	anos
ER	Energia reembolsada	anos
E _{utilizada}	Contribuição de energia durante o ciclo de vida	W
f	Fator de anuidade	1/ano
FE	Fator de emissão	kg de CO ₂
GEB	Gasto energético para fabricação da bateria	kWh

η_{gel}	Coeficiente relativo à eficiência elétrica	%
H	Número de horas de operação por ano	h/ano
η	Eficiência elétrica	%
hi	Horas de pico de irradiação solar	horas
H _{MCI}	Horas de operação do motor gerador	horas
I	Corrente elétrica	A
I _c	Corrente máxima do controlador	A
I _{máx}	Corrente de potência máxima	A
I _{mc}	Corrente máxima do controlador selecionado	A
I _{sc}	Corrente de curto circuito do módulo solar	A
ISF	Investimento total necessário	US\$
IS _{MCI}	Investimento motor gerador	US\$
IS _{MCI}	Investimento do sistema de MCI	US\$
k	Período de amortização de capital ou <i>payback</i>	anos
m	Fator de incidência que indica a escala de economia	-
m _{comb}	Vazão mássica de combustível	kg/s
MM _{biogás}	Massa molar do biogás	kmol/kg
MM _{CH₄}	Massa molar do CH ₄	kmol/kg
MM _{CO₂}	Massa molar do CO ₂	kmol/kg
nel	Rendimento	%
NO _x	Massa de NO _x no gás de exaustão por unidade de massa de combustível	kg NO _x /kgcomb
PT	Potência total do sistema	W
P	Peso da bateria	kg
PCC	Potência contínua do controlador	W
PCI _{comb}	Poder calorífico inferior do combustível	kJ/kg
PCI _{GN}	Poder calorífico inferior do gás natural	kJ/kg
PM _{comb}	Percentual de mistura do combustível utilizado	%
PSC	Potência de surto do controlador	W
PSI	Potência de surto do inversor	W
PTAC	Potência total AC do sistema	W
QBP	Quantidade de baterias ligadas em paralelo	Peças
QBS	Quantidade de baterias ligadas em série	Peças
QMP	Quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em paralelo	Peças

QMS	Quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em série	Peças
QMT	Quantidade de módulos fotovoltaicos totais utilizados na usina para geração de energia elétrica	Peças
QT	Quantidade de produto transportado	t
QTB	Quantidade de baterias total utilizada na usina fotovoltaica	Peças
QTC	Quantidade total de controladores ligado em paralelo	Peças
r	Taxa anual de juros	%
RE	Receita anual	US\$/ano
S	Grandeza de interesse	kW
SO ₂	Massa de SO ₂ no gás de exaustão por unidade de massa de combustível	kg SO ₂ /kgcomb
SR	Grandeza de referência	kW
U	Tensão do sistema	V
U _{bat}	Tensão VDC de cada bateria	V
U _{mf}	Tensão VDC de cada módulo fotovoltaico	V
V	Tensão elétrica	V
w	Mol de CO ₂ no gás de exaustão por mol de combustível	mol/mol

Letras gregas

η	Eficiência	%
γ_{el}	Coefficiente relativo à eficiência elétrica	-

Subscritos

bio	Biogás
el	Eletricidade
g	Global
GN	Gás Natural
SGB	Sistema geração biogás
SGF	Sistema geração fotovoltaico
SMG	Sistema motor gerador

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	24
1.1	MOTIVAÇÃO	24
1.2	OBJETIVOS	25
1.3	APRESENTAÇÃO INICIAL	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	O VEÍCULO ELÉTRICO.....	27
2.1.1	A Relevância da Indústria Automobilística Mundial.....	27
2.1.2	A Indústria Automobilística no Brasil.....	28
2.1.3	O Carro Elétrico	32
2.1.4	A Ação Governamental	37
2.1.5	As Emissões na Condição Atual no Brasil.....	39
2.2	A ENERGIA FOTOVOLTAICA	41
2.2.1	A Energia Solar no Mundo	42
2.2.2	Energia Solar no Brasil	44
2.2.3	As Células e os Módulos Fotovoltaicos	45
2.2.4	A Tecnologia Fotovoltaica.....	47
2.2.5	Eficiência das Células Fotovoltaicas	52
2.2.6	Associações de Módulos Fotovoltaicos.....	53
2.3	O BIOGÁS	56
2.3.1	Biodigestores	59
2.3.2	O Aterro Sanitário	61
3	METODOLOGIA.....	66
3.1	DIMENSIONAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA.....	66
3.1.1	Dimensionamento da Quantidade de Painéis Solares	66
3.1.2	Dimensionamento das Baterias	68
3.1.3	Dimensionamento do Controlador de Cargas.....	71
3.1.4	Dimensionamento do Inversor.....	72
3.2	DIMENSIONAMENTO DA USINA A BIOGÁS	72
3.3	ANÁLISE ECONÔMICA	73
3.3.1	Análise Econômica para o Sistema de Geração Fotovoltaico.....	74
3.3.2	Análise Econômica para o Sistema de Geração a Biogás.....	75
3.4	RECEITA ANUAL ESPERADA.....	79

3.5	CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE ECONÔMICA: CARRO ELÉTRICO X CARRO MCI.....	80
3.6	ANÁLISE AMBIENTAL.....	83
3.6.1	Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) Associado à Usina Fotovoltaica....	84
3.6.2	Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) para o Biogás	85
3.6.3	Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) para a Energia Elétrica.....	88
3.6.4	Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂) para o Consumo de Gasolina	88
3.7	PASSIVO AMBIENTAL RESULTANTE DA ENERGIA RENOVÁVEL	90
3.7.1	Sistema Fotovoltaico	90
3.7.2	Baterias de Chumbo-Ácido.....	93
3.7.3	Carro Elétricos.....	93
3.7.4	Sistema Biogás.....	94
4	RESULTADO E DISCUSSÕES.....	96
4.1	DIMENSIONAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA.....	96
4.2	DIMENSIONAMENTO USINA BIOGÁS.....	97
4.3	ANALISE ECONÔMICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO	97
4.3.1	Custo da Energia Elétrica pelo SGF	99
4.3.2	Receita Anual com Subsídio	105
4.4	ANALISE ECONÔMICA DO SISTEMA A BIOGÁS	106
4.4.1	Custo da Energia Elétrica pelo SGB.....	107
4.4.2	Receita Anual com Subsídio	113
4.4.3	Sistema de Geração a Biogás x Sistema de Geração Fotovoltaico	113
4.5	ANÁLISE ECONÔMICA PARA O CARRO ELÉTRICO	115
4.6	ANÁLISE AMBIENTAL.....	120
4.6.1	Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) Associado à Usina Fotovoltaica..	120
4.6.2	Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) para o Biogás	123
4.6.3	Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) para a Energia Elétrica.....	124
4.6.4	Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂) para o Consumo de Gasolina	125
4.6.5	Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}): Carro Elétrico x Carro MCI....	126
4.7	A ANÁLISE DO PASSIVO AMBIENTAL	127
4.7.1	Sistema Fotovoltaico	127
4.7.2	A Bateria.....	128
4.7.3	Carro Elétrico	129
4.7.4	Biogás.....	130

4.7.5	Resultado do Passivo Ambiental para Diferentes Combinações.....	131
5	CONCLUSÕES.....	133
	REFERÊNCIAS.....	135

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 MOTIVAÇÃO

O consumo de energia vem impulsionando pesquisas com o objetivo de se alcançar o equilíbrio entre o homem e a natureza. O desenvolvimento sustentável será alcançado somente quando houver um interrelacionamento entre os objetivos econômicos, sociais e ambientais na busca da tão desejada energia limpa, mas, para atingir esta importante meta, o comportamento do homem, a exploração dos meios para a obtenção e os tipos de energia terão que ser revistos. Do contrário, danos ao meio ambiente ocorrerão de forma cada vez mais rápida, aumentando a desigualdade e prejudicando o crescimento econômico global.

A matriz energética mundial está sustentada, em uma grande parcela, por fontes não renováveis como petróleo e carvão, e o desequilíbrio ambiental gerado pela crescente demanda tem criado uma sociedade com consciência ambiental, porém sem atitude de mudança, pois a busca pela modernização e conforto sobrepõe-se à capacidade de racionalização. E um dos causadores deste cenário é a indústria automobilística, responsável por uma grande parcela da emissão dos gases de exaustão dos tão conhecidos e tradicionais veículos de motores a combustão. Uma alternativa interessante e desafiadora para essa geração é a eletrificação do meio de transporte, seja ele individual ou coletivo, por meio de energias alternativas que diminuam a agressão ao meio ambiente.

Desde a sua existência e seu desenvolvimento a humanidade escolheu seus sistemas energéticos em função de sua disponibilidade técnica e viabilidade econômica. Somente nas últimas décadas foi adicionada uma preocupação eminente: os impactos ambientais causados por sua utilização. Não se pode pensar em um futuro sustentável sem antes considerar novas soluções e ferramentas para implementá-lo de imediato.

Com esta responsabilidade no Brasil surge a oportunidade de crescimento para a geração de energia elétrica por meio de fontes renováveis como as usinas fotovoltaicas e de biogás, grandes potenciais ainda pouco explorados no território nacional, somado ao impulso e início do incentivo governamental da introdução do carro elétrico no mercado brasileiro.

Finalmente, este estudo busca a justificativa da viabilidade das fontes renováveis para alimentar carros elétricos através de uma análise econômica e ambiental dos sistemas de geração alternativa.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a viabilidade econômica e ambiental da implantação do carro elétrico no Brasil utilizando energia proveniente de fontes renováveis.

- a) Dimensionamento das usinas fotovoltaicas e biogás para alimentar carros elétricos;
- b) Análise da viabilidade da utilização de um banco de baterias independente para armazenamento da energia gerada;
- c) Análise econômica da geração de energia elétrica por meio das usinas fotovoltaicas e biogás, considerando as regiões Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste;
- d) Custo da quilometragem de um carro com motor elétrico;
- e) Custo da quilometragem de um carro com motor de combustão interna;
- f) Comparação do consumo entre um carro elétrico e um carro de motor de combustão interna;
- g) Cálculo do dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) na geração da energia renovável e na utilização de combustível fóssil;
- h) Análise do passivo ambiental referente à fabricação dos elementos necessários para a geração de eletricidade por meio da energia fotovoltaica e do biogás, inclusive do banco de baterias independente.

1.3 APRESENTAÇÃO INICIAL

A proposta desta Tese de Doutorado é estudar o fornecimento de energia elétrica para veículos elétricos, obtendo eletricidade por meio da energia fotovoltaica e do grupo motor gerador acionado por biogás. Para o desenvolvimento deste estudo o conteúdo encontra-se estruturado em cinco capítulos.

O Capítulo 1, Considerações Iniciais, apresenta a forma como o presente estudo é dividido, suas motivações e objetivos.

O Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta o estado da arte do carro elétrico, com uma revisão sobre a sua história, a posição da indústria automobilística no cenário mundial e a sua importância no aspecto ambiental; a viabilidade no Brasil, no que tange à geração de eletricidade de forma mais renovável, utilizando a energia fotovoltaica e o biogás.

O Capítulo 3, Metodologia, apresenta as metodologias aplicadas para o dimensionamento das usinas fotovoltaica e biogás com o objetivo de alimentar aproximadamente 100 carros elétricos; o estudo econômico da geração de eletricidade por meio da usina fotovoltaica e biogás; o custo do km rodado do carro elétrico comparado com o carro de motor de combustão interna, cálculo do $\text{CO}_{2\text{eq}}$ e análise do passivo ambiental.

O Capítulo 4, Resultados e Discussões, traz os resultados obtidos com este estudo e a discussão acerca do custo da produção de eletricidade por meio da tecnologia fotovoltaica e biogás, custo da distância percorrida, cálculo do $\text{CO}_{2\text{eq}}$ e o passivo ambiental gerado.

O Capítulo 5, Conclusões, apresenta as conclusões possíveis a partir dos resultados obtidos neste estudo e os trabalhos futuros esperados.

Finalmente, apresenta todas as referências citadas e consultadas em ordem alfabética.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O VEÍCULO ELÉTRICO

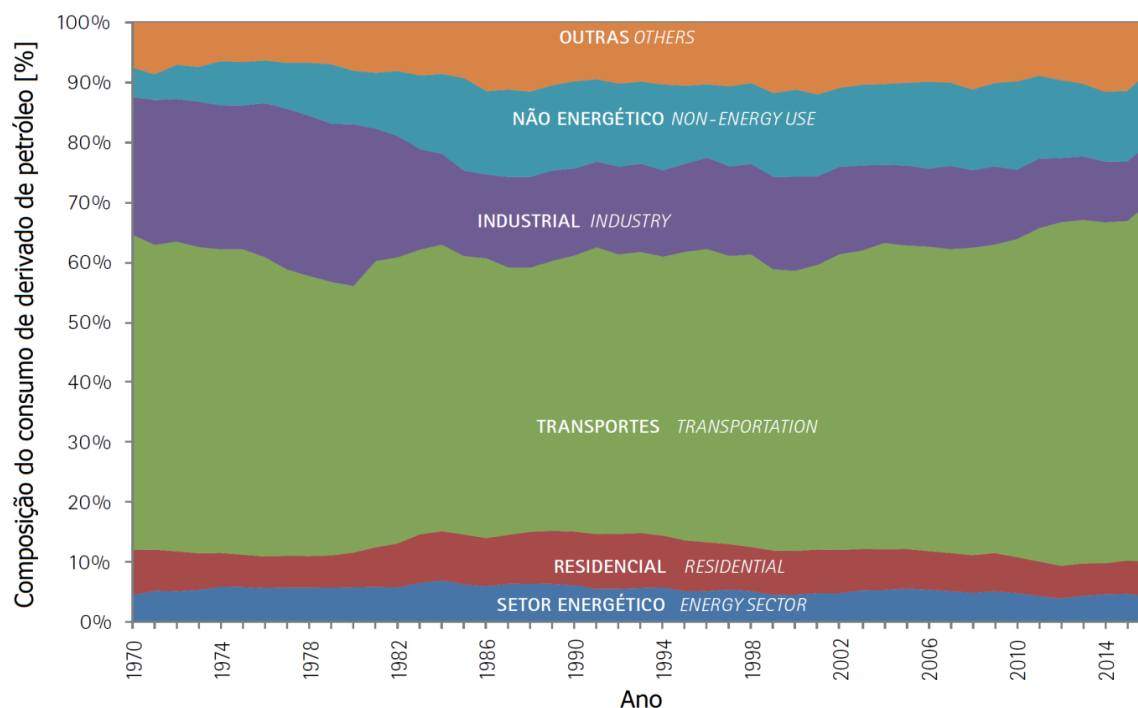
2.1.1 A Relevância da Indústria Automobilística Mundial

Reconhecidamente, a indústria automobilística tem grande importância na economia mundial, movimentando cerca de US\$ 2,50 trilhões por ano. Devido a este valor, atribui-se a essa indústria cerca de 10% do PIB dos países desenvolvidos e é o setor-chave da economia para todos os principais países do mundo (CASOTTI; GOLDENSTEIN, 2008). Estima-se que 50% do total de borracha, 25% do total de vidro e 15% do total de aço produzidos no mundo destinem-se a essa área industrial (CASOTTI; GOLDENSTEIN, 2008).

A frota mundial em 2015 foi estimada em 1,28 bilhão de veículos, com o Brasil atingindo o marco de 42,70 milhões, o que representava 3,34% do total. Segundo a Organização Internacional de Fabricantes de Veículos Automotores (OICA, 2016), em 2015 as maiores frotas foram dos EUA, China e Japão com, respectivamente, 241, 163 e 77 milhões de veículos, representando 39% do total mundial. Por outro lado, a taxa de crescimento percentual da frota dos EUA e do Japão vem diminuindo ao longo dos anos; de 2005 a 2015 o crescimento foi de 11,15% e 2,26% respectivamente. A China ainda continua com um aumento expressivo de 415%. O Brasil, neste mesmo período, teve um crescimento aproximado de 86%.

O setor da economia que mais consome petróleo, em todo o mundo, é o de transportes, responsável em 2014 por 64,5% do consumo de petróleo e 26,0% das emissões de CO₂ (EPE, 2016) no mundo. Este setor foi também o maior responsável pelo crescimento do consumo de petróleo nas últimas décadas, conforme pode-se observar na Figura 1. Esse fator tem levado a indústria automobilística a promover grandes investimentos na pesquisa por alternativas à utilização dos derivados de petróleo (CASOTTI; GOLDENSTEIN, 2008).

Figura 1 – Composição setorial do consumo de derivados de petróleo



2.1.2 A Indústria Automobilística no Brasil

Segundo o Relatório da Frota Circulante, elaborado pelo Sindipeças houve um aumento de 0,70% na frota de veículos no Brasil entre 2015 e 2016, registrando 42,90 milhões de unidades circulantes, entre automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus (SINDIPEÇAS; ABIPEÇAS, 2017). A Tabela 1 mostra o aumento na frota brasileira no decorrer dos anos.

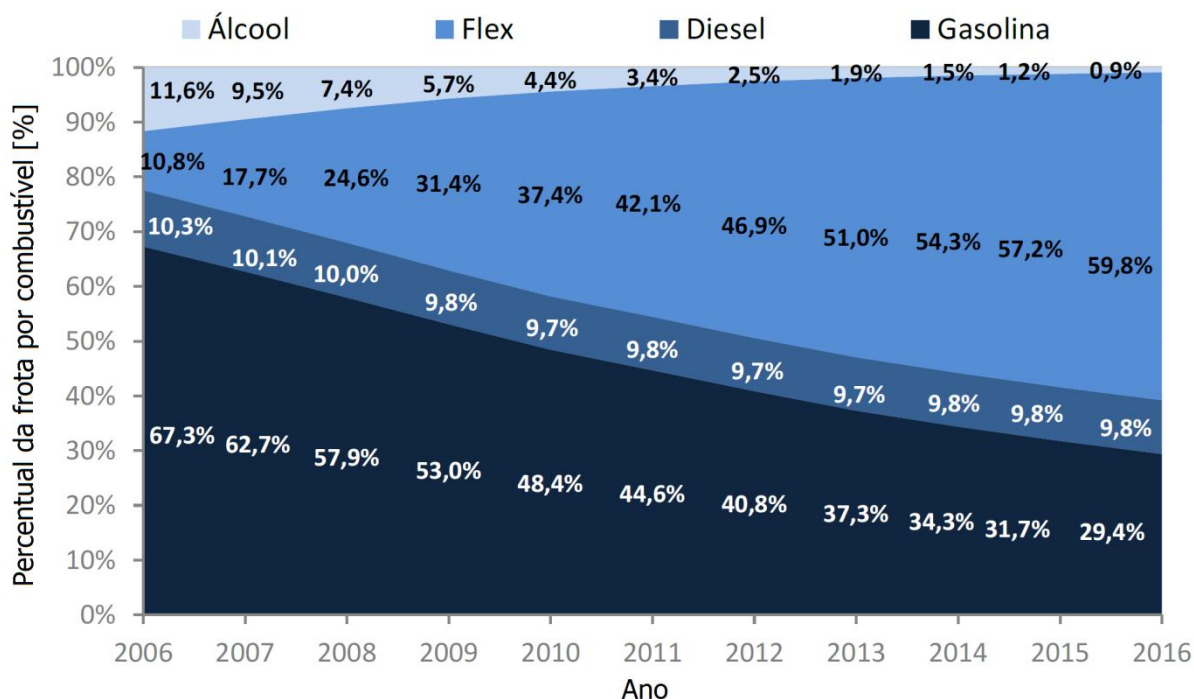
Tabela 1 – Frota circulante no Brasil – 2016

Segmento	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Automóveis	28.902.101	31.124.353	33.203.162	34.389.278	35.261.145	35.601.099
Comerciais Leves	4.106.433	4.389.290	4.700.848	4.899.701	5.055.046	5.001.828
Caminhões	1.577.072	1.664.778	1.769.624	1.859.642	1.881.936	1.883.864
Ônibus	342.992	357.665	374.983	387.656	389.123	385.623
Total	34.928.598	37.536.086	40.048.617	41.536.277	42.587.250	42.872.414

Fonte: Sindipeças; Abipeças (2017)

No Brasil, a frota de veículos é, em sua maioria, formada por motores alimentados a gasolina ou bicomustível chegando a quase 90% de todos os automotores circulantes. Os veículos movidos a GNV, os tetrafuel e os híbridos elétricos não são representativos. A Figura 2 mostra a evolução da frota por combustível (SINDIPEÇAS; ABIPEÇAS, 2017).

Figura 2 – Evolução da frota por combustível



Fonte: Sindipeças; Abipeças 2017

Em meados de 2009 o governo brasileiro se mostrava motivado a promover políticas fiscais favoráveis aos veículos elétricos (VE). Em 2010 uma importante oportunidade foi perdida, mais precisamente na semana que antecedeu a realização do evento internacional sobre mobilidade *Challenge Bibendum* (2010), no Rio de Janeiro. Nessa ocasião, havia uma expectativa dos participantes do evento quanto ao possível anúncio pelo governo com respeito às esperadas medidas relacionadas à introdução de políticas públicas no Brasil para os VE. Porém, as reportagens publicadas na mídia que se sucederam refletiram uma grande frustração por não se compreender que o VE é um fator fundamental de desenvolvimento tecnológico, econômico e social para o país (DOMINGUES et al., 2012).

Não há, ainda, qualquer incentivo, em matéria de impostos ou subsídios financeiros, previsto em lei para os fabricantes e proprietários de carros elétricos.

O Projeto de Lei n.º 415 do ano de 2012 prevista no Senado, que concede isenção de IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) às operações com automóveis equipados com motor acionado exclusivamente por baterias recarregáveis na rede elétrica (carros elétricos), ainda espera um parecer favorável no Senado Federal (AMORIM, 2012). A última tramitação do projeto, que é extensivo às matérias-primas, peças e embalagens utilizadas no processo produtivo, bem como à importação de carros elétricos dos países do Mercosul, foi em 10/11/2016. Isso reflete uma situação diferente do que ocorre em países europeus, onde há apoio governamental para a fabricação dos VE, mas segundo Domingues et al. (2012), ainda há tempo para reduzir a dependência do combustível fóssil no ramo automobilístico no Brasil.

O governo brasileiro precisa adotar políticas públicas federais, estaduais e municipais visando à promoção do desenvolvimento sustentável, por meio de incentivos fiscais na legislação tributária do país, de modo a incentivar a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias veiculares, especialmente para veículos elétricos (DOMINGUES *et al.*, 2012).

O balanço energético nacional (Tabela 2) mostra a indústria e o transporte como sendo os dois maiores consumidores da matriz energética brasileira, ficando responsável por 65% de todo consumo de energia do país.

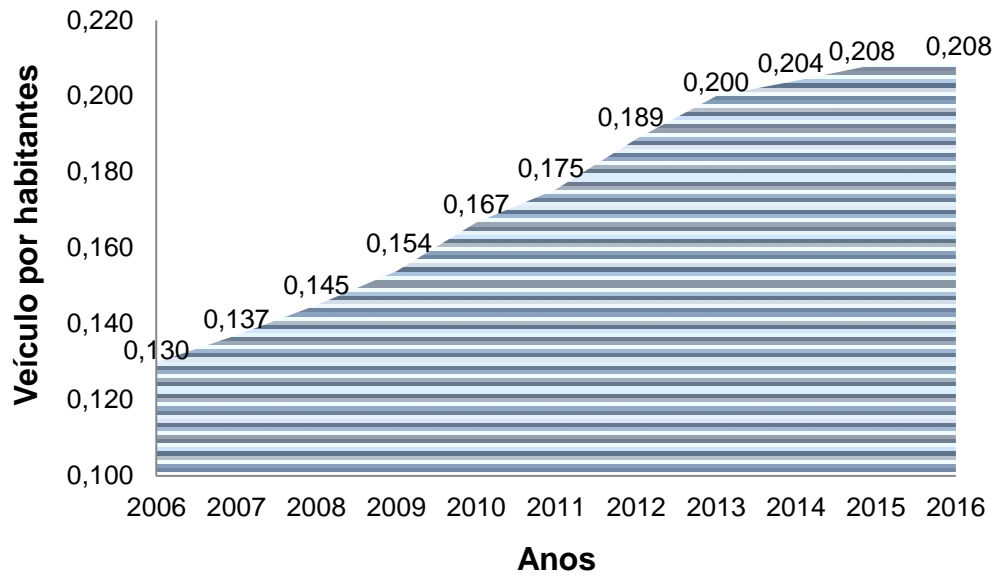
Tabela 2 – Balanço energético nacional

Setor	%
Indústria	32,90%
Transportes	32,50%
Residências	9,30%
Setor Energético	10,30%
Agropecuária	4,20%
Serviços	4,70%
Uso Não Energético	6,00%

Fonte: Empresa De Pesquisa Energética (2015)

Esse valor tende a aumentar a cada ano, dado que o número de veículos por habitantes está aumentando, como mostra a Figura 3. Isso representa uma condição de vida melhor, porém se este crescimento não estiver ligado a um desenvolvimento sustentável, traz consequências ambientais irreversíveis.

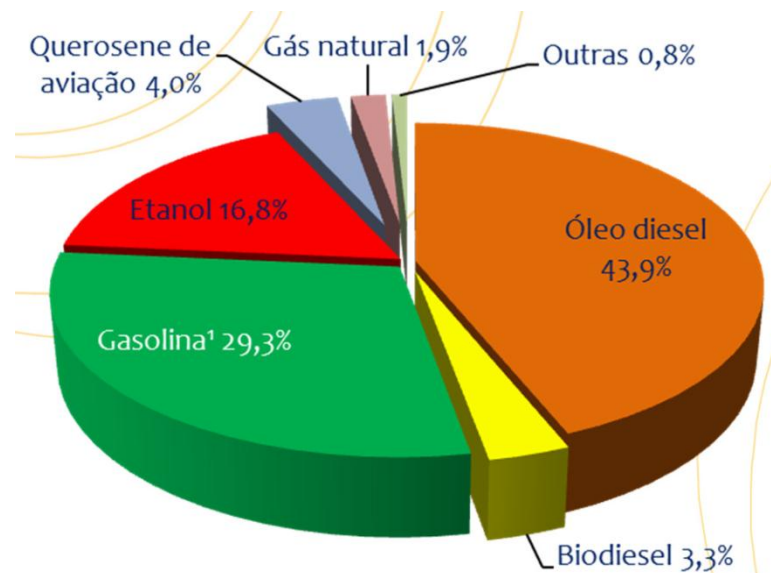
Figura 3 – Veículos por habitantes no Brasil



Fonte: Sindipeças; Abipeças (2017)

No setor de transporte, o maior fornecedor de energia são os combustíveis fósseis, responsáveis por 88% da matriz, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Consumo de energia nos transportes



Fonte: EPE (2017a)

No final do século XX a proteção ambiental tornou-se um assunto global, exigindo imediata mudança comportamental, desenvolvimento tecnológico, economia de energia e

sustentabilidade, tornando o setor automobilístico um alvo importante de estudo, pois 77,2% do consumo de energia relacionado a transporte provem de combustível fóssil.

2.1.3 O Carro Elétrico

A definição de veículo elétrico, segundo a *Society of Automotive Engineering* (SAE), embora não seja padronizada, é a de que “veículo elétrico é aquele no qual pelo menos uma das rodas é acionada por um motor elétrico”. A Associação Brasileira de Veículo Elétrico (ABVE) aprova esta definição (ERBER, 2010).

No Veículo Elétrico a Bateria (VEB) toda a energia elétrica armazenada na bateria provém de uma fonte externa ao veículo, utilizando um motor de indução trifásico (MIT), de alto rendimento (aproximadamente 90%, contra 20% do motor a combustão). Seu tamanho é reduzido e leve, necessitando de menor potência.

Os veículos elétricos são um importante alternativa aos tradicionais motores de combustão interna, onde motores elétricos, centrais ou acoplados diretamente às rodas, são responsáveis pela sua propulsão. Geralmente os veículos elétricos contêm por um banco de baterias para acumular a energia elétrica, um cabo elétrico e um plugue; uma das principais limitações dos veículos elétricos é a baixa autonomia, comparada com o veículo a combustão. (CASTRO; FERREIRA, 2010).

Os veículos elétricos não são uma novidade; no final do século 19 e no início do século 20 eles dominavam o mercado mundial de veículos. Segundo (HØYER, 2008), os veículos elétricos leves começaram a ser desenvolvidos em meados da década de 1880, nos EUA, Reino Unido e Holanda. Em 1859, o belga Gaston Planté, após estudos em eletroquímica, desenvolveu células de bateria em chumbo-ácido, derivando, então, na conhecida bateria de chumbo-ácido, grandemente utilizada como bateria de partida nos carros com motores de combustão interna e como bateria de energia na maioria dos carros elétricos.

Foi o desenvolvimento da tecnologia do motor de combustão e principalmente sua grande autonomia, associado à rapidez de abastecimento e uma crescente rede de distribuição de combustível em função da descoberta de grandes reservas de petróleo na Arábia Saudita, Rússia e Pérsia, levando o barril de petróleo a preços competitivos, somado a uma produção em massa de veículos a gasolina promovida por Ford, que levou ao declínio na utilização de veículos elétricos (LEITMAN; BRANT, 2009; EHSANI et al.; 2005; D'AVILA et al., 2011). Em 1908, o modelo T da montadora Ford, foi o primeiro veículo no qual Henry Ford pôde

introduzir suas ideias revolucionárias (FORD, 2017). Um veículo extremamente simples e confiável, de construção robusta e baixo preço, viria a revolucionar o conceito do automóvel, que deixava de ser um luxo para poucos e viria a ser eleito o “O Carro do Século”. Com a introdução do Modelo T, a Ford se torna o maior fabricante norte-americano de automóveis (mais de 15 milhões de unidades foram fabricadas até o encerramento da sua produção em 1927), em 1925 este modelo custava 560 dólares, enquanto o veículo elétrico custava, na mesma época, 1.760 dólares (EHSANI et al., 2005; D’AVILA et al., 2011; FORD, 2017).

Em 1899, o engenheiro belga Camille Jenatzy, atingiu a incrível velocidade de 100 km/h com a construção do Jamais Contente, mostrado na Figura 5, uma marca notável para o desenvolvimento do carro elétrico.

Figura 5 – Carro elétrico Jamais Contente (1899)



Fonte: Pittoresque (2016)

Em 1973 o Gurgel Itaipu E150, primeiro veículo elétrico produzido no Brasil, foi apresentado no Salão do Automóvel, com autonomia de 60 a 80 km, velocidade máxima de 50 km/h e tempo máximo de recarga das baterias de 10 h. A Figura 6 mostra um modelo deste veículo.

Figura 6 – Gurgel Itaipu E150



Fonte: Pereira (2007)

Hoje, com a pressão por consciência ambiental, o alto preço dos combustíveis fósseis, associados a uma população com acesso ao veículo, cujo perfil são pessoas com menor poder aquisitivo, reflete em um produto de maior eficiência e redução de consumo e torna economicamente atrativas diversas alternativas ao conceito tradicional do automóvel, cuja utilização era considerada improvável nos tempos do petróleo com preços baixos (EHSANI et al., 2005; D'AVILA et al., 2011).

Segundo a projeção da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), a participação dos carros elétricos na frota nacional terá um aumento significativo e gradativo até 2030, como mostra a Tabela 3. Para o mundo estima-se que, em 2040, 90% da frota seja de veículos elétricos (SILVA, 2013).

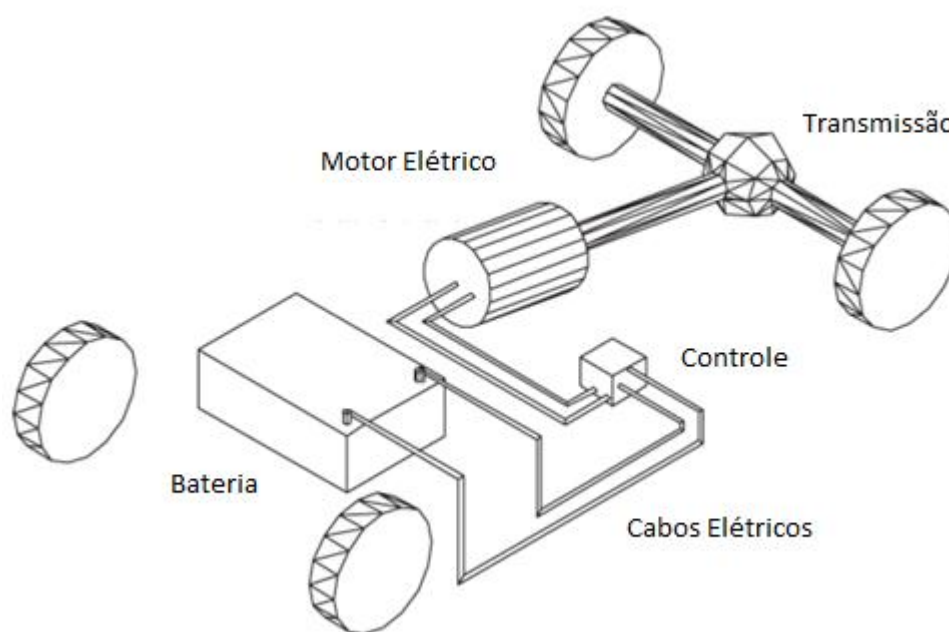
Tabela 3 – Projeção do veículo elétrico no Brasil

Ano	Veículo Elétrico	Veículo Elétrico Híbrido	Veículo Elétrico Híbrido Plug-in	Veículo Elétrico a Bateria
2015	4,30%	3,60%	0,60%	0,10%
2020	25%	15%	9%	1%
2025	48%	20%	19%	9%
2030	60%	18%	24%	18%

Fonte: Silva (2013)

Os principais componentes de um veículo elétrico à bateria são o motor elétrico, um controlador de carga e a bateria. O carregamento das baterias é realizado, geralmente, a partir da rede elétrica, por meio de cabos ou unidades de carregamento. O controlador é responsável pela energia fornecida pelo motor, por consequência sua velocidade. A Figura 7 apresenta o veículo elétrico de forma conceitual (LARMINIE; LOWRY, 2012).

Figura 7 – Veículo elétrico conceitual



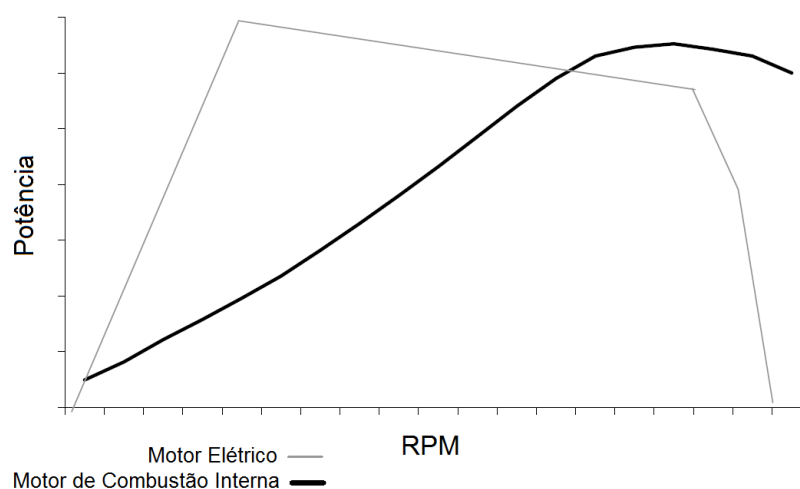
Fonte: Larminie; Lowry (2012)

As quatro tecnologias de bateria mais comum utilizadas são chumbo-ácido (Pb-ácido), íon-lítio, hidreto de níquel-metal (Ni-MH) e níquel-cádmio (Ni-Cd). As baterias de chumbo-ácido são as mais baratas, de maior disponibilidade no mercado, mas têm os ciclos de carga e descarga menor que o restante. As baterias Ni-MH e Ni-Cd têm muitas características semelhantes, sendo a última a mais resistente à temperatura de todas as baterias. As baterias de íon-lítio possuem os ciclos de carga e descarga mais rápidos e tem maior eficiência (99%). No entanto, todas as baterias são mais caras que a chumbo-ácido e de menor disponibilidade (OPIYO, 2016).

Do ponto de vista energético e ambiental, os veículos elétricos são de 30% a 40% mais eficientes do que os de combustão interna, mas tem a desvantagem de serem mais caros e de mecânica mais complexa do que seus equivalentes convencionais (SOVACOOOL; HIRSH, 2009; SOVACOOOL, 2017; EGBUE; LONG; SAMARANAYAKE, 2017; MCLAREN et al., 2016).

