

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE – CTJ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE SISTEMAS ELETRÔNICOS – PPGESE**

Rogério da Silva

**MICRO-INVERSOR TIPO OFF GRID APLICADO EM
SISTEMA DE ENERGIA RENOVÁVEL FOTOVOLTAICO**

Joinville

2019

Rogério da Silva

**MICRO-INVERSOR TIPO OFF GRID APLICADO EM
SISTEMA DE ENERGIA RENOVÁVEL FOTOVOLTAICO**

Trabalho de Qualificação submetido
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Sistemas Eletrônicos para
a obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Moisés Ferber
de Vieira Lessa

Coorientador: Prof. Dr. Diego Santos
Greff

Joinville

2019



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS ELETRÔNICOS - PPGESE

Avaliação de Exame de Qualificação

No dia **01/07/2019** a partir das **14h**, sala **U118**, Bloco U do Centro Tecnológico de Joinville da UFSC, reuniu-se a Banca Avaliadora de Exame de Qualificação composta pelos seguintes membros:

Nome	Instituição	Função
Prof. Dr. Moisés Ferber de Vieira Lessa	Universidade Federal de Santa Catarina	Presidente
Prof. Dr. Joselito Anastácio Heerd	Universidade do Estado de Santa Catarina	Membro
Prof. Dr. Yales Rômulo De Novaes	Universidade do Estado de Santa Catarina	Membro
Prof. Dr. Milton Evangelista de Oliveira Filho	Universidade Federal de Santa Catarina	Suplente

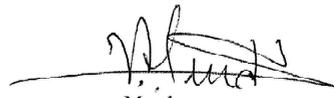
para a avaliação do Projeto de Pesquisa do estudante **Rogério da Silva**, orientado pelo **Prof. Moisés Ferber de Vieira Lessa**, com trabalho intitulado **Micro-inversor tipo OFF GRID aplicado em sistema de energia renovável Fotovoltaico**.

Da avaliação da Banca, o estudante foi considerado APROVADO () REPROVADO no Exame de Qualificação.

Para o caso de reprovação, a Banca levou em conta os seguintes aspectos, que devem ser considerados pelo estudante para nova submissão de requerimento de Exame de Qualificação, nos termos da resolução específica vigente:

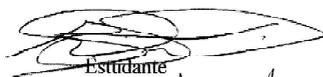
Nestes termos, assinam:


Presidente
Moisés Ferber


Membro
Joselito A. Heerd


Membro
Yales P. de Novaes

Suplente


Estudante
Rogério da Silva

RESUMO

Este trabalho aborda o estudo e uma futura implementação de um Micro-inversor monofásico com LINK CA tipo OFF-Grid a ser aplicado num sistema de energia renovável PV, visando uma ótima relação custo benefício comparado aos conversores tradicionais, pois, os conversores tradicionais utilizam do LINK CC, sendo que o LINK CC é responsável pelo, pelo aumento do volume físico do inversor, pela geração de harmônicas na corrente de saída, em virtude do sistema inviabilizar a técnica do chaveamento suave ZVS e vários outros problemas que poderão ser vistos no trabalho. O Micro-inversor com LINK CA proposto visa reduzir esses problemas. O Micro-inversor ou conversor CC-CA-CA é caracterizado como tendo dois conversores internos, o primeiro um conversor CC-CA, responsável por carregar a energia elétrica gerada pelo módulo PV para o indutor do LINK CA. Esse conversor tem duas pernas, ponte H, tipo unidirecional. O segundo conversor CA-CA é o circuito responsável por descarregar a energia do circuito LC para a carga na saída, o mesmo também é do tipo H, contudo é bidirecional. Entre os dois conversores há um circuito LC, conhecido também como circuito tanque, responsável em parceria com os circuitos conversores pela geração do LINK CA. Até o devido momento, os resultados obtidos se demonstraram bastante favoráveis. O capítulo 1 é apresentado a introdução e os objetivos. No capítulo 2 é apresentado o problema. O capítulo 3 é apresentado uma revisão de todos os elementos para o sucesso de uma implementação de um sistema renovável PV com a utilização do Micro-inversor proposto. O capítulo 4 é apresentado a topologia proposta, funcionamento e resultados. No capítulo 5 é apresentado o plano de trabalho do projeto.

