UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

FRANCIELLY SCAQUETE NEVES

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO A UM VEÍCULO ELÉTRICO

VITÓRIA
2019

FRANCIELLY SCAQUETE NEVES

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO A UM VEÍCULO ELÉTRICO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Francielly Scaquete Neves**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Tiara R. S. de Freitas
Coorientador: Prof. Dr. Oureste Elias Batista

VITÓRIA
2019

FRANCIELLY SCAQUETE NEVES

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO APLICADO A UM VEÍCULO ELÉTRICO

Parte manuscrita do Projeto de Graduação da aluna **Francielly Scaquete Neves**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 13 de dezembro de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Profa. Dra. Tiara R. S. de Freitas
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

M.Sc. Edmilson Bermudes Rocha Junior
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

A Deus, aos meus pais e minha irmã que sempre estiveram lá por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem ele nada disso seria possível. A minha mãe Dirlene, por todas as noites de sono perdidas comigo, por cuidar de mim, por me incentivar, por me colocar pra cima. A meu pai que sempre me apoiou e ficou do meu lado quando precisei. A minha irmã Brunella, por essa amizade de anos, por ser essa pessoa incrível que ela é, pelo carinho, pelas mensagens de apoio. Aos amigos que fiz na Ufes, Hozianna, Rodolpho, Thiago, Leonardo, Mariana, Ícaro, sem vocês todas as manhãs/ noites não seriam possíveis, as aulas não teriam graça. Aos amigos de Planetário, Julia, Carol, Iza, Juliana, Gabriel, vocês foram minha alegria e incentivo nas manhãs cansativas. Aos meus amigos que sempre estiveram lá pra mim, Ana Paula e Thiago, são amigos incríveis que sempre estão lá pra mim, que sei que posso contar sempre que precisar. Aos amigos do Pic Pay, mesmo que com pouco tempo, me incentivavam todas as manhãs. Aos meus avós, pelos aprendizados. A minha madrinha Lena, por ser um amor para mim e estar sempre lá quando eu precisar. As minhas afilhadas Jalice e Rhilary, por me dar amor e carinho e me incentivar e acalmar nos momentos de tristeza. A minha Tia Rita por esse exemplo de força e sabedoria. Minhas primas Mara e Josi, os abraços são sempre incríveis e me acalmam. Minha prima Jani, que eu sei que está sempre perto de mim, olhando e me protegendo. A toda minha família, obrigada por serem tudo na minha vida e por estar aqui sempre. Aos meus professores da Ufes,por cada ensinamento, cada conselho, por cada coisinha que me construiu como engenheira. Se hoje cheguei até aqui, foi por cada uma dessas pessoas que eu conheci e que passaram na minha vida.

RESUMO

Este trabalho propõe um modelo de simulação de um painel fotovoltaico, cuja carga é um motor síncrono sem escovas, que ficará conectado a um triciclo elétrico. A modelagem desse painel fotovoltaico é composta de um painel solar, um MPPT, um conversor CC-CC *boost* e um inversor acoplado a um motor síncrono. O texto traz uma breve descrição sobre painel fovoltaico e suas principais características, MPPT e quais os principais tipos e qual o modelo escolhido e o porquê, conversores *buck* e *boost*, inversor CC-CA e motor síncrono, além de um histórico sobre veículos elétricos e sua função. Em seguida, cada um desses elementos citados é modelado com seus respectivos parâmetros quando necessário. Ao fim, de cada elemento modelado, uma modelagem da simulação completa é mostrada. Os resultados obtidos a partir dessas simulações são exibidos em diferentes pontos do sistema simulado e assim pode-se obter uma estimativa do que poderia acontecer na prática. Por fim, projetos futuros serão sugeridos para melhorar ainda mais esse trabalho.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico. Simulação. Veículo elétrico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mercado fotovoltaico no Mundo 16
Figura 2 – Esquemático a ser simulado 19
Figura 3 – Célula, módulo e painel fotovoltaico 23
Figura 4 – Célula fotovoltaica equivalente real 24
Figura 5 – Curva I x V de uma célula fotovoltaica 25
Figura 6 – Tensões de regulação do regulador 26
Figura 7 – Diagrama elétrico e forma de onda de um conversor CC básico 26
Figura 8 – Conversor *Boost* 27
Figura 9 – Motor sem escovas e com escovas 29
Figura 10 – Painel solar utilizado 31
Figura 11 – Bloco Painel Solar 32
Figura 12 – Variando a Temperatura e Irradiância a 1000 W/m^2 32
Figura 13 – Variando a Irradiância e Temperatura a 25ºC 33
Figura 14 – Bateria 33
Figura 15 – Bloco bateria 34
Figura 16 – Descarga Tensão x Tempo 34
Figura 17 – Conversor DC-DC 35
Figura 18 – Conversor 35
Figura 19 – MPPT 36
Figura 20 – Ponto de máxima potência 37
Figura 21 – Fluxograma do método da variação da condutância 38
Figura 22 – MPPT 38
Figura 23 – Motor 39
Figura 24 – Motor DC trifásico 39
Figura 25 – Motor DC monofásico 40
Figura 26 – Stair Generator 40
Figura 27 – Variação de irradiância 41
Figura 28 – Parte 1 Simulação 42
Figura 29 – Parte 2 Simulação 42
Figura 30 – Simulação Parte 3 43
Figura 31 – Painel Simulado 44
Figura 32 – Torque e Velocidade 45

Figura 33 – Torque e velocidade com bateria 46
Figura 34 – Power Boost Converter 52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Participação de renováveis na matriz energética 14
Gráfico 2 – Participação das energias renováveis na OIE 15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de energia primária por fonte, Espírito Santo x Brasil 15
Tabela 2 – Variação da energia nacional 2017/2018 17
Tabela 3 – Capacidade instalada solar térmica no Espírito Santo 18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASPE	Agência de Serviços Públicos de Energia
ASRP	Agência de Regulação de Serviços Públicos do Espírito Santo
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DC	*Direct Current*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IGBT	*Insulated Gate Bipolar Transistor*
LEPAC	Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico
MCC	Motor de Corrente Contínua
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	*Maximum Power Point Tracker*
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
PEE	Programa de Eficiência Energética
PWM	Modulação por largura de pulso
OIE	Oferta Interna de Energia
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

LISTA DE SÍMBOLOS

R_S	Resistência série da célula fotovoltaica (Ω)
R_p	Resistência paralelo da célula fotovoltaica (Ω)
V	Tensão nos terminais de saída da célula fotovoltaica (V)
I	Corrente nos terminais de saída da célula fotovoltaica (A)
I_{ph}	Fotocorrente (A)
I_d	Corrente de saturação reversa (A)
q	Carga do elétron, $1.6x10^{-19}$ (C)
η	Fator de qualidade da junção p-n
k	Constante de Boltzmann, $1.38x10^{-23}$ J/K (F)
T	Temperatura ambiente (K)
V_{sc}	Tensão de corte de sobrecarga (V)
V_{rc}	Tensão de recarregamento de carga (V)
V_{sd}	Tensão de corte de descarga profunda (V)
V_{rd}	Tensão de recarregamento da descarga (V)
$V_{máx}$	Tensão máxima da célula fotovoltaica (V)
$I_{máx}$	Corrente máxima da célula fotovoltaica (A)
Vmp	Tensão de Máxima Potência (V)
Imp	Corrente de Máxima Potência (A)
Voc	Tensão de Circuito Aberto (A)
Isc	Corrente de Curto Circuito (A)
SP	Ajuste de velocidade (rpm)
Tm	Torque de Carga (N/m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 Apresentação 14

1.2 Objetivos 19

1.2.1 Objetivo Geral 19

1.2.2 Objetivos Específicos 19

1.3 Justificativa 19

2 EMBASAMENTO TEÓRICO 21

2.1 Veículo Elétrico 21

2.2 Sistema Solar Fotovoltaico 22

2.2.1 Painel Solar Fotovoltaico 22

2.2.2 Reguladores ou Controladores de Carga 25

2.2.3 Inversores 28

2.2.4 Baterias 28

2.3 Motor Síncrono 29

2.3.1 Motor Síncrono sem Escovas 29

2.4 Conclusão 30

3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA 31

3.1 Painel Solar 31

3.2 Bateria 33

3.3 Conversor 35

3.4 MPPT 36

3.5 Inversor e Motor 39

3.6 Entrada do Painel e do Motor DC 40

3.7 Sistema Completo 41

3.8 Conclusão 43

4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 44

4.1 Bateria Descarregada 44

4.2 Sem Painel Solar 45

4.3 Conclusão 46

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 47

5.1 Conclusões 47

5.2 Trabalhos Futuros 47

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **49**
APÊNDICE A – CONVERSOR BOOST – COMANDO *POWER_BOOSTCONVERTER* **52**
APÊNDICE B – CÓDIGO MATLAB MPPT **53**

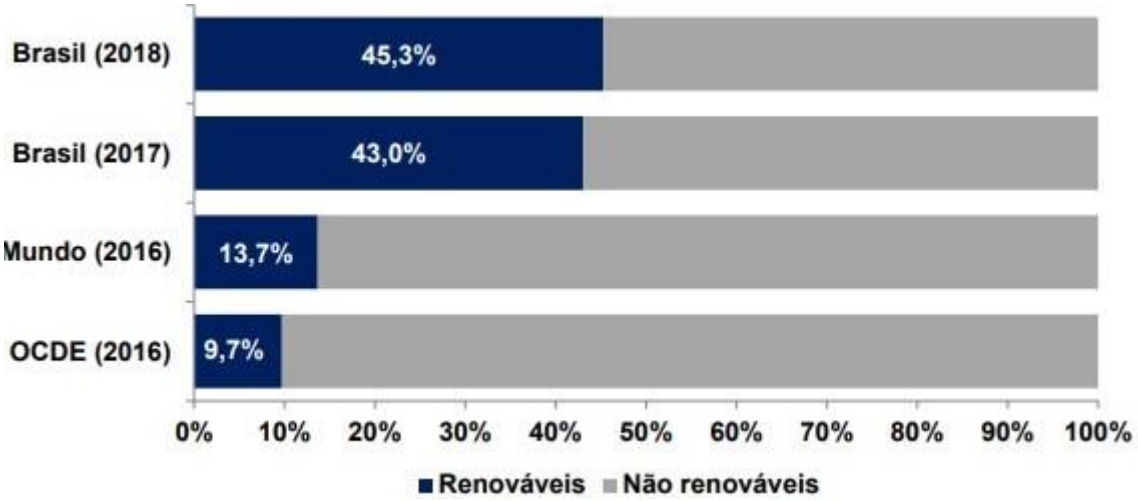
1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A energia renovável é uma forma de energia limpa em que o seu uso e sua utilização, podem-se manter e ser aproveitado ao longo do tempo sem a possibilidade de esgotamento, dentre os exemplos dos tipos de fontes renováveis, pode-se citar a energia eólica, solar, entre outras. Somando-se isso, a um crescimento significativo da demanda energética, além da busca de se utilizar recursos energéticos mais sustentáveis, com maior consciência e que preservem o meio ambiente, muitos países resolveram buscar outras formas de gerar a energia elétrica, fazendo assim com que houvesse um aumento de investimento nas fontes renováveis (VILELA; AFRÂNIO, 2011, p.13).

Com isso, as energias renováveis têm-se destacado cada vez mais no cenário mundial e principalmente a nível nacional em detrimento das energias provenientes de combustíveis fósseis. O Gráfico 1 apresenta a participação de energias renováveis na matriz energética brasileira em comparação com o mundo, tendo como base o ano de 2018, onde podemos observar que o Brasil tem uma participação maior de renováveis em sua matriz energética em relação ao mundo.