Os motores de ciclo Otto, apresentam baixa eficiência, em média 15%, e em baixa rotação esse valor atinge 5 a 10%. O motor elétrico tem a curva de eficiência quase constante, apresentando uma potência máxima na partida, o comportamento típico do gráfico Potência x Rotação está esquematizado na Figura 8 (LACHE et al., 2008).

Figura 8 – Curvas de potência do motor elétrico e motor de combustão interna



Fonte: Lache *et al.* (2008)

Nos países em desenvolvimento a energia consumida no setor de transportes tem apresentado forte tendência de crescimento nos últimos anos, e a expectativa é que essa tendência se repita caso não ocorram mudanças radicais no padrão de consumo de energia (EIA, 2016). A autonomia na utilização de meios de transportes é um reflexo sobre o desenvolvimento econômico dos países, visto que aumenta a qualidade de vida das pessoas que precisam se deslocar para o trabalho ou lazer, expandem fronteiras e reduzem o isolamento.

Nas décadas de 1950 e 1960, os estudos sobre o carro elétrico não se desenvolveram. Somente no início da década de 1970, quando houve uma mudança na opinião pública em vários países, os projetos que estavam descartados começaram a crescer e desenvolver novas alternativas para geração de energia por meio de fontes renováveis.

Há três fatores principais responsáveis pelo crescente interesse nos veículos elétricos: a superação de entraves tecnológicos, as preocupações com o meio ambiente e a segurança energética dos países.

- ✓ **Tecnologia:** o principal item está ligado à superação do desenvolvimento das baterias, fundamental para a viabilização do projeto dos veículos elétricos. Na década de 1990, as baterias tiveram uma nova fase: devido ao avanço da informática e da telecomunicação, era necessário maior autonomia com aumento da energia armazenada e redução de peso, surgindo então uma oportunidade para a utilização nos veículos, já que as infraestruturas das cidades não estavam preparadas para recarga imediata (CASTRO; FERREIRA, 2010).
- ✓ **Meio Ambiente:** segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o setor de transporte é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO₂, e para agravar a situação, ainda é um setor em forte expansão. Devido a esse cenário, o biocombustível não é a solução do problema, abrindo espaço para um desenvolvimento ainda maior da eletrificação veicular.
- ✓ **Energia:** A IEA, em seu cenário de referência, projeta um crescimento médio anual da demanda mundial de energia de 1,50% entre 2007 e 2030, ao passo que, no mesmo período, a oferta de petróleo deve ter expansão média anual de 1,00% (CASTRO; FERREIRA, 2010). Devido a estas projeções a impulsão para os veículos elétricos também é reforçada na área da energia.

2.1.4 A Ação Governamental

Há cinco tipos de ações governamentais de incentivo à difusão do carro elétrico: bônus aos compradores de veículos elétricos, descontos em tributos, adoção de restrições à utilização de veículos convencionais, auxílio à pesquisa e implantação de infraestrutura. Esse apoio foi fortalecido recentemente, quando diversos países aproveitaram os pacotes de benefícios introduzidos durante a crise econômica mundial para promover uma disseminação em favor dos veículos híbridos e elétricos (CASTRO; FERREIRA (2010).

Tendo em vista que o preço de um carro elétrico ainda o inviabiliza comercialmente, em comparação com as alternativas do motor a combustão, vários países têm subsidiado parte do custo de aquisição de um carro, fornecendo um bônus ao comprador. Por fim, os governos têm papel central no estímulo à implantação de infraestrutura de recarga para os carros elétricos.

No Brasil, até o presente momento os veículos elétricos não receberam incentivos diferenciados. No caso do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI), os veículos elétricos

são enquadrados na categoria “outros”, sobre a qual incide a alíquota mais elevada de 25% (CASTRO; FERREIRA, 2010).

A partir de 2012 o Congresso Nacional vem trabalhando na tentativa de criar um ambiente adequado para o desenvolvimento do mercado de carros elétricos. Há pelo menos cinco projetos tratando de interesses sobre o carro elétrico, dois de iniciativa da Câmara dos Deputados (PLs 4751/12 e 3895/12) e três do Senado Federal (PLs 174/14, 415/12 e 304/17) (LIMA, 2017).

O projeto de lei 4751/12 trata da recarga de bateria para os veículos elétricos, tendo como objetivo, a obrigatoriedade de instalações de pontos de recarga junto às vagas de estacionamentos públicos sob a responsabilidade das autoridades locais. Seu texto já foi aprovado pela Câmara dos Deputados e atualmente está em discussão no Senado Federal. De todos os projetos em debate, esse é o que está em estágio mais avançado de tramitação (LIMA, 2017).

O projeto de lei 3895/12 pretendeu criar e regular a figura da revenda varejista de eletricidade para abastecimento de veículo automotor elétrico ou elétrico híbrido, estabelecendo que ela poderá ser exercida por concessionária ou permissionária do serviço público de distribuição de energia elétrica ou por revendedor varejista de eletricidade registrado na Aneel. O objetivo é ampliar o número de entidades que possa fornecer eletricidade para esses veículos, fomentando a competição e o desenvolvimento de infraestrutura de recarga (LIMA, 2017).

Os projetos de lei 415/12 e 174/14, do Senado Federal, foram para a criação de benefícios fiscais, isentando do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) a fabricação de automóveis equipados com motor acionado a energia fornecida por baterias recarregáveis na rede elétrica. O objetivo é viabilizar a redução do preço dos veículos elétricos, hoje muito mais caros do que os tradicionais, e com isso incentivar a criação de um mercado. Medidas desse tipo foram adotadas por países como a Alemanha, que instituiu um bônus ambiental para fomentar a compra de automóveis elétricos. A eletrificação veicular é uma alternativa promissora que não elimina a busca por combustíveis alternativos ao petróleo. Além de alimentarem a frota movida a motores de combustão, há espaço nos modelos híbridos, em máquinas estacionárias e na geração de energia elétrica (LIMA, 2017).

Ainda segundo Lima (2017), no âmbito do Senado Federal, há o recente PLS 304/2017, apresentado em 30 de agosto de 2017. Esse projeto pretende impedir a comercialização de veículos movidos a motor de combustão interna no país a partir de 2030, salvo se esses forem abastecidos exclusivamente com biocombustíveis. Propõe, ainda, que a partir de 2040 a

circulação desses veículos seja proibida, salvo em situações muito específicas (coleções, carros oficiais, representações diplomáticas, etc.) (LIMA, 2017).

2.1.5 As Emissões na Condição Atual no Brasil

Em um projeto de pesquisa e desenvolvimento aprovado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), veículos elétricos movidos exclusivamente à bateria utilizam um terço da energia necessária a um veículo de combustão interna convencional (DOMINGUES *et al.*, 2012).

Um elemento importante que agrava as alterações climáticas é o aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, sendo que o setor de transportes é um dos principais responsáveis pelas emissões, por apresentar em sua matriz energética o combustível fóssil como agente principal (DOMINGUES *et al.*, 2012).

O processo de combustão dos derivados de petróleo efetuado pelos motores veiculares resulta no lançamento de gás carbônico na atmosfera. A emissão do gás carbônico é inerente à reação química de queima do combustível, não sendo possível evitá-la. E, sendo um combustível fóssil, uma grande quantidade de compostos de carbono estocada no subsolo está sendo retirada e lançada na atmosfera, em um processo inverso daquele que o ecossistema do planeta levou cerca de 5 milhões de anos para constituir (CASOTTI; GOLDENSTEIN, 2008).

É importante citar outras substâncias poluentes ao meio ambiente, como o monóxido de carbono, os óxidos de nitrogênio, materiais particulados (MP), e aldeídos. Todos esses componentes estão presentes em maior ou menor grau nas emissões de veículos convencionais, incluindo os bicombustíveis.

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação elaborou a Tabela 4 que mostra as emissões dos CO_{2eq}, um dos gases que fazem parte do fenômeno do efeito estufa. Esse gráfico foi dividido em cinco partes, destacando para o objetivo do trabalho as seções:

- **Energia:** emissões devido à queima de combustíveis e emissões fugitivas da indústria de petróleo, gás e carvão mineral. As emissões de CO₂ devido ao processo de redução nas usinas siderúrgicas foram consideradas no setor de processos industriais.
- **Processos industriais:** emissões resultantes dos processos produtivos nas indústrias e que não são resultado da queima de combustíveis. Subsetores: produtos minerais, metalurgia e química, além da produção e consumo de HFCs e SF₆.

- **Tratamento de resíduos:** emissões pela disposição de resíduos sólidos e pelo tratamento de esgotos, tanto doméstico / comercial quanto industrial, além das emissões por incineração de resíduos e pelo consumo humano de proteínas.
- **Agropecuária:** emissões devido à digestão do gado, manejo de dejetos animais, solos agrícolas, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas.
- **Mudança de Uso da Terra e Florestas:** emissões, remoções e crescimento da vegetação resultantes das variações da quantidade de carbono, por aplicação de calcário em solos agrícolas e das emissões de CH₄ e N₂O pela queima de biomassa nos solos.

Tabela 4 – Emissões brasileiras de gases de efeito estufa Período 1990-2010 em CO_{2e}

Setores	1990	1995	2000	2005	2010
	Gg CO _{2e}				
Energia	191.543	232.430	301.096	328.808	399.302
Processos Industriais	52.536	63.065	71.673	77.943	82.048
Agropecuária	303.772	335.775	347.878	415.713	437.226
Florestas	815.965	1.950.084	1.324.371	1.167.917	279.163
Resíduos	28.939	33.808	38.550	41.880	48.737
Total	1.392.756	2.615.162	2.083.570	2.032.260	1.246.477

Fonte: MCTI (2013)

As emissões originárias da parcela de energia para meios de transporte estão subdivididas como mostrado na Tabela 5, sendo o principal responsável pelas emissões, com uma participação de 90,41% o transporte rodoviário.

Tabela 5 – Emissão de CO₂ pelo setor de transportes no Brasil

Tipo	CO ₂ [t/ano]	Participação
Rodoviário	138.768.000	90,41%
Aéreo	7.999.000	5,45%
Marítimo	4.279.000	2,91%
Ferrovário	1.803.000	1,23%
Total	146.849.000	100%

Fonte: Domingues *et al.* (2012)

A Tabela 6 mostra que na categoria dos transportes rodoviários, os automóveis são responsáveis por 35% da frota, justificando o estudo e desenvolvimento dos veículos elétricos.

Tabela 6 – Emissão de CO₂ por veículo no Brasil

Tipo de Veículo	Porcentagem (%)
Gás natural	3
Caminhões de grande porte	30
Caminhões de médio porte	4
Caminhões de pequeno porte	1
Ônibus rodoviários	3
Ônibus urbano	14
Veículos leves a diesel	3
Automóveis comerciais leves de ciclo Otto	4
Motocicletas	3
Automóveis	35
Total	100

Fonte: Domingues *et al.* (2012)

2.2 A ENERGIA FOTOVOLTAICA

O Sol é uma esfera de material gasoso extremamente aquecido, com $1,40 \times 10^6$ km de diâmetro e está a uma distância aproximada de $1,50 \times 10^8$ km da Terra. A temperatura efetiva da sua superfície é de aproximadamente 5.762 K, e mais próximo ao centro estima-se entre 8×10^6 K e 40×10^6 K (FERREIRA, 1993).

O Sol emite dois tipos de radiação sobre a terra: a primeira é a radiação direta, que são os raios que atingem a terra sem sofrer desvio algum e propagam-se sob a forma de raios paralelos; a segunda é a radiação difusa, que são os raios recebidos do Sol após haver sofrido mudança na sua trajetória inicial, devido às modificações introduzidas pela atmosfera e pela presença de nuvens (FERREIRA, 1993).

A conversão fotovoltaica utiliza os dois componentes da radiação solar incidente, mas somente a radiação direta é significativa.

2.2.1 A Energia Solar no Mundo

Edmond Becquerel, em 1939, observou que placas metálicas, de platina ou prata, submersos em um eletrólito, produziam uma pequena diferença de potencial quando expostas à luz. Esse foi o primeiro efeito fotovoltaico observado.

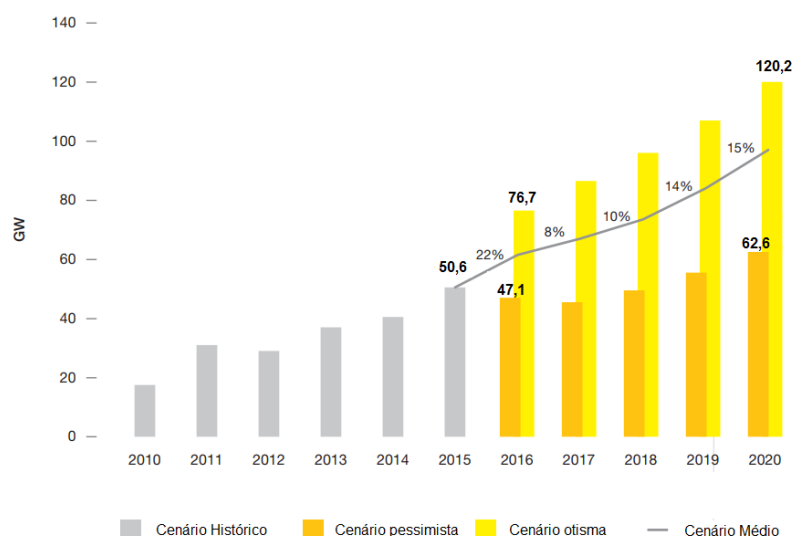
Em 1877, W. G. Adams e R. E. Day, utilizaram as propriedades fotovoltaicas do selênio para desenvolver o primeiro dispositivo sólido de produção de eletricidade por exposição à luz, com eficiência de 0,50%.

Somente em 1955 houve a primeira aplicação das células solares de Chapin, Fuller e Pearsin. O painel era composto de nove células de 30 mm de diâmetro para alimentar uma rede de telefonia local; observa-se então que essa tecnologia era demasiadamente cara, sendo viável somente em aplicações muito específicas, como satélites (VALLÊRA; BRITO, 2006).

Em 1982, movida pela preocupação das alterações climáticas devido à queima dos combustíveis fósseis, é inaugurada a primeira central solar na Califórnia com potência de 1 MWp (VALLÊRA; BRITO, 2006).

O desenvolvimento tecnológico do sistema fotovoltaico é crescente, no momento, para um painel fotovoltaico tipicamente policristalino, sua eficiência de conversão de energia solar para elétrica é de aproximadamente 13-18% (TAN *et al.*, 2017). A Figura 9 apresenta a evolução da produção de energia mundial de células fotovoltaicas, sendo que, os principais consumidores são os países desenvolvidos, devido aos fortes incentivos para as instalações de sistemas fotovoltaicos.

Figura 9 – Evolução da produção de energia mundial de células fotovoltaicas



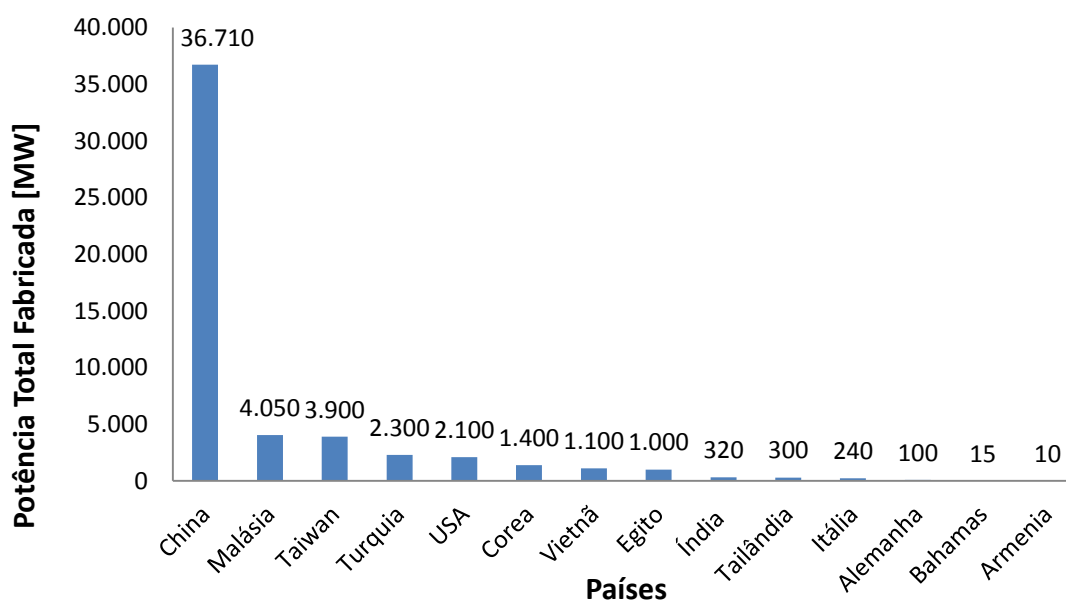
Fonte: Schmela (2016)

Em 2013 o mercado de energia fotovoltaica atingiu a marca de 37 GW de energia, em 2014 este valor subiu para aproximadamente 40 GW, graças ao mercado asiático e americano, a China foi o país com a maior instalação de energia fotovoltaica em 2014 no mundo, atingindo a marca de 10,60 GW conectados à rede, seguida pelo Japão com 9,70 GW e os Estados Unidos com 6,50 GW (MANOËL REKINGER, 2014).

Para se determinar a quantidade dos GEE que foram lançados na atmosfera com a produção dos painéis solares é necessário saber onde esses equipamentos foram fabricados, uma vez que cada país tem uma matriz energética, de forma que quanto mais fóssil maior a quantidade de carbono.

A Figura 10 mostra os maiores países fabricantes de painéis fotovoltaicos, e a Tabela 7 mostra os coeficientes de intensidade de carbono da geração de energia elétrica para os dois maiores países fabricantes dos módulos, para a Alemanha, um dos maiores países que utilizam a energia fotovoltaica, e do Brasil.

Figura 10 – Potência em MW de painéis fotovoltaicos fabricados por países



Fonte: Osborne (2017)

Os coeficientes são determinados de acordo com os vários tipos recursos energéticos que cada país utiliza para gerar energia elétrica e eles são divulgados em relatórios do IPCC, IEA e Ecometric. Foi adotado que os sistemas convencionais de rede elétrica têm uma eficiência de conversão de 35% (ALSEMA, E. A.; NIEUWLAAR, 2000). A Tabela 7 apresenta a média dos coeficientes de CO_{2eq}.

Tabela 7 – CO_{2eq} da geração de eletricidade

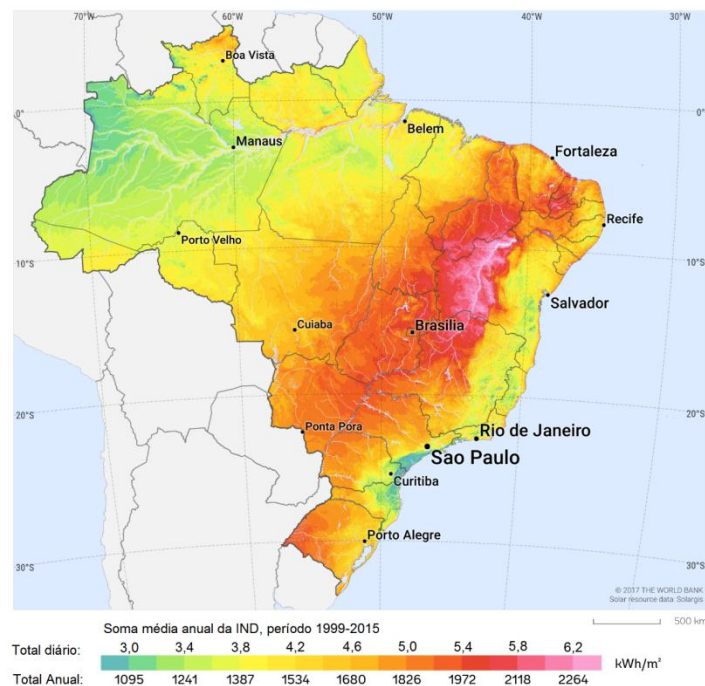
Países	IPCC	IEA	Ecometric	Média
kg CO _{2eq} / kWh				
China	1,05	0,74	0,98	0,92
Malásia	0,47	0,66	0,75	0,62
Alemanha	0,51	0,44	0,67	0,54
Brasil	0,09	0,09	0,09	0,09

Fonte: IPCC/TEAP (2005); Brander *et al.* (2011)

2.2.2 Energia Solar no Brasil

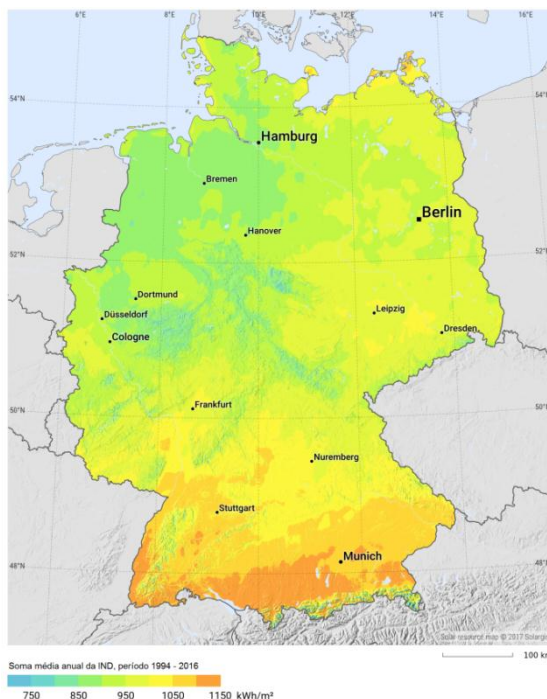
A Figura 11 e Figura 12 utiliza dados do ano de 2017 e expõe uma visão da média anual da irradiação normal direta (kWh/m²) no Brasil e na Alemanha. Os valores da IND incidente em qualquer região do território brasileiro varia entre 1000-2.300 kWh/m² e são superiores aos da maioria dos países europeus, como Alemanha (900-1250 Wh/m²), França (900-1650 kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²), locais onde projetos de aproveitamentos solares são amplamente disseminados (NASCIMENTO, 2017).

Figura 11 – Irradiação Normal Direta no Brasil – Média anual



Fonte: Solargis (2018b)

Figura 12 – Irradiação Normal Direta na Alemanha – Média anual



Fonte: Solargis (2018a)

2.2.3 As Células e os Módulos Fotovoltaicos

A energia solar fotovoltaica é uma energia renovável, que converte a energia solar em energia elétrica. Um sistema típico de energia solar fotovoltaica é composto pelos painéis (módulos) fotovoltaicos, controlador de carga, inversor e bateria, que é um item considerado opcional.

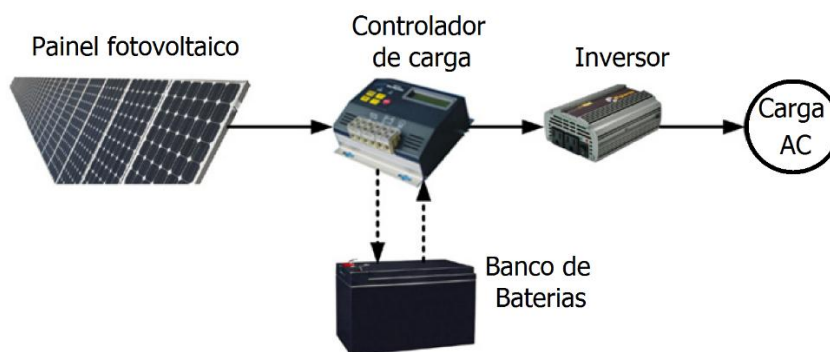
- Os painéis fotovoltaicos ou módulos solares são os principais componentes de um sistema de energia solar é formado por um conjunto de células fotovoltaicas que geram energia por meio da luz do sol. Quando o Sol atinge a célula os elétrons se movimentam gerando uma corrente elétrica. Essas superfícies não possuem partes móveis que se desgastam ou sofrem falhas e trabalham sem o uso de combustível, sem vibração, silenciosamente e sem prejudicar o meio ambiente (SILVEIRA; TUNA; LAMAS, 2013).
- O controlador de carga é responsável por regular e gerenciar o fluxo energético dos geradores fotovoltaicos para as baterias, bem como protegê-las de uma descarga

profunda decorrente de um longo período sem geração, aumentando sua vida útil, tornando o sistema mais eficiente (PINHO; GALDINO, 2014).

- O inversor é um dispositivo responsável por converter a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos, ou seja, pela conversão de uma tensão contínua (DC), proveniente dos geradores renováveis, ou do banco de baterias, para uma tensão alternada (AC), e também equalizar os níveis de tensão e frequência de rede, com forma de onda de baixa harmônica e senoidal (SILVEIRA; TUNA; LAMAS, 2013; PINHO; GALDINO, 2014).
- A bateria é um acumulador elétrico que em um sistema *off-grid* garante o fornecimento de energia quando não houver sol, são responsáveis por todo armazenamento de energia produzido pelos painéis solares, são elas que determinam a autonomia do sistema. Em um sistema *on-grid* elas são dispensáveis.

A Figura 13 representa uma configuração de um sistema fotovoltaico para geração de eletricidade utilizando bateria, também conhecido como sistema isolado *off-grid*.

Figura 13 – Sistema fotovoltaico autônomo *off-grid*



Fonte: Kaldellis *et al.* (2012)

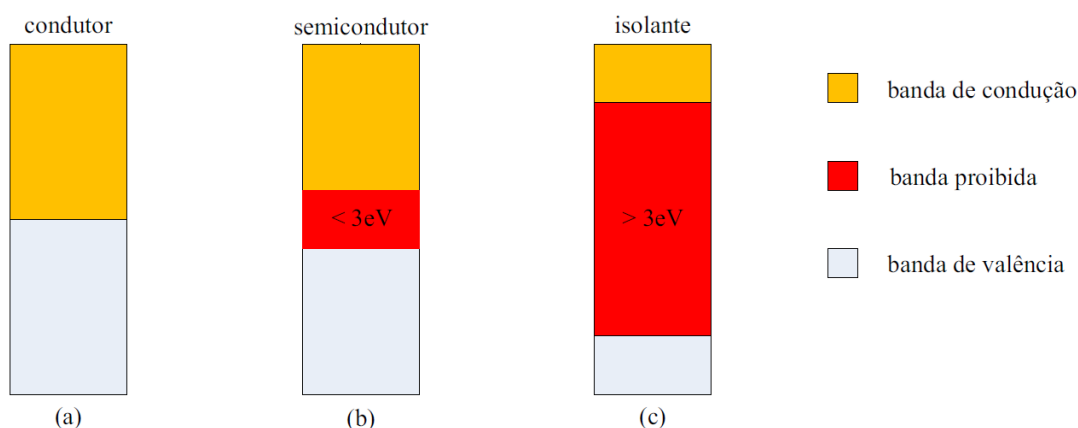
A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é transmitida para o controlador de carga, que regulariza o fluxo de corrente, havendo necessidade de carga o controlador envia diretamente este fluxo de corrente para o inversor, que transforma a corrente contínua em corrente AC, e então supre a necessidade do sistema, se não, esta corrente é direcionada para a bateria que armazena esta energia até o momento solicitado pela carga do projeto.

2.2.4 A Tecnologia Fotovoltaica

O efeito fotovoltaico dá-se em materiais da natureza denominados semicondutores, que se caracterizam pela presença de bandas de energia onde é permitida a presença de elétrons (banda de valência) e de outra onde totalmente “vazia” (banda de condução) (CRESESB, 2006).

A separação entre as duas bandas de energia permitidas dos materiais semicondutores são chamadas de banda proibida, *bandgap*, ou simplesmente *gap*, é representada por uma diferença de potencial E_g que pode atingir até 3 eV (elétron-volt). A Figura 14 representa a estrutura das bandas dos materiais condutores, semicondutores e isolantes (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 14 – Estrutura de banda de energia



(a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes

Fonte: Pinho; Galdino (2014)

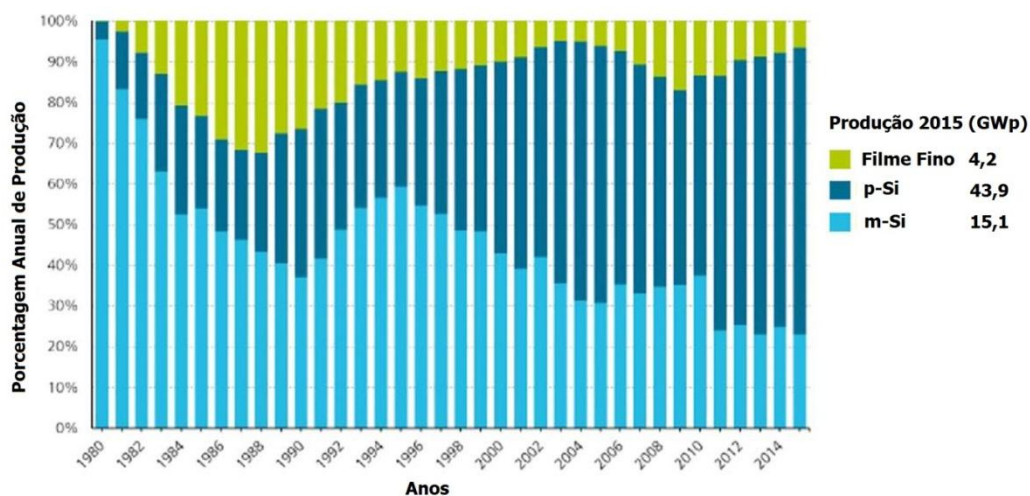
A tecnologia fotovoltaica está dividida em duas grandes categorias: células de silício cristalino e células de filmes finos. Os semicondutores mais utilizados em ordem crescente de maturidade e utilização são silício cristalino (c-Si); silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou a-Si); telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre e índio (CIS) e gálio e índio (CIGS) (RÜTHER, 2004)

O c-Si é a tecnologia fotovoltaica mais tradicional e a única dentre as mencionadas acima que faz uso de lâminas cristalinas (diâmetro de aproximadamente 10 cm, tipicamente) relativamente espessas (espessura 300 – 400 μm), o que representa uma maior limitação em termos de redução de custos de produção. Todas as outras tecnologias estão baseadas em

películas delgadas (filmes finos, com espessura da ordem de 1 μm) de material ativo semiconductor e é neste aspecto que reside o grande potencial de redução de custos que essas tecnologias detêm (RÜTHER, 2004).

O maior mercado atual é constituído pelas células fabricadas baseada no silício, nas formas monocristalina (m-Si) ou policristalina (p-Si), como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Distribuição das tecnologias usadas na produção industrial de células fotovoltaicas



Fonte: Sampaio; González (2017)

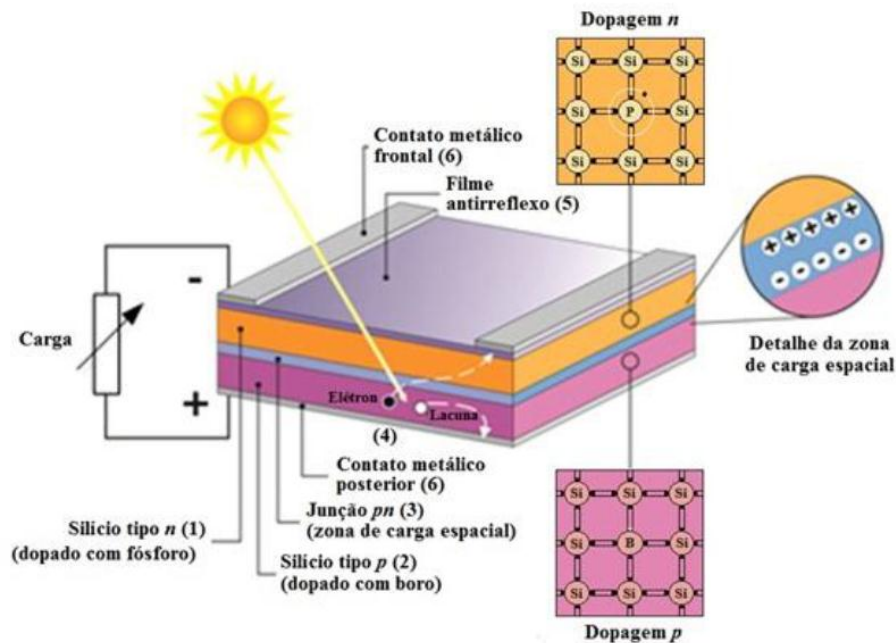
Os materiais mais utilizados na fabricação dos painéis são o silício monocristalino (m-Si), policristalino (p-Si) e *string ribbon*. No Si-c mono a estrutura dos cristais está perfeitamente ordenada, eles apresentam eficiências na ordem dos 16% a 24% e representa cerca de 30% do mercado. O Si-c poli apresenta estrutura dos cristais desordenados e eficiências na ordem dos 14% a 17% e representa cerca de 60% do mercado. O silício do tipo *string ribbon*, produzido inicialmente em formato laminar, tem eficiência entorno de 18%, caracteriza-se pelo diferente crescimento dos lingotes, sendo utilizado um laser para os cortes verticais das bolachas de silício. Esta técnica permite que os custos diminuam devido à utilização eficiente da matéria-prima não sendo necessário o corte e processo químico (ADRIANO, 2015).

O silício é o mais utilizado por conter quatro elétrons na última camada de valência que se ligam ao vizinho, formando ligações covalentes. Quando são adicionados átomos com cinco elétrons de ligação há um elétron em excesso que não pode ser emparelhado e que fica com uma ligação fraca ao seu átomo de origem, resultando em baixa energia térmica na

liberação desse átomo para a banda de condução. Em outra situação, quando se adiciona átomos com apenas três elétrons de ligação, há falta de um elétron para completar as ligações de silício na rede cristalina. Essa falta de elétrons é denominada lacuna ou buraco, então com pouca energia térmica, o elétron de um sítio vizinho se desloca e ocupa esta posição, fazendo com que a lacuna se movimente para o sítio vizinho. A Figura 16 representa a estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício (CRESESB, 2006).

Os átomos que apresentam excesso de elétrons, como no caso do fósforo, são denominados dopante n ou impureza n. Os átomos que apresentam falta de elétrons, como o boro, são denominados dopante p ou aceitador de elétrons (CRESESB, 2006).

Figura 16 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício



(1) região tipo n; (2) região tipo p; (3) zona de carga espacial, onde se formou a junção pn e o campo elétrico; (4) geração de par elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos.

Fonte: Pinho; Galdino (2014)

A junção pn é formada quando um silício puro é dopado de átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra. A reação ocorre devido aos elétrons livres do lado n transferirem-se para o lado p onde se encontram as lacunas que os capturam, ocorrendo um acúmulo de elétrons do lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n, que o torna eletricamente positivo (CRESESB, 2006).