Palavras-chave: LINK CA, Micro-inversor, Fotovoltaico (PV), Energia Renovável, ZVS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Investimento/Capacidade fontes renováveis na área elétrica em 2017.....	29
Figura 3.2 Consumo das fontes de energia pelo mundo em 2016..	30
Figura 3.3 Capacidade por fontes de energia ao final de 2017.....	30
Figura 3.4 Os 5 países que mais investiram nos segmentos das energias renováveis.....	31
Figura 3.5 Capacidade energia elétrica renovável no mundo.....	32
Figura 3.6 Capacidade/Incremento da energia PV mundial.....	33
Figura 3.7 Países que detêm maior capacidade ea energia PV no mundo.....	33
Figura 3.8 Investimentos do Brasil em energias renováveis de 2007 à 2017.....	34
Figura 3.9 Capacidade das fontes de energia elétrica do Brasil em 2019.....	35
Figura 3.10 Tecnologias de células PV: (a) monocristalina; (b) multicristalina; (c) filme fino.....	36
Figura 3.11 % Produção mundial das tecnologias PV entre 1980 à 2017.....	37
Figura 3.12 Capacidade fabricada nas diferentes tecnologias PV entre 2000 à 2017.....	37
Figura 3.13 Países que produziram células/módulos PV entre 2005 à 2018.....	38
Figura 3.14 Eficiência das diferentes tecnologias PV obtidos em laboratório entre 1976 à 2019.....	39
Figura 3.15 Eficiência das células e módulos das principais tecnologias PV em 2018.....	39
Figura 3.16 Características construtiva dos módulos PV.....	40
Figura 3.17 Curva I-V de um módulo PV.....	41
Figura 3.18 Dados de diferentes tipos de células PV.....	43
Figura 3.19 Circuito equivalente de uma célula PV real.....	43
Figura 3.20 Comportamento da corrente x tensão com a variação da radiação.....	44
Figura 3.21 Comportamento da corrente x tensão com a variação da temperatura.....	44

Figura 3.22 Célula e módulo PV: (a) Célula PV; (b) Módulo PV; (c) Módulos PV em série e paralelo.....	45
Figura 3.23 Configuração de módulos PV: (a) Módulos PV em série; (b) Módulo PV em paralelo; (c) Módulos PV em série e paralelo.	46
Figura 3.24 Conversor CC-CC: (a) Circuito básico; (b) Forma de onda do conversor CC-CC.....	49
Figura 3.25 Exemplo sinal PWM: (a) Circuito eletrônico; (b) Formas de onda.....	50
Figura 3.26 Circuito elétrico de um conversor Buck.....	50
Figura 3.27 Ganho estático versus razão cíclica D no conversor Buck.....	51
Figura 3.28 Principais forma de ondas do conversor Buck.....	52
Figura 3.29 Circuito elétrico de um conversor Boost.....	53
Figura 3.30 Tensão no indutor do conversor Boost.....	54
Figura 3.31 Ganho estático versus razão cíclica D no conversor Boost.....	54
Figura 3.32 Principais forma de ondas do conversor Boost.....	55
Figura 3.33 Circuito elétrico de um conversor Buck-Boost.....	55
Figura 3.34 Ganho estático versus razão cíclica D no conversor Buck-Boost.....	56
Figura 3.35 Principais forma de ondas do conversor Buck-Boost...	57
Figura 3.36 Conversor CC-CA monofásico VSI.....	58
Figura 3.37 Conversor CC-CA monofásico CSI.....	58
Figura 3.38 Conversor CC-CA monofásico meia ponte.....	59
Figura 3.39 Curva da tensão em relação a razão cíclica.....	59
Figura 3.40 Conversor CC-CA monofásico ponte completa.....	60
Figura 3.41 Formas de onda da tensão de saída do conversor CC-CA ponte completa SPWM bipolar.....	61
Figura 3.42 Conversor CC-CA multinível tipo cascata simétrica...	62
Figura 3.43 Conversor CA-CA monofásico.....	62
Figura 3.44 Formas de onda da tensão de entrada e PWM nas chaves.....	62
Figura 3.45 Motobomba instalada na cisterna.....	63
Figura 3.46 Placa de identificação na motobomba.....	64
Figura 3.47 Placa de identificação do motor da motobomba.....	64
Figura 3.48 Circuito equivalente do motor monofásico com capaci-	