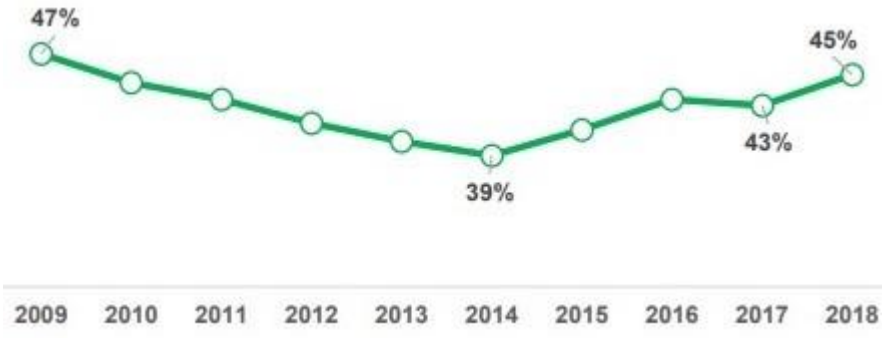
Gráfico 1 – Participação de renováveis na matriz energética



Fonte: EPE (2019).

O Gráfico 2 apresenta a participação das energias renováveis de 2009 até 2018 na Oferta Interna de Energia (OIE).

Gráfico 2 – Participação das energias renováveis na OIE



Fonte: EPE (2019).

A Tabela 1 mostra a produção primária de energia por fonte a nível estadual em comparação com o Brasil.

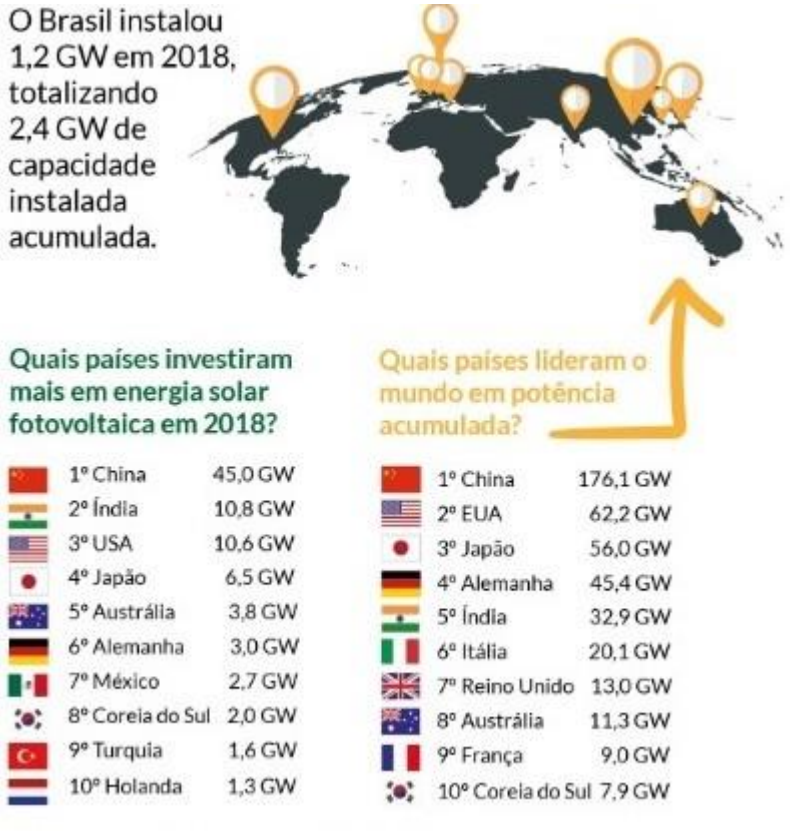
Tabela 1 – Produção de energia primária por fonte, Espírito Santo x Brasil

Energético	Espírito Santo (%)									
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Não Renovável	83,8	77,0	88,7	91,9	91,7	91,9	93,2	93,6	94,4	93,7
Petróleo	57,2	63,6	71,7	72,8	73,8	72,1	74,6	77,8	79,3	77,8
Gás Natural	26,6	13,4	17,0	19,1	17,9	19,7	18,6	15,9	15,0	15,9
Outros Não Renováveis	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Renovável	16,2	23,0	11,3	8,1	8,3	8,1	6,8	6,4	5,6	6,3
Energia Hidráulica	1,2	2,3	1,1	0,9	0,9	0,8	0,6	0,3	0,3	0,4
Lenha	1,2	2,6	1,3	0,7	0,8	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6
Produtos da Cana-de-açúcar	4,4	5,2	2,3	1,8	1,6	1,7	1,3	1,1	0,5	1,0
Lixívia	9,4	12,7	6,5	4,7	5,0	4,8	4,3	4,1	4,0	4,1
Outros Renováveis	0,1	0,2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Total	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**
Energético	**Brasil (%)**									
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Não Renovável	52,1	53,8	53,0	54,8	54,7	54,2	56,5	57,9	58,5	59,2
Petróleo	39,7	42,0	42,1	42,5	41,7	40,6	42,8	44,1	44,2	44,8
Gás Natural	9,0	8,7	9,0	9,3	10,0	10,8	11,6	12,2	12,8	13,1
Outros Não Renováveis	3,3	3,1	2,0	3,0	3,0	2,8	2,0	1,7	1,5	1,2
Renovável	47,9	46,2	47,0	45,2	45,3	45,8	43,5	42,1	41,5	40,8
Energia Hidráulica	13,4	14,0	13,7	14,4	13,9	13,0	11,8	10,8	11,1	10,5
Lenha	12,4	10,2	10,3	10,1	10,0	9,5	9,1	8,7	7,8	7,7
Produtos da Cana-de-açúcar	19,0	18,6	19,3	16,9	17,6	19,1	18,1	17,6	17,2	16,9
Lixívia	2,2	2,3	2,4	2,4	2,4	2,5	2,7	2,8	2,9	2,9
Outros Renováveis	0,9	1,0	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,2	2,5	2,8
Total	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

Fonte: ASRP (2018).

Dentre essas energias renováveis, a energia solar é a que possui grande potencial e vem sendo a fonte de muitas pesquisas e investimentos ao longo do tempo, a nível mundial a Figura 1 mostra o mercado fotovoltaico no mundo.

Figura 1 – Mercado fotovoltaico no Mundo



Fonte: Absolar (2019).

No Brasil, a energia fotovoltaica obteve um grande crescimento em relação a 2017, como se pode observar na Tabela 2, onde, em comparação com outras energias, ela foi a que obteve um maior crescimento em 2018.

Tabela 2 – Variação da energia nacional 2017/2018

Fonte (Mtep)	2017	2018	Δ 18 / 17
RENOVÁVEIS	126,2	130,5	3,4%
Energia hidráulica[1]	35,0	36,5	4,1%
Biomassa da cana	49,8	50,1	0,7%
Lenha e carvão vegetal	24,0	24,1	0,6%
Eólica	3,6	4,2	14,4%
Solar	0,072	0,298	316,1%
Lixívia e outras renováveis	13,8	15,4	11,8%
NÃO RENOVÁVEIS	167,0	157,9	-5,5%
Petróleo e derivados	106,3	99,3	-6,5%
Gás natural	37,9	35,9	-5,4%
Carvão mineral	16,8	16,6	-0,9%
Urânio (U_3O_8)	4,2	4,2	-0,5%
Outras não renováveis	1,8	1,8	-0,1%

[1] *Inclui importação de eletricidade oriunda de fonte hidráulica*

Fonte: EPE (2019).

No Espírito Santo, graças ao Programa Bairro Solar, que é uma ação da concessionária de energia elétrica EPD ES, antiga EDP Escelsa, apoiado pelo do Governo do Estado do ES, por meio da então Agência de Serviços Públicos de Energia (Aspe), utilizando recursos do Programa de Eficiência Energética das empresas de Distribuição de Energia Elétrica (PEE) estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a energia solar evitou o consumo de energia elétrica de mais de 200 kWh, como pode se observar na Tabela 3.

Tabela 3 – Capacidade instalada solar térmica no Espírito Santo

Município	Bairros	Unidades residenciais	Consumo de energia elétrica evitado (KWh)
Serra	Serra dourada I, II e III	2.149	106.161
	Eldorado	218	10.769
	Novo Horizonte	179	8.843
Vila Velha	Jacarenema	288	14.227
	Jabaeté	909	44.905
Cariacica	Prolar	98	4.841
	Itanguá	240	11.856
Castelo	Cava Roxa	112	5.533
Vitória	Nova Palestina	26	1.284
	Estrelinha	21	1.037
Total		**4.240**	**209.456**
Potência Solar Térmica Instalada (KW_{th})			**5.936**

OBS: Adotou-se o consumo médio mensal de 190 KWh por residência. Verifica-se uma redução de 26% no gasto de energia com a instalação dos painéis.

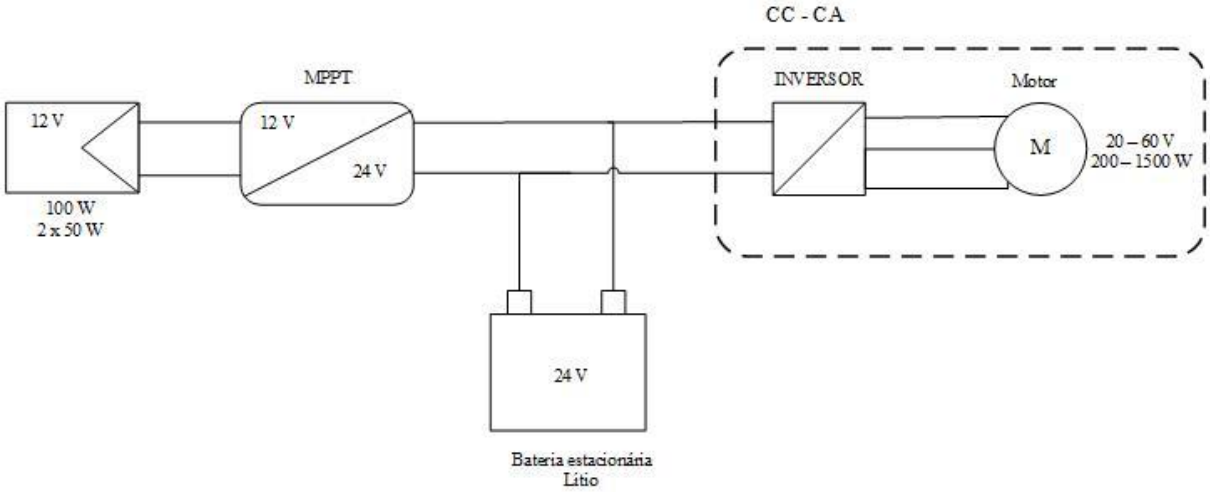
OBS2: Capacidade instalada solar térmica no Espírito Santo quando estiver totalmente concluído, por meio do Programa Bairro Solar.

Fonte: ASPE (2016).

Essa energia é gerada pela luz irradiada do sol, ou seja, é abundante na natureza e não polui o meio ambiente. No ramo da energia solar, pode-se destacar a energia solar fotovoltaica, uma energia obtida da conversão da luz do sol em eletricidade. Além de gerar eletricidade para consumo, a energia solar fotovoltaica possui inúmeras aplicações.

Sendo assim, esse projeto propôs a implementação e simulação de um painel fotovoltaico, cuja carga é um motor CC, que foi acoplado a um veículo elétrico, utilizando o *software* MATLAB. A Figura 2 apresenta o esquemático a ser simulado.

Figura 2 – Esquemático a ser simulado



Fonte: Produção do próprio autor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Simular e analisar um sistema fotovoltaico isolado e assim obter um melhor entendimento sobre o funcionamento desse tipo de sistema.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Fazer uma breve revisão bibliográfica de cada elemento do sistema individualmente para obter um melhor entendimento sobre cada um deles.;
- Modelar e simular o sistema composto pelo painel fotovoltaico, *mppt, bateria e carga,* simulando diferentes condições de operação do sistema.

1.3 Justificativa

Um veículo elétrico solar obtém parte da energia para o seu movimento através do Sol, energia essa captada através de painéis fotovoltaicos. Além disso, não polui o meio ambiente, é bastante abundante na natureza e serve para locomoção de pessoas.