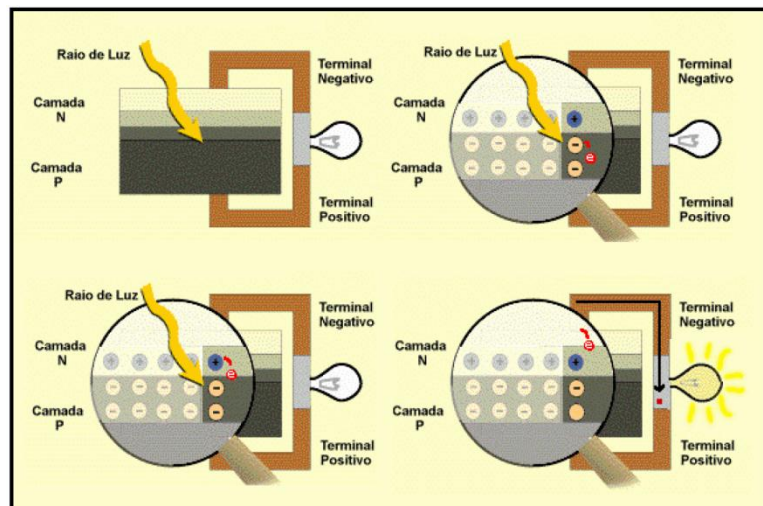
Essas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p; este processo alcança um equilíbrio

quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n (CRESESB, 2006; PINHO; GALDINO, 2014)

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o *gap*, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial, o qual é chamado de Efeito Fotovoltaico (CRESESB, 2006)

Se as duas extremidades do eletrodo de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons – essa é a base do funcionamento das células fotovoltaicas (CRESESB, 2006; PINHO; GALDINO, 2014)

Figura 17 – Efeito fotovoltaico na junção pn

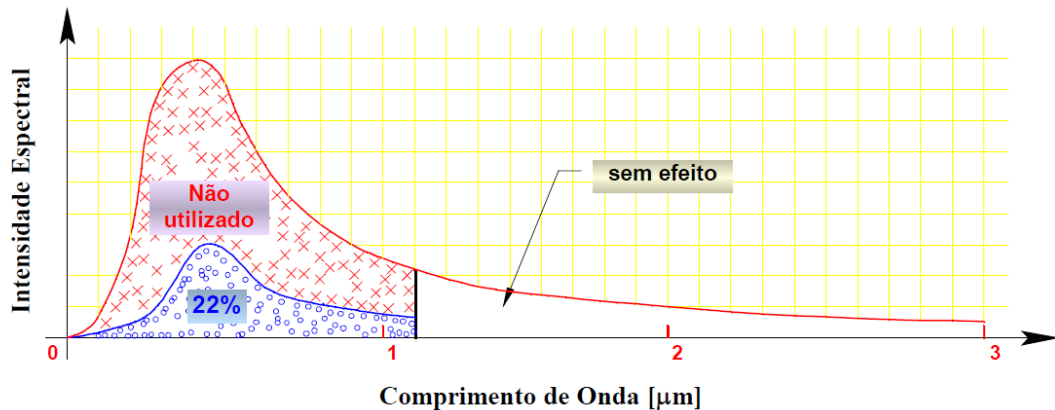


Fonte: Cresesb (2006)

Há alguns fatores que limitam o processo de conversão de energia solar em energia elétrica:

- **Espectro de radiação solar:** somente uma parcela do espectro do comprimento de onda, é capaz de excitar os elétrons da célula fotovoltaica. A Figura 18 mostra que somente ondas de 1 μm transformam energia solar em energia elétrica.
- **Um fóton consegue excitar um elétron:** o balanço de energia mostra que há um excesso de energia para efetuar a dopagem dos fótons para o intervalo da junção, essa sobra é convertida em calor. Existe também a possibilidade de que elétrons excitados não participem efetivamente da corrente gerada.

Figura 18 – Aproveitamento da radiação solar por células fotovoltaicas

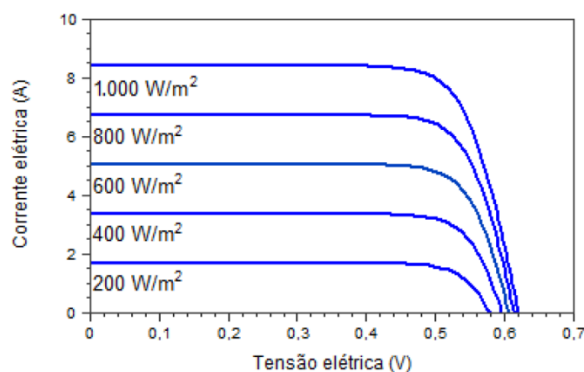


Fonte: Reis (2002)

Há alguns fatores que afetam as características elétricas dos módulos fotovoltaicos, os principais são: intensidade luminosa e temperatura das células. As curvas características ideais para os módulos fotovoltaicos são radiação solar 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C na célula:

- **Intensidade luminosa:** A corrente gerada está diretamente ligada à intensidade luminosa, como mostra a Figura 19, é fundamental determinar a melhor inclinação para cada região de acordo com a latitude local.

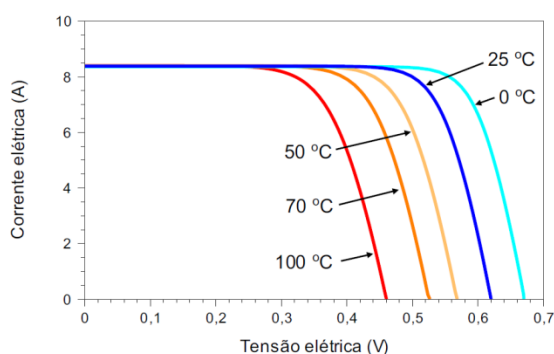
Figura 19 – Influência da variação da variação da irradiância solar na curva característica I - V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino na temperatura de 25°C



Fonte: Pinho; Galdino (2014)

- **Influência da temperatura:** O aumento da temperatura na célula diminui a eficiência do módulo, diminuindo os pontos de operação de potência máxima gerada. Isto se deve ao fato da diminuição significativa da tensão, como mostra a Figura 20 e um aumento quase desprezível da corrente.

Figura 20 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V, para irradiância de 1000 W/m^2



Fonte: Pinho; Galdino (2014)

2.2.5 Eficiência das Células Fotovoltaicas

A Tabela 8 apresenta o resumo da eficiência de diferentes células fotovoltaicas construídas com os principais materiais e tecnologia. A eficiência alcançada em laboratório pode ser até 40% maior do que os módulos comerciais, isto porque ao aumentar o tamanho das células e agrupá-las para formar os módulos, aumentam também as perdas. Outro motivo para que a eficiência dos módulos comercializados seja diferente dos testados em laboratório está relacionado a fabricação, que utiliza materiais e processos mais baratos, o que compromete a eficiência final do módulo (MIT, 2015).

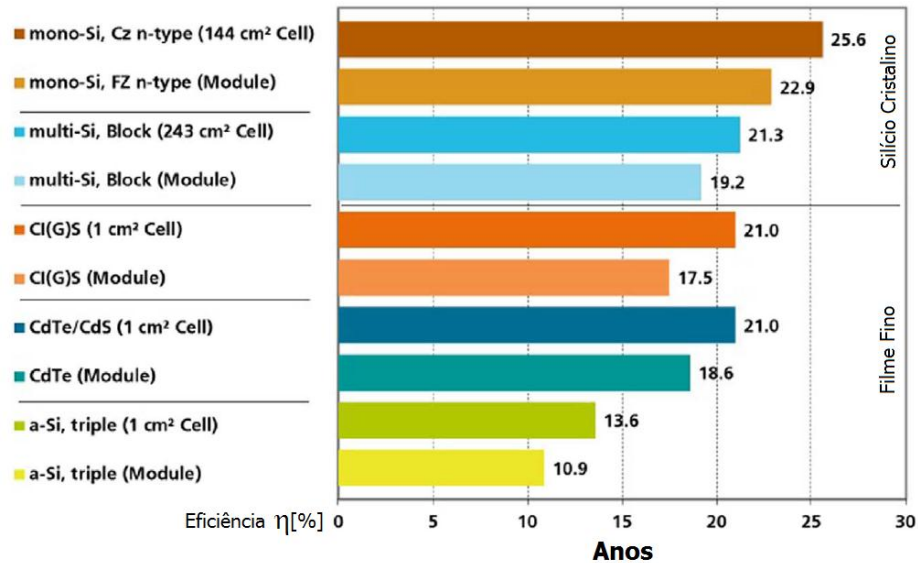
Tabela 8 – Eficiência das células fotovoltaicas por tecnologia

Tecnologia	Eficiência típica de módulos comerciais	Eficiência dos melhores módulos (em laboratório)
Silício cristalino		
Monocristalino	17 a 21,50%	22,90%
Policristalino	14 a 17%	18,50%
Filmes finos		
Silício amorfo (a-Si)	4 a 8%	10,90%
Telureto de Cádmio (CdTe)	10 a 16,30%	18,20%
Disseleneto de cobre-índio-gálio (CIGS)	12 a 14,70%	17,50%
Concentrador fotovoltaico (CPV)	27 a 33%	38,90%

Fonte: Tolmasquim (2016)

A Figura 29 ilustra a comparação de rendimento em laboratório de diferentes tecnologias utilizadas na fabricação de uma única célula fotovoltaica e quando a mesma está agrupada e formando um módulo, como exemplo, o silício monocristalino que tem 25,60% de eficiência quando o mesmo está só em uma única célula e 22,90% quando agrupado.

Figura 21 – Rendimento dos materiais utilizados na confecção de células



Fonte: Sampaio; González (2017)

2.2.6 Associações de Módulos Fotovoltaicos

- **Associação em Série**

Para associação em série, o terminal positivo de um dispositivo fotovoltaico é conectado ao negativo de outro, como associação em série de fontes de tensão.

A tensão é igual à somatória dos valores individuais de cada unidade associada, como representado na Equação (1) (PINHO; GALDINO, 2014).

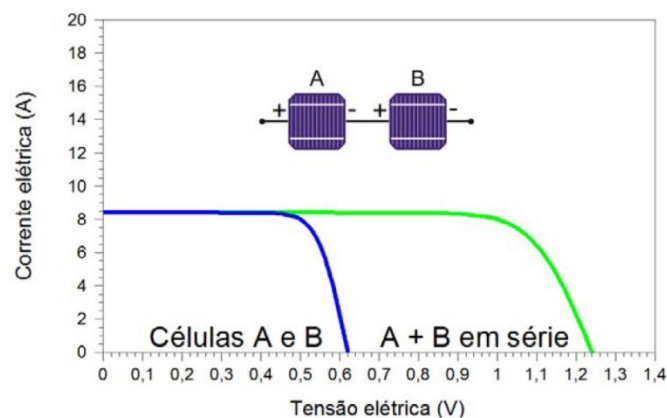
$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (1)$$

A corrente elétrica não é afetada na associação em série, sendo a relação dada pela Equação (2) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad (2)$$

O gráfico da Figura 22 representa as características da corrente x tensão para as unidades fotovoltaicas associadas em série. Pressupõe que o desempenho de todos os módulos sob a mesma condição de radiação solar e temperatura seja equivalente.

Figura 22 – Curva I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectada em série



Fonte: Galdino (2012)

- **Associação em Paralelo**

Para associação em paralelo, os terminais são interligados entre si, positivo com positivo e negativo com negativo, como associação de fontes de corrente em paralelo. A corrente é igual à somatória dos valores individuais de cada unidade associada, como representado na Equação (3) (PINHO; GALDINO, 2014).

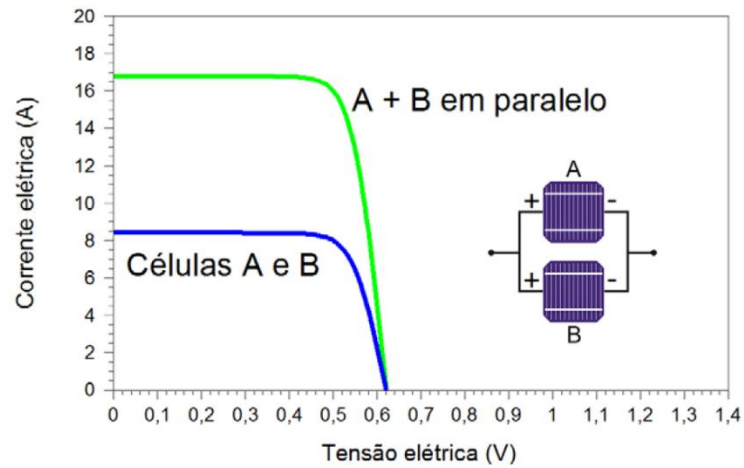
$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (3)$$

A tensão elétrica não é afetada na associação em paralelo, sendo a relação dada pela Equação (4) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \quad (4)$$

O gráfico da Figura 23 representa as características da corrente x tensão para as unidades fotovoltaicas associadas em paralelo. Pressupõe que o desempenho de todos os módulos sob a mesma condição de radiação solar e temperatura seja equivalente.

Figura 23 – Curva I-V de duas células fotovoltaicas de silício cristalino conectada em paralelo

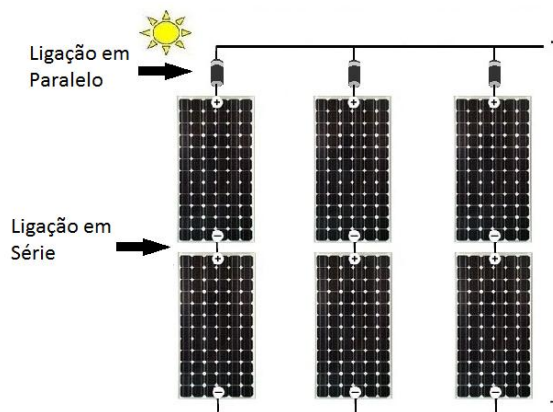


Fonte: Pinho; Galdino (2014)

- **Associação em Série – Paralelo**

Para o dimensionamento de uma usina fotovoltaica geralmente é necessário a associação dos módulos solares em série e paralelo, para que se aumente a tensão e a corrente até que se atinja a necessidade do sistema, como é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Associação em série – paralelo



Fonte: Adaptado Leiaut (2016)

2.3 O BIOGÁS

Define-se como biogás uma mistura no estado gasoso, composto tipicamente por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de outros compostos como o sulfureto de hidrogênio, monóxido de carbono, gás amoníaco, gás sulfídrico, oxigênio e nitrogênio em estado vestigial (ABDESHAHIAN *et al.*, 2016; BELAISSAOUI *et al.*, 2016; COTANA *et al.*, 2015; REDDY; ARAVINDHAN; MALLICK, 2016).

Devido às características corrosivas dos componentes do biogás, como o sulfureto de hidrogênio, faz-se necessário o uso de materiais resistentes à sua ação, como plástico e aço inoxidável para o armazenamento e transporte do gás. A digestão anaeróbica é responsável pelo processo de formação do biogás; a obtenção é realizada por biodigestores, que são equipamentos utilizados para o processamento da matéria orgânica por meio do isolamento do ar atmosférico (DE CASTRO VILLELA; SILVEIRA, 2007).

A Figura 25 ilustra o processo de digestão anaeróbica e as suas quatro etapas, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Segundo Kumar (2013), as etapas são descritas da seguinte maneira:

- Hidrólise: é a primeira etapa para o processo de biodigestão anaeróbica. As ligações moleculares complexas (polímeros) como lipídios, carboidratos, proteínas e gorduras, são quebradas por enzimas extracelulares em um processo bioquímico liberadas por um grupo específico de bactérias e dão origem aos compostos orgânicos simples (monômeros) como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares. Esse processo é de fundamental importância para a produção de biogás porque somente com a quebra dos polímeros maiores é que começa o processo de biodigestão, contudo esse processo ocorre na ausência ou não de oxigênio.

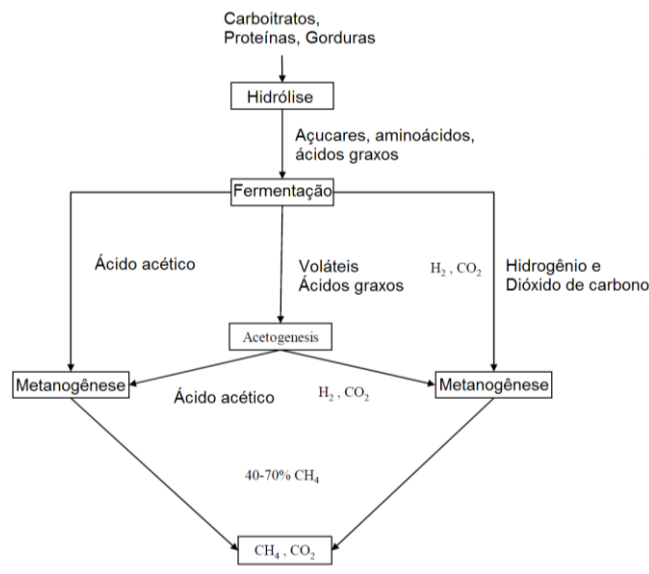
- Acidogênese: as substâncias resultantes da hidrólise são transformadas por bactérias fermentativas na fermentação anaeróbica ou oxidante, resultando em ácidos graxos voláteis e álcoois. A formação de produtos nesta fase também depende da quantidade de hidrogênio dissolvido na mistura. Quando a concentração de hidrogênio é muito alta, interfere negativamente na eficiência da acidogênese o que causa o acúmulo de ácidos orgânicos. Com isso, o pH da mistura baixa e o processo pode ser quase que totalmente afetado.

- Acetogênese: é uma etapa necessária, pois os produtos do processo de acidogênese não podem ser utilizados diretamente no processo de metanogênese. Logo, os ácidos graxos e álcoois são oxidados e transformados em acetato, bio-hidrogênio e dióxido de carbono. Esse é uma das fases mais delicadas do processo, pois é necessário manter o

equilíbrio para que a quantidade de hidrogênio gerado seja consumida pelas bactérias Arqueas responsáveis pela metanogênese.

- Metanogênese: o acetato, bio-hidrogênio e dióxido de carbono são transformados em metano e dióxido de carbono por microrganismo do tipo Arqueas.

Figura 25 – Processo de digestão anaeróbica



Fonte: Manyi-Loh *et al.* (2013)

A Tabela 9 apresenta a composição do biogás depois do processo de digestão anaeróbica.

Tabela 9 – Composição do biogás

Composição	%
Metano (CH ₄)	50-70
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 – 50
Nitrogênio (N ₂)	0 – 7
Gás Sulfídrico (H ₂ S)	0 – 3
Oxigênio (O ₂)	0 – 2
Hidrogênio (H ₂)	0 – 1
Amoníaco (NH ₃)	0 – 1
Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0,2
Gases em menor concentração	0,01 – 0,6

Fonte: Cetesb (2018)

Segundo Lima *et al.* (2017) nas camadas inferiores de aterros e lixões abertos, a concentração de oxigênio é baixa e os componentes orgânicos biodegradáveis são decompostos por processo biológico anaeróbico, gerando gás contendo de 50-60% de metano. A CETESB (2018) afirma que os aterros sanitários brasileiros possuem composições com valores entre 25-50% de CO₂ e 50-70% de CH₄. Para este trabalho foi considerada a composição do biogás de 60% de CH₄ e 40% de CO₂.

O gás produzido pela digestão anaeróbica é renovável, abundante e pode ser obtido de diversas fontes, como resíduos sólidos urbanos, excremento de animais, atividades agrícolas, etc., desde que sejam criadas em condições ideais de temperatura, pH, concentração de oxigênio e outras substâncias. O gás metano, o principal composto do biogás, pode chegar até 70% da totalidade do gás produzido, é incolor, apresenta elevado poder calorífico (5000 – 7000 kcal/m³), altamente combustível, não produz fuligem e o impacto no efeito estufa é 21 vezes maior que o dióxido de carbono, porque o metano é mais eficiente na captura de radiação do que o CO₂ (EPE, 2008). A produção de metano depende da quantidade e tipo da biomassa, do clima e do tamanho do biodigestor.

A produção do biogás conseqüentemente ao aproveitamento do metano (CH₄) é de grande importância para o efeito dos gases de estufa, pois tem a capacidade de reter a radiação solar 21 vezes mais que o dióxido de carbono. A Tabela 10 mostra a comparação do potencial de aquecimento global entre os dois gases.

Tabela 10 – Comparação do potencial de aquecimento global

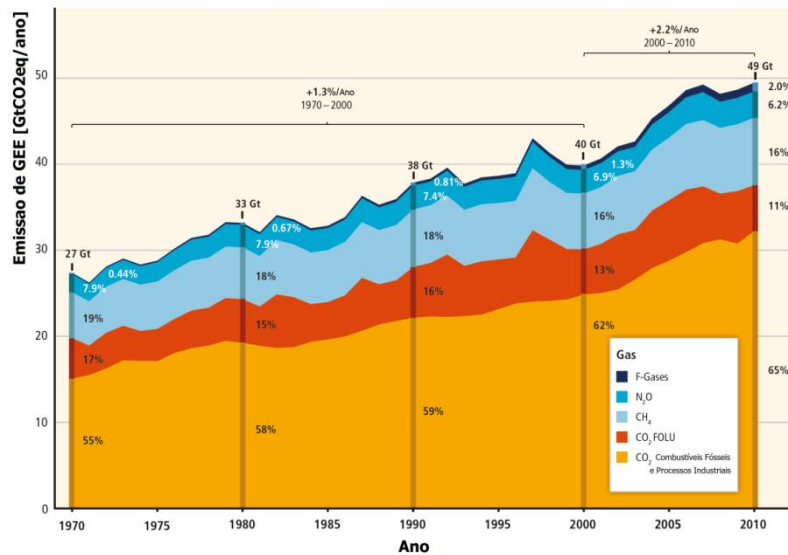
Gases de Efeito de Estufa	Potencial de Aquecimento Global	Principais Causas
CO ₂ (dióxido de carbono)	1 . CO _{2eq} (referência)	Uso intensivo de combustíveis fósseis, aumento da ocorrência de queimadas e incêndios florestais que provocam o aumento das emissões de CO ₂ para a atmosfera; redução das áreas florestadas, que absorvem e estocam o carbono atmosférico.
CH ₄ (metano)	21 . CO _{2eq}	Degradação anaeróbica de material orgânico em aterros, estações de tratamento de efluentes, lagoas anaeróbicas com dejetos animais, além do processo digestivo de animais ruminantes (ex.: gado bovino).

Fonte: Iclei (2009)

Sendo o metano um gás gerador de efeito estufa e conhecendo seu poder de queima para produção de energia, aliado à grande quantidade, surge uma oportunidade lucrativa e ambientalmente viável para o homem com o aproveitamento energético do metano. A Figura 26 mostra a evolução do dióxido de carbono e do metano na atmosfera.

As emissões antrópicas totais do GEE aumentaram rapidamente de 2000 a 2010 atingindo 49 ($\pm 4,5$) GtCO_{2eq} / ano (IPCC, 2015). Os níveis atuais alcançaram o máximo da tendência projetada para a última década. O crescimento das emissões de GEE ocorreu apesar de um grande número de instituições multilaterais, bem como políticas nacionais voltadas para mitigação. De 2000 a 2010, as emissões de GEE cresceram em média 1,00 GtCO_{2eq} (2,20%) por ano em comparação com 0,40 GtCO_{2eq} (1,30%) em todo o período de 1970 a 2000. A crise econômica global 2007/2008 reduziu temporariamente as emissões de GEE, mas as curvas mostram que não continuou com essa tendência (IPCC, 2015). Devido a emissão de 49 GtCO_{2eq}, gera a necessidade da utilização do gás metano para outros fins que não seja aumentar o número de emissões e contribuir para o aumento do gás de efeito estufa.

Figura 26 – Histórico da concentração de dióxido de carbono e de metano na atmosfera



Fonte: IPCC (2015)

2.3.1 Biodigestores

Biodigestores são equipamentos que tem por finalidade a produção do biogás, são constituído de uma câmara fechada onde é depositado o material orgânico liquefeito, e de um

gasômetro onde é acumulado o biogás produzido por microrganismos anaeróbicos que degradam o material formando uma mistura de gases e uma lama residual (HAVE, 2007)

Os biodigestores mais utilizados são:

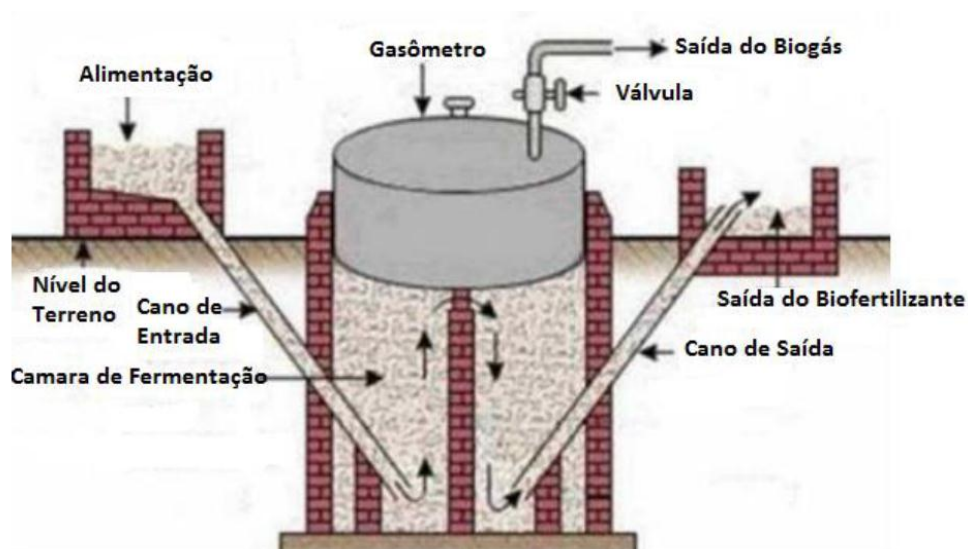
- **Descontínuos (bateladas):** é um processo mais simples, onde fermentação da matéria orgânica é realizada de uma única vez, podendo ser realizada em um ou mais tanques dependendo da demanda de biogás.
- **Contínuo:** requerem carregamentos periódicos, com controle diário de operação, a fermentação é realizada em intervalos de tempos curtos e regulares.

No Brasil o mais utilizado é do tipo contínuo dos modelos indiano e chinês.

O biodigestor indiano da Figura 27 possui um sistema mais sofisticado, com uma cúpula móvel que se eleva em torno de uma guia de metal à medida que se produz biogás. Esta cúpula funciona como um verdadeiro gasômetro, utilizando de seu peso para comprimir o gás estocado e a partir de onde pode ser distribuído. A adição de pesos especiais nesta cúpula aumenta a pressão, resultando em uma maior velocidade de saída do biogás (BARREIRA, 2011; COLOMBAROLI, 2015).

O modelo indiano apresenta um bom isolamento em suas paredes com sua cúpula metálica, não permitindo perdas de gás, enquanto o modelo chinês apresenta dificuldade em manter-se estanque e, por isso, deve ser protegido com materiais impermeáveis e não porosos (COLOMBAROLI, 2015).

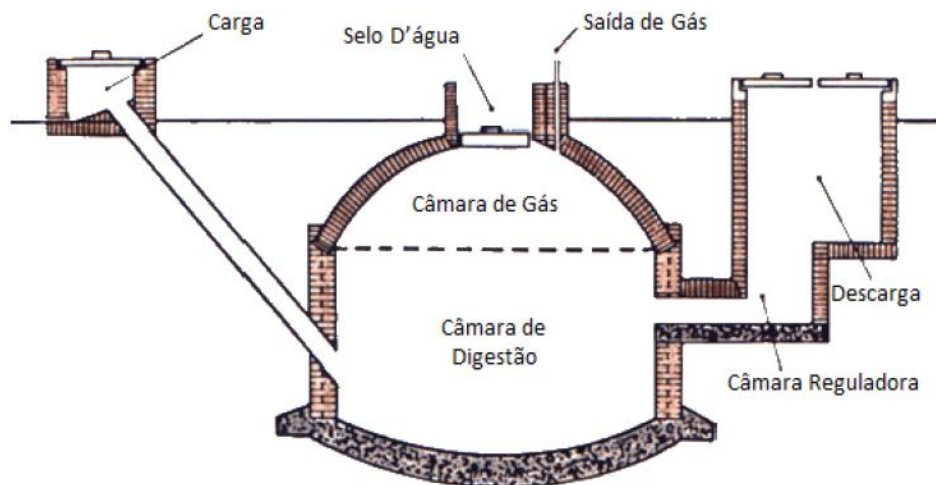
Figura 27 – Biodigestor modelo indiano



Fonte: Colombaroli (2015)

A Figura 28 apresenta o modelo chinês que é um sistema mais rústico, simples, barato e completamente construído em alvenaria, ficando quase que totalmente enterrado no solo: apresenta cúpula fixa (parede externa que delimita a câmara de gás) e possui uma espécie de válvula semelhante a uma tampa que, por sua vez, é pressionada por um depósito de água, formando um selo d'água. Esta configuração exige que se esgote o gás com mais frequência evitando, assim, o desperdício (BARREIRA, 2011; COLOMBAROLI, 2015).

Figura 28 – Biodigestor modelo chinês



Fonte: Colombaroli (2015)

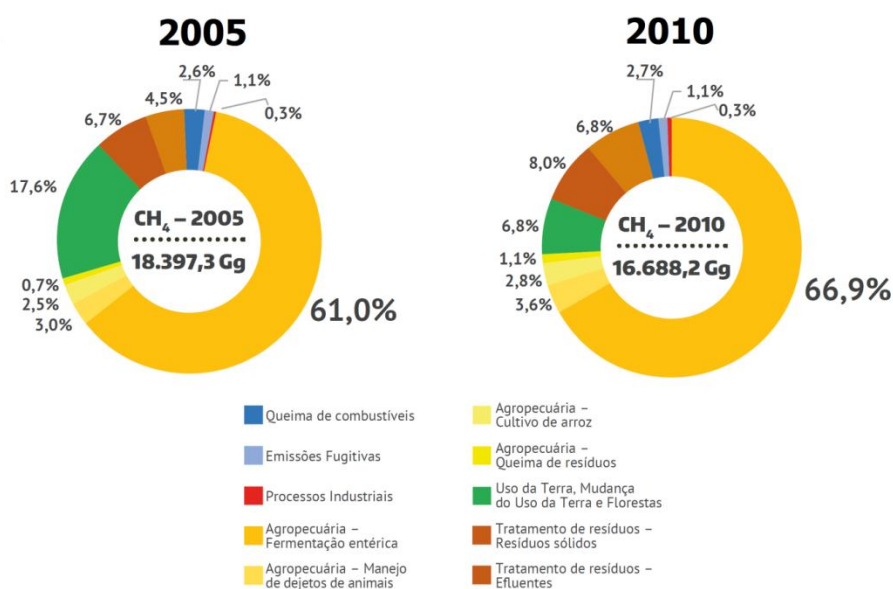
2.3.2 O Aterro Sanitário

O acúmulo de resíduos sólidos aumentou a conscientização pública devido aos problemas causados pela quantidade de descartes no meio ambiente. No entanto, os enormes volumes que são produzidos globalmente ao lado da diversidade que esses resíduos apresentam tornaram-no candidatos ideais para serem utilizados de forma inteligente para aplicações de alto valor agregado (MATSAKAS *et al.*, 2017). Uma das alternativas de tratamento dos resíduos sólidos são os aterros sanitários, que, por sua vez, têm como subproduto a emissão de gases provenientes da decomposição do material orgânico. Os principais constituintes desses gases são o dióxido de carbono (CO_2) e o gás metano (CH_4), sendo este último passível de coleta e utilização para a geração de energia (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

De acordo com a Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (BRASIL, 2016) a geração de metano em depósitos

de resíduos sólidos urbanos no Brasil em 1990 foi de 824,4 Gg, já em 2010 este número subiu para de 1.327 Gg, em 10 anos o RSU teve um aumento notório de 61%, sua densidade é de 0,72 kg/m³, o que representa em 2010, 1.151,39 milhões de m³ por ano. Como o metano, em geral, representa 55% do volume do biogás, chega-se a 2.093,43 milhões de m³ anuais deste gás, com recuperação de 90%, estaria disponível um volume de 1884,09 Mm³, resultando em 2,50 TWh para geração de energia elétrica. Segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2013), os aterros são responsáveis por cerca de 8% do total de metano liberado por fontes com origem em atividades humanas como mostra a Figura 29.

Figura 29 – Participação nas emissões de CH₄



Fonte: Brasil (2016)

A escassez das reservas de combustíveis fósseis, a severa poluição ambiental resultante das emissões dos gases do efeito estufa, juntamente com a sua natureza não renovável, levaram à busca, em todo o mundo, de combustíveis renováveis e alternativos aos motores de combustão interna (ELFASAKHANY, 2016). Os combustíveis fósseis são a forma dominante de energia utilizada no mundo (86%) e representam cerca de 75% das emissões antropogênicas de CO₂ (HOUGHTON *et al.*, 2001).

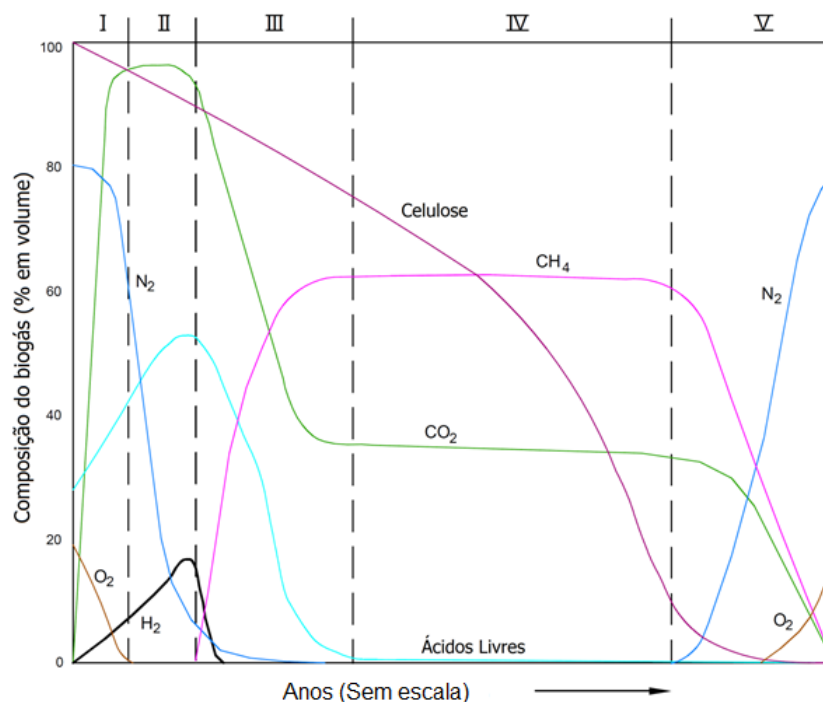
O aumento do dióxido de carbono (CO₂) por atividades antropogênicas, como a mudança no padrão de uso da terra, o desmatamento, a industrialização, o transporte e o estilo de vida moderno levam à mudança climática global, que é um dos desafios ambientais críticos que o mundo enfrenta hoje (KUMAR, MANISH *et al.*, 2018). A concentração atmosférica de

CO₂ é atualmente é de 406,75 ppm (CO₂ EARTH, 2018). O mundo hoje está enfrentando uma emissão crescente de dióxido de carbono (CO₂) que conduz a mudanças climáticas, bem como a deterioração ambiental. A concentração de CO₂, o principal gás do efeito estufa, aumentou aproximadamente 43% desde a revolução industrial e deverá aumentar mais 60% até 2100 se a tendência atual se manter (KUMAR; GUPTA; THAKUR, 2015).

A estratégia de atenuação das emissões de CO₂ pode ser alcançada por três maneiras principais: primeiro, melhorando a eficiência energética da tecnologia de motores existentes e a utilização adequada de combustíveis fósseis, em segundo lugar pelo sequestro de CO₂ e, finalmente, facilitando o uso de combustíveis não convencionais (KUMAR, MANISH *et al.*, 2018).

As fases de formação e a taxa de geração dos principais elementos do biogás de aterro variam ao longo dos anos e possuem várias fases distintas, como pode ser observado na Figura 30, porém a duração de cada uma dessas fases depende de uma série de fatores, incluindo o tipo de resíduos, teor de umidade, conteúdo de nutrientes e bactérias e o nível de pH. A extrema heterogeneidade dos resíduos em um aterro típico, juntamente com o meio ambiente em um aterro específico, tem uma influência significativa sobre cada fase da produção do biogás (WORLD BANK, 2004)

Figura 30 – Fases de formação do biogás de aterro



Fonte: World Bank (2004)

A Tabela 11 descreve as fases e o tempo típico para formar cada fase da geração do biogás.

Tabela 11 – Tempo típico de cada fase da biomassa de aterro sanitário

Fases	Estado	Tempo Típico
I	Aeróbico	de 1 hora a 1 semana
II	Anóxico	de 1 a 6 meses
III	Anaeróbico, metanogênico, instável	de 3 meses a 3 anos
IV	Anaeróbico, metanogênico, estável	de 8 a 40 anos
V	Anaeróbico, metanogênico, declinante	de 1 a mais de 40 anos
Total		de 10 a mais de 80 anos

Fonte: World Bank (2004)

A primeira fase acontece a decomposição aeróbia, ocorre imediatamente após a colocação do resíduo, enquanto o oxigênio ainda está presente nos dejetos, os componentes orgânicos sofrem reações bioquímicas por meio de uma fermentação aeróbica por uma combinação de bactérias, fungos, leveduras e algas, nesta etapa há a produção de dióxido de carbono, água e calor.

A segunda etapa é a anóxica, não metanogênica, onde são formados compostos ácidos e hidrogênio, e a produção continua de dióxido de carbono.