tor permanente.....	66
Figura 3.49 Circuito equivalente do ensaio com rotor bloqueado e bobina auxiliar aberta.....	68
Figura 3.50 Circuito equivalente do ensaio com rotor bloqueado e bobina auxiliar aberta.....	69
Figura 3.51 Circuito equivalente do ensaio com motor em vazio e enrolamento auxiliar aberto.	71
Figura 4.1 Topologia do micro-inversor proposto.....	74
Figura 4.2 Representação FSM como atuador do conversor.....	75
Figura 4.3 Formas de onda IRef, ILP, Vo.	77
Figura 4.4 Ciclo de comportamento de carga e descarga do Link CA.	77
Figura 4.5 Estado 1 - Carga semi-ciclo positivo do Link CA.....	78
Figura 4.6 Estado 2, 4 6 e 8 - Ressonância Link CA.....	79
Figura 4.7 Estado 3 - Incremento da tensão do Semi-Ciclo positivo. 80	
Figura 4.8 Estado 3 - Incremento da tensão do semi-ciclo negativo. 80	
Figura 4.9 Estado 3 - Decremento da tensão do semi-ciclo positivo. 81	
Figura 4.10 Estado 3 - Decremento da tensão do semi-ciclo negativo. 81	
Figura 4.11 Estado 5 - Carga semi-ciclo negativo do Link CA.	82
Figura 4.12 Estado 7 - Incremento da tensão do semi-ciclo positivo. 82	
Figura 4.13 Estado 7 - Incremento da tensão do semi-ciclo negativo. 83	
Figura 4.14 Estado 7 - Decremento da tensão do semi-ciclo positivo. 83	
Figura 4.15 Estado 7 - Decremento da tensão do semi-ciclo negativo. 83	
Figura 4.16 Formas de onda do ciclo do fluxo de energia.	85
Figura 4.17 Formas de onda da entrada (VPV, IPV) e saída (Vo, Io).....	86
Figura 4.18 % Eficiência do micro inversor proposto.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Características dos módulos PV com regime STC.	47
Tabela 3.2 Características dos módulos PV com regime NOCT....	48
Tabela 3.3 Percentual da potência e resistência na carga.	65
Tabela 4.1 Parametros do micro-inversor proposto.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FP	Fator de Potência
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
DNAEE	Departamento Nacional de Aguas e Energia Elétrica
VSI	“Voltage Source Inverter” - Inversor com Fonte de Tensão
CSI	“Current Source Inverter” - Inversor com Fonte de Corrente
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
PWM	“Pulse Width Modulation” - Modulação por Largura de Pulso
SPWM	“Sinusoid Pulse Width Modulation” - Modulação por Largura de Pulso Senoidal
CSP	“Concentrating Solar Power” - Energia Solar Concentrada
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
STC	“Standard Testing Conditions” - Condições de Teste Padrão
NOCT	“Nominal Operation Cell Temperature” - Temperatura Nominal de Operação da Célula
ZVS	“Zero Volts Switching” - Chaveamento com zero volts
ZCS	“Zero Currents Switching” - Chaveamento com zero corrente
FSM	“Finite-State Machines” - Máquina de estado finito
PV	“Photovoltaics” - Fotovoltaico
UV	Ultravioleta
TL	Tensão de Linha
IGBT	“Insulated Gate Bipolar Transistor”
OFF-Grid	Desconectado da Rede Pública
ON-Grid	Conectado a Rede Pública
PSIM	“Power Electronics Simulation” - Simulador de Eletrônica de Potência