É importante obter o melhor uso desses painéis fotovoltaicos e consequentemente do sistema fotovoltaico, para que assim o motor funcione com sua máxima capacidade, que a bateria possa

se manter carregada por tempo suficiente e assim obter o melhor desempenho possível do veículo elétrico.

Assim, essa simulação visa ver o funcionamento desse sistema fotovoltaico e das partes que o compõem, para obter resultados satisfatórios.

Para isso, este trabalho foi dividido em algumas partes. No capítulo 2, será descrito um pouco sobre o funcionamento de cada componente necessário para simulação. O capítulo 3 mostrará sobre cada parte da simulação e como foi modelado cada componente. No capítulo 4 alguns resultados da simulação serão apresentados e, por fim, no capítulo 5 serão feitas a conclusão e a indicação de trabalhos futuros para esse projeto.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Para a execução desse projeto a utilização de equipamentos se faz necessário, assim dividindo-se a simulação em duas partes tem se o sistema solar fotovoltaico, que será responsável por gerar e alimentar o nosso motor de carga do veículo elétrico.

2.1 Veículo Elétrico

De acordo com Instituto Nacional de Eficiência Energética (2015):

> Veículos elétricos são aqueles acionados por pelo menos um motor elétrico. Eles podem reduzir consideravelmente desperdícios evitáveis de combustíveis fósseis, são muito mais eficientes que os convencionais acionados exclusivamente por motores de combustão interna. Além disso, veículos elétricos também podem produzir efeitos consideráveis no sistema elétrico interligado do Brasil.

Existem dois tipos de veículos elétricos. Os puramente elétricos, onde a propulsão é somente elétrica, não havendo motor a combustão. E os híbridos, que por sua vez, são intermediários, sendo aqueles que combinam um motor a combustão interna com um ou mais motores elétricos para propulsão (BNDES, 2015, p. 296 – 297).

Com o funcionamento através do propulsor elétrico, o modelo de veículos com motores elétricos utiliza energia química que ficam localizadas nas baterias recarregáveis, que é convertido em energia elétrica, que por sua vez, converterá em energia mecânica, possibilitando a movimentação do veículo (RODRIGUES, 2016).

Apresenta um torque mais elevado na partida e em baixas rotações, por esse motivo não há necessidade de fazer a troca de marchas. O câmbio é usado apenas para selecionar a ré. Em geral, os motores a combustão têm uma faixa de rotação na qual se encontra o pico de torque. Em um motor elétrico automotivo, a força está disponível o tempo todo (CHIPTRONIC,2018).

No início do século XX, os veículos elétricos dominavam o mercado automotivo. Porém, a pequena capacidade de armazenamento das baterias, seu peso e o tempo elevado para carga limitaram o uso deles ao atendimento de necessidades específicas como o transporte em áreas restritas.

No fim do século XX, a preocupação com a sustentabilidade ambiental motivou o ressurgimento do interesse pelo veículo elétrico. O Rio-92 marcou o despertar de maior conscientização global pela melhoria da qualidade do ar nas cidades, pela redução das emissões de gases de efeito estufa e pela substituição de combustíveis fósseis por energias alternativas. Em 1997, foi lançado no Japão o primeiro veículo híbrido produzido em massa, o Toyota Prius (BNDES, 2015, p. 301).

O interesse em reduzir os gases do efeito estufa, faz com que o setor automotivo atualmente seja alvo de muitos estudos e incentivos de políticas energéticas e ambientais.

Existem algumas barreiras quanto ao uso do veiculo elétrico, atualmente o mesmo não tem uma presença forte no mercado essencialmente pelo fato de a tecnologia que é utilizada nestes veículos estar ainda em uma fase prematura, a seguir são relacionados às principais barreiras enfrentadas:

- Custo de aquisição;
- Autonomia – baixa autonomia não lhes permite mais que 200 km;
- Tempo de recarga (PORCHERA; LOSS; MIRANDA, LEAL, 2014, p. 7 – 8).

2.2 Sistema Solar Fotovoltaico

A composição de um sistema fotovoltaico depende do tipo de aplicação que o mesmo terá. Porém, existem alguns itens principais que podem compor esse sistema, que são:

a) Painel solar fotovoltaico;

b) Controladores de carga;

c) Baterias;

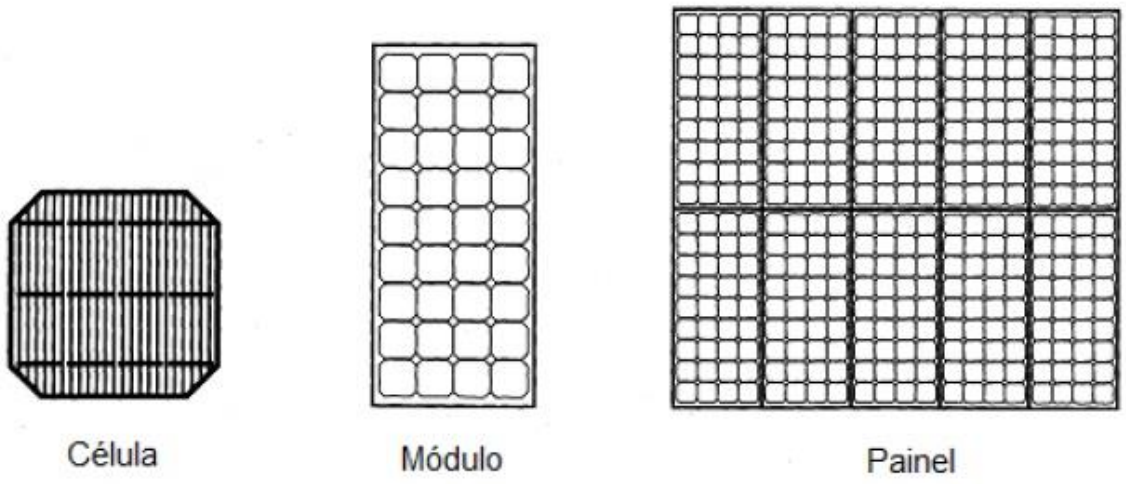
d) Inversores (ARAMIZU; JULIANA, 2010, p.40).

2.2.1 Painel Solar Fotovoltaico

Segundo Almeida, Rosa, Braz, entre outros, “Os painéis solares são os principais componentes do sistema fotovoltaico de geração de energia”.

Antes de qualquer coisa é importante diferenciar células, módulos e painéis fotovoltaicos. A combinação de células em série e/ou paralelo, dependendo das tensões e/ou correntes determinadas em projeto, forma um módulo fotovoltaico, e a combinação desses módulos também em série e/ou paralelo forma o painel fotovoltaico. A Figura 3 exemplifica essa diferença entre eles.

Figura 3 – Célula, módulo e painel fotovoltaico



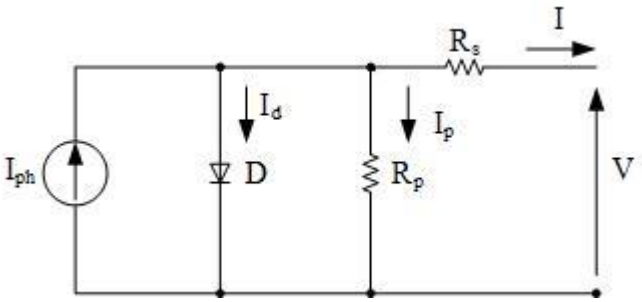
Fonte: Aramizu (2010).

De acordo com Casaro e Martins (2008, p. 142):

> O modelo real de uma célula fotovoltaica pode ser representado por um circuito composto por uma fonte de corrente, um diodo e dois resistores, Rs e Rp, que modelizam respectivamente as perdas de tensão e corrente. Rs é a resistência em série e se origina da resistência do material semicondutor e Rp é a resistência em paralelo e representa as impurezas e defeitos da estrutura.

A Figura 4 representa o circuito citado.

Figura 4 – Célula fotovoltaica equivalente real



Fonte: Produção do próprio autor

A corrente que chega na carga é determinada pela equação (1).

$$I = I_{ph} - I_d - I_p = I_{ph} - I_d * \left[e^{q\frac{(V+IRs)}{\eta kT}} - 1\right] - \frac{V + IR_S}{R_P} \quad (1)$$

Onde:

V, I – Tensão e corrente nos terminais de saída da célula fotovoltaica;

I_{ph} – Fotocorrente;

I_d – Corrente de saturação reversa da célula fotovoltaica;

q – Carga do elétron, $1{,}6 \times 10^{-19}$ C;

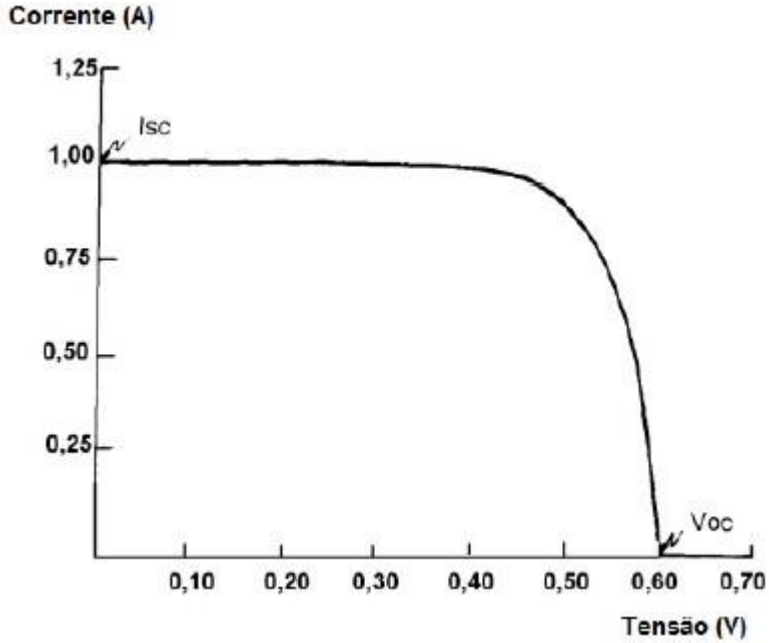
η – Fator de qualidade da junção p-n;

k – Constante de Boltzmann, $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K;

T – Temperatura ambiente, em K.

Para um nível de irradiação solar igual a 1000 W/m^2 e temperatura igual a 25ºC de operação da célula, a Figura 5 mostra uma curva I x V de uma célula fotovoltaica.

Figura 5 – Curva I x V de uma célula fotovoltaica



Fonte: Aramizu (2010).

2.2.2 Reguladores ou Controladores de Carga

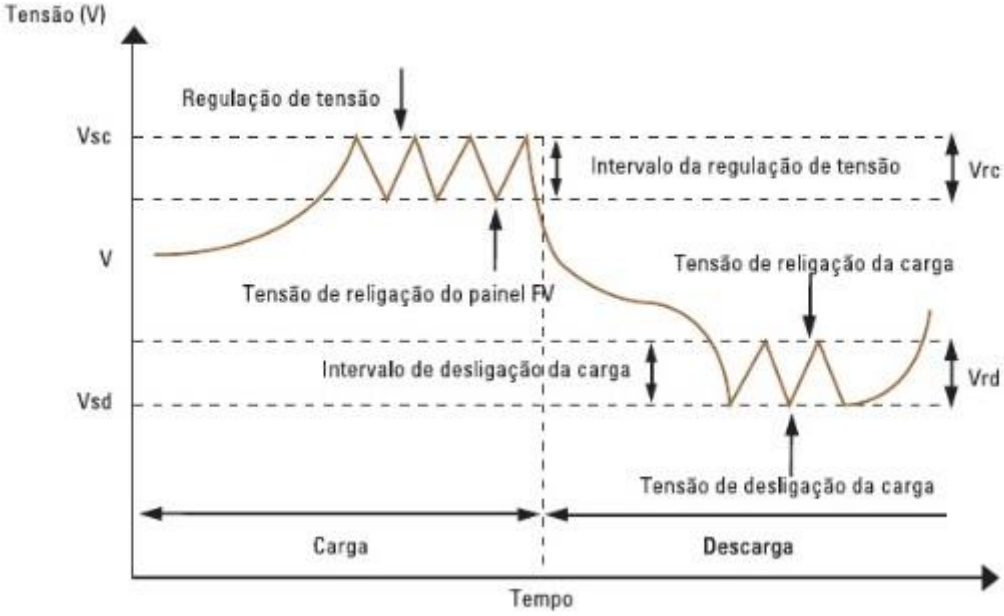
Nas instalações fotovoltaicas, a função do regulador é a de proteger as baterias contra as sobrecargas do sistema. Ele também impede que a bateria continue a receber carga do painel solar uma vez que este tenha alcançado a sua carga máxima, o que previne que a bateria se venha a deteriorar por meio de gaseificação ou aquecimento, o que encurtaria a sua vida útil (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015, p. 119-121).