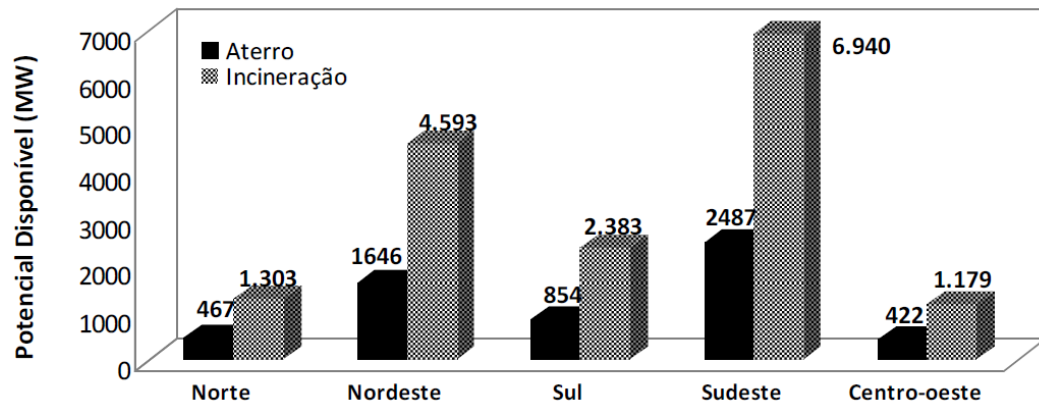
A terceira fase é a metanogênica, onde a produção de dióxido de carbono começa a diminuir porque a decomposição de resíduos se move de aeróbica para a anaeróbia, ou seja há a ausência de oxigênio. Na decomposição anaeróbica há a produção de calor e água, mas, ao contrário da decomposição aeróbia, existe a presença do metano, neste momento os resíduos ficam confinados sob uma camada de solo para evitar que odores e sólidos sejam transportados pelo vento.

A quarta fase, ocorre a geração do metano, com proporção de 40 a 70% do volume total do biogás formado.

A quinta fase ocorre a diminuição do nível de emissão, porém o biogás pode ser produzido em um aterro sanitário por até 100 anos a partir da data de colocação dos resíduos.

A Figura 31 mostra o potencial de energia disponível no Brasil a partir de resíduos sólidos, sendo as regiões Nordeste e Sudeste as maiores regiões de disponibilidade de geração de energia elétrica por meio do resíduo sólido urbano.

Figura 31 – Potencial de energia disponível no Brasil a partir de RSU



Fonte: Pavan (2010)

3 METODOLOGIA

3.1 DIMENSIONAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA

3.1.1 Dimensionamento da Quantidade de Painéis Solares

O consumo médio diário do carro é calculado por meio da Equação (5) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$CMD = \frac{P_T}{U} \cdot \frac{\text{horas de sol}}{\text{dia}} \cdot \frac{\text{dias de utilização}}{\text{semana}} \quad (5)$$

no qual “CMD” é o consumo médio diário [Ah], “P_T” é a potência total do sistema [W] e “U” é a tensão do sistema [V].

Serão adotados módulos fotovoltaicos com potência de 260 W, tensão de 30,57 VDC e corrente de 8,54 A, devido ser um dos modelos com maior disponibilidade no mercado. A capacidade de carga de cada módulo fotovoltaico é calculada por meio da Equação (6) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$CC = h_i \cdot I_{m\acute{a}x} \quad (6)$$

no qual “CC” é a capacidade de carga de cada módulo fotovoltaico [Ah], “h_i” é horas de pico de irradiação solar [horas] e “I_{máx}” é corrente de potência máxima [A].

A quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em paralelo é calculada por meio da Equação (7) (PINHO; GALDINO, 2014), o coeficiente 1,20 considera que um módulo fotovoltaico tem que carregar a bateria até uma tensão 20% acima da nominal devido à perda pelo efeito Joule.

$$QMP = \frac{(CMD \cdot 1,20)}{CC} \quad (7)$$

sendo que “QMP” é a quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em paralelo.

A quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em série é calculada por meio da Equação (8) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$QMS = \frac{U}{U_{mf}} \quad (8)$$

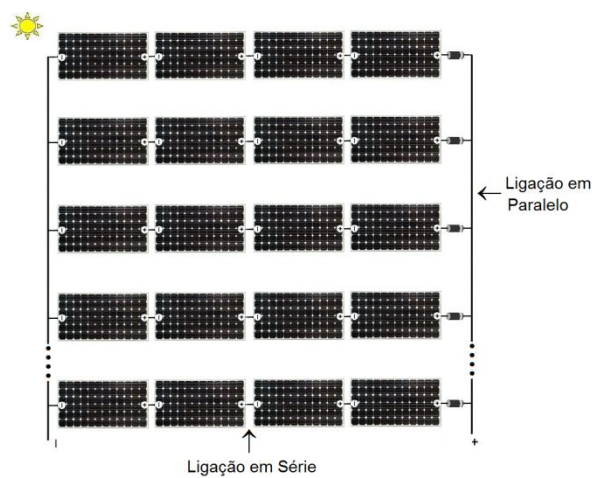
no qual “QMS” é a quantidade de módulos fotovoltaicos ligados em série e “ U_{mf} ” é a tensão VDC de cada módulo fotovoltaico [V].

A quantidade total de módulos fotovoltaicos para a usina é calculada pela Equação (9) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$QMT = QMP \cdot QMS \quad (9)$$

sendo que “QMT” é quantidade de módulos fotovoltaicos totais utilizados na usina para geração de energia elétrica. A Figura 32 mostra a configuração dos painéis solares ligados em série e em paralelo, como será montado no projeto.

Figura 32 – Ligação dos Painéis Solares: Série / Paralelo



Fonte: Adaptado Leiaut (2016)

A corrente de curto circuito do módulo solar é calculada pela Equação (10) (PINHO; GALDINO, 2014), com uma margem de segurança de 10% em relação a corrente máxima de cada módulo (PINHO; GALDINO, 2014).

$$I_{SC} = I_{m\acute{a}x} \cdot 1,10 \quad (10)$$

no qual “ I_{sc} ” é a corrente de curto circuito do módulo solar [A].

A corrente máxima do controlador é calculada pela Equação (11) (PINHO; GALDINO, 2014), é considerada a corrente de curto circuito do painel fotovoltaico acrescida de um fator mínimo de segurança de 25%, assumindo que o painel pode receber uma irradiância de até 1.250 W/m^2 (ainda que por curtos períodos) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$I_C = I_{SC} \cdot QMP \cdot 1,25 \quad (11)$$

sendo que “ I_c ” é a corrente máxima do controlador [A].

3.1.2 Dimensionamento das Baterias

Quando o sistema fotovoltaico não estiver conectado à rede será necessário o dimensionamento do banco de baterias, fazendo com que o sistema esteja disponível para carregamento em qualquer hora do dia, armazenando a energia necessária ao veículo elétrico durante as horas com sol, utilizando os módulos fotovoltaicos.

A descarga de uma bateria é o processo de retirada de corrente elétrica de uma bateria, mediante o acoplamento de uma carga, por meio da conversão da energia química, disponibilizada como potencial eletroquímico, em energia elétrica, no interior da célula. A sequência carga-descarga de uma bateria, até uma determinada profundidade de descarga é chamada de ciclo. Quando a descarga ultrapassa 50% da capacidade da bateria, ela é chamada de descarga profunda (PINHO; GALDINO, 2014).

Os fatores mais importantes que afetam o desempenho, a capacidade e a vida útil de qualquer bateria recarregável são: profundidade de descarga (por ciclo), temperatura, número

de ciclos, controle da carga/descarga e manutenção periódica, estes itens exigem um fator multiplicativo para o cálculo da capacidade de carga da bateria, mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Fator de descarga da bateria

Aplicação	Bateria	Fator de Descarga
Não Crítica	Automotiva	10
Não Crítica	<i>Deep Cycle</i>	6,25
Crítica	<i>Deep Cycle</i>	12,50

Fonte: Bueno; Souza (2004)

A grande diferença entre baterias *deep cycle* e as automotivas é que a primeira tem a capacidade de descarregar completamente centenas de vezes e a segunda é projetada para fornecer milhares de vezes uma quantidade rápida de energia durante a sua vida útil, enquanto que é capaz de descarregar completamente menos de 50 vezes.

A aplicação está relacionada à importância da bateria em manter a integridade do sistema e a continuidade das operações.

Para este projeto será considerando baterias *deep cycle* em uma situação não crítica, com capacidade de carga de 220 Ah e 12 VDC de tensão.

A capacidade de carga total da bateria é calculada utilizando a Equação (12) (PINHO; GALDINO, 2014; AVILÉS; SOUZA, 2011), considera que as baterias têm que ser carregadas até uma tensão 20% acima da nominal.

$$CTB = CMD. 1,20.6,25 \quad (12)$$

no qual “CTB” é capacidade de carga total da bateria [Ah].

A quantidade de baterias ligadas em paralelo é obtida por meio da Equação (13) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$QBP = \frac{CTB}{CB} \quad (13)$$

sendo que “QBP” é a quantidade de baterias ligadas em paralelo e “CB” é a capacidade de carga de cada bateria [Ah].

A quantidade de baterias ligadas em série é encontrada por meio da Equação (14) (PINHO; GALDINO, 2014).

$$QBS = \frac{U}{U_{bat}} \quad (14)$$

no qual “QBS” é quantidade de baterias ligadas em série e “ U_{bat} ” é a tensão VDC de cada bateria [V].

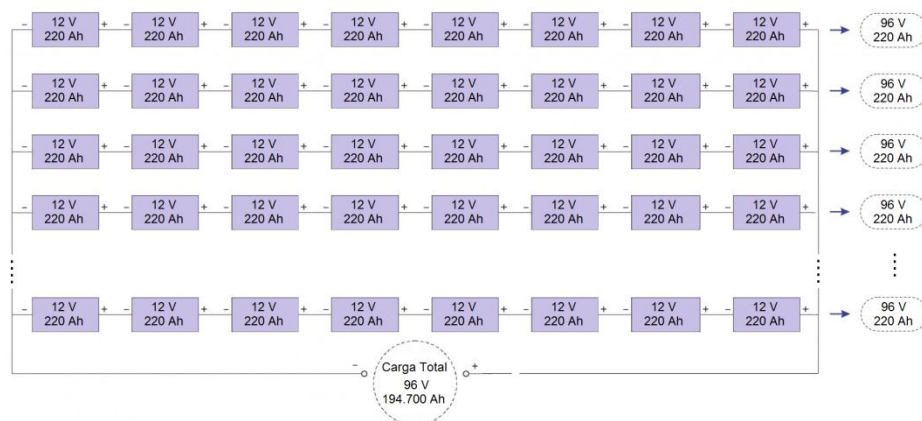
A quantidade total de baterias para a usina fotovoltaica é calculada pela Equação (15) (AVILÉS; SOUZA, 2011).

$$QTB = QBP \cdot QBS \quad (15)$$

sendo que “QTB” é a quantidade de baterias total utilizada na usina fotovoltaica.

A Figura 33 mostra a configuração das baterias ligadas em série e em paralelo, como será usado no projeto.

Figura 33 – Ligação das Baterias: Série / Paralelo



Fonte: Elaboração própria

3.1.3 Dimensionamento do Controlador de Cargas

Utilizando um controlador de carga com corrente máxima de 80 A, a potência contínua do controlador é obtida pela Equação (16) (AVILÉS; SOUZA, 2011).

$$PCC = I_{mc} \cdot U \quad (16)$$

no qual “PCC” é a potência contínua do controlador [W] e “ I_{mc} ” é a corrente máxima do controlador selecionado [A].

O controlador de carga para sistema fotovoltaico deve tolerar surtos de corrente que ocorrem, por exemplo, na partida de motores elétricos, os quais podem exigir valores acima de dez vezes à corrente nominal do motor em curtos períodos de tempo, antes de entrar em regime normal de trabalho, assim para este projeto a estimativa para a potência de surto do controlador é calculada pela Equação (17) (AVILÉS; SOUZA, 2011).

$$PSC = P_{CC} \cdot 2 \quad (17)$$

sendo que “PSC” é a potência de surto do controlador [W]

A quantidade total de controladores em paralelo para a usina fotovoltaica é calculada pela Equação (18) (AVILÉS; SOUZA, 2011).

$$QTC = \frac{I_{mc}}{I_{sc}} \quad (18)$$

no qual “QTC” é a quantidade total de controladores ligado em paralelo [peças].

3.1.4 Dimensionamento do Inversor

A potência total AC é calculada pela Equação (19) (AVILÉS; SOUZA, 2011).

$$P_{T_{AC}} = P_T \cdot D_{SS} \quad (19)$$

sendo que “ $P_{T_{AC}}$ ” é potência total AC do sistema [W], “ P_T ” é a potência total do sistema [W] e “ D_{SS} ” são os números de dias sem sol.

O inversor para sistema fotovoltaico deve tolerar surtos de corrente que ocorrem, por exemplo, na partida de motores elétricos, os quais podem exigir valores mais de 10 vezes superiores à corrente nominal do motor em curtos períodos de tempo, antes de entrar em regime normal de trabalho, assim para este projeto a estimativa da potência de surto do inversor é calculada pela Equação (20) (AVILÉS; SOUZA, 2011).

$$P_{SI} = P_{T_{AC}} \cdot 2 \quad (20)$$

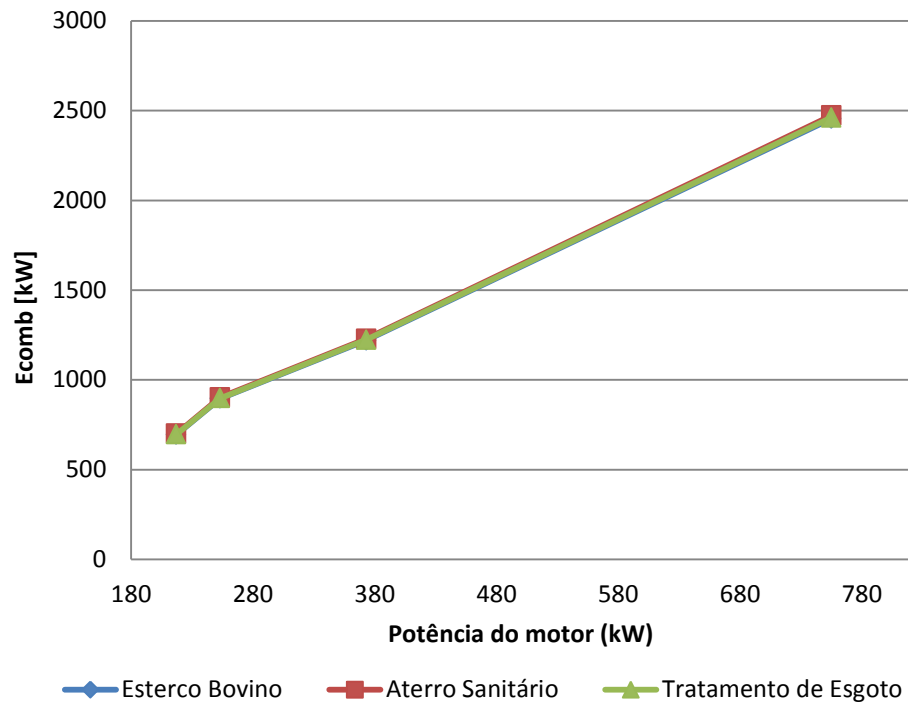
no qual “ P_{SI} ” é a potência de surto do inversor [W].

3.2 DIMENSIONAMENTO DA USINA A BIOGÁS

O poder calorífico é um bom parâmetro para se avaliar a potencial energético de combustíveis de biomassa, ele é a quantidade de calor total (energia térmica) que é liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível (kcal/kg ou kJ/kg; kcal/m³ ou kJ/m³) (BRAND *et al.*, 2014).

Para esse estudo foram analisados três diferentes biomassas: aterro sanitário com PCI de 13.082 kJ/kg (CAMPANI; SCHNEIDER; XAVIER, 2009), estação de tratamento de esgoto (ETE) com PCI de 15.150 kJ/kg (BILOTTA; ROSS, 2016) e esterco bovino com PCI de 16.238 kJ/kg (SANTOS, 2012), porém não houve diferença significativa da vazão mássica e com isso a potência energética fornecida pelo combustível (E_{comb}) é muito próxima para as três biomassas (Figura 34). Dessa forma, foi escolhido para este trabalho o combustível proveniente da biomassa de aterro sanitário.

Figura 34 – Potência energética fornecida por três diferentes biomassas



Fonte: Elaboração própria

3.3 ANÁLISE ECONÔMICA

A viabilidade econômica busca traduzir o fato de que os custos e esforços gastos em sua implantação e funcionamento são compensados, vantajosamente, pelas receitas e benefícios auferidos, no decorrer de um prazo conveniente. Para o caso do sistema híbrido utilizando como fonte de geração elétrica o sol e o biogás com a finalidade de alimentar veículos elétricos, espera-se que o custo da energia seja menor do que utilizando a energia elétrica convencional, fornecida pelas companhias de energia (REIS, 2002).

Neste trabalho será adotada a metodologia da viabilidade econômica utilizada por Silveira (1994), Brizi et al., (2014) e Reis, (2002) e adaptada para este estudo. Abrangerá o cálculo dos custos de produção do sistema, baseando-se no custo do combustível para o sistema de biogás e no custo do investimento para o fotovoltaico. Será considerado também o custo de manutenção e operação dos sistemas.

Serão analisados os valores da receita anual referente à implantação dos sistemas fotovoltaico e biogás em substituição a energia fornecida pelas companhias de distribuição de energia elétrica.

3.3.1 Análise Econômica para o Sistema de Geração Fotovoltaico

Os investimentos necessários para viabilizar uma usina fotovoltaica estão relacionados com as aquisições dos materiais, sendo os principais componentes os módulos fotovoltaicos, inversor de frequência, controlador de carga e a bateria, sendo a última opcional podendo usar diretamente as baterias do veículo elétrico. Somado aos materiais existe o custo com a instalação, operação e manutenção da usina operando com o sistema fotovoltaico.

Para o sistema de geração fotovoltaico estudado neste trabalho, projetou-se três usinas uma para a Região Norte, outra para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e por último para a Região Nordeste, isto porque cada região tem uma quantidade diferente de irradiação solar. A Tabela 13 mostra a média dos custos para a geração de energia da usina.

Tabela 13 – Tabela de custo para o sistema fotovoltaico – Ano 2016

Itens	Custo (US\$/kWh)
Módulos fotovoltaicos 265W	0,0012
Inversores de frequência	0,0005
Operação	0,007
Manutenção	0,035

Fonte: Elaboração própria

No Brasil, segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA, 2000), a média diária de Sol na Região Norte é de 5 h, na Região Sul, Sudeste e Centro-Oeste é de 6 h e a Região Nordeste é de 7 h. Esse trabalho propõe duas situações, a primeira com a utilização de um banco de baterias, o que aumentaria essa média de 2 a 4 horas a mais, devido ao acúmulo de energia no banco de baterias e a segunda situação com a utilização direta da bateria do carro.

Na equação (21) apresenta-se a relação do custo de eletricidade produzida utilizando um sistema fotovoltaico.

$$C_{el} = \left(\frac{I_{SGF} \cdot f}{H \cdot E} \right) + C_{op} + C_{man} \quad (21)$$

sendo que “ $C_{el(SGF)}$ ” é o custo de eletricidade produzida [US\$/kWh], “ I_{SGF} ” é o investimento total necessário [US\$], “ H ” é o número de horas de operação por ano [h/ano], “ C_{op} ” é o custo de operação [US\$/kWh], “ C_{man} ” é o custo de manutenção do sistema [US\$/kWh], “ f ” é o fator de anuidade [1/ano] e “ E ” é a energia elétrica gerada [kW].

O fator de anuidade pode ser obtido por meio da equação (22) (SILVEIRA, 1994).

$$f = \frac{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^k \cdot \left(\frac{r}{100}\right)}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^k - 1} \quad (22)$$

no qual “ r ” a taxa anual de juros [%] e “ k ” o período de amortização de capital ou *payback* [ano].

3.3.2 Análise Econômica para o Sistema de Geração a Biogás

Os investimentos necessários para viabilizar uma usina biogás estão relacionados com os cálculos dos custos de produção do sistema com base no valor de aquisição do motor gerador, custo de combustível, custo de manutenção e a bateria, sendo a última opcional podendo usar diretamente as baterias do veículo elétrico.

Para o sistema de geração biogás estudado neste trabalho, projetou-se três usinas de diferentes capacidades, seguindo o mesmo potencial necessário para o SGF de aproximadamente 750 kW para a Região Norte de 5 h diárias de irradiação solar, de 620 kW para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste com irradiação de 6 h diária e de 530 kW para a Região Nordeste onde se tem 7 h de sol por dia.

Utilizou-se os dados do conjunto de motores a gás do grupo Caterpillar para frequência de 60 Hz e velocidade de rotação entre 900 e 1800 rpm, cujos dados de catálogo são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Dados de catálogo dos MCI

Modelo	Velocidade de rotação [rpm]	Potência elétrica no GN [kW]	Eficiência elétrica no GN [%]
G3412C	1800	453	35,30
G3512	1200	581	34,50
CG132-12	1800	600	41,10
G3516	1200	755	33,00
CG132-16	1800	800	41,50

Fonte: Caterpillar (2013)

A equação (23) mostra a relação do custo de eletricidade produzida utilizando um sistema biogás.

$$C_{el(SGB)} = \left(\frac{I_{SMG} \cdot f}{H_{MCI} \cdot E_{MCI}} \right) + \frac{C_{comb} \cdot E_{comb}}{E_{MCI}} + C_{man} + C_{MCI} \quad (23)$$

sendo que “ $C_{el(SGB)}$ ” é o custo de produção de eletricidade utilizando sistema de geração a biogás [US\$/kW], “ I_{SMG} ” é o investimento motor gerador [US\$], “ H_{MCI} ” é as horas de operação do motor gerador [h], “ E_{MCI} ” é a potência elétrica produzida no sistema [kW], “ C_{comb} ” é o custo do combustível [US\$/kWh], “ E_{comb} ” é a potência energética fornecida pelo combustível [kW] e “ C_{MCI} ” é o custo de manutenção do MCI [US\$/kW]

A potência fornecida pelo combustível é dada pela Equação (24) (PÉREZ *et al.*, 2015).

$$E_{comb} = \dot{m}_{comb} \cdot PCI_{com} \quad (24)$$

sendo que “ \dot{m}_{comb} ” é a vazão mássica de combustível [kg/s], e “ PCI_{com} ” é a eficiência elétrica do motor, apresentada na Equação (25) e que segundo (SALES, 2008), deve ficar entre 25 e 45%, dependendo do sistema de geração.

$$\eta_{el} = \frac{E_{MCI}}{E_{comb}} \quad (25)$$

sendo “ η_{el} ” é a eficiência elétrica do motor utilizando biogás como combustível.

Quando o combustível a ser utilizado no motor é diferente do gás natural, com menor valor de PCI, é necessário utilizar um coeficiente de compensação de eficiência elétrica. Wang et al. (2015) propõe a Equação (26) na determinação da eficiência elétrica.

$$\eta_{el} = \gamma_{el} \cdot \eta_{el}^* \quad (26)$$

sendo que “ η_{el}^* ” é a eficiência elétrica do motor utilizando gás natural como combustível e “ γ_{el} ” é o coeficiente relativo à eficiência elétrica.

Ainda segundo Wang et al. (2015) o coeficiente relativo à eficiência elétrica é encontrado por meio da Equação (27)(29).

$$\gamma_{el} = 0,102 \cdot \frac{PCI_{comb}}{PCI_{GN}} + 0,897 \quad (27)$$

no qual “ PCI_{comb} ” é o poder calorífico inferior do combustível (13.082 kJ/kg) e “ PCI_{GN} ” é o poder calorífico inferior do gás natural (47.054,41 kJ/kg).

Para determinação do custo de investimento do motor de combustão interna utilizado na planta, utilizou-se o método apresentado por Boehm (1987), que considera alguns custos associados para cada componente, provenientes de literaturas para determinação dos parâmetros necessários. Esta técnica foi desenvolvida por Boehm para refinar a estimativa no cálculo do investimento em equipamentos de sistemas térmicos. A Equação (28), determina o custo do investimento do motor gerador, e utilizou-se como referência as pesquisas de Ehyaei et al. (2012), Skorek-Osikowska et al. (2014).

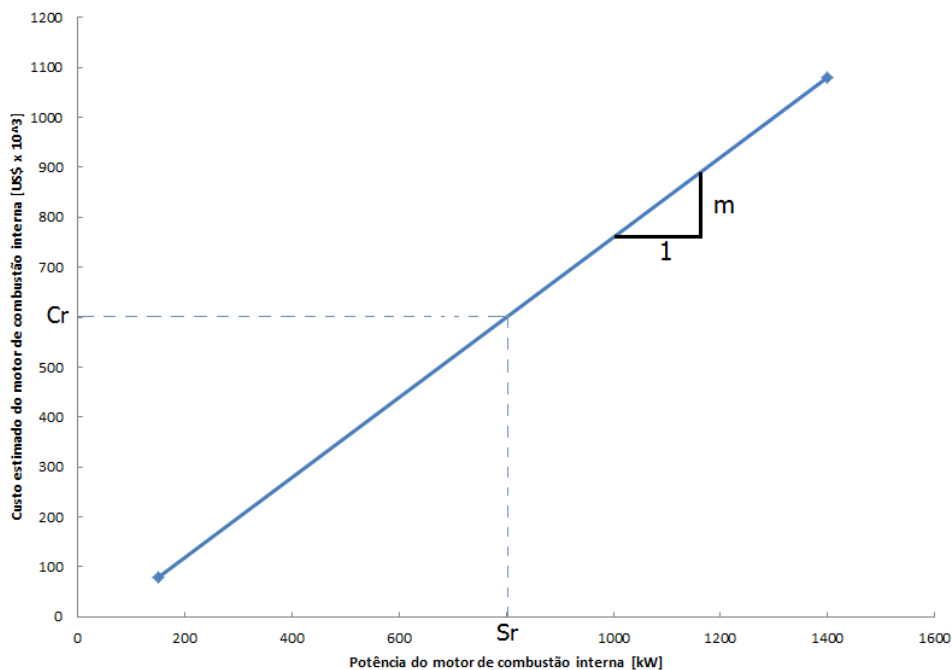
$$C_{MCI} = C_R \cdot \left(\frac{S}{S_R} \right)^m \quad (28)$$

Sendo que “ C_{MCI} ” é o investimento do motor de combustão interna [US\$], “ C_R ” é o custo do equipamento para uma grandeza de referência Sr [US\$], “ S ” é a grandeza de interesse [kW], “ S_R ” é a grandeza de referência [kW] e “ m ” é o fator de incidência que indica a escala de economia.

A Figura 35 permite a determinação dos parâmetros Sr , C_R e m com o propósito de determinar o custo do investimento.

De acordo com Boehm (1987) determina-se o valor de “ m ” usando semelhança de triângulos, considera-se um triângulo hipotético com um cateto adjacente unitário e outro formado por quaisquer outros dois pontos da curva. É importante considerar que os eixos “ x ” e “ y ” tenham a mesma ordem de grandeza e que “ m ” deve estar no intervalo $[0,5-1,0]$ para validar o método (BOEHM, 1987). Realizam-se sucessivas tentativas até a obtenção do valor de “ m ” que é igual a 0,824. Com o auxílio do gráfico da Figura 35 determinam-se então o valor de C_r e S_r como sendo $600 \text{ US\$} \times 10^3$ e 820 kW respectivamente, podendo então calcular o valor do investimento do motor gerador da equação (29).

Figura 35 – Metodologia de Boehm (1987) para determinação do custo de investimento no MCI



Fonte: Elaboração própria

Desse modo, aplicando a metodologia de Boehm (1987), pode-se determinar o custo do investimento do motor gerador de combustão interna para a usina de biogás por meio da Equação (29).

$$I_{SMGI} = 600.10^3 \cdot \left(\frac{E_{MCI}}{820} \right)^{0,824} \quad (29)$$

no qual “ I_{SMGI} ” é o investimento do sistema de motor gerador de combustão interna [US\$].

Segundo Ehyaei et al. (2012), o custo de manutenção de motor gerador de combustão interna é de “ C_{mMCI} ” = 0,015 [US\$/kW]. Segundo Kunte (2015), o custo do biogás é de “ C_{bio} ” = 0,019 [US\$/kW].

3.4 RECEITA ANUAL ESPERADA

Hoje ainda não há subsídio do governo para implantação de usinas fotovoltaicas para geração e distribuição de energia solar. Há uma necessidade de incentivo à pesquisa e desenvolvimento da tecnologia, e de subsídios do governo para que essa tecnologia avance no Brasil.

A vida útil de um painel fotovoltaico, segundo seus fabricantes, é no mínimo de 25 anos. Com essa informação será considerado um período de amortização de 1 a 25 anos, e serão utilizadas as taxas de juros praticadas pelo BNDES de 4%, 8% e 12%.

Considerando um futuro próximo em que o governo subsidiará a energia fotovoltaica para pequena geração distribuída, será calculado o custo final da eletricidade considerando um subsídio entre 10% a 50%, disponibilizado pelos programas de desenvolvimento sustentável.

A receita anual esperada com a implantação da usina fotovoltaica para alimentar veículos elétricos pode ser obtida por meio da equação (30) (REIS, 2002).

$$R_{E(SGF)} = E \cdot H \cdot (C_{ele} - C_{el(SGF)}) \quad (30)$$

sendo que “ $R_{E(SGF)}$ ” é a receita anual do sistema de geração fotovoltaico [US\$/ano], “ C_{ele} ” é a tarifa da eletricidade fornecida pela rede [US\$/kWh] e “ $C_{el(SGF)}$ ” é o Custo de produção de eletricidade pelo sistema fotovoltaico [US\$/kWh].

A receita anual esperada com a implantação da usina a biogás, para alimentar veículos elétricos, pode ser obtida por meio da equação (31) (REIS, 2002).

$$R_{E(SGB)} = E_{MG} \cdot H \cdot (C_{ele} - C_{el(SGB)}) \quad (31)$$

no qual “ $R_{E(SGB)}$ ” é a receita anual do sistema de geração biogás [US\$/ano], “ C_{ele} ” é a tarifa da eletricidade fornecida pela rede [US\$/kWh] e “ $C_{el(SGB)}$ ” é o Custo de produção de eletricidade pelo sistema biogás [US\$/kWh].

3.5 CONSIDERAÇÕES PARA A ANÁLISE ECONÔMICA: CARRO ELÉTRICO X CARRO MCI

Utilizando a análise econômica para cálculo do custo da eletricidade gerada por meio das fontes renováveis fotovoltaica (3.3.1) e biogás (3.3.2), será calculado o custo do quilômetro rodado de um carro elétrico sendo carregado com essas fontes de energia e a tarifa da concessionária, comparando com os gastos de gasolina de um automóvel de mesmo porte que utiliza motor a combustão interna. A Tabela 15 mostra os dados técnicos dos carros, motor de combustão interna e motor elétrico considerados no estudo.

Tabela 15 – Dados técnicos do carro de MCI e elétrico

Descrição	Dados Técnicos	
	MCI	Elétrico
Marca/modelo	Daimler AG Smart Forfour	Daimler AG Smart Forfour
Motor	Motor de 3 cilindros em linha	Motor síncrono de corrente alternada de excitação externa
Cilindrada em cm ³	999	-
Potência máxima	52 / 6.000 kW a rpm	60 kW
Taxa de compressão	10,5 : 1	-
Composição da mistura	Injeção de gasolina	-
Velocidade máxima em km/h	151	130
Aceleração dos 0-100 km/h em seg	15,9	12,7
Consumo de combustível: urbano	4,8 L/100 km	13,1 kWh/100 km
Tipo de combustível	Gasolina	Elétrico
Tratamento dos gases de escape/norma de emissões	Catalisador de 3 vias/Euro 6	-
Autonomia em km	-	155
Tempo de carregamento 20-100 % em horas na tomada doméstica	-	6
Emissões de CO ₂ (combinadas) em g/km	97	0

Fonte: Daimler (2018)

A Figura 36 mostra o carro elétrico modelo Smart Forfour e o de motor de combustão interna utilizado como exemplo para os cálculos, os dois são da montadora Daimler AG (Mercedes-Benz).

Figura 36 – Smart Forfour elétrico



Fonte: Daimler (2018)

(a) elétrico; (b) MCI

A Figura 37 mostra o interior do Smart Forfour elétrico, muito parecido com o carro de motor de combustão interna.

Figura 37 – Interior dos carros da montadora Daimler

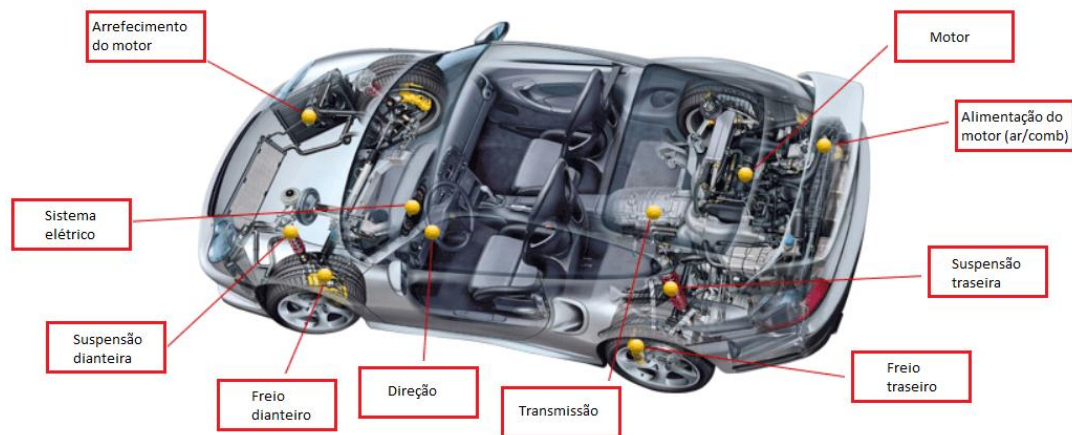


Fonte: Daimler (2018)

(a) elétrico; (b) MCI

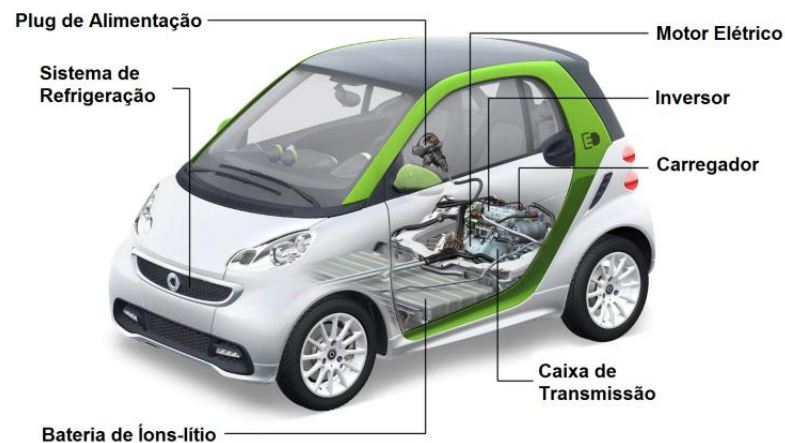
Além do custo de utilização há também o valor referente a manutenção, as Figura 65 e 66 mostram os principais itens a ser monitorado em um carro MCI e elétrico, é possível observar que os carros movidos a combustível fóssil tem um maior número de itens a ser verificado, ficando mais custoso sua manutenção.

Figura 38 – Itens de manutenção do carro MCI



Fonte: Motors (2018)

Figura 39 – Itens de manutenção do carro elétrico



Fonte: Daimler (2012)

3.6 ANÁLISE AMBIENTAL

A metodologia de análise ecológica baseia-se nos cálculos do dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) para uma distância percorrida diária de 150 km, referente a autonomia do carro usado no estudo, o Smart Forfour.

3.6.1 Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) Associado à Usina Fotovoltaica

- **Painéis Fotovoltaicos**

O processo de produção dos painéis fotovoltaicos de células se inicia com a mineração da areia rica em quartzo, passando por processos de purificação, aquecimento, para se tornar silício de grau solar, e então são derretidos e postos em moldes que formam blocos policristalinos, e por último, as células são postas juntas para formar o módulo. Todo este processo requer grande quantidade de energia (PENG; LU; YANG, 2013). O estudo ainda requer maior análise para um resultado mais preciso do gasto de energia primária para a fabricação dos painéis. A Tabela 16 apresenta os resultados da energia primária consumida para a construção dos painéis fotovoltaicos mono-Si e poli-Si.

Tabela 16 – Energia primária de fabricação total das placas fotovoltaicos

Tecnologia	Módulo (MJ/m ²)
mono-Si	5200
poli-Si	3900

Fonte: Alsema, Erik A.; De Wild-Scholten (2006)

Neste trabalho será usado o fator de emissão de CO_{2eq} da geração de eletricidade da China no valor de 0,92 kgCO_{2eq} / kWh, considerando que ela é o maior fabricante de painéis fotovoltaicos.