LISTA DE SÍMBOLOS

\int	Integral
\prod	Produtório
I	Corrente (A)
V	Tensão (V)
D	Razão Ciclica do Conversor
I_{Ref}	Corrente de Referência
I_{LP}	Corrente da Bobina do Circuito LC
V_o	Tensão de Saída
I_o	Corrente de Saída
LC	Indutor e Capacitor
VPV	Tensão Módulo Fotovoltaico
VLP	Tensão no circuito LC
CLP	Capacitor do circuito LC
LLP	Indutor do circuito LC
LFo	Indutor do Filtro de Saída
IPV	Corrente Módulo Fotovoltaico
P_{MPP}	Ponto de Máxima Potência
V_{MPP}	Tensão de Máxima Potência
I_{MPP}	Corrente de Máxima Potência
I_{SC}	Corrente de Curto Circuito
V_{OC}	Tensão de Circuito Aberto
FF	Fator de Forma
I_L	Corrente Foto Gerada
R_{SH}	Resistência da Corrente de Fuga
R_S	Perdas da Célula/Módulo PV
I_D	Corrente do Diodo
V_1	Tensão sobre o módulo 1
V_2	Tensão sobre o módulo 2
V_3	Tensão sobre o módulo 3
V_4	Tensão sobre o módulo 4
I_1	Corrente no circuito 1
I_2	Corrente no circuito 2

AM	Parâmetro de Massa de Ar
T_s	Intervalo de Comutação - Período
T_s	Frequência de Comutação
T_{on}	Período da Chave Ligada
V_i	Tensão de Entrada
VCC	Tensão Corrente Contínua
V_c	Tensão Referência Modulação
$D1, D2$	Diodos
S	Chave do Conversor
L_o	Bobina do Conversor
C_o	Capacitor do Conversor
$CFin$	Capacitor do Filtro de Entrada
CFo	Capacitor do Filtro de Saída
R_o	Resistência na Saída do Conversor
V_g	Tensão de Entrada
Q_1, Q_2	Chave do Conversor
V_A, V_B	Tensão nas Chaves do Conversor
i_L	Corrente no Indutor
v_o	Tensão de Saída
V_f	Tensão do Capacitor ou Tensão de Entrada
v_{ab}	Tensão na Saída do Conversor
v_{abpk}	Tensão de Pico na Saída do Conversor
MI	Índice de Modulação
v_{Lc}	Tensão no Indutor do Conversor
E	Fonte de Tensão
Z_o	Impedância de Saída
P_m	Potência Máxima do Módulo Fotovoltaico
I_m	Corrente Máxima do Módulo Fotovoltaico
V_{bm}	Tensão Bobina Principal
I_{bm}	Corrente Bobina Principal
P_{bm}	Potência Bobina Principal
X_1	Reatância da Bobina Principal
Z_{bm}	Impedância da Bobina Principal
X_{bm}	Impedância da Bobina Principal