Em nível de tensão existem 4 parâmetros necessários para o regulador:

a) **Tensão de corte de sobrecarga, V_{sc}**– tensão máxima que o regulador permite que a bateria atinja;
b) **Tensão de recarregamento de carga, V_{rc}** – valor de tensão ao qual o regulador volta a ligar o gerador fotovoltaico a bateria;
c) **Tensão de corte de descarga profunda, V_{sd}** – valor de tensão da bateria abaixo do qual se interrompe o abastecimento de eletricidade às cargas de consumo;
d) **Tensão de recarregamento da descarga, V_{rd}** – valor ao qual se estabelece de novo o consumo.

A Figura 6 exemplifica bem esses níveis de tensão.

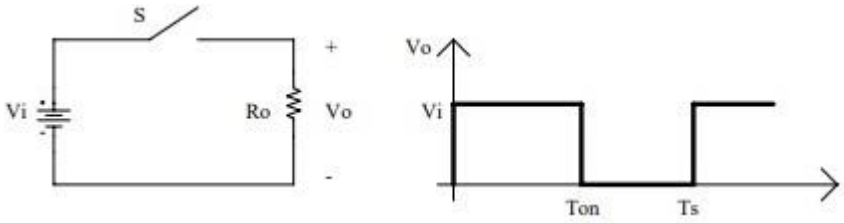
Figura 6 – Tensões de regulação do regulador



Fonte: Pereira e Oliveira (2015)

Nesse projeto utiliza-se um conversor CC – CC que são sistemas formados por semicondutores de potência operando como interruptores, e por elementos passivos, normalmente indutores e capacitores que tem por função controlar o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída (PETRY, 2011, p. 3). A Figura 7 mostra o diagrama elétrico e a forma de onda de um conversor CC básico.

Figura 7 – Diagrama elétrico e forma de onda de um conversor CC básico



Fonte: Petry (2011)

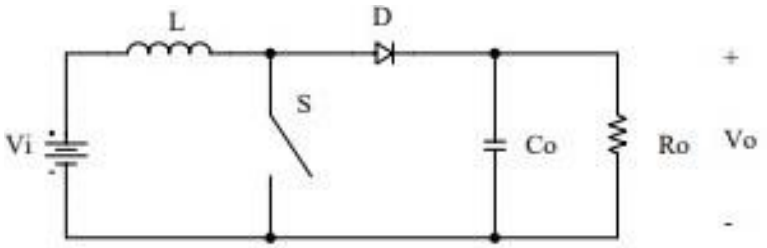
Existem alguns tipos de conversores CC – CC, os principais são:

- Conversor *Buck* – conversor abaixador de tensão, onde a tensão na entrada é maior que na saída;

- Conversor *Boost* – conversor elevador de tensão, onde a tensão na saída é menor que na entrada;
- Conversor *Buck – Boost* – conversor que pode operar como abaixador ou elevador de tensão.

Nesse projeto o conversor utilizado será do tipo *Boost*, cujo diagrama elétrico pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Conversor *Boost*



Fonte: Petry (2011).

As principais características do conversor *Boost* são:

- Pode apenas aumentar a tensão na saída;
- A corrente de saída é descontínua;
- A corrente na entrada tem boa qualidade (PETRY, 2011, p. 8).

Para um funcionamento otimizado, é necessário manter o sistema fotovoltaico operando no ponto de máxima potência. Para isso, utiliza-se um regulador do tipo MPPT (*Maximum Power Point Tracker*).

Este regulador permite aproveitar a energia produzida, situando o ponto MPP na máxima potência, que corresponde aos valores de tensão máxima ($V_{máx}$) e corrente máxima ($I_{máx}$) mantendo um valor de tensão superior ao da bateria, fazendo assim com que seja um regulador que não desperdiça energia e opera na sua máxima eficiência (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015, p. 128-130).

2.2.3 Inversores

O inversor CC – CA é o dispositivo eletrônico responsável pela conversão de grandezas de corrente contínua (CC), em grandezas de corrente alternada (CA) (ARAMIZU; JULIANA, 2010, p. 41).

A energia elétrica na saída dos módulos fotovoltaicos é em corrente contínua (CC). Isto inviabiliza a sua aplicação direta na maioria dos equipamentos que trabalham, somente, em corrente alternada (CA). Para a solução deste problema, empregam-se os inversores, capazes de realizar a conversão desta tensão contínua para um valor de tensão em CA.
Um inversor possui dois tipos de aplicações:

a) Sistemas isolados;
b) Sistemas ligados à rede elétrica.

Nos equipamentos atuais é usado para o controle dos dispositivos programáveis o microcontrolador ou o DSP (processamento digital de sinal), que registram as medidas e as condições de entrada e saída para realizar o controle da ponte do inversor. Com este controle, pretende-se alcançar sempre o ponto máximo de potência que se modifica em função do nível da radiação e temperatura (PEREIRA; OLIVEIRA, 2015, p. 138-142).

2.2.4 Baterias

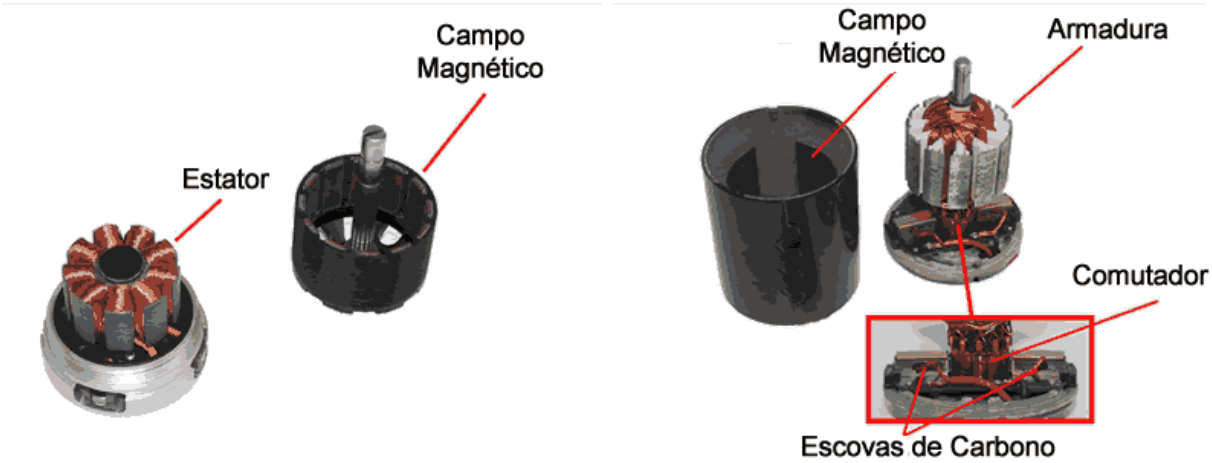
As baterias eletroquímicas são uma importante forma de armazenamento de energia que pode ser utilizada em sistemas fotovoltaicos, pois elas são capazes de transformar diretamente energia elétrica em energia potencial química e posteriormente converter, diretamente, a energia potencial química em energia elétrica. Elas são classificadas em duas categorias: Baterias primárias que são dispositivos eletroquímicos que, uma vez esgotados os reagentes que produzem a energia elétrica, são descartadas. Já as baterias secundárias podem ser regeneradas, ou seja, através da aplicação de uma corrente elétrica em seus terminais pode-se reverter às reações responsáveis pela geração de energia elétrica e assim recarregar novamente a bateria. Os sistemas fotovoltaicos de geração de energia elétrica utilizam acumuladores secundários, ou seja, baterias que podem ser recarregadas. Entre inúmeros tipos de baterias secundárias as mais comuns são as chumbo-ácido e as níquel-cádmio (BRAGA, 2008, p. 31-32).

Portanto, as baterias são os elementos armazenadores de energia. A partir disso, é possível alimentar a carga em condições nas quais não ocorre a produção de energia nos painéis fotovoltaicos. Isso ocorre, por exemplo, em dias nublados ou chuvosos, ou durante a noite. (ARAMIZU; JULIANA, 2010, p. 41).

2.3 Motor Síncrono

Um motor síncrono nada mais é do que um motor alimentado por corrente contínua (CC), sendo esta alimentação proveniente de uma bateria ou qualquer outra de alimentação CC. A sua comutação pode ser através de escovas ou sem escovas (*brushless*) (SILVEIRA; CRISTIANO, 2017). A Figura 9 mostra essa diferença na comutação.

Figura 9 – Motor sem escovas e com escovas



Fonte: Silveira e Cristiano (2017).

O funcionamento de um motor de corrente contínua (MCC) está baseado nas forças produzidas da interação entre o campo magnético e a corrente de armadura no rotor, que tendem a mover o condutor num sentido que depende do sentido do campo e da corrente na armadura (regra da mão direita). O motor utilizado no projeto será o do tipo *brushless*, sem escovas.

2.3.1 Motor Síncrono sem Escovas

Os motores sem escovas ou *Brushless* usam um ímã permanente incorporado no conjunto do rotor. Eles podem usar um ou mais dispositivos de Efeito Hall para detectar a posição do rotor e uma eletrônica de acionamento associada a ele controla a rotação do eixo (velocidade). Os

motores *Brushless* são similares aos motores CA, mas são comutados eletronicamente de modo que possam ser alimentados em CC. A comutação sem escovas (*Brushless*) é mais eficiente, requer menos manutenção, gera menos ruído e tem uma maior densidade de potência e faixa de velocidade se comparado ao motor de comutação escovada. No entanto, a eletrônica dos motores *brushless* geralmente contribuem para o seu custo de aquisição, que também possuem maior complexidade e maiores limitações ambientais (SILVEIRA; CRISTIANO, 2017).

2.4 Conclusão

Neste capítulo, foi apresentado o embasamento teórico necessário para a realização desse trabalho, os elementos que contém a simulação e a sua importância para a realização desse projeto.

3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA

Como já informado, o *software* usado para simulação do sistema fotovoltaico é o MATLAB 2019a/Simulink, para fazer a simulação o sistema foi dividido em várias partes, e elas serão mais bem abordadas adiante.

3.1 Painel Solar

Os dados utilizados para simulação do painel solar vieram do Painel Solar 50W M-Si-16 V Flexível, da marca SolarPro Engenharia, que é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Painel solar utilizado

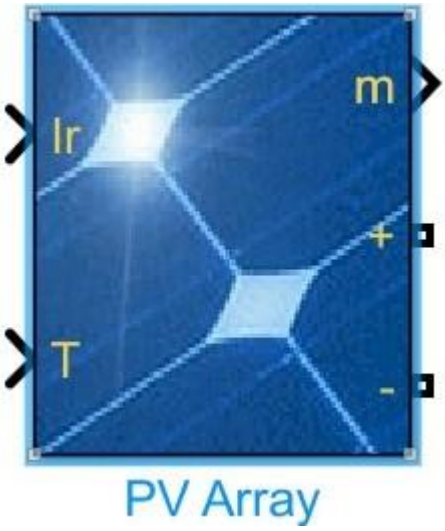
Fonte: SolarPro Engenharia (2019).