A Equação (32) (CARVALHO, 2011), calcula as emissões relativas a construção do painel fotovoltaico:

$$(CO_2)_e = A_T \cdot E_{primária} \cdot \eta_{rede} \cdot FE \quad (32)$$

sendo que “A_T” é a área total dos painéis fotovoltaicos [m²], “E_{primária}” é a energia primária para a fabricação do painel fotovoltaico [kWh/m²], “η_{rede}” é a eficiência da rede e “FE” é o fator de emissão de CO₂ devido a fabricação do produto do país de origem [kgCO_{2eq}/ kWh].

- **Transporte**

Neste trabalho foram adotados os seguintes fatores com o objetivo de determinar a emissão de GEE em decorrência do transporte dos painéis fotovoltaicos:

- ✓ Importação: China;
- ✓ Caminhão a diesel com capacidade de carga de 25 toneladas e média de consumo de 2,5 km/L (GARCIA; SPERLING, 2010; SILVA, RICHARD; AGOSTINHO, 2017);
- ✓ Emissão média do diesel de 3,20 kg de CO₂ por litro (CARVALHO, 2011);
- ✓ Fator de emissão do transporte rodoviário é de 0,0512 kg de CO₂ por quilometro a cada tonelada transportada;
- ✓ Os painéis fotovoltaicos foram importados de Shangai, via transporte marítimo até o porto de Santos, SP (distância de 11.056 milhas náuticas);
- ✓ O trajeto do porto de Santos até Guaratinguetá, SP foi realizado por transporte terrestre a caminhão a diesel (distância de 254 km);
- ✓ O fator de emissão do transporte marítimo é de 0,0179 kg de CO₂ por milha náutica a cada tonelada transportada (ODFJELL, 2015).

A Equação (33) (CARVALHO, 2011), calcula as emissões relativas ao transporte do painel fotovoltaico:

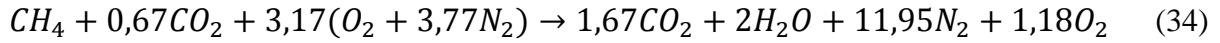
$$(CO_2)_e = QT.D.FE \quad (33)$$

sendo que “*QT*” é a quantidade de produto transportado [t], “*D*” é a distância percorrida pelo veículo transportador [km] e “*FE*” é o fator de emissão de CO₂ devido a fabricação do produto, em quilogramas de CO_{2eq} pela distância do deslocamento a cada tonelada transportada [kgCO_{2eq}/km.t].

3.6.2 Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) para o Biogás

O cálculo do dióxido de carbono equivalente é realizado considerando as concentrações de CO₂, CH₄, SO₂, NO_x e MP separadamente para a queima de 1 kg de combustível, ou seja, do biogás.

Segundo Boloy *et al.* (2011), o excesso de ar na queima de qualquer combustível gasoso de um motor de combustão interna é de aproximadamente 40%. A reação real de combustão do biogás (60% CH₄ e 40% CO₂), incluído o excesso de ar, é apresentada na Equação (34).



A Tabela 17 mostra a massa molar dos elementos da combustão do biogás para temperatura de 298 K.

Tabela 17 – Massa molar dos elementos do biogás

Elementos	Massa Molar [kmol/kg]
CH ₄	16
CO ₂	44
N ₂	28
H ₂ O	18
O ₂	32
SO ₂	64

Fonte: Borgnakke; Sonntag (2013)

$$MM_{biogás} = 1,00 MM_{CH_4} + 0,67MM_{CO_2} \quad (35)$$

sendo que “ $MM_{biogás}$ ” é a massa molar do biogás [kmol/kg], “ MM_{CH_4} ” é a massa molar do CH₄ [kmol/kg] e “ MM_{CO_2} ” é a massa molar do CO₂ [kmol/kg].

A massa molar do biogás é calculada pela Equação (35) com auxílio da Tabela 17, e seu valor é igual 45,48 kmol/kg.

Segundo Cardu e Baica (1999), o CO_{2eq} pode ser calculado pela Equação (36). Foi utilizado como padrão os índices do Instituto de Energia e Meio Ambiente de julho de 2012, que apresenta a máxima concentração permitida em ambientes de trabalho, para uma hora de exposição. A determinação dos fatores é realizada dividindo a concentração máxima aceitável de CO₂ pelas concentrações máximas permitidas de SO₂, NO_x e MP. A Equação (36), apresenta esta metodologia de Cardu e Baica (1999) atualizada com os índices de Santana *et al.* (2012)

Tabela 18 – Concentração admissível de gases prejudiciais à qualidade do ar

Componentes	Concentração média	Concentração máxima
CO ₂	7.000 mg/m ³	10.000 mg/m ³
SO ₂	10 mg/m ³	60 µg/m ³
NO _x		260 µg/m ³
MP		120 µg/m ³

Fonte: Cardu; Baica (1999); Santana *et al.* (2012)

$$(CO_2)_{eq} = CO_2 + 167(SO_2) + 38(NO_x) + 83 (MP) \quad (36)$$

no qual o “CO₂” é a massa de CO₂ no gás de exaustão por unidade de massa de combustível [kgCO₂/kgcomb], “SO₂” é a massa de SO₂ no gás de exaustão por unidade de massa de combustível [kg SO₂/kg de combustível], “NO_x” é a massa de NO_x no gás de exaustão por unidade de massa de combustível [kg NO_x/kgcomb] e “MP” é o material particulado presente nos gases de exaustão [kg NO_x/kg de combustível].

De acordo com De Castro Villela; Silveira (2007), a emissão de CO₂ pode ser calculada pela Equação (37):

$$CO_2 = \frac{(w \cdot 44)CO_2}{MM_{biogás}} \quad (37)$$

sendo que “w” é o mol de CO₂ no gás de exaustão por mol de combustível [mol/mol] e “MM_{biogás}” é a massa molar do biogás [kg/kmol].

De acordo com Jr.; Lacava (2003), as emissões de NO_x e MP para o biogás são calculadas por meio das equações (38) e (39).

$$NO_x = \frac{2120.0,0224}{10^6} \cdot \frac{1}{MM_{biogás} \cdot 10^{-3}} \quad (38)$$

$$MP = \frac{\frac{224.0,0224}{10^6}}{MM_{\text{biogás}} \cdot 10^{-3}} \quad (39)$$

3.6.3 Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) para a Energia Elétrica

Para o cálculo das emissões de CO_{2eq} decorrentes do consumo de energia elétrica no Brasil foi utilizado o fator de emissão do Sistema Interligado Nacional (SIN), mostrado na Tabela 19, que, em 2014 e 2015, teve um aumento devido à maior participação dos insumos fósseis pelas usinas termoelétricas para geração de eletricidade e da menor fração de hidroeletricidade, devido à crise hídrica ocorrida no Brasil.

Para o cálculo das emissões em CO_{2eq} para a energia elétrica produzida pela rede, utilizou-se a Equação (40) (SANQUETTA *et al.*, 2017).

$$(CO_2)_e = C \cdot FE \quad (40)$$

no qual “CO_{2e}” é a emissão anual [tCO₂], “C” é o consumo de energia elétrica [MWh.ano⁻¹] e “FE” é o fator de emissão [tCO_{2eq}.MWh⁻¹].

Tabela 19 – Fatores de emissão da energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN)

Ano	2013	2014	2015	2016
Fator de emissão (tCO _{2eq} .MWh ⁻¹)	0,0960	0,1355	0,1244	0,0817

Fonte: MCTI (2017)

3.6.4 Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂) para o Consumo de Gasolina

Segundo Carvalho (2011), vários fatores podem atuar na taxa quilométrica de emissão de CO₂ equivalente dos veículos movidos à gasolina, sendo que os que mais influenciam são a potência média, idade e rendimento quilométrico.

A análise estequiométrica permite calcular uma relação de CO₂ emitido por unidade volumétrica de combustível. No caso ideal a queima seria completa do combustível, como isto

não ocorre, há emissão de outros poluentes. A Equação (41) apresenta a reação estequiométrica do CO_{2eq} emitido, considerando a queima total da gasolina.

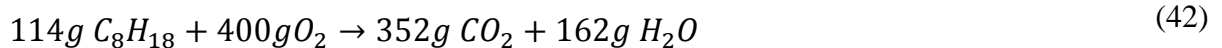


Tabela 20 – Massa molar dos elementos da gasolina

Elementos	Massa Molar [kmol/kg]
C8H18	16
O2	32
CO ₂	44
H ₂ O	18

Fonte: Borgnakke; Sonntag (2013)

Considerando as massas dos elementos da Tabela 20, temos a Equação (42):



Da composição das massas dos elementos químicos, obtemos as seguintes relações: 1 g de gasolina pura queimada gera 3,08 g de CO_2 . Considerando a densidade da gasolina pura como sendo 0,740 kg/L, da equação estequiométrica obtém-se que 1g de gasolina pura queimada gera 3,08 g de CO_2 , resultando em uma relação de 2,28 kg de CO_2/L de gasolina (CARVALHO, 2011).

Segundo Soares *et al.*, (2009), estudos europeus revelam que, para cada litro de gasolina disponível nos postos, houve uma emissão anterior de cerca de 0,50 kg de CO_2 na produção e distribuição do combustível, aumentando a taxa final para 2,80 kg de CO_2/L de gasolina.

Veículos movidos a etanol apresentam cerca de 20% das emissões de CO_2 não renováveis apresentadas em veículos a gasolina (SOARES *et al.*, 2009), gerando uma taxa de 0,56 kg de CO_2/L . A Equação (43) calcula o fator de emissão de CO_2 por litro, considerando as porcentagens dos tipos de combustíveis utilizados (CARVALHO, 2011).

$$FE = \sum PM_{comb} \cdot emissões_{comb} \quad (43)$$

sendo que “ FE ” é o fator de emissão final do veículo considerado [kg de CO_2/L], “ PM_{comb} ” é o percentual de mistura do combustível utilizado e “ $emissões_{comb}$ ” é a emissões quilométricas do combustível utilizado [kg de CO_2/L].

3.7 PASSIVO AMBIENTAL RESULTANTE DA ENERGIA RENOVÁVEL

Para Alsema; Nieuwlaar (2000), toda nova tecnologia para geração de energia para ser chamada de “renovável” ou “sustentável” deve estar sujeita a uma análise de seu equilíbrio de energia, para verificar sua viabilidade dentro deste contexto.

Esta análise é chamada de *Energy Payback Time* ou EPBT, o conceito de gastar para economizar, ou seja, quanto tempo um sistema tem que operar para gerar a mesma quantidade de energia que foi gasta na fabricação, montagem, instalação e deposição ao final de sua vida útil. Por meio desta análise é possível também verificar as emissões de CO_2 durante o ciclo de vida dos equipamentos de acordo com a quantidade de CO_2/kWh emitido pela fonte energética utilizada na produção dos mesmos.

De acordo com Nieuwlaar; Alsema (1997) e Mangan; Oral (2016) o EPBT é definido por ER, na Equação (44):

$$EPBT = ER = \frac{E_{utilizada}}{E_{economizada}} \quad (44)$$

sendo que “ $EPBT$ ” é a *energy payback time* ou tempo de reembolso de energia [anos], “ ER ” é a energia reembolsada [anos], “ $E_{utilizada}$ ” é a contribuição de energia durante o ciclo de vida, incluindo o uso de energia para fabricar, instalar, utilização de energia durante operação e deposição ao final da vida útil do equipamento [W] e “ $E_{economizada}$ ” é a economia de energia devido à energia elétrica produzida pelo produto durante seu funcionamento ao longo de um ano [W].

3.7.1 Sistema Fotovoltaico

O levantamento do passivo gerado pela fabricação dos módulos fotovoltaicos está limitado pelo processo de fabricação dos três principais componentes estruturais.

- Fabricação das células fotovoltaicas de silício
- Fabricação do alumínio para a moldura que fornece parte da sustentabilidade mecânica ao painel.
- Fabricação do vidro plano utilizado sobre a placa de células de silício do painel.

A Tabela 21 mostra as características de três modelos de painéis fotovoltaicos com a potência escolhida de 260 W e a média adotada para a análise do passivo ambiental, proposto no trabalho.

Tabela 21 – Características do painel fotovoltaico 260 W – Irradiância 1000 W/m², temperatura 25°C

	Sun Edison [SE-P265NPB-A4]	Canadian Solar [CS6P-265]	JA Solar [JAP6-265]	Média Adotada
Peso [kg]	18,6	18	18,2	18,26
Dimensão [mm]	1650x992x35	1638x982x40	1650x991x40	1646x988x38
Área do módulo [m ²]	1,64	1,61	1,64	1,63
Perímetro do módulo [m]	5,28	5,24	5,28	5,27
Número de células [série x paralelo]	60 [6x10]	60 [6x10]	60 [6x10]	60
Energia Total do Painel				
Potência do painel [Wp]	260	260	260	260
Vida útil [anos]	25	25	25	25
Eficiência [%]	15,90	16,16	16,21	16,09

Fonte: Sunedison (2015); Canadian (2009); Jasolar (2015)

A Tabela 22 mostra a distribuição por peso e a Tabela 22 mostra a distribuição por gasto de energia dos principais componentes de um módulo fotovoltaico típico de silício cristalino.

Tabela 22 – Distribuição por peso de um módulo fotovoltaico

Composição de um módulo fotovoltaico	% em peso
Estrutura de Alumínio	11%
Material eletroeletrônico	1%
Vidro Solar	69%
Silício	14%
Folhas de Polímero	4%
Cobre	1%

Fonte: Olson *et al.* (2013)

Tabela 23 – Distribuição por gasto energético de um módulo fotovoltaico

Composição de um módulo fotovoltaico	% de gasto energético
Estrutura de Alumínio	5%
Vidro Solar	8%
Silício	83%
Folhas de Polímero	4%
Pasta de prata	1%

Fonte: Olson *et al.* (2013)

Apesar do silício ter 14% de participação no peso total de um módulo solar, ele requer 83% da energia gasta na fabricação do mesmo, isto porque, a transformação do quartzo, a forma mais comum de sílica, em silício de grau metalúrgico ocorre em fornos de arco elétrico e é necessário uma grande quantidade de energia para mantê-los quente (FTHENAKIS; KIM; ALSEMA, 2008; MULVANEY, 2014)

3.7.2 Baterias de Chumbo-Ácido

Segundo Filho; Rosa (2013), as bateria de chumbo-ácido apresentam um consumo de energia dos materiais que a compõe entre 6,94 a 13,89 kWh/kg, e um gasto de energia durante o processo de manufatura entre 2,5 e 4,44 kWh/kg. Será adotado um valor médio de consumo para os componentes e para a manufatura, assim o valor total para o gasto na fabricação da bateria será de 13,89 kWh/kg. Será considerado uma bateria automotiva comum de dimensões 20,50 x 17,50 x 17,50 [cm] de 12 V de tensão, corrente de 45 Ah, peso de 12 kg e uma capacidade de reserva de 55 minutos. A Equação (45) mostra o cálculo para o gasto energético da fabricação da bateria.

$$GEB = P \cdot CTF \quad (45)$$

no qual “*GEB*” é o gasto energético para fabricação da bateria [kWh], “*P*” é o peso da bateria [kg] e “*CTF*” é o consumo total para fabricação da bateria [kWh/kg].

3.7.3 Carro Elétricos

O levantamento do passivo ambiental gerado pela fabricação dos carros elétricos estará baseado em um estudo realizado por Marques; Meirelles (2007) para três décadas de fabricação. A Tabela 24 mostra o peso relativo de três décadas de fabricação de automóveis.

Tabela 24 – Peso dos materiais utilizados em automóveis

	Anos 50	Anos 90	Anos 00
	[kg]	[kg]	[kg]
Aço	1373	831	510
Zinco	25	10	15
Borracha	85	61	64
Vidro	54	38	31
Chumbo	23	15	11
Cobre	25	22	12
Fluídos	96	81	48
Ferro	220	207	150
Alumínio	0	68	77
Plástico	0	101	150
Total	1901	1434	1070

Fonte: Marques; Meirelles (2007)

Como os automóveis não produzem energia, o gasto energético da produção dos automóveis será considerado como $E_{utilizada}$ da Equação (44).

3.7.4 Sistema Biogás

Para estimativa da quantidade dos diferentes tipos de resíduos produzidos no Brasil, foi considerado os dados da composição gravimétrica média, que são provenientes do estudo de 93 caracterizações física realizados entre 1995 e 2008 (BRASIL, 2012). A Tabela 25 mostra a participação de cada componente nesta análise.

Tabela 25 – Análise gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos

Resíduos	Participação [%]
Material reciclável	31,90
Aço	2,30
Alumínio	0,60
Papel, papelão e tetrapak	13,10
Plástico total	13,50
Vidro	2,40
Matéria orgânica	51,40
Outros	16,70
Total	100,00

Fonte: Brasil (2012)

Para a análise do passivo ambiental para o biogás, considerou-se que o resíduo sólido urbano é um material descartado não sendo necessário sua fabricação com a finalidade de geração de energia elétrica, foi considerado para este estudo a parcela de energia utilizada, sendo o gasto energético proveniente do combustível (E_{comb}) para a produção da eletricidade em um ano.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 DIMENSIONAMENTO DA USINA FOTOVOLTAICA

Para o dimensionamento da usina fotovoltaica é necessário saber a quantidade de irradiação solar diária no local a ser instalada e a demanda de energia elétrica para o projeto. Uma visão geral do SGF pode ser observada na Tabela 26; foram utilizadas as equações (5) à (20) para a composição da mesma.

A usina foi projetada para alimentar aproximadamente 100 carros elétricos. Conforme o mapa de irradiação solar normal do Brasil (SOLARGIS, 2018b), a média diária de Sol na Região Norte é de 5 h, na Região Sul, Sudeste e Centro-Oeste é de 6 h e a Região Nordeste é de 7 h.

Tabela 26 – Dimensionamento da usina fotovoltaica

	Equação	5 h de sol Norte	6 h de sol Sul – Sudeste Centro-Oeste	7 h de sol Nordeste
Consumo médio diário [Ah]	(5)	23.956	23.956	23.956
Módulo solar em paralelo [Un]	(7)	753	627	885
Módulo solar em série [Un]	(8)	4	4	4
Módulo solar em total [Un]	(9)	3.012	2.508	2.152
Potência total do módulo solar [W]		753.000	627.000	538.000
Capacidade total da bateria [Ah]	(12)	194.638	194.638	194.638
Bateria em paralelo [Un]	(13)	885	885	885
Bateria em série [Un]	(14)	8	8	8
Bateria total [Un]	(15)	7.080	7.080	7.080
Potência contínua do controlador [W]	(16)	7.680	7.680	7.680
Controlador total [Un]	(18)	86	72	62
Potência total AC do inversor [kW]	(19)	459,95	383,29	328,53

Fonte: Elaboração própria

4.2 DIMENSIONAMENTO USINA BIOGÁS

A usina biogás também foi projetada para alimentar aproximadamente 100 carros elétricos. Para se ter uma base de comparação com a usina fotovoltaica, a usina biogás também funcionará na mesma quantidade de horas por região que o SGF, 5 h na Região Norte, 6 h nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e 7 h na Região Norte.

A Tabela 27 mostra o desempenho dos motores de combustão interna para as diferentes horas de utilização. Utilizando o catálogo da Caterpillar (CATERPILLAR, 2013), foi selecionado motores que suprisse aproximadamente a mesma potência necessária na usina fotovoltaica para 5, 6 e 7 horas de utilização.

Tabela 27 – Dimensionamento da usina biogás

	5 h de sol Norte	6 h de sol Sul – Sudeste – Centro-Oeste	7 h de sol Nordeste
PCI [kJ/kg]	13.082	13.082	13.082
Motor	G3516	CG132-12	G3512
Vazão mássica de combustível [kg/s]	0,1749	0,1116	0,1327
Eletricidade produzida [kW]	698,64	555,21	521,90
Eficiência elétrica do motor [-]	0,3076	0,3822	0,3007

Fonte: Elaboração própria

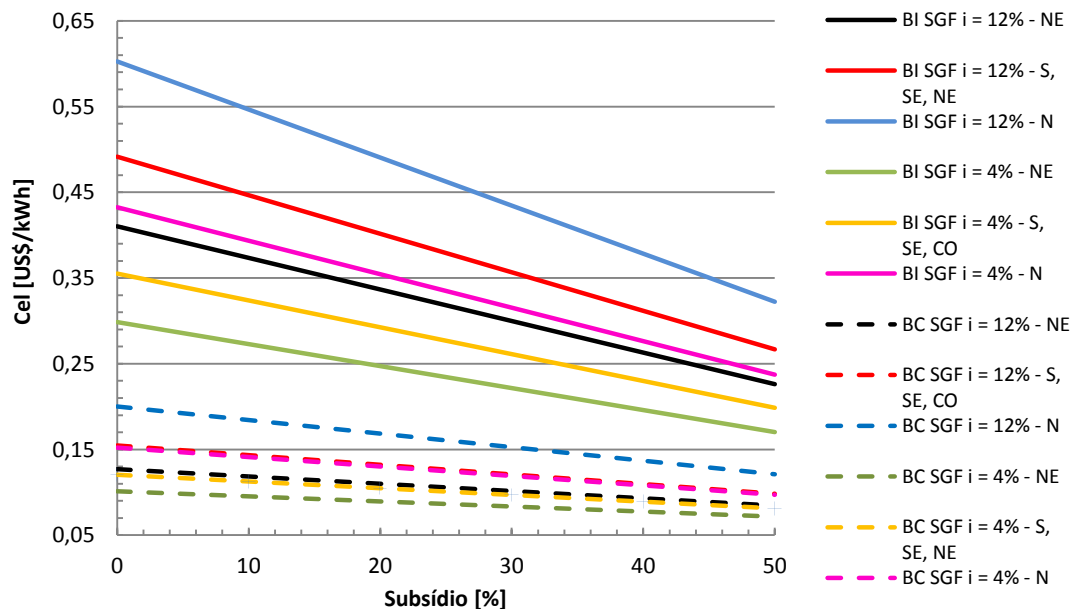
4.3 ANALISE ECONÔMICA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

A Figura 40 mostra o custo da eletricidade produzida pelo sistema fotovoltaico em duas situações, utilizando um banco de bateria independente (BI) e carregando diretamente a bateria do carro elétrico (BC).

Para cada situação foi considerada as taxas de juros de 4 e 12% praticadas pelo banco BNDES. Também foram considerados subsídios entre 10 e 50% disponibilizados pelos programas sociais do governo Solar e o Eólica, Biomassa, Cogeração e PCH (BNDES, 2016) que tem como objetivo a geração de energia elétrica, com um tempo de amortização de 10 anos.

A Figura 40 apresenta o resultado da variação do custo da eletricidade de um SGF considerando radiação solar de 5, 6 e 7 h/dia. Estimou-se um custo de investimento do sistema fotovoltaico utilizando as baterias do carro elétrico em torno de US\$ 2,8/W, neste valor estão incluídos os equipamentos necessários para compor o sistema (módulos fotovoltaico, inversores e controlador de carga) somado ao custo de operação e manutenção da usina, todos estes itens estão especificados na Tabela 13. Se necessário criar um banco de baterias independentes o custo da usina aumenta para US\$ 10,70/W, relativo a compra das mesmas.

Figura 40 – Variação do custo de eletricidade produzida pelo SGF com subsídio



Fonte: Elaboração própria

Como exemplo, o custo da eletricidade gerada pelo SGF nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste sem subsídio e utilizando um BI é de aproximadamente US\$ 0,50/kWh, para uma taxa de juros de 12%. Quando se aplica um subsídio de 50%, o custo da eletricidade produzida diminui para US\$ 0,27/kWh, há uma redução de 46% no valor da geração de energia. Na situação de utilizar a BC, com a mesma taxa de juros, o custo da eletricidade produzida é de US\$ 0,15 sem ajuda governamental e de US\$ 0,10 com um subsídio de 50%.

O custo de produção de eletricidade, diminuem ao longo dos anos para o SGF, o valor relacionado ao investimento inicial na planta reduz com o tempo de acordo com a taxa de amortização. Este comportamento é relacionado ao fator de anuidade, que é dependente da

taxa anual de juros considerada. Além disso, outro fator que influencia a distribuição das curvas de custos de produção é o período de operação anual da planta (H).

Devido à diferença de horas de irradiação solar no Brasil e do preço das diferentes companhias de distribuição de energia elétrica, será realizado uma análise para cada região do custo da eletricidade gerada em função do período de retorno do investimento (*payback*).

4.3.1 Custo da Energia Elétrica pelo SGF

O custo da produção de energia elétrica foi calculado com a variação da taxa de juros anual de 4%, 8% e 12%. O custo da produção diminui ao longo dos anos devido à taxa de amortização, que está relacionado com o fator de anuidade que depende da taxa de juros considerada. Outro fator de grande influência no custo de produção de energia elétrica é o período de operação anual da planta, mostrado na tabela juntamente com a média de preço da energia elétrica fornecida pelas concessionárias no ano de 2016.

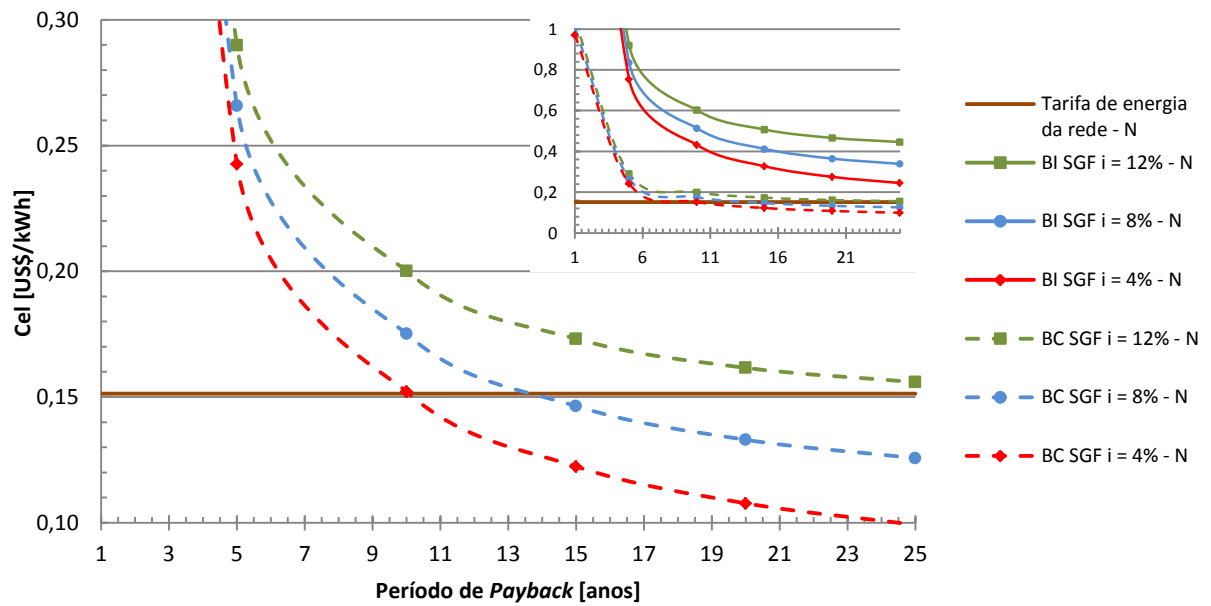
Tabela 28 – Dados para o cálculo do custo da produção de energia por região

	Norte	Sul	Sudeste	Centro Oeste	Nordeste
Horas de operação por ano [h]	1.825	2.190	2.190	2.190	2.555
Custo de eletricidade da rede [US\$/kWh]	0,15	0,13	0,14	0,14	0,13

Fonte: Brasil (2017); Solargis (2018b)

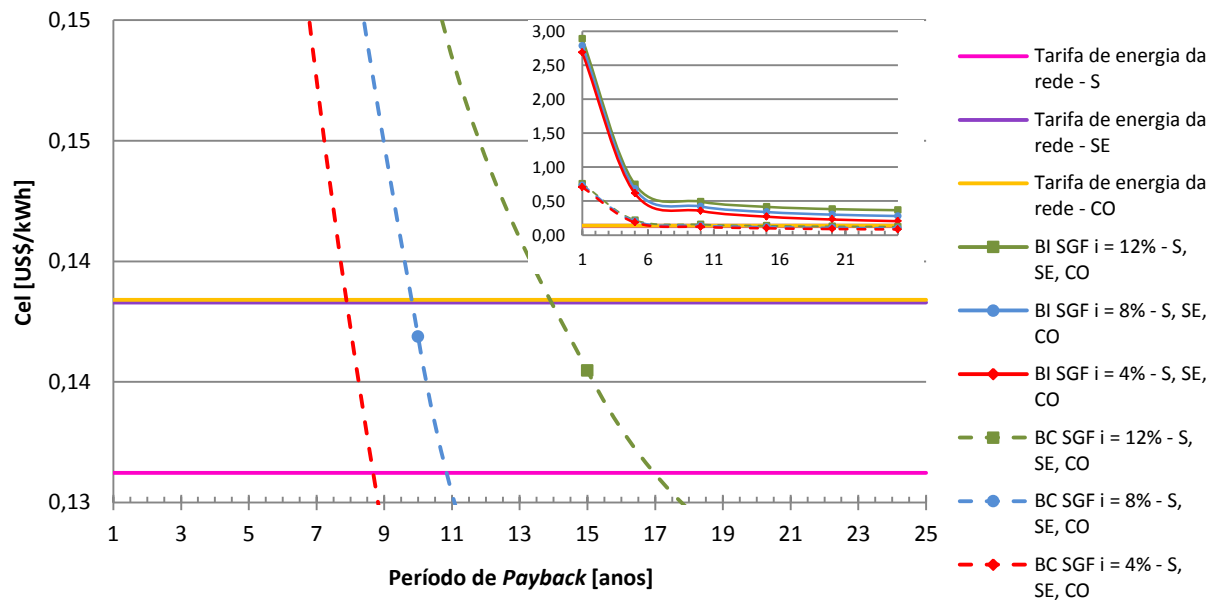
Nas Figura 41 a Figura 43 pode-se observar que o custo da eletricidade gerada pelo SGF. Quando se utiliza um banco de baterias independentes não há viabilidade de operação quando comparado a energia da concessionária. Quando o armazenamento de energia é realizado diretamente na bateria do carro elétrico, o custo da eletricidade gerada pelo SGF passa a ser viável. A Tabela 29 apresenta o *payback* com relação a energia da concessionária para cada região.

Figura 41 – Custo da eletricidade produzida pelo SGF – Região Norte (5 horas diárias)



Fonte: Elaboração própria

Figura 42 – Custo da eletricidade produzida pelo SGF – Região Sul, Sudeste e Centro-Oeste



Fonte: Elaboração própria

Figura 43 – Custo de eletricidade produzida pelo SGF – Região Nordeste

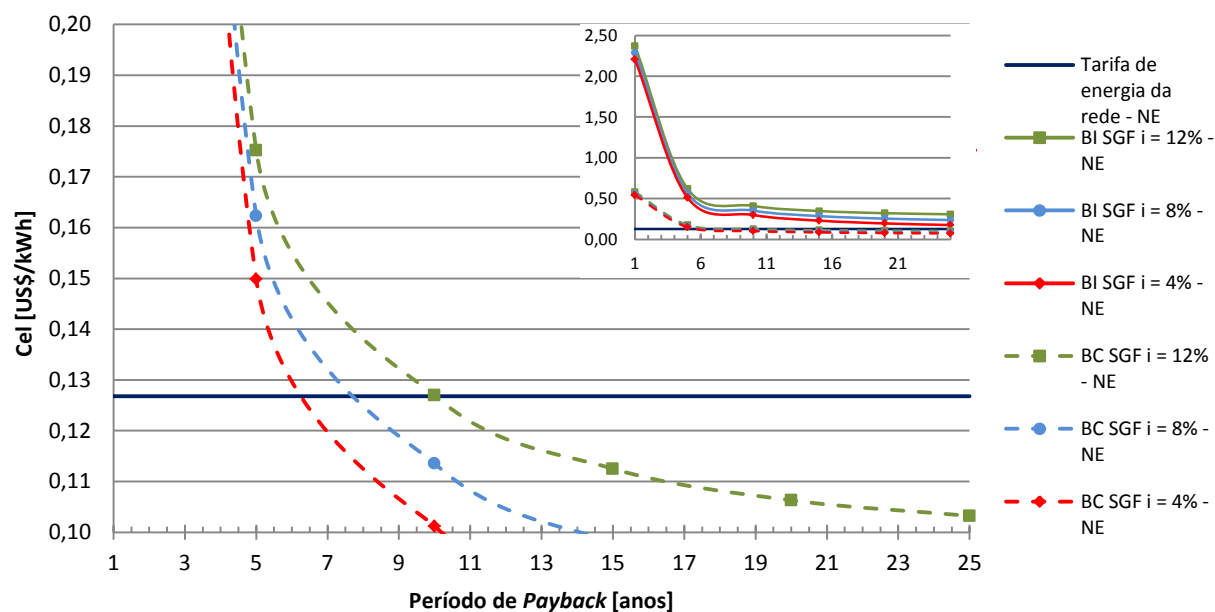


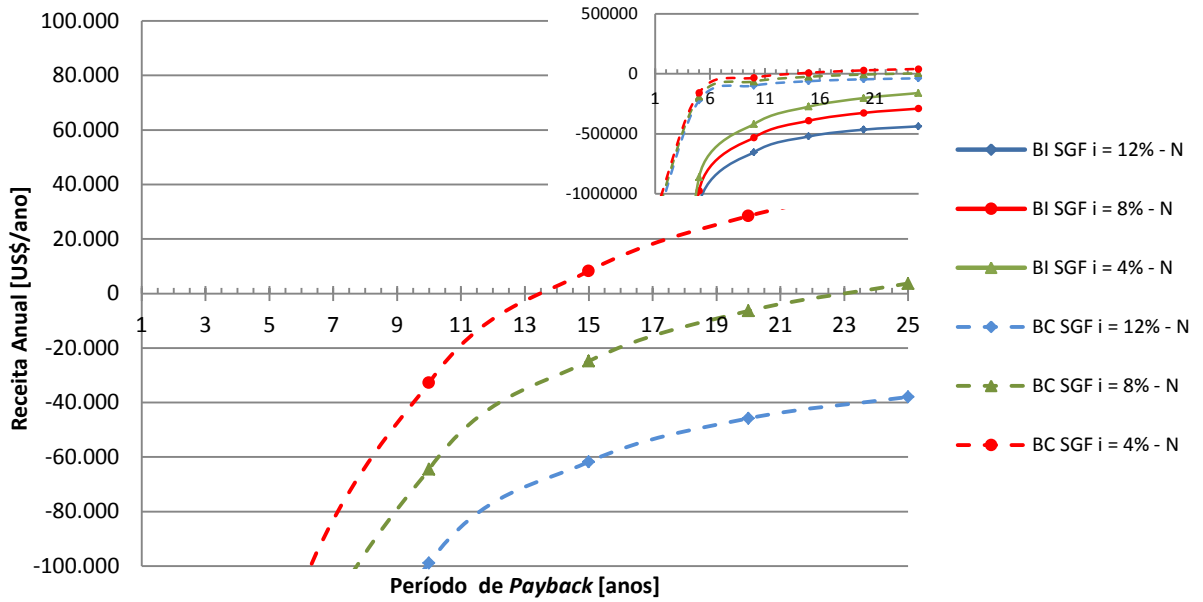
Tabela 29 – Payback do SGF

Regiões	Taxa de juros		
	4%	8%	12%
Norte	9,8	12,8	25
Sul	8,2	10,4	15,8
Sudeste	7,6	9,4	13,0
Centro Oeste	7,6	9,4	13,0
Nordeste	6,2	7,6	9,6

Fonte: Elaboração própria

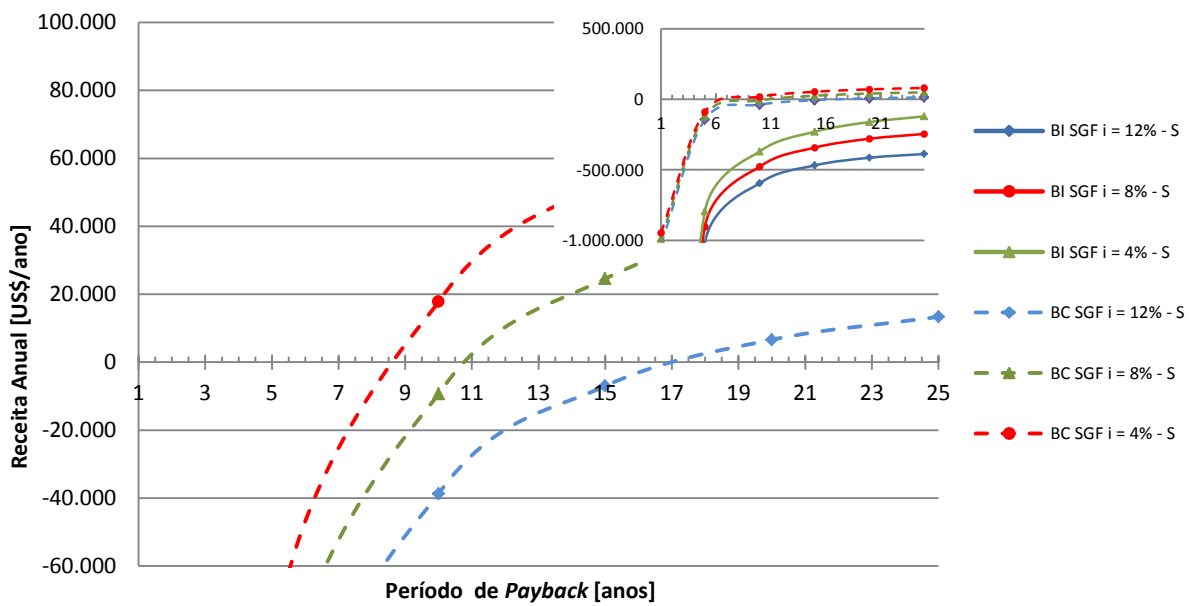
As Figura 44 a Figura 48 mostram a receita anual esperada para cada região na condição de um BI e para BC, em função do período de retorno do investimento e da variação da taxa de juros anual.