V_{ba}	Tensão Bobina Auxiliar
I_{ba}	Corrente Bobina Auxiliar
P_{ba}	Potência Bobina Auxiliar
X_{nL}	Reatância Total da Carga
P_r	Perdas Rotacionais
X_{ba}	Impedância da Bobina Auxiliar
OFF	Desligado
ON	Ligado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo Geral	21
1.1.2	Objetivos Específicos	21
2	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	23
3	SISTEMA DE ENERGIA RENOVÁVEL FOTO- VOLTAICO (PV)	25
3.1	GERADOR FOTOVOLTAICO (PV)	25
3.1.1	História	25
3.1.2	Energia fotovoltaica	28
3.1.2.1	Investimento/Capacidade das fontes renováveis na área Elétrica	29
3.1.2.2	Consumo das fontes de energia no mundo	29
3.1.2.3	Capacidade das fontes de energia elétrica	30
3.1.2.4	Os 5 países com maiores investimentos nas fontes de ener- gias renováveis	31
3.1.2.5	Capacidade energia elétrica renovável no mundo	32
3.1.2.6	Capacidade/Incremento da energia PV mundial	32
3.1.2.7	Países que detêm maior capacidade da energia PV no mundo	32
3.1.2.8	Investimentos do Brasil em energias renováveis	34
3.1.2.9	Como o Brasil se encontra?	34
3.1.3	Células e módulos PV	35
3.1.3.1	Tecnologia de células PV	36
3.1.3.2	% Produção mundial das tecnologias PV	36
3.1.3.3	Capacidade fabricada das tecnologias PV	36
3.1.3.4	Onde estão os fabricantes das células/módulos PV?	37
3.1.3.5	Evolução da eficiência das diferentes tecnologias PV	38
3.1.3.6	Eficiência das principais tecnologias de células e módulos .	38
3.1.3.7	Características construtiva dos módulos PV	38
3.1.3.8	Características elétricas dos módulos PV	41
3.1.3.9	Configuração das células e módulos PV	44
3.1.4	Comparação de módulos PV	46
3.2	CONVERSORES ESTÁTICOS CC-CC / CC-CA / CA-CA	48
3.2.1	Conversores estáticos CC-CC	48
3.2.1.1	Princípio dos conversores estáticos CC-CC	48
3.2.1.2	Conversor Buck	50
3.2.1.3	Conversor Boost	52

3.2.1.4	Conversor Buck-Boost	55
3.2.2	Conversores estáticos CC-CA (Inversores)	57
3.2.2.1	Conversor CC-CA monofásico meia ponte	58
3.2.2.2	Conversor CC-CA monofásico ponte completa.....	59
3.2.2.3	Conversor CC-CA multinível tipo cascata simétrica	61
3.2.3	Conversor estático CA-CA	61
3.3	CARGA MICRO-INVERSOR	63
3.3.1	Resistiva	65
3.3.2	Motor monofásico com capacitor permanente	66
3.3.2.1	Como obter os parâmetros do motor monofásico?	67
3.3.2.2	Ensaio com rotor bloqueado.....	67
3.3.2.3	Ensaio com motor em vazio	70
4	TOPOLOGIA E FUNCIONAMENTO DO MICRO- INVERSOR PROPOSTO	73
4.1	CONTROLE DO MICRO-INVERSOR.....	74
4.2	FUNCIONAMENTO DO MICRO-INVERSOR	77
4.2.1	Estado 1 (Energização).....	78
4.2.2	Estado 2 (Ressonância parcial)	79
4.2.3	Estado 3 (Desenergização)	79
4.2.4	Estado 4 (Ressonância parcial)	81
4.2.5	Estado 5 à 8 (Similar aos estados 1 à 4)	81
4.3	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	82
4.4	CONCLUSÃO	86
5	PLANO DE TRABALHO	89
	REFERÊNCIAS	91
	APÊNDICE A - Cronograma	99

1 INTRODUÇÃO

A proposta da pesquisa está muito alinhada com a importância das fontes de energias renováveis para a humanidade.

Essa questão é tema anual de uma comunidade mundial, que envolve mais de 900 peritos de áreas diversas, entre elas estão os acadêmicos e a ciência (REN21, 2018).

As fontes de energia não renováveis, como os combustíveis fósseis e outras são limitadas e poluentes.

Ao final de 2017 o Brasil aumentou sua capacidade de fonte PV em 0,9 GW, chegando a 1,1GW acumulado, isso corresponde a 1% da capacidade global (REN21, 2018).

A capacidade das fontes de energia renováveis global ao final de 2017 chegaram a 2,195GW que resultaram os 26,5% informados anteriormente. Sendo que 16,4% são de hidroelétricas, 5,6% são de energia Eólica, 2,2% de energia Biomassa, 1,9% de energia PV e 0,4% energias oceânica, CSP e geotermal (REN21, 2018).