O painel é flexível, o material que o compõe é silicone monocristalino, a potência máxima fornecida por ele é de 50 W e sua eficiência é de 21, 3%. A tensão e a corrente no ponto de máxima potência, a tensão de circuito aberto e a corrente de curto circuito são:

- Vmp = 17, 6V;
- Imp = 2, 84A;
- Voc = 21, 6V;
- Isc = 3, 05A.

Para simular o painel, foi utilizado um bloco da biblioteca do Simulink, cujo nome é *PV Array* e que pode ser observado na Figura 11.

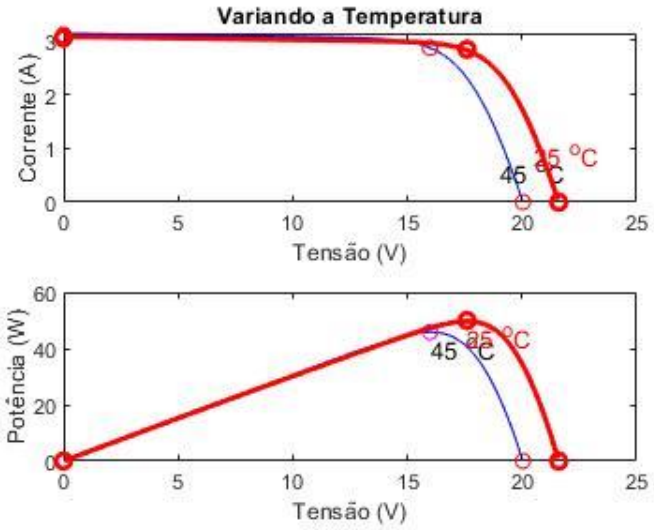
Figura 11 – Bloco Painel Solar



Fonte: MathWorks (2019b).

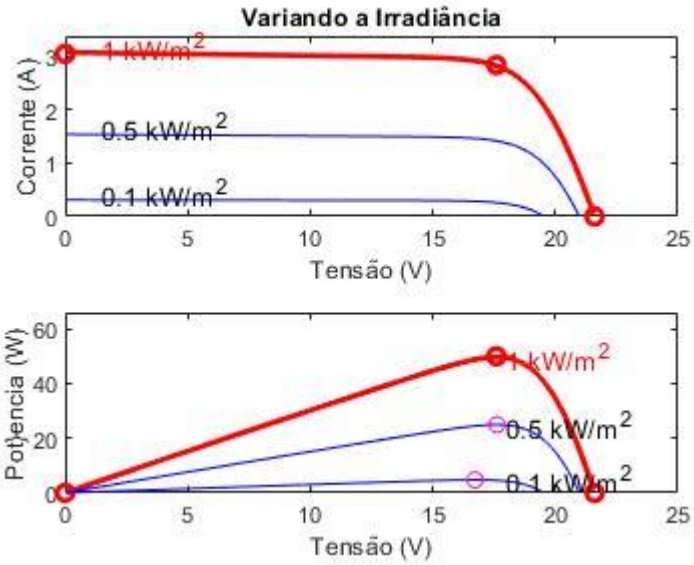
Ao clicar no modelo ele abre uma janela, onde podem ser inseridos os parâmetros a cerca do painel e nessa mesma janela é possível plotar algumas curvas I x V e P x V, variando a temperatura e mantendo a irradiância a 1000 W/m^2 ou variando a irradiância e mantendo a temperatura a 25ºC, como pode se observar nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Variando a Temperatura e Irradiância a 1000 W/m^2



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 13 – Variando a Irradiância e Temperatura a 25ºC



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 Bateria

Para simular a bateria o modelo utilizado foi o da Bateria Estacionária Heliar Freedom DF300 (30 Ah / 26 Ah), da NeoSolar. A Figura 14 mostra o modelo da bateria utilizada.

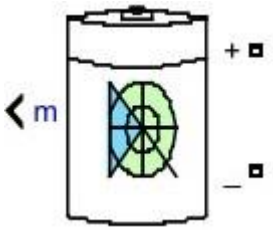
Figura 14 – Bateria

Fonte: NeoSolar (2019).

A tensão nominal da bateria é de 12V, na simulação serão usadas três baterias de 12V, cuja tensão nominal será de 36V e (90 Ah/78Ah).

No Simulink o bloco utilizado também pertence a sua biblioteca, cujo nome é *Battery* e pode ser visto na Figura 15.

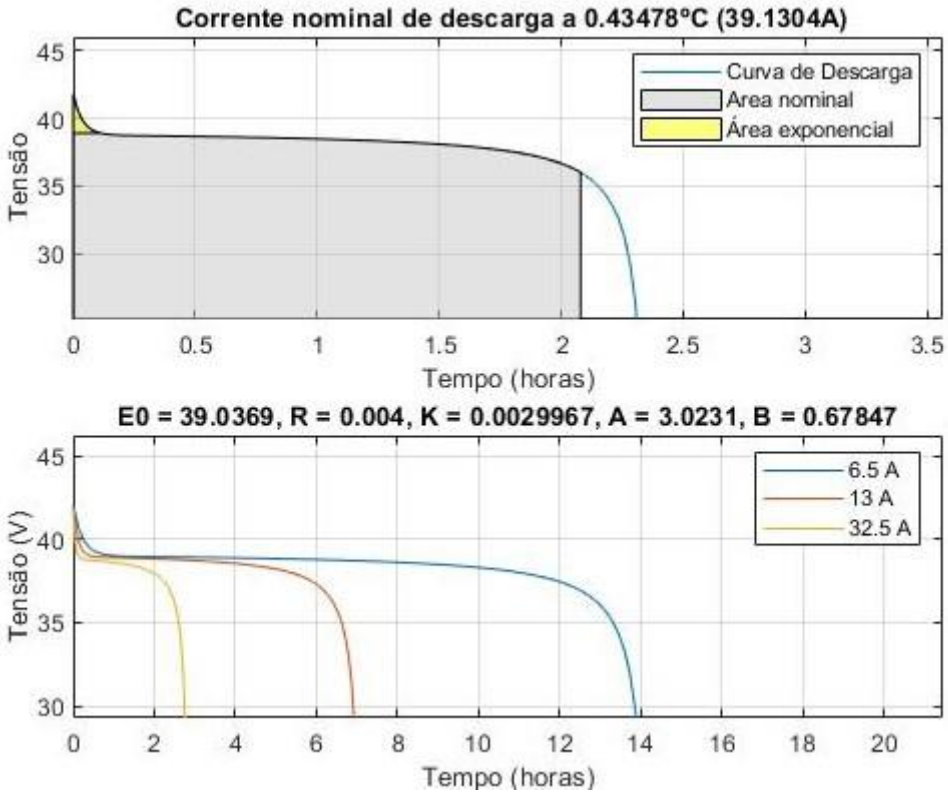
Figura 15 – Bloco bateria



Fonte: MathWorks (2019b).

Ao clicar ela gera uma janela para inserção dos parâmetros da bateria, assim é possível plotar gráficos acerca da bateria que podem ser observados na Figura 16.

Figura 16 – Descarga Tensão x Tempo



Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 Conversor

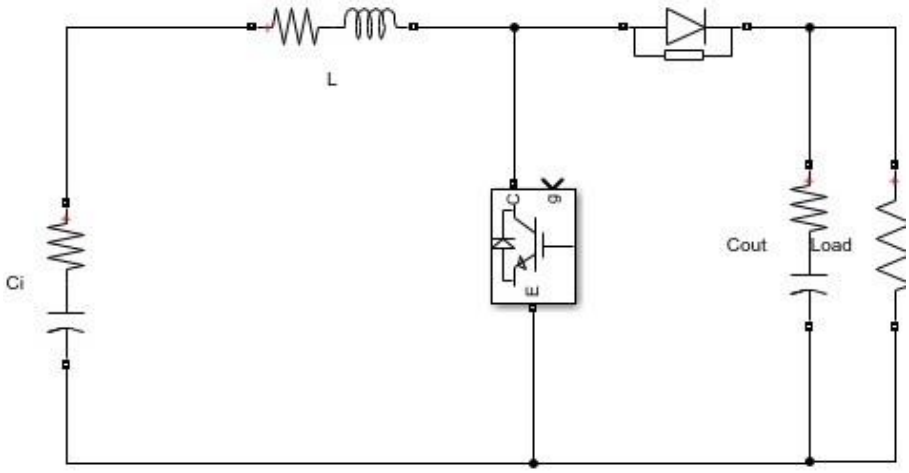
O conversor utilizado é o modelo de 1500 W 30 A *DC-DC high current DC constant current power supply module of electric booster-booster*, e é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Conversor DC-DC

Fonte: Mercado Livre (2019).

Para simular o conversor foi utilizado um modelo sugerido pelo próprio Simulink com algumas modificações para que fosse possível se adaptar o projeto e pudesse se obter algum resultado, esse circuito é mostrado na Figura 18. Ao digitar o comando *Power_BoostConverter* na janela de comando do Matlab, com componentes encontrados na biblioteca do Simulink, o circuito original pode ser visto em APÊNDICE A.

Figura 18 – Conversor



Fonte: Produção do próprio autor.

Sendo assim os valores usados nos componentes acima foram:

a) Ci: R = 1mΩ e C = 100µF;
b) L: R = 0.1 Ω e L = 250µH;
c) Cout: R = 1mΩ e C = 200µF
d) Load: R = 3Ω.

3.4 MPPT

O MPPT utilizado é o foi BlueSolar Charge Controllers MPPT (150/45) da Victron Energy, mostrado na Figura 19.

Figura 19 – MPPT

Fonte: Victron Energy (2014).

O modelo utilizado pode trabalhar com baterias de 12 V, 24 V ou 48 V, tem uma eficiência máxima de 98%. Corrente nominal de carga é de 45 A e a potência nominal do painel para placas de 24 V é 1300 W.

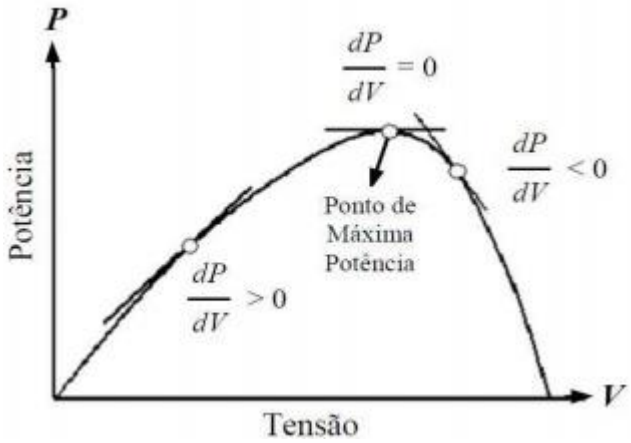
O MPPT pode ser implementado de algumas maneiras diferentes de acordo com o método utilizado, os principais métodos de MPPT que existem são:

- Pertube e Observe (P&O): que produz uma perturbação na variável de controle (tensão ou corrente);
- Variação da Condutância;
- Método de razão cíclica fixa: é o mais simples dos métodos por não existir realimentação e controle;

- Método da tensão constante: método de simples implementação e requer apenas um medidor de tensão;
- Método da condutância incremental: se baseia nos valores de condutância instantânea e incremental do arranjo;
- Método de oscilação do sistema: baseado no principio da máxima transferência de potência e utiliza oscilações para determinar o ponto de ótima operação.