Figura 44 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Norte



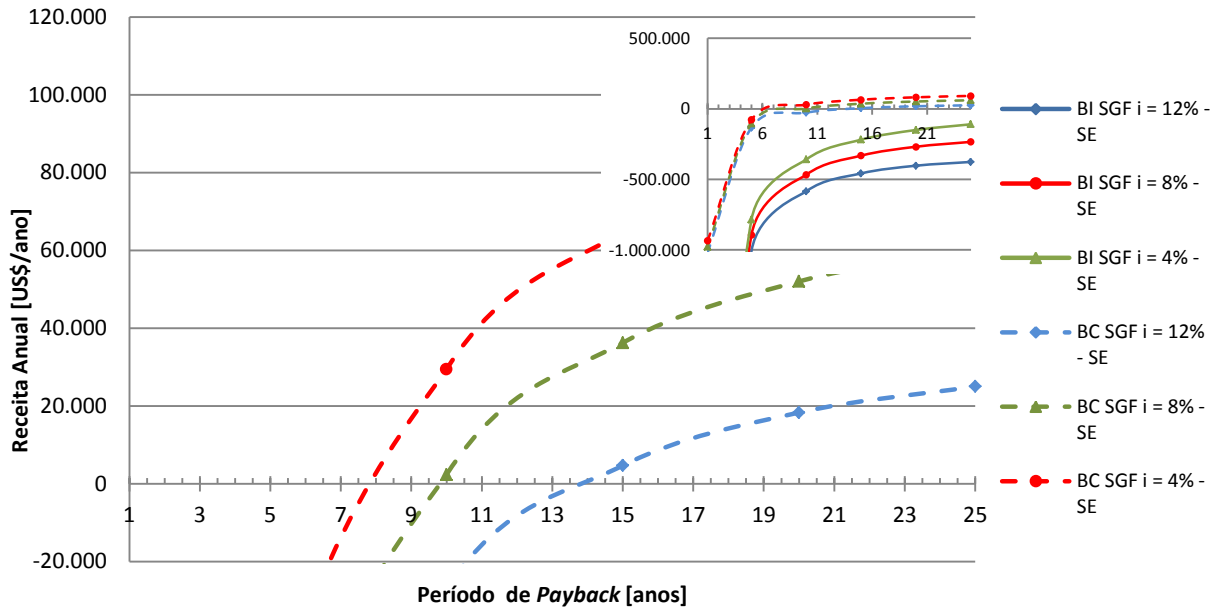
Fonte: Elaboração própria

Figura 45 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Sul



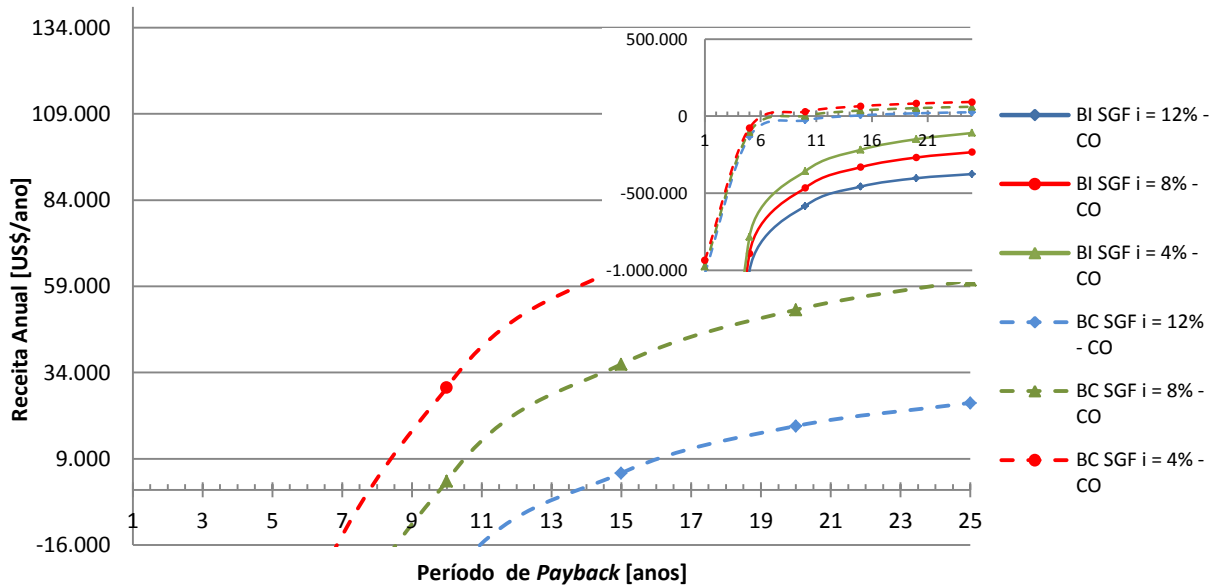
Fonte: Elaboração própria

Figura 46 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Sudeste



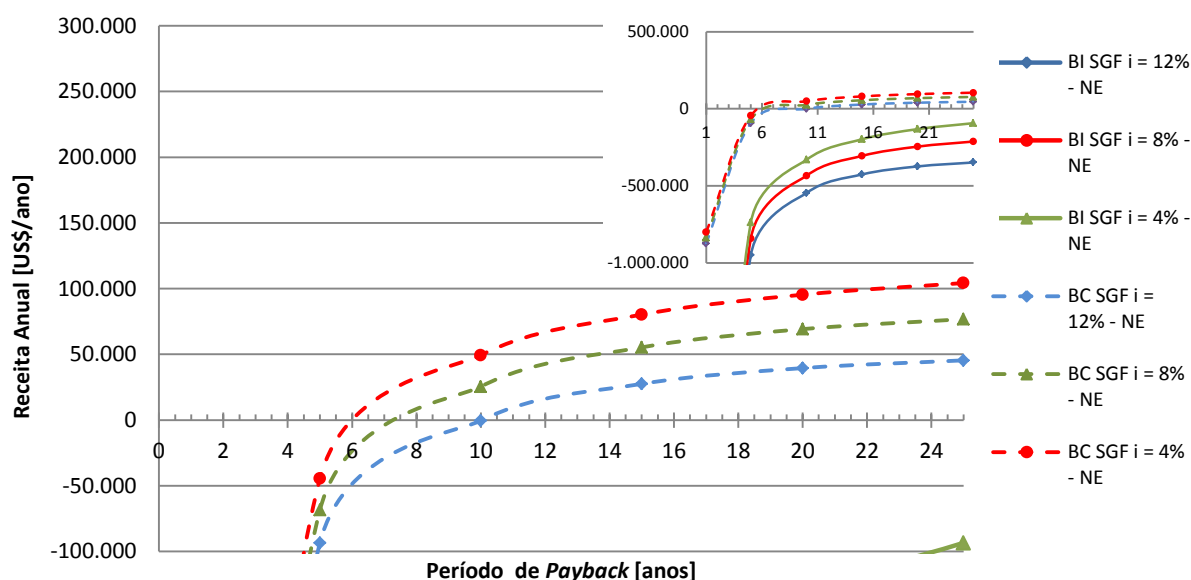
Fonte: Elaboração própria

Figura 47 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Centro-Oeste



Fonte: Elaboração própria

Figura 48 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Nordeste



Para a condição da utilização de um banco de baterias independente verifica-se a inviabilidade de implantação deste sistema para geração de energia elétrica em qualquer região, isto ocorre porque o preço da bateria é muito alto, tornando o sistema muito caro.

Para o sistema de geração e abastecimento direto das baterias do veículo elétrico a Tabela 30 mostra o período de retorno de investimento para uma taxa de juros de 4%, 8% e 12%. Somente para a região Norte para a taxa de juros de 12%, há inviabilidade, isto ocorre porque a radiação solar é baixa, gerando uma quantidade menor de energia, somado a uma taxa de juros elevada. Para todas as outras o investimento é viável visto que a vida útil do painel fotovoltaico é de 25 anos informado pelo fabricante.

Tabela 30 – Receita anual esperada em função do período de *payback* para as regiões

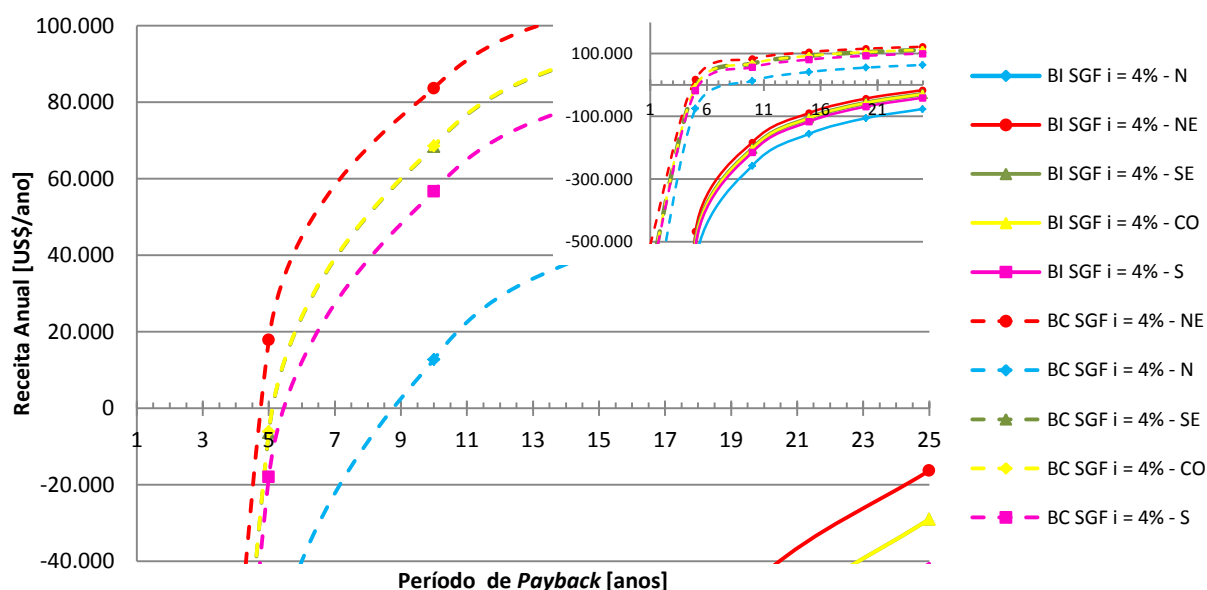
Regiões	Taxa de juros		
	4%	8%	12%
Norte	9,8	12,8	25
Sul	7,2	10,4	15,6
Sudeste	6,6	9,0	12,6
Centro Oeste	6,6	9,0	12,6
Nordeste	6,2	7,8	9,6

Fonte: Elaboração própria

4.3.2 Receita Anual com Subsídio

A Figura 49 apresenta o período de retorno do capital investido considerando um subsídio de 30% disponibilizados pelos programas sociais do governo e uma taxa de juros de 4%, é possível observar a redução do *payback* para o investimento de um SGF para alimentar veículos elétricos, para as regiões Norte, Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste.

Figura 49 – Receita anual com 30% de subsídio e 4% de juros anual em função do período



Fonte: Elaboração própria

Para a condição da utilização de um banco de baterias independentes verifica-se a inviabilidade de implantação deste sistema para geração de energia elétrica mesmo obtendo um subsídio de 30%.

Para o sistema de geração e abastecimento diretamente nas baterias do carro elétrico, o período de retorno de investimento para uma taxa de juros de 4% é de aproximadamente 4,50 anos para a Região Nordeste, 5 anos para o Sul, Sudeste e Centro-Oeste e cerca de 8,50 anos para a Região Norte tornando SGF viável, visto que a vida útil para os módulos solares é de 25 anos.

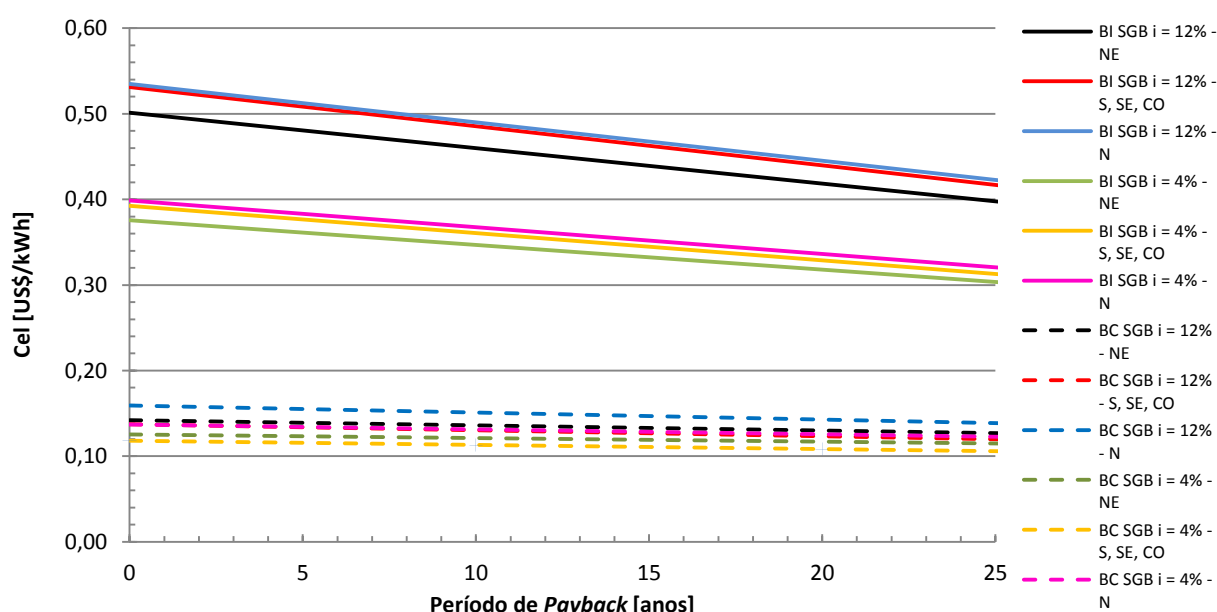
4.4 ANÁLISE ECONÔMICA DO SISTEMA A BIOGÁS

Para o cálculo dos custos do sistema de geração a biogás, utilizou-se o mesmo procedimento para o custo da eletricidade do sistema fotovoltaico.

A Figura 50 mostra o custo da eletricidade produzida pelo sistema biogás em duas condições, utilizando um banco de bateria independente (BI) e carregando diretamente a bateria do carro elétrico (BC).

Para cada situação foi considerada as taxas de juros de 4 e 12% praticadas pelo banco BNDES. Também foram considerados subsídios entre 10 e 50% disponibilizados pelos programas sociais do governo Solar e o Eólica, Biomassa, Cogeração e PCH (BNDES, 2016) que tem como objetivo a geração de energia elétrica, e foi considerado um tempo de amortização de 10 anos.

Figura 50 – Variação do custo de eletricidade produzida pelo SGB – *payback* 10 anos



Fonte: Elaboração própria

O número de horas de operação da usina biogás é igual ao número de horas de operação da usina fotovoltaica para efeito de comparação entre as duas tecnologias.

Para a situação apresentada na Figura 50, considerando que a usina produziu o biogás por 6 h diária O custo da eletricidade gerada pelo SGB sem subsídio e utilizando um BI ficou em torno US\$ 0,53/kWh, para uma taxa de juros de 12%. Quando se aplica um subsídio de 50%, o custo da eletricidade produzida diminui para US\$ 0,31/kWh, há uma redução de 42%

no custo. Na situação de utilizar BC, com uma taxa de juros de 12% o custo da eletricidade produzida é de US\$ 0,16/kWh quando não se tem ajuda de custo e de US\$ 0,12/kWh com um subsídio de 50%.

O custo de produção de eletricidade, diminui ao longo dos anos para o SGB, o custo relacionado ao investimento inicial na planta reduz com o tempo de acordo com a taxa de amortização. Este comportamento está relacionado ao fator de anuidade, que é dependente da taxa anual de juros considerada. Além disso, outro fator que influencia a distribuição das curvas de custos de produção é o período de operação anual da planta.

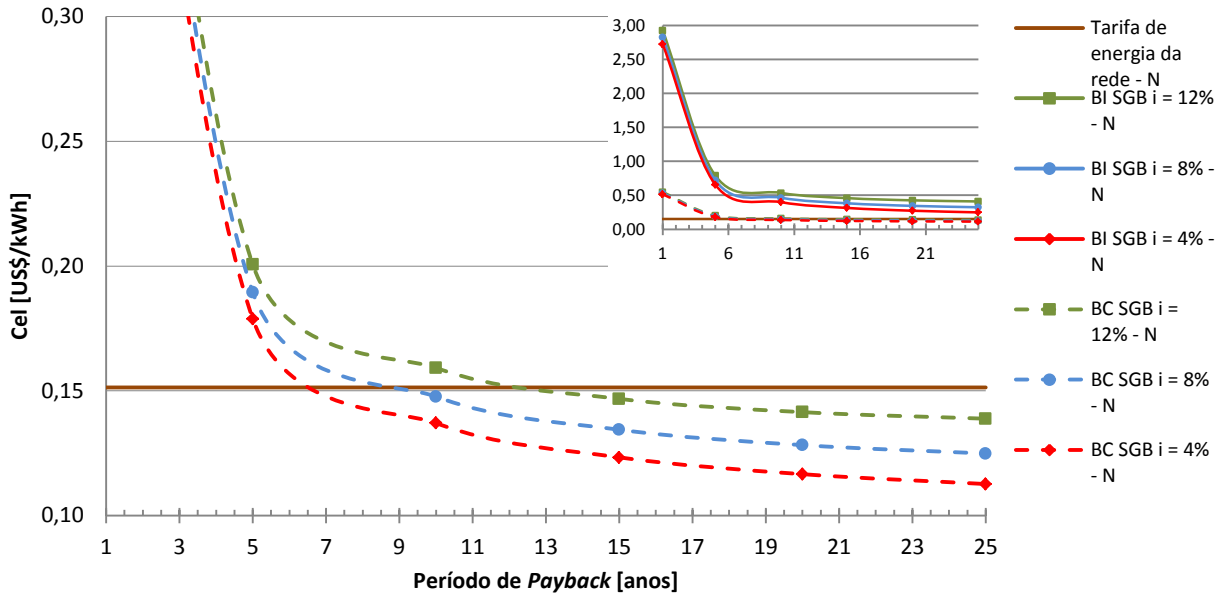
Devido à diferença de horas de irradiação solar no Brasil e do preço das diferentes companhias de distribuição de energia elétrica, será realizado uma análise para cada região do custo médio da eletricidade gerada em função do período de retorno do investimento (*payback*).

4.4.1 Custo da Energia Elétrica pelo SGB

O custo da produção de energia elétrica foi calculado com a variação da taxa de juros anual de 4%, 8% e 12%, tempo de operação e custo da eletricidade fornecida pelas concessionárias conforme a Tabela 28. As Figura 51 a Figura 53 apresentam o valor da energia elétrica do SGB comparado com o preço da eletricidade das companhias de energia elétrica das Regiões Norte, Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste. O custo da produção diminui ao longo dos anos devido à taxa de amortização, que está relacionado com o fator de anuidade que depende do juro considerado.

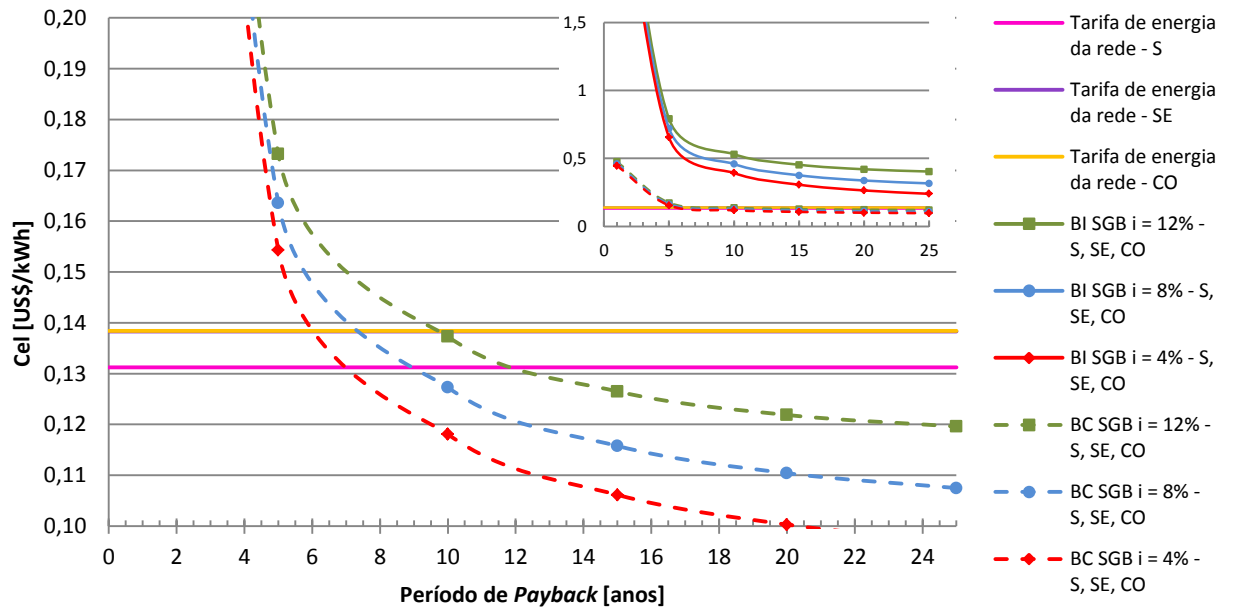
As Figura 51 a Figura 53 mostram que o custo da eletricidade gerada pelo SGB quando se utiliza um banco de baterias independentes (BI) sempre terá um valor superior a energia da concessionária. Quando o armazenamento de energia é realizado diretamente na bateria do carro elétrico, há viabilidade para o sistema a biogás como mostra a Tabela 31.

Figura 51 – Custo de eletricidade produzida pelo SGB – Região Norte



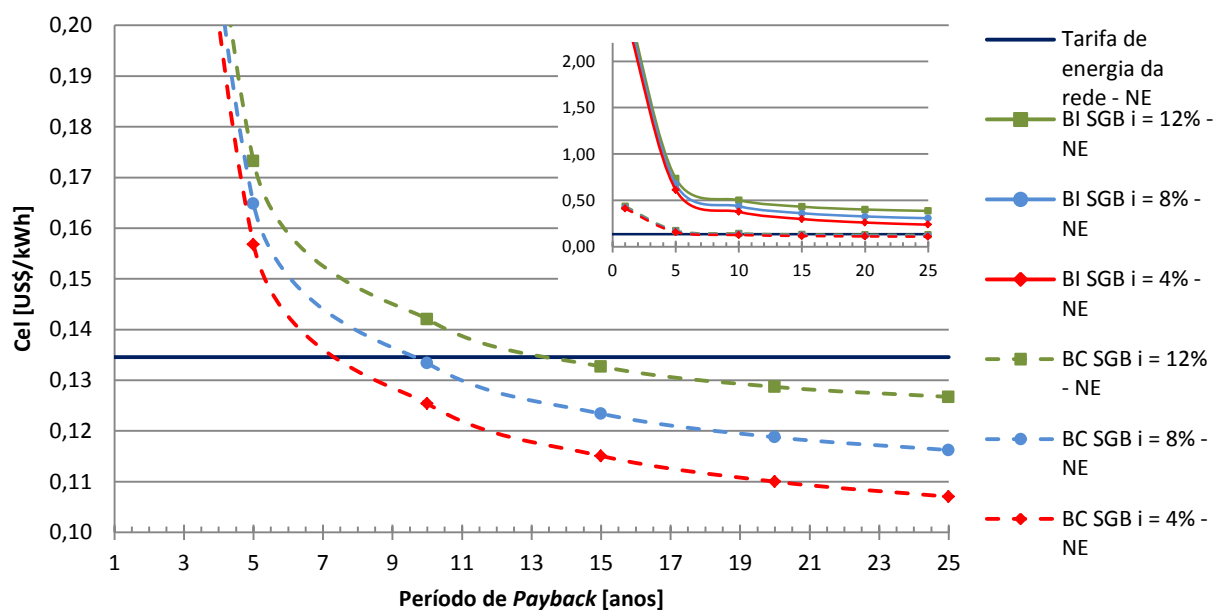
Fonte: Elaboração própria

Figura 52 – Custo de eletricidade produzida pelo SGB – Região Sul, Sudeste e Centro-Oeste



Fonte: Elaboração própria

Figura 53 – Custo de eletricidade produzida pelo SGB – Região Nordeste



Fonte: Elaboração própria

Tabela 31 – Payback do SGB

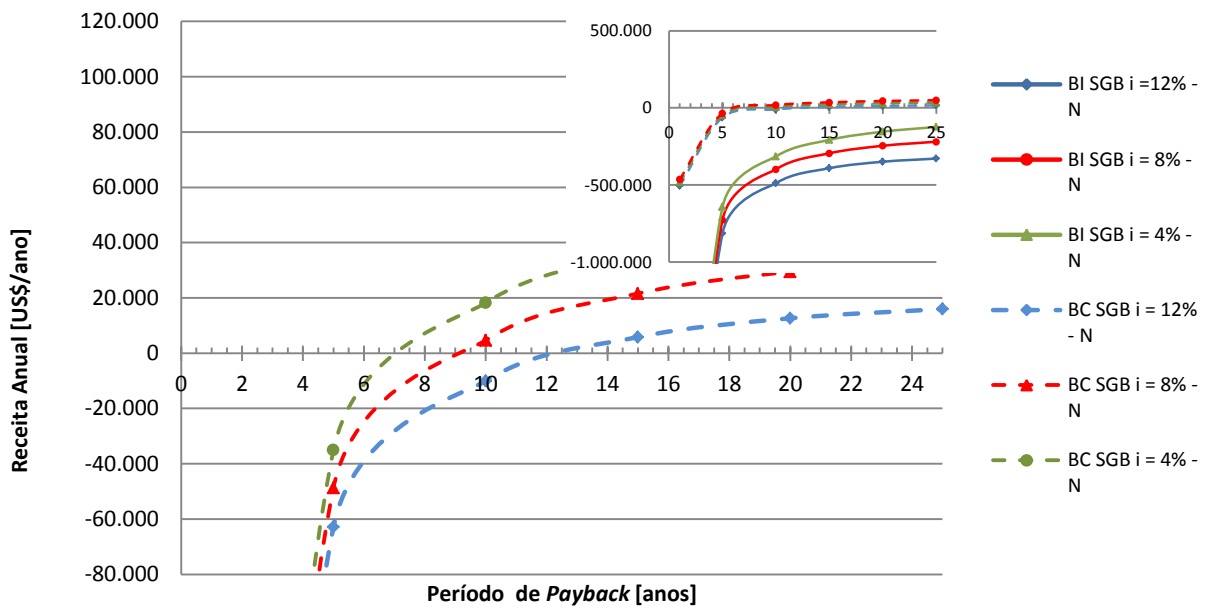
Regiões	Taxa de juros		
	4%	8%	12%
Norte	6	7,4	11,8
Sul	7,2	9,0	12,0
Sudeste	6,2	7,6	9,8
Centro Oeste	6,2	7,6	9,8
Nordeste	7,6	9,6	13,4

Fonte: Elaboração própria

As Figura 54 a Figura 58 mostram a receita anual esperada para um BI e para BC, em função do período de retorno do investimento e da variação da taxa de juros anual.

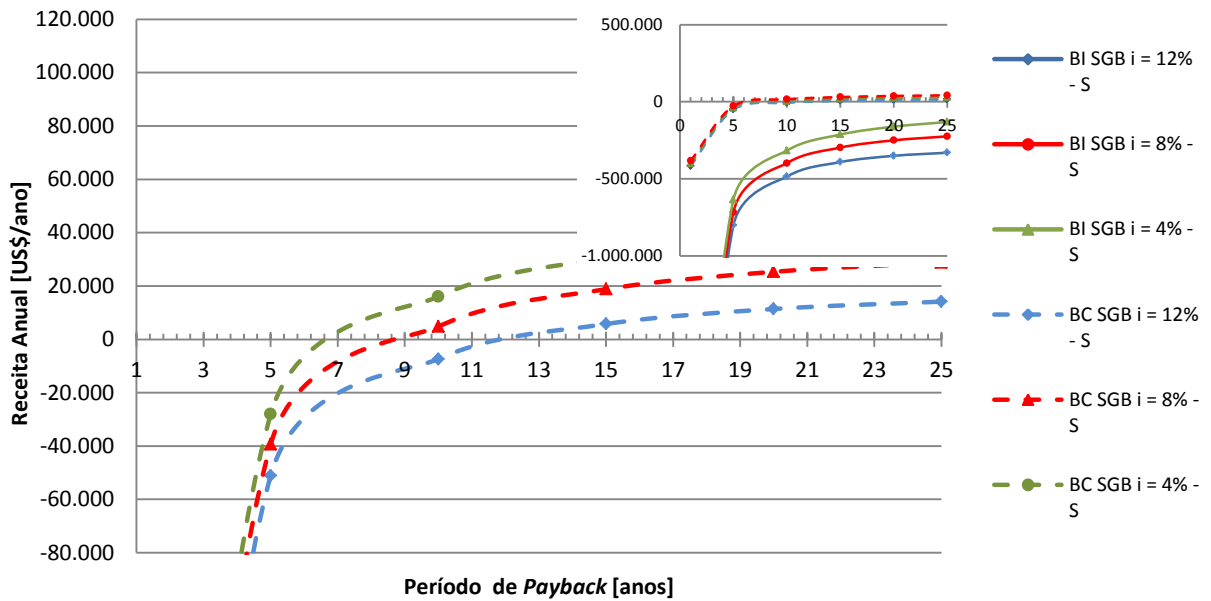
Quando se utiliza um banco de baterias independente, assim como no SGF, verifica-se a inviabilidade de implantação do sistema para geração de energia elétrica, isto ocorre porque o preço da bateria é muito alto, tornando o sistema muito oneroso.

Figura 54 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Norte



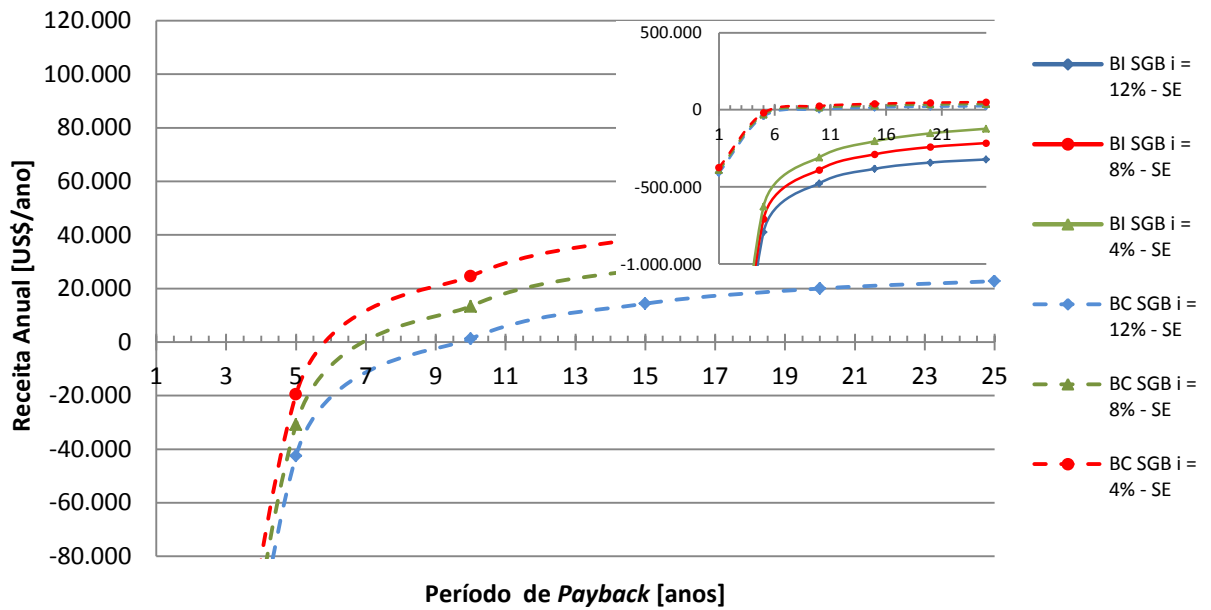
Fonte: Elaboração própria

Figura 55 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Sul



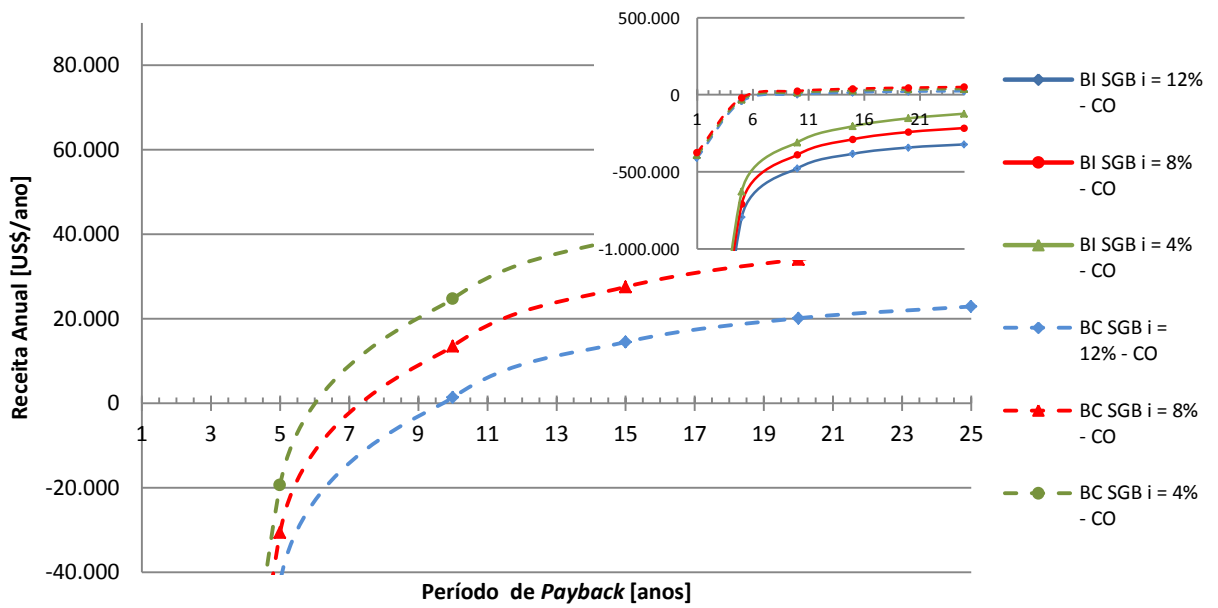
Fonte: Elaboração própria

Figura 56 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Sudeste

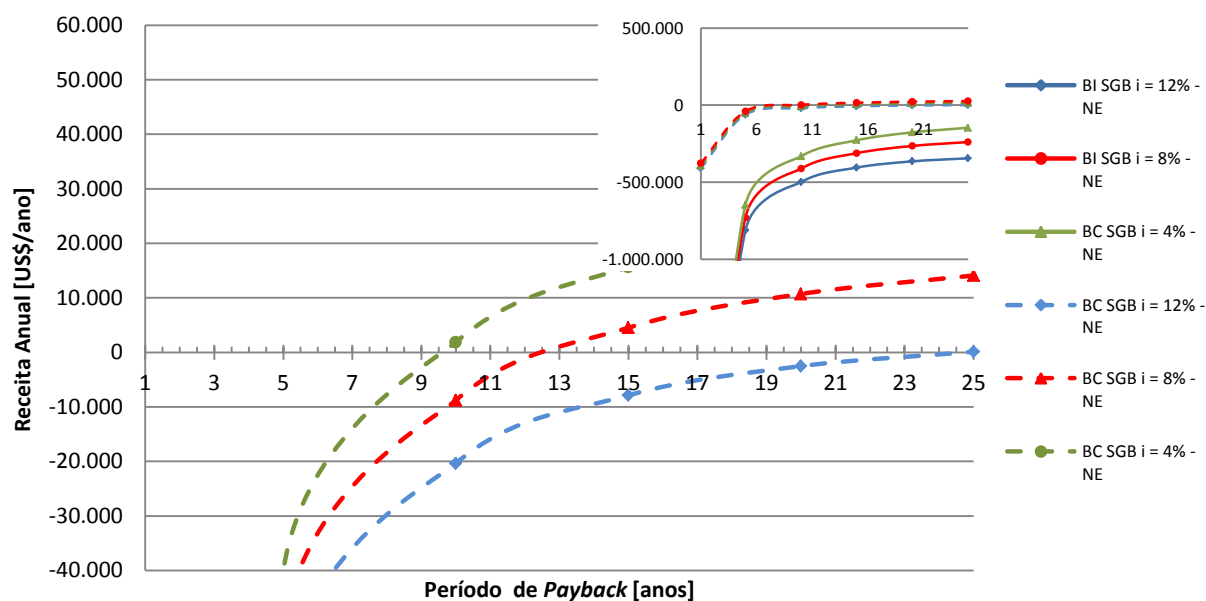


Fonte: Elaboração própria

Figura 57 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Centro-Oeste



Fonte: Elaboração própria

Figura 58 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Nordeste

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 32 mostra o período de retorno de investimento para uma taxa de juros de 4%, 8% e 12% para o sistema de geração e abastecimento direto das baterias do carro elétrico. Somente para a taxa de juros de 12% para a região nordeste não há viabilidade do sistema, para as demais regiões e taxas de juros há viabilidade, visto que o fabricante garante uma vida útil do motor de 20 anos.

Tabela 32 – Receita anual esperada do SGB em função do período de *payback* para as regiões

Regiões	Taxa de juros		
	4%	8%	12%
Norte	7,4	9,2	13
Sul	7,2	9	11,8
Sudeste	6,2	7,6	9,8
Centro Oeste	6,2	7,6	9,8
Nordeste	9,6	12,4	24,8

Fonte: Elaboração própria

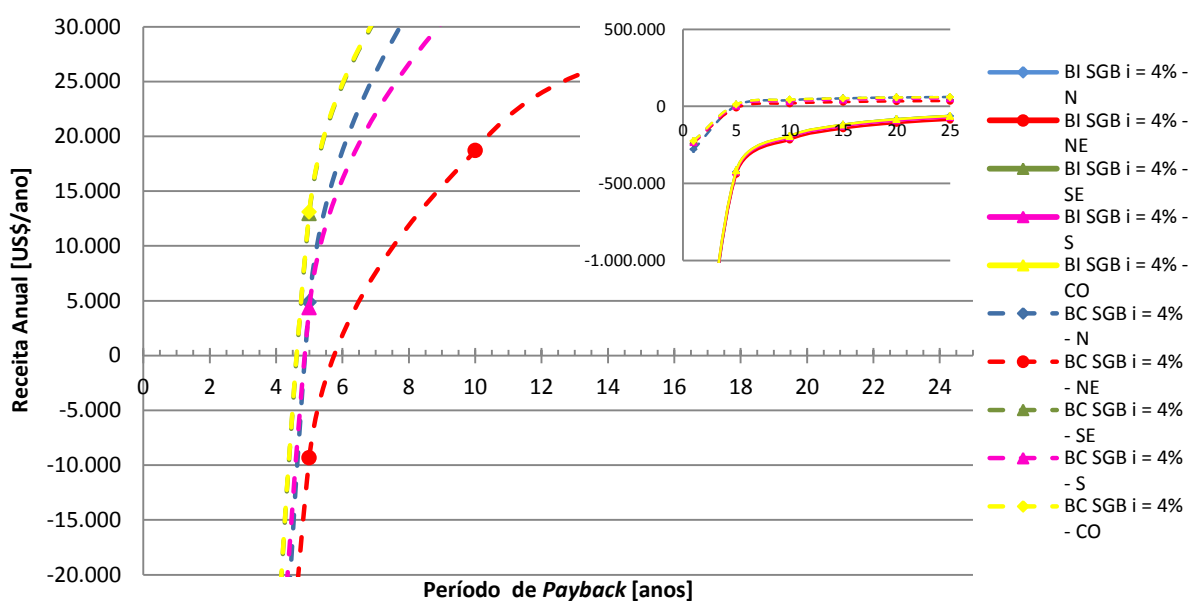
4.4.2 Receita Anual com Subsídio

A Figura 59 apresenta o período de retorno do capital investido considerando um subsídio de 30% disponibilizados pelos programas sociais do governo e uma taxa de juros de 4%, é possível observar a redução do *payback* para o investimento de um SGB para alimentar carros elétricos, para as regiões Norte, Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste.

Para a condição da utilização de um banco de baterias independentes verifica-se a inviabilidade de implantação deste sistema para geração.

Para o abastecimento direto nas baterias do carro elétrico, o período de retorno de investimento para uma taxa de juros de 4% é de aproximadamente 4,50 anos para a Região Sudeste e Centro-Oeste, 5 anos para as regiões Norte e Sul, e de 5,50 anos para a Região Nordeste tornando SGB viável, visto que a vida útil para o conjunto motor-gerador é de 20 anos.

Figura 59 – Receita anual com 30% de subsídio e 4% de juros anual em função do período de *payback* para o SGB



4.4.3 Sistema de Geração a Biogás x Sistema de Geração Fotovoltaico

O custo da produção da energia elétrica está diretamente relacionado as horas de operação da usina. Para o SGF, este tempo está relacionado a quantidade de horas diárias de

sol, não podendo gerar energia sem haver Sol, estando limitado a irradiação solar no local de operação da usina, que para este trabalho, utilizou a radiação média, segundo

Para o SGB este tempo de operação está ligado a vazão mássica do combustível do aterro sanitário e limitado por recomendação técnica do motor-gerador a 20 h diárias.

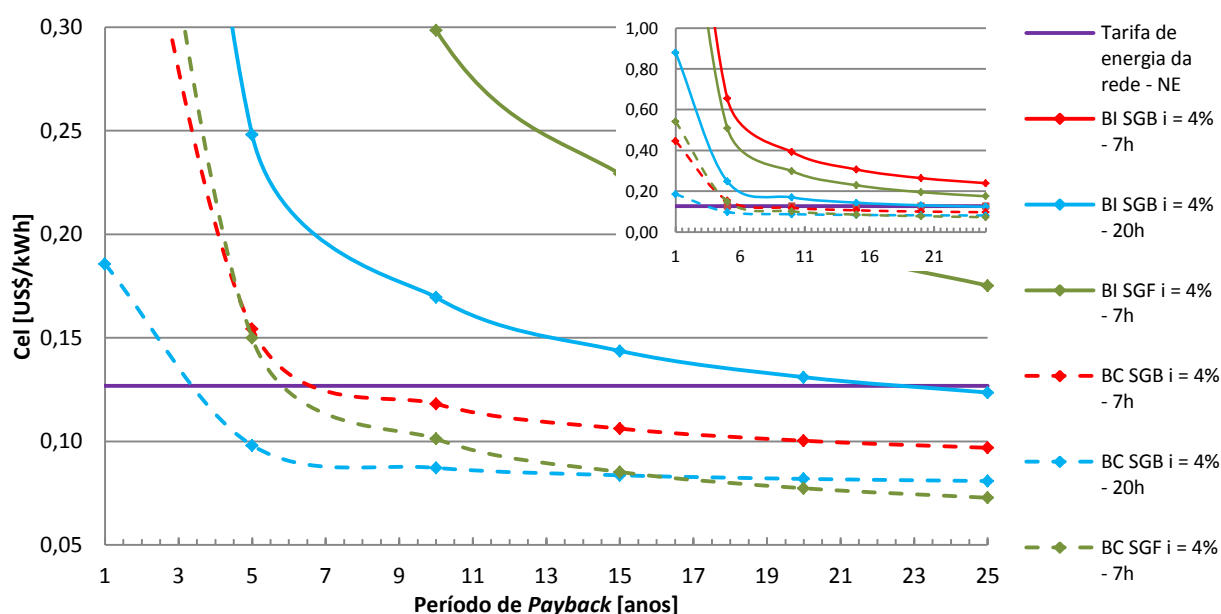
Para verificar o comportamento da curva de custo da geração de eletricidade, quando se utiliza um tempo maior de operação para o SGB, foi gerado o gráfico da Figura 60, utilizado como exemplo de comparação a Região Nordeste, onde há a maior incidência solar.

A Figura 60 mostra a comparação entre o SGB com 7 h e 20 h de operação e um SGF com 7 h de geração, com uma taxa anual de 4%.

No caso de se utilizar um BI, o SGB com funcionamento de 20 h diárias passa a ser viável a partir do 22º ano, fato que não acontece para 7 h e nem para o SGF.

Quando se utiliza a BC, o SGB com 20 h tem uma tarifa de geração de eletricidade menor do que a concessionária a partir do 4,5º ano, com 7 h passa a ser viável a partir do 6º ano, para o SGF o custo da energia é menor no 5,50º ano.

Figura 60 – Custo de eletricidade produzida pelo SGB e SGF



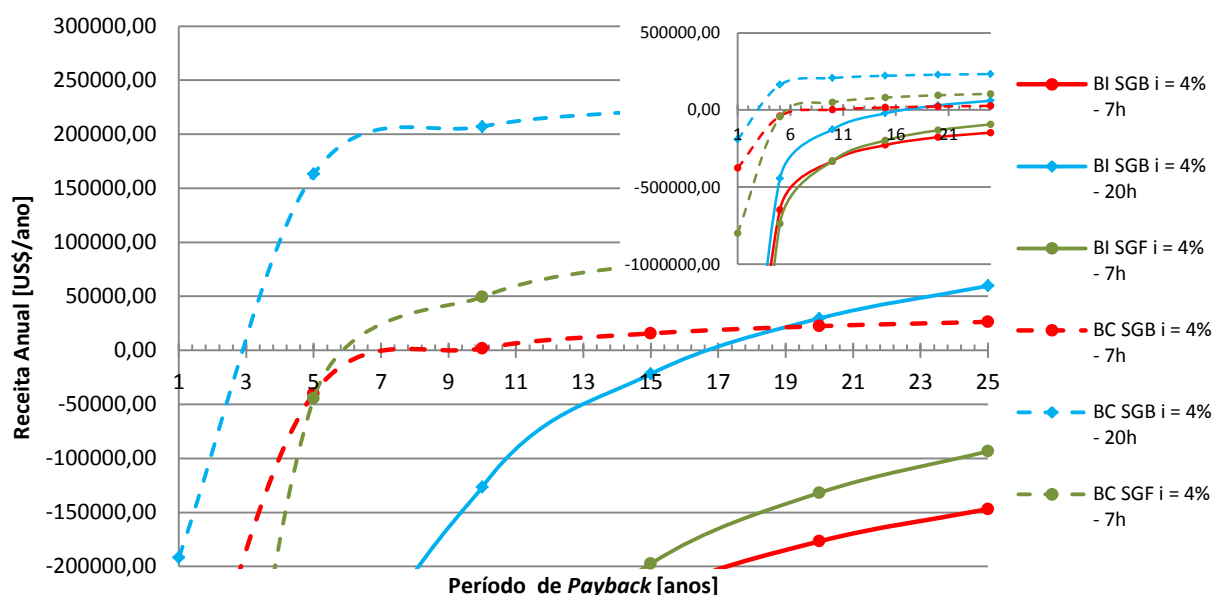
Fonte: Elaboração própria

A Figura 61 mostra a receita anual esperada para o banco de bateria independente e utilizando a própria bateria do carro elétrico, com um tempo de utilização do SGB de 7 h e 20 h de operação e do SGF com 7 h de irradiação solar.

Para a condição da utilização de um banco de baterias independente verifica-se a viabilidade da implantação somente para SGB com 20 h de operação, onde o *payback* ocorre com aproximadamente 17 anos.

Para o sistema de geração e abastecimento direto das baterias do carro elétrico, o período de retorno de investimento para o SGB com 20 h e 7 h de operação é de 3 e 10 anos respectivamente, para o SGF o *payback* acontece com 6 anos utilizando uma taxa de juros de 4%, havendo viabilidade para os dois sistemas de produção de energia elétrica, visto que a vida útil do grupo motor-gerador é de 20 anos e dos painéis fotovoltaicos é de 25 anos, informação dada pelos fabricantes.

Figura 61 – Receita anual esperada em função do período de *payback* – Região Nordeste



4.5 ANÁLISE ECONÔMICA PARA O CARRO ELÉTRICO

Utilizando o resultado do custo da eletricidade gerada por meio das fontes renováveis fotovoltaica (item 4.3) e biogás (item 4.4), será calculado o custo do quilômetro rodado.

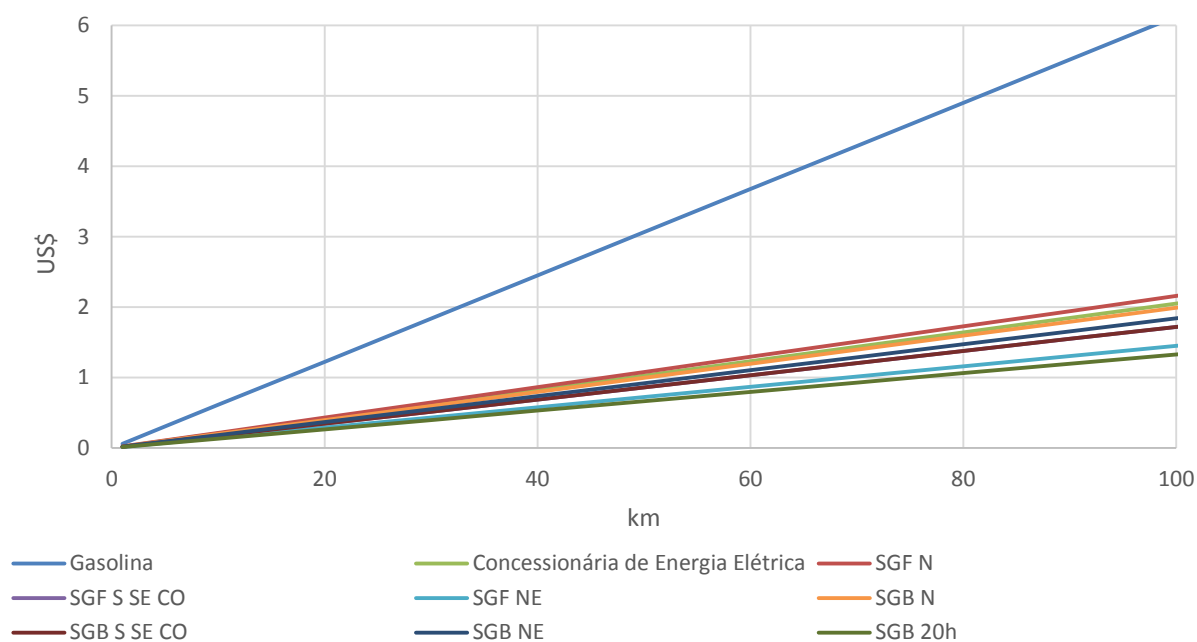
Para o carro elétrico, a análise econômica será através da energia gerada pelo SGF, SGB e utilizando a eletricidade da concessionária de energia brasileira. Será realizada uma comparação com o custo do quilômetro rodado de um automóvel movido a gasolina de mesma característica que o carro elétrico.

Para o estudo da viabilidade econômica associada ao custo do quilômetro rodado utilizando energia renovável, foram realizadas as seguintes considerações:

- Carro elétrico: Modelo Smart Elétrico da montadora Daimler;
- Carro MCI: Modelo Smart 1.0, motor de 3 cilindros em linha da montadora Daimler;
- Para os itens de custo em que a referência está em moeda nacional, utilizou-se a taxa de câmbio US\$ 1,00 = R\$ 3,27;
- Taxa anual de juros da geração de energia renovável pelos SGF e SGB: 4%
- Horas de operação dos SGF e SGB conforme a região do Brasil: 1825, 2190, 2555 e 7300 [horas/ano];
- Período de amortização ou *payback*: 8 anos;
- Consumo de combustível (gasolina) para o carro de MCI: 20,40 km/L (Smart Forfour 1.0 4P);
- Consumo de eletricidade para o carro de motor de motor elétrico: 0,15 kWh/km (Smart Forfour Elétrico 4P);
- Velocidade média de utilização: 100 km/h (NEFZ, ECE R101)
- Média da tarifa de energia elétrica no Brasil do setor comercial e de serviço: 0,14 US\$/kWh;
- Tarifa da energia elétrica para a Região Norte utilizando a energia renovável proveniente do: SGF: 0,14 US\$/kWh; SGB: 0,13 US\$/kWh;
- Tarifa da energia elétrica para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste utilizando a energia renovável proveniente do: SGF: 0,11 US\$/kWh; SGB: 0,11 US\$/kWh;
- Tarifa da energia elétrica para a Região Nordeste utilizando a energia renovável proveniente do: SGF: 0,10 US\$/kWh; SGB: 0,12 US\$/kWh;

A Figura 62 apresenta o custo do quilômetro rodado pelos dois tipos de carro. Quando se utiliza um veículo de motor de combustão interna o custo para uma distância percorrida de 100 km é de US\$ 6,13 e para o carro elétrico, percorrendo a mesma quilometragem, o valor varia de US\$ 1,33 a US\$ 2,15, conforme a fonte utilizada.

Figura 62 – Custo da distância percorrida do carro elétrico



Fonte: Elaboração própria

A Tabela 33 mostra o custo exato para cada fonte utilizada na alimentação das baterias do carro elétrico.

Tabela 33 – Custo de 100 km rodados para o MCI e elétrico em US\$

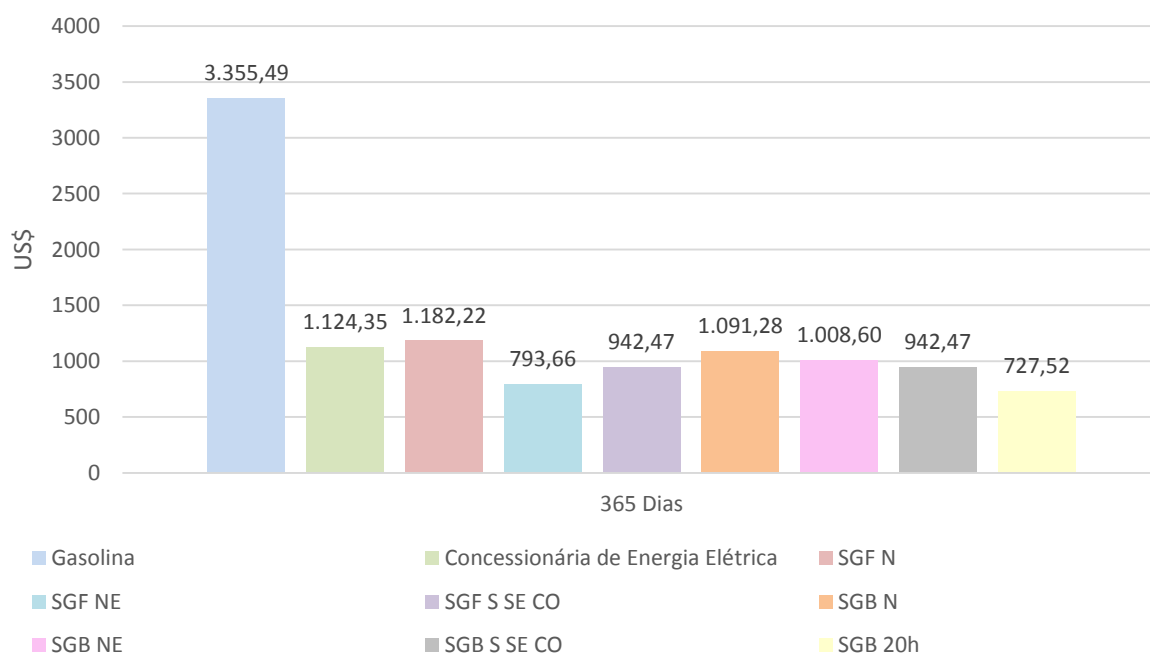
Fonte de Alimentação	Motor Utilizado [US\$ / 100 km]	
	MCI	Elétrico
Gasolina	6,13	-
Concessionária	-	2,05
SGF N	-	2,16
SGB N	-	1,99
SGF S, SE, CO	-	1,72
SGB S, SE, CO	-	1,72
SGF NE	-	1,45
SGB NE	-	1,72
SGB 20 h	-	1,33

Fonte: Elaboração própria

A Figura 63 mostra o custo de utilização do carro de MCI e elétrico, para 1 ano, com uma distância percorrida de 150 km por dia, referente à autonomia do carro elétrico.

O custo anual para o carro elétrico é 33,51% menor quando se utiliza a eletricidade fornecida pelas concessionárias de energia do Brasil, 29% inferior para a energia proveniente das usinas fotovoltaica e 30,22% mais baixo para a bioeletricidade em comparação ao carro de motor de combustão interna.

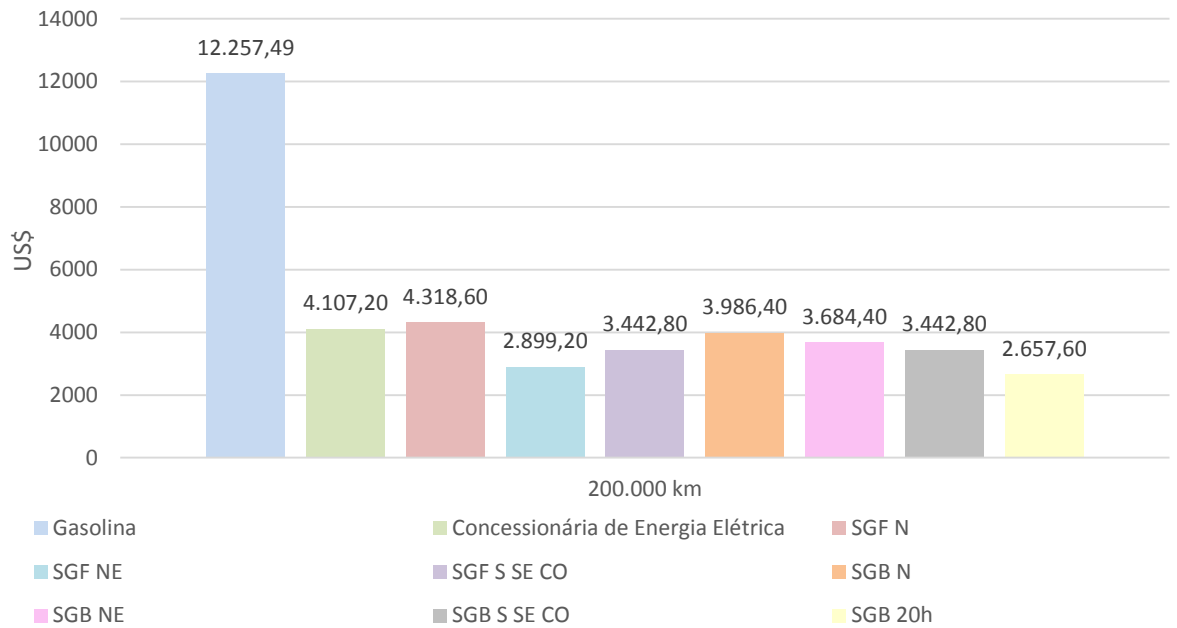
Figura 63 – Custo de utilização para autonomia de 150 km diário em 1 ano



Fonte: Elaboração própria

A Figura 64 mostra o custo de abastecimento considerando a vida útil de um motor de combustão interna que é de aproximadamente 200.000 km rodados. O custo de utilização de um carro MCI com as condições especificadas no início do item 4.5 é de US\$ 12.257,49, enquanto o carro elétrico gasta US\$ 4.107,00 se utilizar a energia da rede e se operar com a energia renovável para o abastecimento das baterias este valor diminui ainda mais, em média de US\$ 3.553,00 para o SGF e de US\$ 3.704,00 para o SGB.

Figura 64 – Custo de combustível para 200.000 km

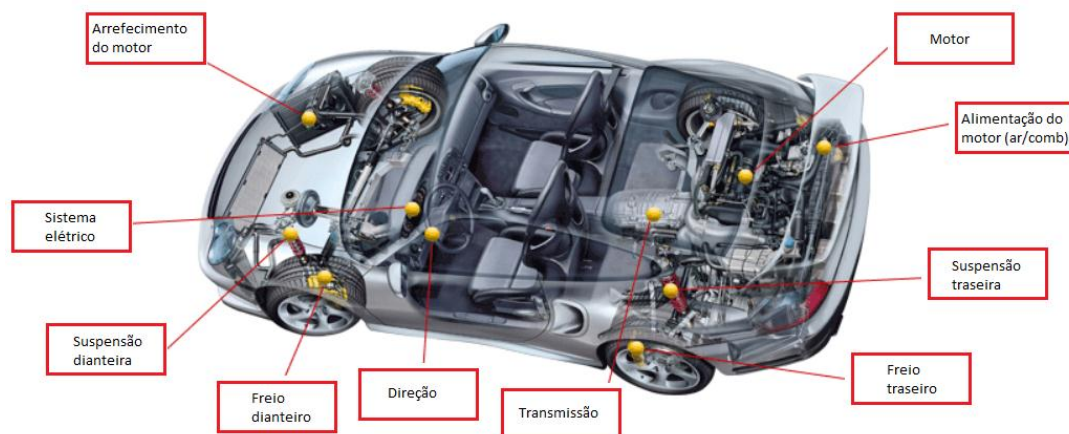


Fonte: Elaboração própria

Além do custo de utilização ser maior do carro MCI, o valor da manutenção também é superior ao do motor elétrico. Para efeito de comparação, a Figura 65 apresenta os principais itens de manutenção do carro MCI e, a

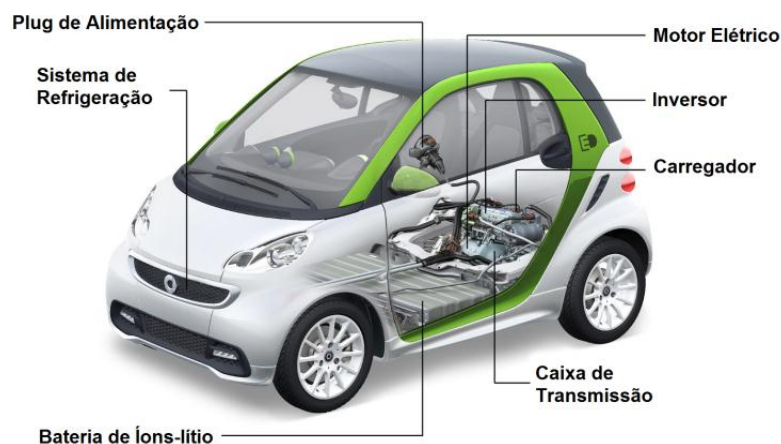
Figura 66, do carro elétrico.

Figura 65 – Itens de manutenção do carro MCI



Fonte: Motors (2018)

Figura 66 – Itens de manutenção do carro elétrico



Fonte: Daimler (2012)

4.6 ANÁLISE AMBIENTAL

4.6.1 Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) Associado à Usina Fotovoltaica

- **Painéis Fotovoltaicos**

Para este estudo foi escolhido o painel solar de marca Canadian Solar Inc., cujas características se encontram na Tabela 34.

Tabela 34 – Característica do painel solar

Descrição	Característica
Marca	Canadian Solar Inc.
Modelo	CS6P-260
Pais de Fabricação	China
Tecnologia	poli-Si
Peso	18 kg
Área	1,61 m ²
Potência	260 W
Eficiência	16,16 %

Fonte: Canadian (2009)

A Tabela 35 mostra o gasto em energia primária com a fabricação dos painéis fotovoltaicos, considerando o fator de emissão da China que é o principal país de fabricação dos PV e a fabricante Canadian, escolhida como modelo para a análise de emissões, que tem sede no país.

Tabela 35 – Energia primária utilizada nos painéis fotovoltaicos

Gasto energético	Valor de referência
Energia primária para a tecnologia Poli-Si [kWh / m ²]	1.083,33
Eficiência da rede [%]	35% ¹
Fator de emissão da China [kg CO _{2eq} / kWh]	0,92 ²
Energia primária para a construção por m ² [kg CO _{2eq} / m ²]	349,97

Fonte: Elaboração própria

Nota: ¹Alsema, E. A.; Nieuwlaar (2000); ²IPCC/TEAP, 2005; Brander *et al.* (2011)

A Tabela 36 mostra as emissões de CO_{2eq} relacionadas à construção dos painéis fotovoltaicos. Para cada tempo de utilização da usina há uma quantidade necessária diferente de PV e com isso áreas distintas de construção de células fotovoltaicas, gerando vários valores de emissões para cada capacidade de fornecimento de energia.

Tabela 36 – Emissão de CO_{2eq} relacionado a construção dos painéis fotovoltaicos

Emissões	Dimensionamento da Usina		
	5 horas	6 horas	7 horas
Quantidade de PV	3012	2508	2152
Área total [m ²]	4849,32	4037,88	3464,72
Emissão painéis [kg de CO _{2eq}]	1.695.256,65	1.411.604,86	1.211.233,51

Fonte: Elaboração própria

- **Transporte**

A Tabela 37 apresenta a emissão de CO_{2eq} relacionado ao transporte dos painéis fotovoltaicos da China, país de origem, à Guaratinguetá, SP, cidade destino de utilização. Foi considerado um trecho marítimo, do porto de Shanghai, na China até o porto de Santos, SP e um trecho rodoviário de Santos a Guaratinguetá. Para o cálculo relacionado ao transporte é necessário considerar o peso total dos PV.

Tabela 37 – Emissão de CO_{2eq} para o transporte dos PV

Emissões	Dimensionamento da Usina		
	5 horas	6 horas	7 horas
Peso Total dos PV [t]	54,22	45,14	38,74
Emissão Navio [kg de CO _{2eq}]	10.729,48	8.934,11	7.665,95
Emissão Caminhão [kg de CO _{2eq}]	705,07	587,09	503,75
Emissão Transporte [kg de CO _{2eq}]	11.434,54	9.521,19	8.169,70

Fonte: Elaboração própria

- **Total**

A Tabela 38 apresenta as emissões totais relacionados com a fabricação da usina fotovoltaica, para este trabalho foi considerado somente a fabricação dos painéis fotovoltaicos na China e o seu transporte até Guaratinguetá.

Tabela 38 – Emissões totais dos PV

Emissões	Dimensionamento da Usina		
	5 horas	6 horas	7 horas
Emissão Construção PV [kg CO _{2eq} / m ²]	1.695.256,65	1.411.604,86	1.211.233,51
Emissão Transporte PV [kg de CO _{2eq}]	11.434,54	9.521,19	8.169,70
Emissão Total para SGF [t de CO _{2eq}]	1.706,71	1.421,13	1.219,40

Fonte: Elaboração própria

Considerando que a vida útil dos painéis solares é de 25 anos, como informado pelos fabricantes, a Tabela 39 mostra a taxa de emissão de CO_{2eq} por ano de utilização em t de CO_{2eq}.

Tabela 39 – Emissões totais considerando o tempo de vida útil dos PV

Emissões	Dimensionamento da Usina		
	5 horas	6 horas	7 horas
Emissão Total para SGF [t de CO _{2eq}]	68,27	56,85	48,78

Fonte: Elaboração própria

4.6.2 Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) para o Biogás

As emissões dos poluentes CO₂, NO_x, MP e o CO₂ equivalente para a queima do biogás no motor de combustão interna são apresentados na Tabela 40, em kg por kg de combustível.

Tabela 40 – Emissões de CO₂, NO_x, SO₂, MP e CO_{2eq} da queima do biogás no MCI

Componentes	Combustão do biogás
CO ₂ [kgCO ₂ / kg _{comb}]	1,62
NO _x [kgNO _x / kg _{comb}]	1,04 x 10 ⁻³
SO ₂ [kgSO ₂ / kg _{comb}]	-
MP [kgMP / kg _{comb}]	1,10 x 10 ⁻⁴
CO _{2eq} [kgCO _{2eq} / kg _{comb}]	1,66

Fonte: Elaboração própria

Para cada dimensionamento da usina é utilizado uma vazão mássica de combustível, e isto reflete na quantidade de CO_{2eq} por kg. A Tabela 41 apresenta estas emissões.

Tabela 41 – Emissões de CO_{2eq} do biogás

Emissões	Dimensionamento da Usina		
	5 h	6 h	7 h
m _{comb} [kg/s]	0,18	0,11	0,13
CO _{2eq} [t de CO _{2eq}]	5,23	4,00	5,55

Fonte: Elaboração própria

4.6.3 Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}) para a Energia Elétrica

Utilizou-se as características técnicas do Smart Forfour elétrico, usado como exemplo neste estudo. Para o cálculo do dióxido de carbono equivalente para o carregamento das baterias foram consideradas as seguintes situações:

- Quilometragem de 150 km por dia, referente a autonomia do carro elétrico usado como exemplo neste estudo (Smart Forfour elétrico);
- Consumo de 0,15 kWh/km;
- Gasto energético para uma frota de 100 carro elétricos.

A Tabela 42 apresenta as emissões referente a rede elétrica para um ano de utilização do carro do carro elétrico percorrendo 150 km por dia.

Tabela 42 – Emissões de CO_{2eq} da rede elétrica

Emissão	Resultado
Fator de emissão (tCO _{2eq} .MWh-1)	0,0817 ¹
Consumo de energia elétrica [MWh.ano ⁻¹]	826,73
Emissão anual [tCO ₂]	67,54

Fonte: Elaboração própria

Nota: ¹MCTI (2017)

4.6.4 Dióxido de Carbono Equivalente (CO₂) para o Consumo de Gasolina

Para o cálculo do dióxido de carbono equivalente foram consideradas as seguintes situações:

- Quilometragem de 150 km por dia, referente a autonomia do carro elétrico usado como exemplo neste estudo (Smart Forfour elétrico);
- Consumo de 0,05 L/km, referente ao carro de combustão interna utilizado como exemplo neste estudo (Smart Forfour)
- Gasto de combustível para uma frota de 100 carros MCI.
- Utilizou-se a gasolina brasileira Premium que é composta de 75% de gasolina e 25% de etanol anidro, conforme Portaria n.º 75, de 5 de março de 2015 (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2015);

A Tabela 43 apresenta as emissões referentes a gasolina Premium para um ano de utilização do carro de MCI, rodando 150 km por dia.

Tabela 43 – Emissões de CO_{2eq} da gasolina Premium

Emissão	Resultado
Fator emissão da Gasolina [CO ₂ / l]	2,80 ¹
Fator emissão do etanol anidro [CO ₂ / l]	0,56 ¹
Gasolina [%]	75 ²
Etanol Anidro [%]	25 ²
Emissão da gasolina [kg de CO ₂ / l]	210
Emissão do etanol anidro [kg de CO ₂ / l]	14
Emissão total do combustível [kg de CO ₂ / l]	224
Consumo [l / ano]	735
Emissão anual [tCO₂]	164,64

Fonte: Elaboração própria

Nota: ¹Soares *et al.* (2009); ²Ministério da Agricultura (2015)

A Tabela 44 mostra as emissões de CO_{2eq} para um carro que utiliza 100% de etanol anidro; foi considerado um aumento no consumo de 30% em relação ao carro que utiliza a gasolina Premium.