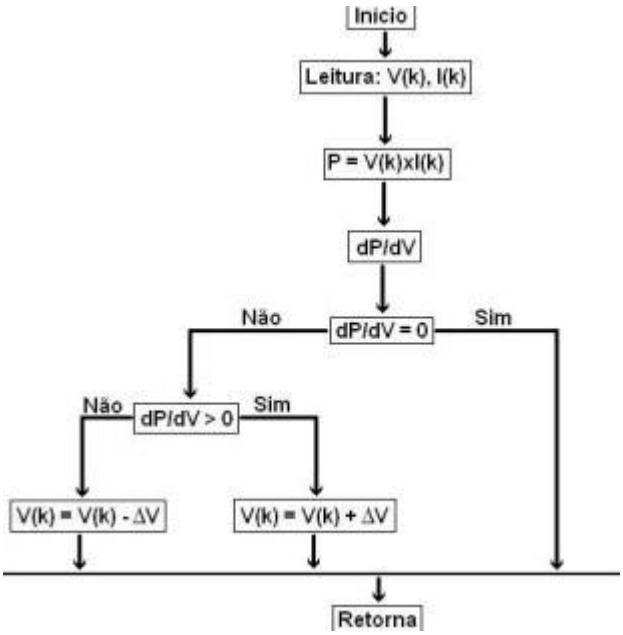
Para modelar o MPPT no Simulink o método utilizado foi o método da variação da condutância. Este método consiste na variação do ponto de atuação do sistema em torno do ponto da tensão de máxima potência do sistema FV (VMP), sendo observado pelas derivadas instantâneas de potência e tensão. Assim, para dP/dV > 0, o sistema passa a atuar em um ponto no qual V é maior que o anterior e, para dP/dV < 0, o sistema atua em um ponto com V menor que o anterior. Então, este método atua na verificação do declive da curva de potência em função da tensão, de forma a encontrar o ponto de potência máxima, no qual o declive é zero (ALBUQUERQUE et al., 2012, p. 2), que pode ser observado na Figura 20, assim como no fluxograma desse método na Figura 21.

Figura 20 – Ponto de máxima potência



Fonte: Albuquerque e outros (2012).

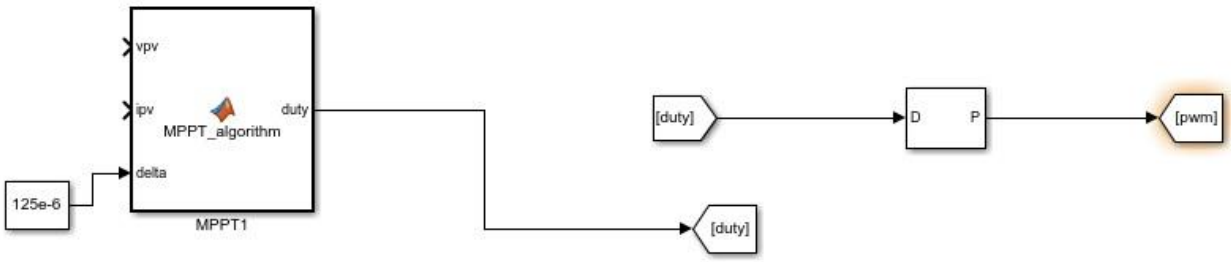
Figura 21 – Fluxograma do método da variação da condutância



Fonte: Albuquerque e outros (2012).

Utilizando o bloco MATLAB *function* (MPPT AND BOOST CONVERTER FOR PV, 2019), implementado pelo professor Dr.Naki Güler, da Universidade Gazi, na Turquia, e controlado por um código visto no APÊNDICE B, pode-se implementar esse método para o MPPT. Além disso, um bloco chamado *PWM Generator*, foi colocado na saída desse bloco e cuja função é gerar pulsos para conversores de modulação por largura de pulso (PWM). O bloco será usado para disparar o dispositivo de comutação forçada (IGBT). Sendo assim, esse bloco é mostrado na Figura 22.

Figura 22 – MPPT



Fonte: MPPT and Boost Converter for PV (2019).

3.5 Inversor e Motor

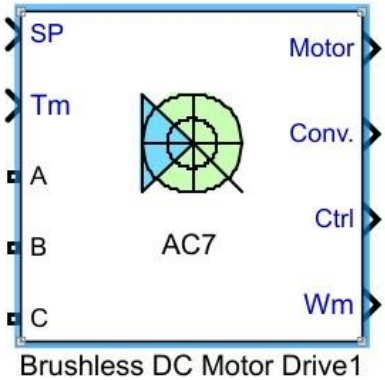
O motor utilizado foi adquirido na Wind Bike. O modelo é Kit Conversão Bike Elétrica 600 W 36 V Dianteiro *Wind Bikes*, que possui um controlador de velocidade do modelo KT36ZWSM-GP13CF, isso pode ser observado na Figura 23. A potência nominal do motor é de 600 W e opera com tensão de 36 V.

Figura 23 – Motor

Fonte: Wind Bikes (2018).

Para modelar o motor, o controle de velocidade e o inversor, foi utilizado um único bloco do Simulink chamado *Brushless DC Motor Drive*, que pode ser visto na Figura 24.

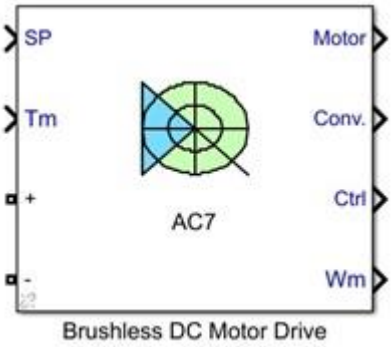
Figura 24 – Motor DC trifásico



Fonte: MathWorks (2019b).

Porém esse bloco possui uma entrada trifásica, o que não seria muito útil nessa modelagem, assim, foi feita uma pequena mudança na sua entrada, o tornando entrada monofásica, como pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 – Motor DC monofásico



Fonte: MathWorks (2019b).

3.6 Entrada do Painel e do Motor DC

Para a entrada do bloco do motor dois parâmetros serão controlados, a entrada SP que é o ponto de ajuste da velocidade em rpm e o Tm que é o Torque de carga. Já na entrada do painel solar os parâmetros controlados são Ir que varia a irradiância e T que varia a temperatura. Para controlar essas entradas o bloco utilizado será o *Stair Generator*, cujo modelo pode ser visto na Figura 26.

Figura 26 – Stair Generator

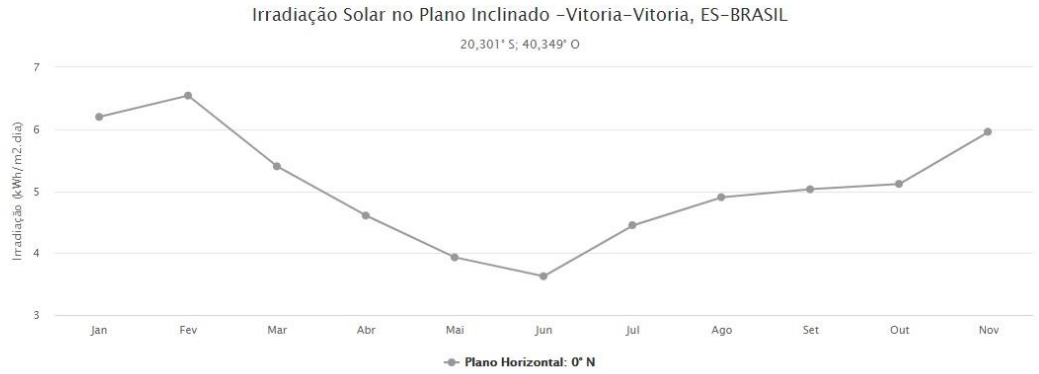
Fonte: MathWorks (2019b)

Para irradiância, foi usada uma média de variação do município de Vitória, até o mês de novembro, como pode ser observado na Figura 27, que teve um pico em fevereiro de 6,54 kWh/m^2.

Figura 27 – Variação de irradiância

Estação: Vitoria
Município: Vitoria , ES - BRASIL
Latitude: 20,301° S
Longitude: 40,349° O
Distância do ponto de ref. (20,3222° S; 40,3381° O) :2,6 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
☑	Plano Horizontal	0° N	6,20	6,54	5,40	4,61	3,93	3,63	3,72	4,45	4,90	5,03	5,12	5,96	4,96	2,92
☐	Ângulo igual a latitude	20° N	5,64	6,25	5,52	5,11	4,70	4,51	4,54	5,10	5,16	4,91	4,74	5,36	5,13	1,74
☐	Maior média anual	18° N	5,71	6,30	5,53	5,08	4,64	4,44	4,48	5,06	5,16	4,94	4,80	5,44	5,13	1,86
☐	Maior mínimo mensal	24° N	5,47	6,12	5,49	5,16	4,80	4,64	4,66	5,18	5,16	4,84	4,63	5,19	5,11	1,50



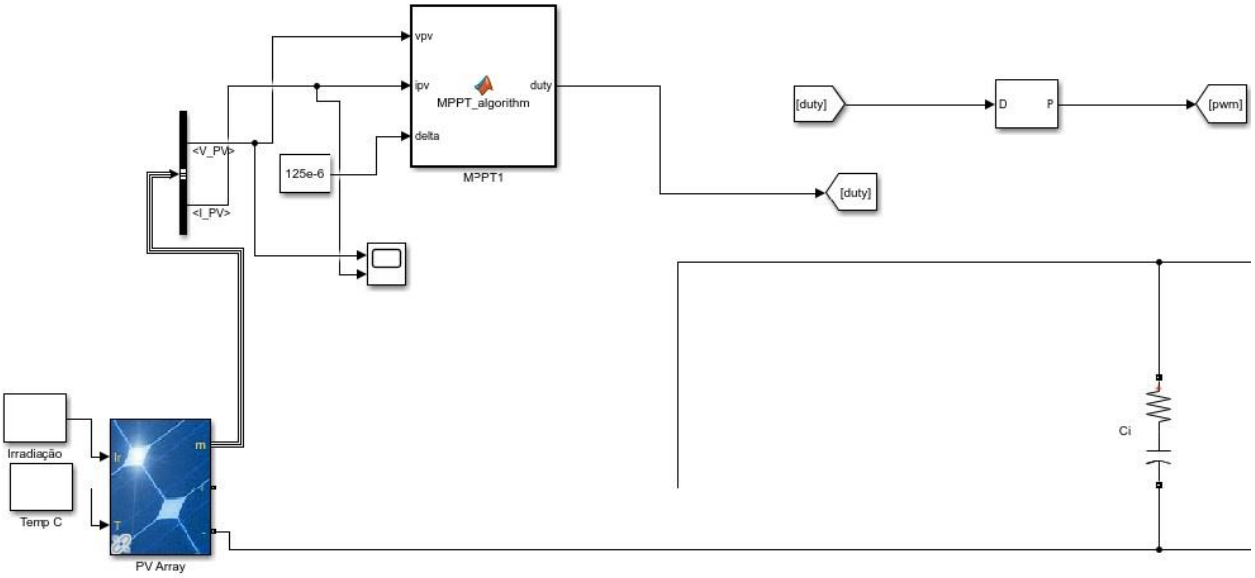
Fonte: Cresesb (2019).

A temperatura foi usada uma média de temperatura do mês de novembro que variou entre 20 ºC a 35ºC.

3.7 Sistema Completo

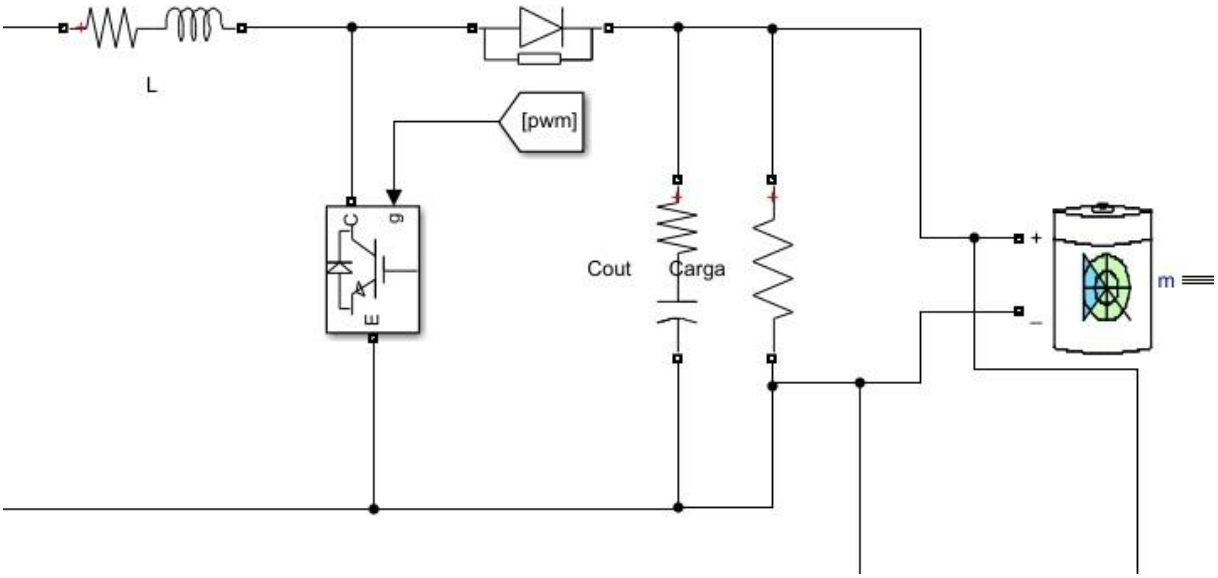
As Figuras 28, 29 e 30 mostram como ficou toda simulação, quando se junta todos os blocos citados anteriormente, e onde cada *Scope* foi localizado para que houvesse resultados e medições interessantes.