Tabela 44 – Emissões de CO_{2eq} do etanol anidro

Emissão	Resultado
Fator emissão do etanol anidro [CO ₂ /L]	0,56 ¹
Etanol Anidro [%]	100
Emissões total do combustível [kg de CO ₂ /L]	56
Consumo [L/ano]	960
Emissão anual [tCO ₂]	53,76

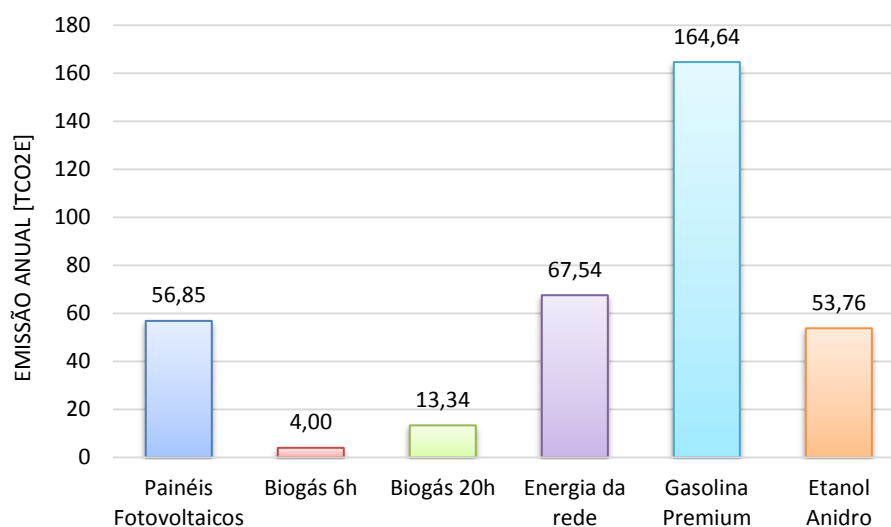
Fonte: Elaboração própria

Nota: ¹Soares *et al.* (2009)

4.6.5 Dióxido de Carbono Equivalente (CO_{2eq}): Carro Elétrico x Carro MCI

O resultado do gráfico da Figura 67 mostra a quantidade de CO_{2eq} emitido para cada tecnologia utilizando o carro com uma quilometragem diária de 150 km, referente à ao valor da autonomia do carro elétrico. Para a comparação foi utilizada a emissão do SGF e do SGB para o dimensionamento relativo a 6 horas de operação diária, que é o tempo necessário para o carregamento de carga total do carro elétrico.

A Figura 67 mostra que o biogás é a tecnologia menos poluente, com 4 tCO_{2eq} emitidas por ano. Isto ocorre devido ao ciclo de vida dos biocombustíveis provenientes de fonte renovável. O etanol é o segundo menos poluente, por ser produzido da cana-de-açúcar, uma fonte de energia também renovável. A geração de energia por meio dos painéis fotovoltaicos fica em terceiro lugar como fonte menos poluente, tendo uma emissão 189,60% menor do que a gasolina. A energia da rede para o fator de emissão do ano de 2016 é 143,80% menor que a gasolina, porém se houver novamente crise hídrica no Brasil e a geração de energia for por meio das termelétricas, que utiliza como base combustível fóssil, o valor de CO_{2eq} aumentará. A gasolina Premium é a mais poluente com 164,64 tCO_{2eq} emitidas em um ano.

Figura 67 – Emissão de CO_{2eq} [tCO_{2eq}] para 150 kW diário

Fonte: Elaboração própria

4.7 A ANÁLISE DO PASSIVO AMBIENTAL

4.7.1 Sistema Fotovoltaico

Os dados referentes aos valores energéticos da fabricação dos módulos fotovoltaicos, dos vidros e alumínio, foram obtidos de literaturas consultadas e, quando necessário, os valores foram recalculados para a necessidade do painel de 260 W e área adotada de 1,63 m². Os valores estão apresentados na Tabela 45.

Os pesos foram calculados a partir dos dados fornecidos dos catálogos dos fabricantes e a porcentagem citada de cada material de Olson *et al*, (2013),

Tabela 45 – Gasto energético dos componentes do sistema fotovoltaico

Material	Unidade	Gasto Energético [kWh]
Vidro	12,60 [kg]	178,16
Alumínio	2,00 [kg]	112,34
Silício grau metalúrgico	60 [células]	103,12
Célula de silício e painel fotovoltaico	60 [células]	810,79
Total		1204,30

Fonte: Rosa (2008); Wild-Scholten; Alsema (2005), modificado

A Tabela 46 apresenta a energia gerada por cada painel de 260 W durante 1 ano.

Tabela 46 – Energia gerada por painel durante 1 ano

Horas diárias de uso [horas]	Produção de energia no período de 1 ano [kWh]
5	456,25
6	547,5
7	638,75

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 47 apresenta o resultado do tempo de retorno de energia.

Tabela 47 – Cálculo do equilíbrio energético da produção do módulo fotovoltaico

Horas diárias de uso [horas]	Número de painéis	E_{utilizada} [kWh]	E_{economizada} [kWh]	EPBT [anos]
5	3012	3627351,60	1374225	2,64
6	2508	3020384,40	1373130	2,20
7	2152	2591653,60	1374590	1,89

Fonte: Elaboração própria

O EPBT para os painéis fotovoltaicos de 260 W e radiação solar de 5 a 7 horas diárias foi de aproximadamente 2 anos, um valor relativamente baixo atingindo 8% do tempo total de vida útil do painel que é de 25 anos.

4.7.2 A Bateria

Os dados referentes aos valores energéticos da fabricação da bateria de chumbo-ácido foram obtidos das literaturas consultadas e, quando necessário, os valores foram recalculados para a necessidade da mesma.

O gasto energético para fabricação de cada bateria foi calculado utilizando a Equação (45) do tópico 3.7.2. O peso de cada bateria é de 60 kg e o consumo total de fabricação de 13,89 kWh/kg (FILHO; ROSA, 2013), consumindo um GEB de 833,40 kWh.

A bateria tem como função o armazenamento de energia e, não produção. O gasto energético de fabricação estará associado como $E_{utilizada}$ na Equação (44).

A quantidade de bateria utilizadas nos veículos elétricos varia muito de modelo para modelo. Para este estudo será utilizado como modelo o Smart Forfour, que utiliza 96 células eletroquímicas, com um total de 16 baterias para armazenamento de energia.

4.7.3 Carro Elétrico

Com relação à distribuição de peso do veículo, foi considerado o valor citado por Pryshlakivsky e Searcy (2017), dos automóveis entre 1968 e 2013. A Tabela 48 mostra o gasto energético dos materiais utilizado nos automóveis.

Como os automóveis não produzem energia, o gasto energético da produção dos automóveis será considerado como $E_{utilizada}$ da Equação (44).

Tabela 48 – Energia para a produção de materiais

Material	[kWh/kg]	Peso [kg]	Energia de Produção [kWh]
Ferro fundido	7,51	142,70	1.071,68
Cobre	12,22	24,90	304,28
Chumbo	10,02	16,30	163,33
Aço	5,34	600,10	3.204,53
Aço reciclado	5,07	215,30	1.091,57
Alumínio	23,00	28,80	662,40
Alumínio reciclado	13,16	54,30	714,59
HDPE (polietileno de alta densidade)	23,19	30,20	700,34
PP (polipropileno)	23,76	71,30	1.694,09
PET (tereftalato de polietileno)	22,77	42,40	965,45
Borracha	5,94	30,10	178,79
Vidro	5,11	38,00	194,18
Pintura	19,62	11,80	231,52
Total		1306,2	11.176,74

Fonte: Pryshlakivsky; Searcy (2017)

A quantidade de bateria utilizada nos veículos elétricos varia muito de modelo para modelo. Para este estudo será utilizado como modelo o Smart Fortfour, que utiliza 96 células eletroquímicas, com um total de 16 baterias para armazenamento de energia.

4.7.4 Biogás

A Tabela 49 mostra o gasto energético dos materiais encontrados nos resíduos sólidos urbanos, separados por análise gravimétrica, ou seja, separação e pesagem de um elemento na forma mais pura possível.

Para os metais foi considerado o gasto energético para fabricação do cobre e bronze. Em resíduo de matéria orgânica a análise gravimétrica contabiliza a preparação das sobras de alimentos, sendo assim, a energia considerada para este item, foi o gasto energético da preparação do alimento.

Para o item outros, a análise gravimétrica contabiliza roupas, óleo, componentes de informática, etc. Portanto, para este item foi considerado uma média do gasto energético da produção de vários tecidos como, nylon e poliéster, produção da borracha e do óleo.

Tabela 49 – Gasto energético da fabricação dos materiais do RSU

Resíduos	Participação [%]	Energia [kWh/kg]
Aço	2,30	11,11
Alumínio	0,60	54,44
Papel, papelão e tetrapak	13,10	5,00
Plástico total	13,50	18,47
Vidro	2,40	8,33
Matéria orgânica	51,40	2,00
Outros	16,70	24,00
Total		

Fonte: Pinheiro (1996)

A Tabela 50 apresenta o resultado do tempo de retorno de energia para a geração de eletricidade através do SGB.

Tabela 50 – Cálculo do equilíbrio energético da produção do biogás

Horas diárias de uso [horas]	Eutilizada [kWh]	Eeconomizada [kWh]	EPBT [anos]
5	4.175.378,79	1.275.027,51	3,27
6	3.197.080,29	1.215.920,27	2,63
7	4.433.907,69	1.333.459,23	3,33

Fonte: Elaboração própria

O equilíbrio energético para a utilização de uma usina a biogás acontece com aproximadamente 3 anos, um bom resultado, visto que a vida útil de um motor-gerador é de 20 anos, o EPBT está representando em média 16% de todo tempo útil do motor.

4.7.5 Resultado do Passivo Ambiental para Diferentes Combinações

A Tabela 51 mostra o resultado do passivo ambiental para as 5 regiões do Brasil, com o tempo de utilização de cada usina de 5, 6 e 7 h/dia.

Tabela 51 – Passivo Ambiental

Combinação de utilização	Regiões do Brasil		
	Norte (5h)	Sul, Sudeste e Centro Oeste (6h)	Nordeste (7h)
Carro elétrico + SGB	3,30	2,65	3,35
Carro elétrico + SGF	2,56	2,14	1,83
Carro elétrico + SGB + SGF	2,90	2,37	2,57
Carro elétrico + BI + SGB + SGF	7,34	6,90	6,91

Fonte: Elaboração própria

Todas as combinações são ambientalmente viáveis, visto que o tempo de vida útil do motor gerador da usina a biogás é de 20 anos e dos módulos solares é de 25 anos, especificações fornecidas pelos fabricantes.

O período necessário de funcionamento da combinação 1, ou seja, o gasto energético para a produção do carro elétrico, do painel fotovoltaico, para a geração do biogás e ainda utilizando um banco de baterias independentes é de aproximadamente 7 anos para que ele possa amortizar seus gastos energéticos de produção. Com isto restariam 18 anos de vida ambientalmente útil para o módulo e 13 anos para o motor-gerador após atingir seu equilíbrio energético com a sua produção.

O valor de EPBT de aproximadamente 7 anos, para o tempo de utilização de 5, 6 e 7 horas diárias quando comparados com a vida útil do painel fotovoltaico e do grupo motor-gerador, pode ser considerado um valor razoável, atingindo 28% do tempo total de vida útil do módulo e 35% do motor dado como exemplo.

Quando passa-se a utilizar a bateria do carro elétrico (combinação 2), o gasto energético diminui para aproximadamente 2,50 anos para que se possa amortizar os gastos energéticos de produção. Com isto restariam 22,50 anos de vida ambientalmente útil para o módulo e 17,50 anos para o motor-gerador após atingir seu equilíbrio energético com relação aos gastos energéticos de sua produção.

O valor de EPBT de aproximadamente 2,50 anos, para o tempo de utilização de 5, 6 e 7 horas diárias quando comparados com a vida útil do painel fotovoltaico e do motor-gerador, pode ser considerado um valor baixo, atingindo 10% do tempo total de vida útil do módulo e 12,50% do motor dado como exemplo.

5 CONCLUSÕES

É possível concluir que o objetivo principal do estudo foi alcançado, uma vez que houve viabilidade econômica e ambiental utilizando energia gerada através de uma usina fotovoltaica e a biogás para todas as regiões analisadas (Norte, Sul, Sudeste, Centro Oeste e Nordeste) com a finalidade de alimentar carro elétrico. No caso de se utilizar um banco de baterias independentes para armazenar energia elétrica com a finalidade de carregar o carro posteriormente o sistema passa a ser inviável economicamente.

O dimensionamento das usinas é necessário para que não ocorra superdimensionamento, inviabilizando o projeto e para que também não haja insuficiência para suprir a demanda de energia elétrica necessária para alimentar os carros elétricos

O *payback* para o SGB é ligeiramente mais baixo que o SGF, quando as duas usinas operam na mesma situação, porém o motor da usina a biogás tem capacidade de ter um maior tempo de horas de operação. É necessário verificar qual tecnologia é mais viável para cada área, a disponibilidade diária de irradiação solar na região e se há separação adequada do resíduo sólido com a finalidade de gerar biocombustível.

O custo de utilização do carro de MCI é superior ao elétrico, há viabilidade no carregamento das baterias do carro elétrico ao utilizar a energia da rede e das usinas fotovoltaicas e biogás. O custo de gasolina para MCI é 198% superior a energia elétrica proveniente da rede e 256% mais caro do que a eletricidade fornecida pelas usinas fotovoltaica e biogás.

O biogás é a tecnologia menos poluente, com 4 tCO_{2eq} emitidas por ano com uma quilometragem diária de 150 km. Isto ocorre devido ao ciclo de vida dos biocombustíveis provenientes de fonte renovável. O etanol é o segundo menos poluente, por ser produzido a partir da cana-de-açúcar, uma fonte de energia também renovável. A geração de energia por meio dos painéis fotovoltaicos fica em terceiro lugar como fonte menos poluente, tendo uma emissão de 189,6% menor do que a gasolina. A energia da rede para o fator de emissão do ano de 2016 é 143,8% menor que a gasolina, porém se houver novamente crise hídrica no Brasil e a geração de energia for por meio das termelétricas, que utiliza como base combustível fóssil, o valor de CO_{2eq} aumentará. A gasolina Premium é a mais poluente com 164,64 tCO_{2eq} emitidas em um ano.

O retorno do passivo ambiental calculado é satisfatório utilizando a combinação: carro elétrico, banco de baterias independentes, SGF e SGB. Para a Região Norte é de aproximadamente 7,50 anos. Para as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste é de 7

anos. Isso equivale a aproximadamente 28% da vida útil dos módulos solares e 35% do motor-gerador, um valor muito adequado em comparação as outras tecnologias para fornecer energia elétrica para os automóveis.

É necessário, por parte do governo, um incentivo à produção dos carros elétricos, na redução de impostos e taxas de importação, assim como uma maior acessibilidade ao subsídio para geração de eletricidade por meio das tecnologias fotovoltaica e biogás, visto que essas tecnologias produzem energia elétrica mais barata e menos poluente em relação gasolina.

Finalmente, como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se:

- Análise do ciclo de vida do carro elétrico e da energia renovável utilizada para a geração de energia.
- Análise exergética das instalações geradoras propostas, e da fabricação do carro elétrico.
- Estudar diferentes instalações para outros tipos de veículos elétricos (de pequeno e grande porte).
- Uso de metodologia de otimização para escolher a melhor configuração de sistemas de geração de eletricidade, com aplicações a veículos elétricos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABDESHAHIAN, Peyman *et al.* Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 714–723, 2016.
- ADRIANO, Guilherme Luís Martins. *Análise de ciclo de vida da tecnologia fotovoltaica em Portugal*. 2015. 79 f. Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- ALSEMA, E. A.; NIEUWLAAR, E. Energy viability of photovoltaic systems. *Energy Policy*, v. 28, n. 14, p. 999–1010, 2000.
- ALSEMA, Erik A.; DE WILD-SCHOLTEN, Mariska J. Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production. 2006, Leuven: [s.n.], 2006. p. 1–10.
- AMORIM, Senador Eduardo. *Projeto de Lei do Senado nº 415, de 2012*. . Brasília – DF: [s.n.], 2012.
- AVILÉS, Sandra Milena Aragón; SOUZA, Teófilo Miguel De. *Sistemas Renovables con Energía Solar*. São Paulo – SP: Páginas & Letras Editora e Gráfica, 2011.
- BARREIRA, Paulo. *Biodigestores: Energia, Fertilidade e Saneamento para a Zona Rural*. 3. ed. São Paulo – SP: Ícone, 2011.
- BELAISSAOUI, Bouchra *et al.* Potentialities of a dense skin hollow fiber membrane contactor for biogas purification by pressurized water absorption. *Journal of Membrane Science*, v. 513, p. 236–249, 2016.
- BILOTTA, Patrícia; ROSS, Bárbara Zaniccotti Leite. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 21, n. 2, p. 275–282, 2016.
- BNDES. *BNDES divulga novas condições de financiamento à energia elétrica*. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-divulga-novas-condicoes-de-financiamento-a-energia-eletrica>>. Acesso em: 6 nov. 2017.
- BOEHM, Robert F. *Desing analysis of thermal systems*. USA: Editora John Weley & Sons, 1987.
- BOLOY, Ronney Arismel Mancebo *et al.* Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, n. 9, p. 5194–5201, 2011.
- BORGNAKKE, Claus; SONNTAG, Richard E. *Fundamentos da termodinâmica*. 8. ed. ed. São Paulo – SP: Edgard Blucher, 2013.
- BRAND, Martha Andreia *et al.* Influência das dimensões da biomassa estocada de Pinus taeda L. e Eucalyptus dunnii Maiden na qualidade do combustível para geração de energia. *Revista Árvore*, v. 38, n. 1, p. 175–183, 2014.
- BRANDER, Matthew *et al.* Electricity-specific emission factors for grid electricity. *Ecometrica*, p. 1–22, 2011.

BRASIL. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 ano base 2016*. Brasília – DF: EPE, 2017.

BRASIL. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. Brasília – DF: [s.n.], 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS_consultaspublicas.pdf>.

BRASIL, Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília – DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. v. III.

BRIZI, Federico *et al.* Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 38, p. 193–211, out. 2014.

BUENO, Jomar Esteves; SOUZA, Teófilo Miguel De. *Bombeamento de Água e Geração de Energia utilizando Cata-vento*. 2004, Campinas – SP: AGRENER GD 2004, 2004.

CAMPANI, Darci B.; SCHNEIDER, Paulo Smith; XAVIER, Fernando Matos. *Determinação Do Poder Calorífico Do Biogás Gerado Em Aterros Sanitários*. 2009, Buenos Aires, Argentina: [s.n.], 2009.

CANADIAN. *Datasheet – CanadianSolar – CS6P-260/265/270P*. . Canada: [s.n.], 2009

CARDU, Mircea; BAICA, Malvina. Regarding a global methodology to estimate the energyecologic efficiency of thermopower plants. *Energy Conversion and Management*, v. 40, n. 1, p. 71–87, 1999.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro De. *Emissões Relativas De Poluentes Do Transporte Motorizado De Passageiros Nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros*. Ipea. Brasília – DF: [s.n.], 2011. Disponível em: <http://www.en.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf>.

CASOTTI, Bruna Pretti; GOLDENSTEIN, Marcelo. *Panorama Do Setor Automotivo : As Mudanças Estruturais Da Indústria E As Perspectivas Para O Brasil*. *BNDES Setorial*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008. v. 28. p. 147–188.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro De; FERREIRA, Tiago Toledo. *Veículos elétricos : aspectos básicos , perspectivas e oportunidades*. *BNDES Setorial* 32. [S.l: s.n.], 2010. p. 267–310.

CATERPILLAR. *Resumo de dados de catálogo da série de geradores a gás – CAT*. CATERPILLAR. Disponível. . [S.l: s.n.], 2013.

CETESB. *BIOGÁS Sistema*. . São Paulo – SP: [s.n.], 2018. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/biogas/>>.

CO2 EARTH. *CO2 Earth*. Disponível em: <<https://www.co2.earth/>>. Acesso em: 7 jan. 2018.

COLOMBAROLI, Tulio Stefani. *Análise técnica, econômica e ecológica do uso de biogás em célula a combustível óxido sólido (SOFC)*. 2015. 79 f. Universidade Estadual Paulista, 2015.

COTANA, Franco *et al.* Lignocellulosic Biomass Feeding in Biogas Pathway: State of the Art and Plant Layouts. *Energy Procedia*, v. 81, p. 1231–1237, dez. 2015.

CRESESB. *Energia solar princípios e aplicações. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito*. [S.l: s.n.], 2006.

D`AVILA, Carlos Eduardo Presa *et al.* *Estudo de um motor CC brushless aplicado no acionamento de um carro elétrico de pequeno porte*. [S.l: s.n.], 2011. v. 12.

DAIMLER. *Dados técnicos Smart*. Disponível em: <<https://www.smart.com/pt/pt/index/smart-forfour-electric-drive-453.html#?product=forfour>>. Acesso em: 6 jan. 2018.

DAIMLER. *Manual Mobilidade urbana*. . Alemanha: [s.n.], 2012.

DE CASTRO VILLELA, Iraídes Aparecida; SILVEIRA, José Luz. Ecological efficiency in thermoelectric power plants. *Applied Thermal Engineering*, v. 27, n. 5–6, p. 840–847, 2007.

DOMINGUES, José Marcos *et al.* Tributação, Políticas Públicas e Eficiência Energética: Caso do Veículo Elétrico. *Revista Tributária e de Finanças Públicas*, v. 107, p. 207–221, 2012.

EGBUE, Ona; LONG, Suzanna; SAMARANAYAKE, V. A. Mass deployment of sustainable transportation: evaluation of factors that influence electric vehicle adoption. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 19, n. 7, p. 1927–1939, 2017.

EHSANI, Mehrdad *et al.* *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles 2nd. Edition*. Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2005.

EHYAEI, M.A. *et al.* Feasibility study of applying internal combustion engines in residential buildings by exergy, economic and environmental analysis. *Energy and Buildings*, v. 55, p. 405–413, dez. 2012.

EIA, U.S. Energy Information Administration. Transportation Sector Energy Consumption. *International Energy Outlook*. [S.l: s.n.], 2016. v. 2016. p. 127–137.

ELFASAKHANY, Ashraf. Engine performance evaluation and pollutant emissions analysis using ternary bio-ethanol e iso-butanol e gasoline blends in gasoline engines. *Journal of Cleaner Production*, v. 139, p. 1057–1067, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014*. Rio de Janeiro – RJ: [s.n.], 2015.

EPE. *Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. , RECURSOS ENERGÉTICOS.*, n° NOTA TÉCNICA DEN 06/08. Rio de Janeiro – RJ: [s.n.], 2008.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional, Relatório Síntese: Ano base 2016*. EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro – RJ: [s.n.], 2017a.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016*. Rio de Janeiro – RJ: EPE, 2017b.

ERBER, Pietro. Automóveis Elétricos a Bateria uma Política para sua Utilização no Brasil. *Estratégia de Implantação do Carro Elétrico no Brasil*. Rio de Janeiro – RJ: [s.n.], 2010. p. 87–116.

FERREIRA, Maria Julita Guerra. *Inserção da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil*. 1993. 168 f. Universidade de São Paulo, 1993.

FILHO, Geraldo Lúcio Tiago; ROSA, Carlos Adriano. Análise da Capacidade de Amortização dos Passivos Energéticos e Ambientais dos Painéis Fotovoltaicos. *Revista Brasileira de Energia*, v. 19, p. 171–194, 2013.

FORD. *A História da FORD Company*. Disponível em: <<https://www.ford.com.br/sobre-a-ford/historia/>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

FTHENAKIS, VASILIS M.; KIM, HYUNG CHUL; ALSEMA, ERIK. Emissions from Photovoltaic Life Cycles. *ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY*, v. 42, n. 6, p. 2168–2174, 2008.

GALDINO, Marco Antonio. Análise de custos históricos de sistemas fotovoltaicos no Brasil. 2012, São Paulo – SP: [s.n.], 2012.

GARCIA, Juan Carlos Claros; SPERLING, Eduardo Von. *Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais. Engenharia Sanitaria e Ambiental*. [S.l: s.n.], 2010.

HAVE, Brian. A Second Life for Marketers? *Forrester Trends*, v. May 1, n. 7, p. 1–11, 2007.

HØYER, Karl Georg. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008.

ICLEI. *Manual para Aproveitamento de Biogás*. São Paulo – SP: [s.n.], 2009. v. 1.

IPCC. *CLIMATE CHANGE 2014 Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers and Technical Summary*. Cambridge: [s.n.], 2015.

IPCC/TEAP. *Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System*. UK: Cambridge University Press, 2005.

J.T. HOUGHTON *et al.* *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. New York – USA: IPCC, 2001.

JASOLAR. *Datasheet – JA Solar – JAP6-265*. . China: [s.n.] , 2015

JR., João Andrade de Carvalho; LACAVA, Pedro Teixeira. *Emissões em Processos de Combustão*. São Paulo – SP: Editora Unesp, 2003.

KALDELLIS, J. K. *et al.* Optimum wind- and photovoltaic-based stand-alone systems on the basis of life cycle energy analysis. *Energy Policy*, v. 50, p. 345–357, 2012.

KUMAR, K *et al.* A review on production of biogas, fundamentals, applications & its recent enhancing techniques. *Chemical Engineering*, v. 57, p. 14073–14079, 2013.

KUMAR, Manish *et al.* Carbon dioxide capture, storage and production of biofuel and biomaterials by bacteria: A review. *Bioresource Technology*, v. 247, p. 1059–1068, 2018.

KUMAR, Manish; GUPTA, Asmita; THAKUR, Indu Shekhar. Carbon dioxide sequestration by chemolithotrophic oleaginous bacteria for production and optimization of polyhydroxyalkanoate. *Bioresource Technology*, v. 213, p. 249–256, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.038>>.

KUNTE, Benjamin. *Thermodynamic , Economic and Emissions Analysis of a Micro Gas Turbine Cogeneration System Operating on Biofuels*. 2015. 101 f. Universidade Estadual Paulista, 2015.

LACHE, Rod *et al.* Electric Cars : Plugged In Batteries must be included. *Deutsche Bank FITT Research*, n. June, p. 52 pp., 2008.

LANDIM, Ana Luiza Pinto Ferreira; AZEVEDO, Lizandra Prado De. O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável. *BNDES Setorial*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008. p. 59–100.

LARMINIE, James; LOWRY, John. *Electric Vehicle Technology Explained*. [S.l: s.n.], 2012.

LEIAUT, DICAS. *ASSOCIAÇÃO DE PAINÉIS SOLARES*. Disponível em: <<https://www.leiautdicas.com/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

LEITMAN, Seth; BRANT, Bob. *Build Your Own Electric Vehicle*. Second ed. New York Chicago San Francisco: McGraw-Hill, 2009.

LIMA, João Emmanuel Cordeiro. Os desafios para criação do mercado de carros elétricos no Brasil sob uma perspectiva jurídica. *Migalhas*, p. 5, set. 2017.

LIMA, Rodolfo M. *et al.* Spatially distributed potential of landfill biogas production and electric power generation in Brazil. *Waste Management*, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X1730956X>>.

LIU, Liansheng *et al.* A review on electric vehicles interacting with renewable energy in smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 648–661, nov. 2015.

MANGAN, Suzi Dilara; ORAL, Gül Koçlar. Energy and Cost Analyses of Solar Photovoltaic (PV) Microgeneration Systems for Different Climate Zones of Turkey. *Energy and Power Engineering*, n. March, p. 117–129, 2016.

MANOËL REKINGER, Frauke Thies. *Global Market Outlook For Solar Power / 2015 – 2019*. Bélgica: OECD Publishing, 2014. (Key World Energy Statistics).

MANYI-LOH, Christy E. *et al.* Microbial anaerobic digestion (bio-digesters) as an approach to the decontamination of animal wastes in pollution control and the generation of renewable energy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 10, n. 9, p. 4390–4417, 2013.

MARQUES, Flávio De Oliveira; MEIRELLES, Luiz Antonio. *Tendências da Reciclagem de materiais na indústria automobilística*. Rio de Janeiro – RJ: CETEM / MCT, 2007.

MATSAKAS, Leonidas *et al.* Green conversion of municipal solid wastes into fuels and chemicals. *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 26, p. 69–83, 2017.

MCLAREN, Joyce *et al.* Emissions Associated with Electric Vehicle Charging : Impact of Electricity Generation Mix , Charging Infrastructure Availability , and Vehicle Type Emissions Associated with Electric Vehicle Charging : Impact of Electricity Generation Mix , Charging Infr. n. April, 2016.

MCTI. Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil. *Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação*, p. 168, 2013.

MCTI, Ministério de Ciência Tecnologia e Inovação. *Fatores de Emissão de CO2 do Sistema Interligado Nacional do Brasil*. . [S.l: s.n.], 2017.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, Pecuária e Abastecimento. *Diário Oficial da União*. , n° ANO CLII N° 44 Brasília. Brasília – DF: [s.n.], 2015.

MOTORS, Save. *Como está seu carro*. Disponível em: <http://www.savemotors.com.br/site/internas/com_seucarroagora_resultado.php>. Acesso em: 7 jan. 2018.

MULVANEY, Dustin. Solar’s green dilemma. *IEEE Spectrum*, v. 51, n. 9, p. 30–33, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6882984/>>.

NASCIMENTO, Rodrigo. *Energia Solar No Brasil: Situação E Perspectivas*. . Brasília – DF: [s.n.], 2017.

NIEUWLAAR, Evert; ALSEMA, Erik. *Environmental aspects of PV power systems. IEA PVPS Task*. Utrecht, The Netherlands: [s.n.], 1997.

ODFJELL. *Odfjell cares ; environmental initiatives AT Odfjell*. . [S.l: s.n.], 2015.

OF, Future; ENERGY; AN. MIT Study on the Future of Solar Energy. *MIT Study on the Future of Solar Energy*. [S.l: s.n.], 2015. p. 3–6.

OICA. *World Vehicles in Use -All Vehicles*. . [S.l: s.n.], 2016. Disponível em: <http://www.oica.net/wp-content/uploads//Total_in-use-All-Vehicles.pdf>.

OLSON, Carol *et al.* Current and Future Priorities For Mass and Material in Silicon Pv Module Recycling. 2013, Paris: [s.n.], 2013. p. 4629–4633.

OPIYO, Nicholas. Energy storage systems for PV-based communal grids. *Journal of Energy Storage*, v. 7, p. 1–12, 2016.

OSBORNE, Mark. *Planned solar manufacturing capacity expansions bigger than expected in IH 2017*. . [S.l: s.n.], 2017.

PAVAN, Margareth De Cassia Oliveira. Geração de Energia a partir de Resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil. p. 187, 2010.

PENG, Jinqing; LU, Lin; YANG, Hongxing. Review on life cycle assessment of energy

payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, n. March 2013, p. 255–274, 2013.

PEREIRA, Fabiano. Clássicos: Grandes Brasileiros: Gurgel Itaipu. *Quatro Rodas*, abr. 2007.

PÉREZ, Nestor Proenza *et al.* Biomass gasification for combined heat and power generation in the Cuban context: Energetic and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, v. 90, p. 1–12, 2015.

PESQUISA, Empresa De; EPE, Energética. Balanço Energético Nacional Relatório Síntese | ano base 2015 |. 2016.

PINHEIRO, Paulo César da Costa. Aspectos da conservação de energia no setor automóveis e auto-peças. 1996, Belo Horizonte – MG: [s.n.], 1996. p. 1–17.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro – RJ: CEPTEL – CRESESB Edição, 2014.

PITTORESQUE, L A France. 29 avril 1899 : La Jamais contente franchit les 100km/h et établit un nouveau record de vitesse. *LA FRANCE PITTORESQUE*, 2016.

PRYSHLAKIVSKY, Jonathan; SEARCY, Cory. Uncertainty analysis focusing on the variance of energy intensity of vehicle materials. *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 1165–1182, fev. 2017.

REDDY, K.S.; ARAVINDHAN, S.; MALLICK, Tapas K. Investigation of performance and emission characteristics of a biogas fuelled electric generator integrated with solar concentrated photovoltaic system. *Renewable Energy*, v. 92, p. 233–243, jul. 2016.

REIS, Luiz Octávio Mattos Dos. *Lógica Fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica: eólica, fotovoltaica e biogás*. 2002. 181 f. Universidade Estadual Paulista, 2002.

ROSA, Carlos Adriano. *Estudo do Balanço Energético e do Passivo Ambiental Resultante da Fabricação do Módulo Fotovoltaico*. 2008. 248 f. Universidade Federal de Itajubá, 2008.

RÜTHER, Ricardo. *Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*. [S.l: s.n.], 2004.

SALES, Leandro da Silva. *Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas de Cogeração para Atender a Demandas Elétricas, Térmicas e de Refrigeração em Aplicações de Pequeno e Médio Porte*. 2008. 318 f. Universidade Federal de Itajubá, 2008.

SAMPAIO, Priscila Gonçalves Vasconcelos; GONZÁLEZ, Mario Orestes Aguirre. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, n. March, p. 590–601, 2017.

SANQUETTA, Carlos Roberto *et al.* Carbon Dioxide Emissions from Electrical Energy Use in Parana State During 2010-2014. *BIOFIX Scientific Journa*, v. 2, n. 1, p. 1–6, 2017.

SANTANA, Eduardo *et al.* *Padrões de qualidade do ar Experiência – Experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia*. São Paulo – SP: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012.

SANTOS, Izabel Aparecida Dos. *Emissões de Gases de Efeito Estufa (Gee) Associadas À Bovinocultura: O Valor Fertilizante do Esterco e o Impacto da Biodigestão Anaeróbia*. 2012. 73 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2012.

SCHMELA, Michael. *Global market outlook For Solar Power / 2016 – 2020*. Munich: SolarPower Europe, 2016.

SILVA, Estevam Prado Barbosa. *Veículos Verdes*. v. 83, p. 6–8, 2013.

SILVA, Richard; AGOSTINHO, F. *Eficiência global dos sistemas rodoviário e ferroviário de transporte da soja Brasileira para exportação*. 2017, São Paulo – SP: [s.n.], 2017.

SILVEIRA, José Luz. *Cogeração Disseminada para Pequenos Usuários: Estudo de Casos para o Setor Terciário*. 1994. 216 f. Universidade Estadual de Campinas, 1994.

SILVEIRA, Jose Luz; TUNA, Celso Eduardo; LAMAS, Wendell de Queiroz. 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, abr. 2013.

SINDIPEÇAS; ABIPEÇAS. *Relatório da Frota Circulante de 2016*. p. 5, 2017.

SKOREK-OSIKOWSKA, Anna *et al.* The influence of the size of the CHP (combined heat and power) system integrated with a biomass fueled gas generator and piston engine on the thermodynamic and economic effectiveness of electricity and heat generation. *Energy*, v. 67, p. 328–340, abr. 2014.

SOARES, Luís Henrique de Barros *et al.* *Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil*. *Circular técnica*. Seropédica – RJ: [s.n.], 2009.

SOLARGIS. *Mapa de Irradiação Solar Normal da Alemanha*. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview/>>. Acesso em: 28 mar. 2018a.

SOLARGIS. *Mapa de Irradiação Solar Normal do Brasil*. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview/>>. Acesso em: 28 mar. 2018b.

SOVACOOOL, Benjamin K. Experts, theories, and electric mobility transitions: Toward an integrated conceptual framework for the adoption of electric vehicles. *Energy Research and Social Science*, v. 27, p. 78–95, 2017.

SOVACOOOL, Benjamin K.; HIRSH, Richard F. Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. *Energy Policy*, v. 37, n. 3, p. 1095–1103, 2009.

SUNEDISON. *Datasheet SunEdison – P-SERIES 255 W TO 270 W 60-Cell Crystalline PV Modules*. . Singapore: [s.n.] , 2015

TAN, Lippong *et al.* Efficiency Gains of Photovoltaic System Using Latent Heat Thermal Energy Storage. *Energy Procedia*, v. 110, n. December 2016, p. 83–88, 2017.

TIBA, Chigeru. *Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. v. 1. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes>>.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. *Energia Renovável – Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica*. Rio de Janeiro – RJ: [s.n.], 2016.

VALLÊRA, António M.; BRITO, Miguel Centeno. Meio Século de História Fotovoltaica. *Gazeta de Física – Sociedade Portuguesa de Física*, p. 10–14, 2006.

WANG, Jiangjiang *et al.* Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas. *Energy*, v. 93, p. 801–815, 2015.

WILD-SCHOLTEN, Mariska De; ALSEMA, Erik a. Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production. 2005, Boston, USA: [s.n.], 2005.

WORLD BANK. Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. p. 651, 2004.