Figura 28 – Parte 1 Simulação



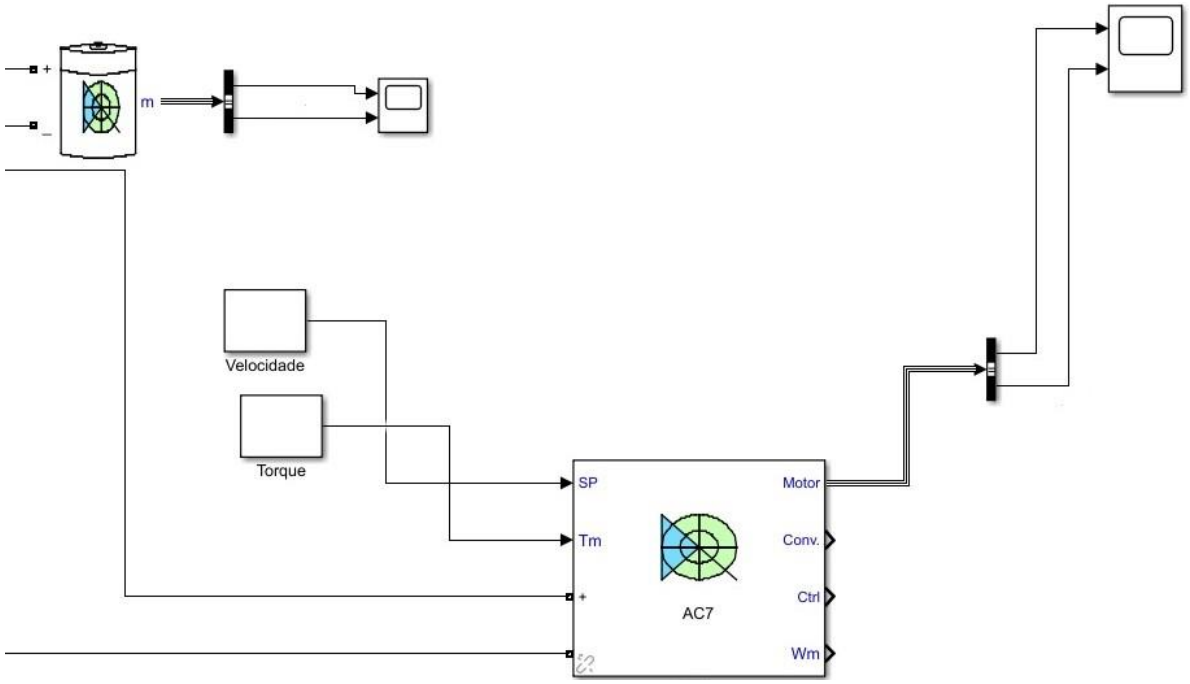
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 29 – Parte 2 Simulação



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 – Simulação Parte 3



Fonte: Produção do próprio autor.

3.8 Conclusão

Neste capítulo foi mostrado como cada elemento da simulação foi modelado em cada parte e os valores utilizados para isso.

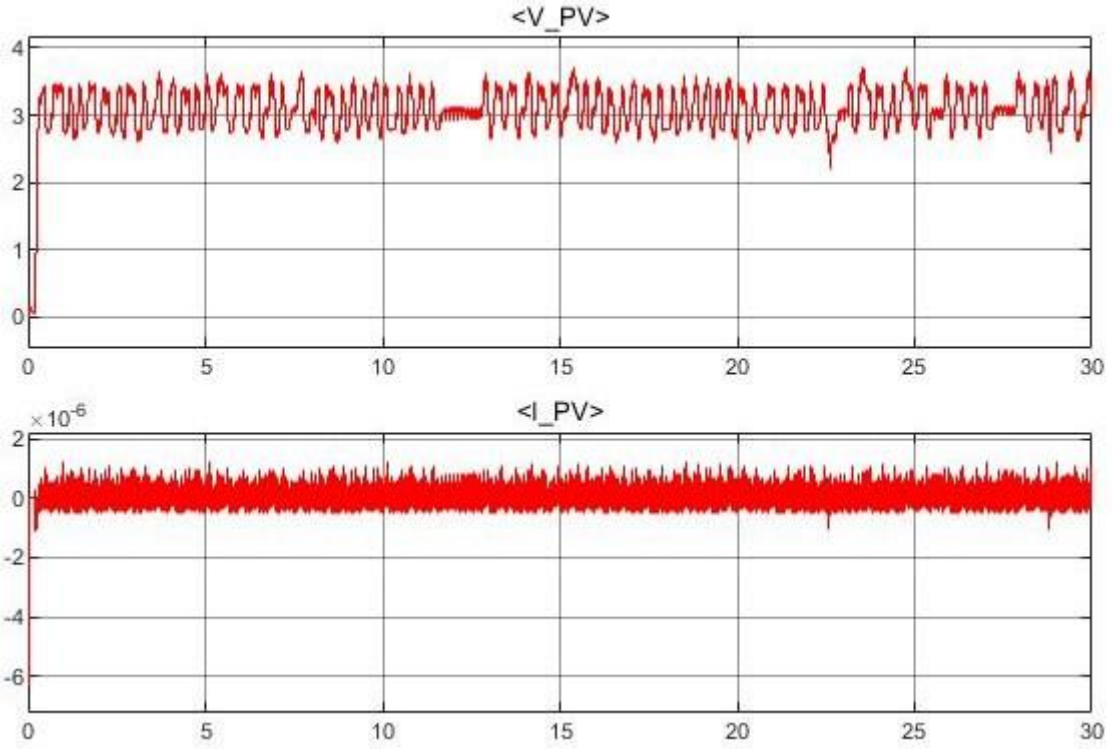
4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para os resultados dois cenários diferentes foram simulados. No primeiro caso a bateria está descarregada e o painel irá alimentar todo o sistema. O segundo caso o painel será retirado para simular dias de chuva ou quando já estiver de noite e o painel não poderá ser usado e a bateria alimentará a carga, para todos esses cenários a capacidade de descarga da bateria utilizado foi o de 90 Ah.

4.1 Bateria Descarregada

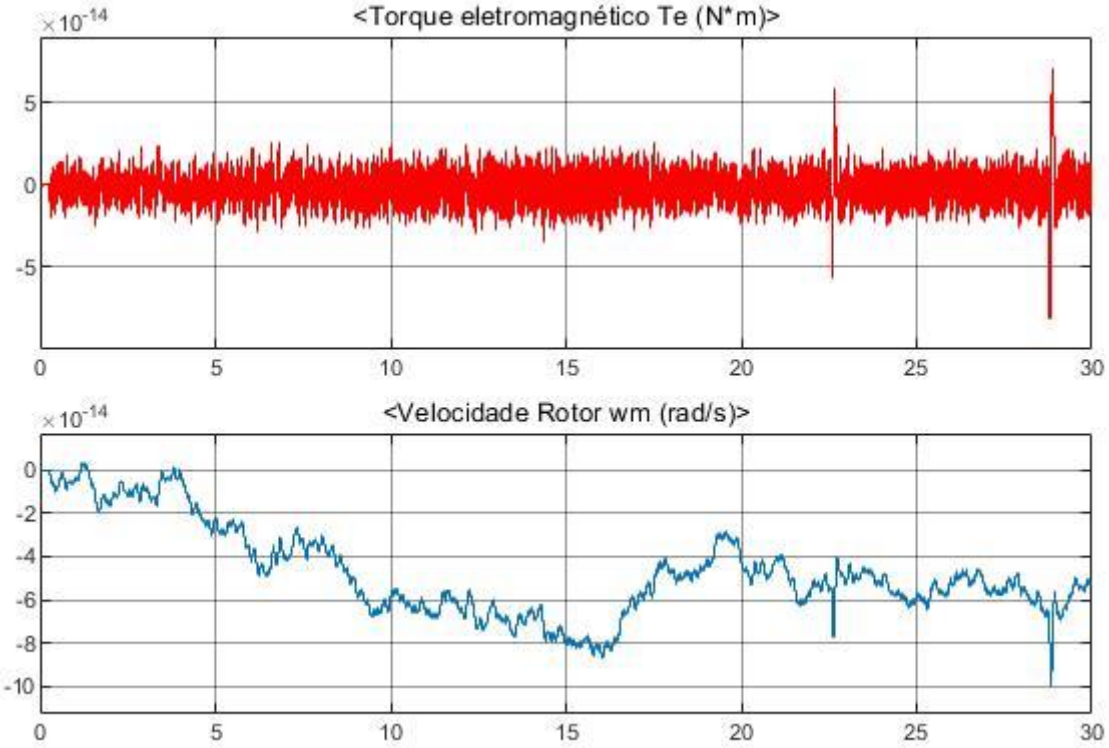
Nesse primeiro cenário o tempo de amostragem é de T = 30 e capacidade de descarga de 90 Ah. Sendo assim, a Figura 31 mostra o que ocorreu com o painel solar nesse tempo, e a Figura 32 mostra o Torque eletromagnético do motor e a velocidade do rotor em rad/s.

Figura 31 – Painel Simulado



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 32 – Torque e Velocidade

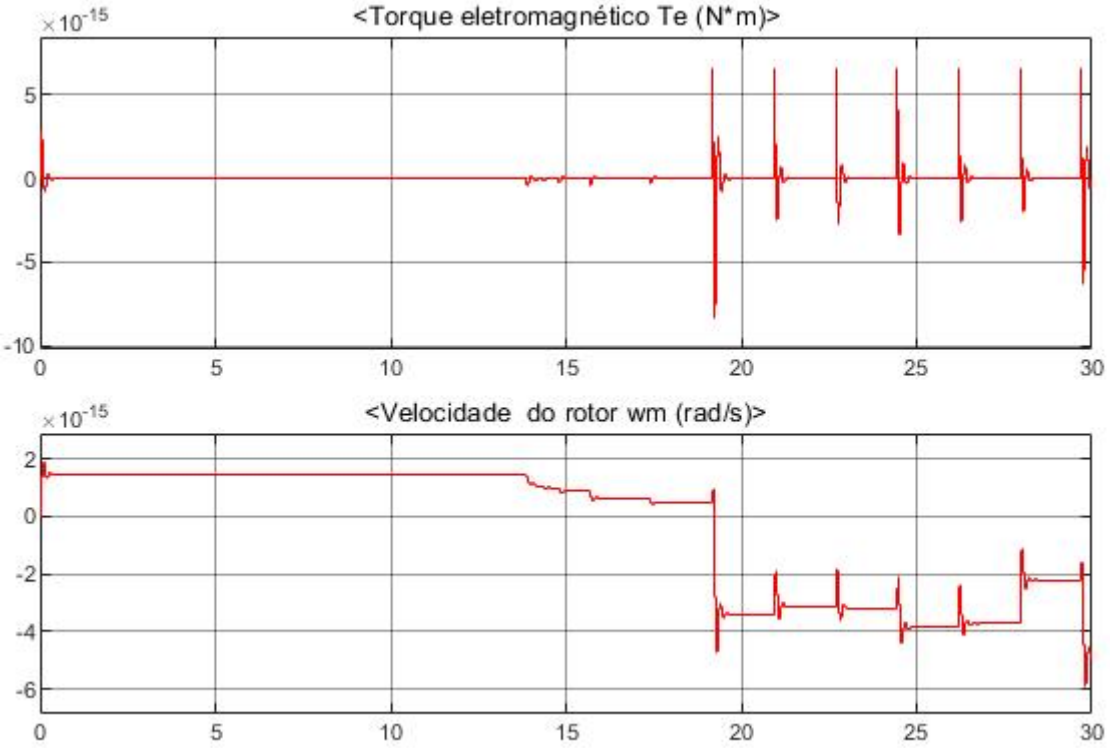


Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 Sem Painel Solar

Nesse segundo cenário, T = 30 e capacidade de descarga de 90 Ah. Sendo assim, a Figura 33 mostra o que irá acontecer no motor.

Figura 33 – Torque e velocidade com bateria



Fonte: Produção do próprio autor.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foram exibidos os resultados obtidos ao rodar o sistema fotovoltaico em alguns cenários que simulariam a prática.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Como se sabe, a energia solar vem apresentando um crescimento no mercado brasileiro. Os veículos elétricos embora ainda não tão presentes no cenário, vem tendo um olhar mais atento do mundo político nos últimos tempos, sendo assim, o uso de um veiculo elétrico, alimentado por um painel fotovoltaico, é de grande importância no futuro tecnológico.

Inicialmente, o modelo a ser simulado foi exibido e, assim, pode-se conhecer cada elemento envolvido nesse sistema fotovoltaico. A partir disso, pôde-se fazer um estudo acerca de cada um desses elementos, foi necessário entender um pouco mais como funciona um painel fotovoltaico, o MPPT, o conversor, a bateria, o inversor e motor, e bem interessante saber um pouco mais sobre os veículos elétricos e como eles surgiram. Tendo essas informações sobre os elementos, as modelagens usadas no Simulink para cada um foram apresentadas e, em alguns casos, como no painel e na bateria, pode-se observar suas características a partir das informações nominais fornecidas e, assim, observar como esses dois elementos se comportam.

Por fim, os resultados foram apresentados e, como se pode observar, não foram aqueles que se esperavam o que mostra que esse modelo simulado, ainda carece de muitas mudanças e variações para refiná-lo melhor. Assim, observam-se situações e cenários possíveis que poderão seguir os resultados que o triclico poderá oferecer.

5.2 Trabalhos Futuros

A partir do trabalho desenvolvido é possível listar algumas sugestões que poderão ser usadas em trabalhos futuros:

- Considerar mais painéis fotovoltaicos para simular um sistema com mais de uma placa e como ele irá agir;
- Implementar outros tipos de MPPT, que possam obter uma maior eficiência e assim fazer uma comparação entre eles;
- Implementar um conversor mais refinado e eficaz em relação ao que foi feito;

- Comparar o cenário real com o simulado a partir de dados obtidos tanto simulado quanto na prática.
- Aumentar tempo e forma das simulações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, F. L.; SILVA, S. B.; TAMASHIRO, M. A.; PICCINI, A. R; GUIMARÃES, G. C.; MORAES, A. J.; CUNHA, G. H.B. Principío de Funcionamento do Rastreamento de Potência Máxima (MPPT), Utilizando o Método de Variação de Condutância. *In:* CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 10, 2012, Uberlândia, Minas Gerais. **Anais** [...]. Uberlândia: 2012. Disponível em: https://docplayer.com.br/19259711-Principio-de-funcionamendo-do-rastreamento-de-potencia-maxima-mppt-utilizando-o-metodo-de-variacao-de-condutancia.html. Acesso em: 20 de nov. 2019.

ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; BRAZ, K. T. M.; LANA, L. T. C.; SANTO, O. C. E.; SACRAMENTO, T. C. B. Energia Solar Fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias Online,** v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**.** **INFOGRÁFICO ABSOLAR.** 2019. Disponível em: http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html. Acesso em: 18 dez. 2019.

AGÊNCIA DE REGULAÇÃO DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Balanço Energético do Espírito Santo – Ano Base 2017**. Vitória: ARSP, 2018.

AGÊNCIA DE SERVIÇOS PÚBLICOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **A Energia Solar no Espírito Santo.** Vitória: ASPE, 2016.

ARAMIZU, A. **Modelagem e Análise de desempenho de um sistema fotovoltaico em operação isolada e em paralelo com uma rede de distribuição de Energia Elétrica.** 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ARAUJO. A; **Microrrede autônoma móvel caracterizada por um painel solar fotovoltaico integrado a um triciclo elétrico**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENO ECONÔMICO E SOCIAL. **Veículos elétricos**: um mercado em ascensão. 2018. Disponível em Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/veiculos-eletricos. Acesso em: 07 dez. 2019.

BRAGA, R. P.; **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação. **Eletrônica de Potência**, v. 13, n. 3, p. 141-146, ago. 2008.

CHIPTRONIC. **Motor Elétrico Automotivo**: Entenda as Diferenças e Vantagens. 2018. Disponível em: https://chiptronic.com.br/blog/motor-eletrico-automotivo-entenda-as-diferencas-e-vantagens#comments. Acesso em: 18 dez. 2019.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA SÉRGIO S. BRITO. **Potencial Solar SunData v 3.0.** 2019. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&. Acesso em: 01 dez. 2019

CYTISYSTEMS. **Motor CC: Saiba como funciona e de que forma especificar**. 2015. Disponível em: https://www.citisystems.com.br/motor-cc/. Acesso em: 07 dez. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional –** Ano Base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional –** Ano Base 2018. Rio de Janeiro: EPE, 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA**. Sobre Veículos Elétricos.** 2019. Disponível em: http://www.inee.org.br/veh_sobre.asp?Cat=veh. Acesso em: 07 dez. 2019.

LEAL, E. A. S; PORCHERA, G. S. O; LOSS, M. E. S; MIRANDA, P. H. R. Vantagens e Barreiras a Utilização de Veículos Elétricos. *In*: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 13, 2016, Resende, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Resende: 2016. Disponível em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos16/28224302.pdf. Acesso: 18 dez. 2019.

MATHWORKS. **Simulink**. [S.I.]: MathWorks, [2019a].

MATHWORKS. **Boost Converter**. [S.I]: MathWorks, [2019b]. (Documentação). Disponível em: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/boost-converter.html. Acesso em: 01 de nov. 2019.

MERCADO LIVRE. **1500 W 30 A Boost DC-DC Conversor Step-Up Controller Conversor.** 2019. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1314381026-1500w-30a-boost-dc-dc-conversor-step-up-controller-conversor-. Acesso em: 21 nov. 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia Solar no Brasil e no Mundo –** Ano Base 2016. Brasília: MME, 2017.

MPPT AND BOOST CONVERTER FOR PV. [S. I.: s.n.], 2019. 1 vídeo (36 min). Publicado pelo canal Naki Guler. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=CLbLkmci5SU&t=1054s. Acesso em: 07 dez. 2019

MOREIRA. H. S; **Estudo de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência Tolerantes a Sombras para Sistemas Fotovoltaicos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

OFICINA DA NET. **Como funciona o motor elétrico de veículos.** 2016. Disponível em: https://www.oficinadanet.com.br/post/18004-como-funciona-o-motor-eletrico-de-veiculos. Acesso em: 18 dez. 2019

PEREIRA, F. A. S.; OLIVEIRA, M. A. S. **Curso técnico instalador de energia solar fotovoltaica**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2015.

PETRY, C. A; **Introdução aos conversores CC – CC**. 2001 Trabalho para Conclusão de Estágio de Docência (Eletrônica de Potência II) – Instituto de Eletrônica de Potência, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SANTOS. F. H. F; **Desenvolvimento de Statcom – MMC Combinado com Geração Solar Fotovoltaica.** 2018**.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

SILVA. L. R. C. **Análise de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT) para Aplicação em Arranjos de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

SOLAR PRO ENGENHARIA. **Energia Solar Fotovoltaica**. 2017. Disponível em: https://loja.solarproengenharia.com/. Acesso em: 07 dez. 2019

VAZ, L. F. H; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. **BNDES Setorial.** Rio de Janeiro, n. 41, p. [295]-344, mar. 2015.

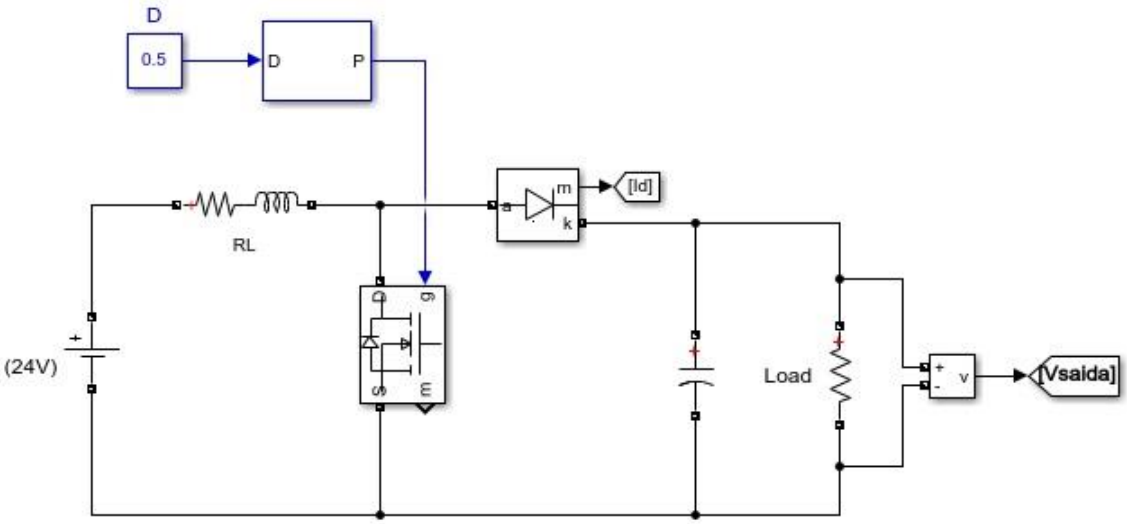
VILELA, A. **Projeto e construção de um conversor Boost controlado em modo de tensão.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

WIND BIKES BICICLETAS ELÉTRICAS. **Kit Conversão Bike Elétrica 600 W 36 V Dianteiro Wind Bikes.** 2019. Disponível em: https://www.windbikes.com.br/index.php?route=product/product&product_id=838&search=%C3%A9+Kit+Convers%C3%A3o+Bike+El%C3%A9trica+600+W+36+V+Dianteiro+&category_id=0. Acesso em: 25 nov. 2019

APÊNDICE A – CONVERSOR BOOST – COMANDO *POWER_BOOSTCONVERTER*

A Figura 34 mostra o circuito original do conversor *Boost*, sugerido pelo Simulink.

Figura 34 – Power Boost Converter



Fonte: MathWorks (2019b).

APÊNDICE B – CÓDIGO MATLAB MPPT

```
function duty = MPPT_algorithm(vpv,ipv,delta)
duty_init = 0.1;
duty_min=0;
duty_max=0.85;

persistent Vold Pold duty_old;
    Vold=0;
    Pold=0;
    duty_old=duty_init;
end
P= vpv*ipv;
dV= vpv - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 && vpv>30
    if dP < 0
        if dV < 0
            duty = duty_old - delta;
        else
            duty = duty_old + delta;
        end
    else
        if dV < 0
            duty = duty_old + delta;
        else
            duty = duty_old - delta;
        end
    end
else
    duty = duty_old;
end


if duty >= duty_max
    duty=duty_max;
elseif duty<duty_min
    duty=duty_min;
end

duty_old=duty;
Vold=vpv;
Pold=P;
```