Quanto a tendência mundial nas formas de energias renováveis, as energias eólica e PV estão com o maior crescimento entre 2007 à 2017 (REN21, 2018).

Os investimentos quanto as fontes de energias renováveis foram de 280 bilhões USD em 2017.

Onde, 160,8 bilhões USD foram destinados a energia solar.

Em segundo lugar com 107 bilhões USD foi a energia eólica.

Enquanto as outras fontes de energia renováveis ficaram com aproximadamente 12,2 bilhões USD.

Comparando o investimento de 2017 com 2016, ouve um acréscimo de investimento de 18% voltado a tecnologia "PV", enquanto a eólica que está em segundo lugar apresentou uma queda de 12%, todas as demais fontes de energias também apresentaram queda quanto aos investimentos.

Um componente importante nos conversores estáticos em geral são as chaves semicondutores, pois os mesmos são responsáveis pela grande parte das perdas de eficiência.

Conforme (De Doncker et al., 2010), a eficiência máxima das tecnologias apontam que o Mosfet chega a 98,8% e o IGBT 97,2% sobre uma condição de 350VDC, lembrado ainda que a melhor condição dessa medição a nível de eficiência é sobre um sistema trifásico, pois, se mantém um fluxo de energia contínuo no LINK-DC para a rede. Assim como, ao aumentar o nível de tensão DC essa eficiência cai, assim como,

a eficiência alcança seu ponto máximo de eficiência próximo a 50% da potência.

Com base em (De Doncker et al., 2010), sugere-se a substituição dos atuais IGBTs utilizados nos conversores eletrônicos PV pelos semicondutores SiC-JFET, assim como, relata sobre a construção de um inversor fotovoltaico que já utiliza essa tecnologia, com uma eficiência máxima de 99%.

O conversor DC-AC-AC (AMIRABADI; TOLIYAT; ALEXANDER, 2013) (AMIRABADI et al., 2014) traz uma topologia bastante arrojada, comparado as topologias convencionais do mercado.

Elimina o LINK-DC, responsável pelo buffer de energia intermediário, de contra partida também é responsável por grande parte da redução da vida útil dos conversores, onera a fabricação e a manutenção. Assim como, o LINK-DC impacta no tamanho do conversor e apresenta elevado nível de harmônica.

Com base na topologia com Link-AC (AMIRABADI; TOLIYAT; ALEXANDER, 2013) (AMIRABADI et al., 2014), o micro inversor trará inúmeros benefícios, entre eles, o tamanho, a redução de harmônicos na rede, aumento da vida útil do conversor e redução no custo de fabricação e manutenção.

Como desvantagem dessa proposta, maior complexidade quanto a implementação do controle.

Esse trabalho está organizado da seguinte forma: Ainda no capítulo I é apresentado os objetivos do trabalho, no Capítulo II é apresentado a contextualização do problema, que levou ao desafio, no Capítulo III é apresentado um sistema de energia renovável PV e todas as partes que fazer parte desse sistema, no Capítulo IV é apresentado a topologia do conversor proposto, detalhes de funcionamento, a técnica de controle aplicada e os resultados obtidos até o momento atual, no Capítulo V é apresentado o Plano de Trabalho.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho visa estudar, projetar e aplicar um conversor monofásico tipo OFF-Grid a ser aplicado em sistemas de energias renováveis PV. Assim como, identificar e promover uma topologia pouco convencional, visando uma redução dos problemas identificados nos conversores convencionais, conforme (AMIRABADI; TOLIYAT; ALEXANDER, 2013) (AMIRABADI et al., 2014).

1.1.1 Objetivo Geral

Quanto a abrangência desse trabalho, tem-se como objetivo, a busca por uma maior viabilidade das aplicações de sistemas renováveis PV.

Alinhado ao objetivo mencionado anteriormente, o trabalho tem como proposta o estudo, projeto e aplicação de um Micro-inversor com Link-CA monofásico tipo OFF-Grid. Proposta não convencional para esses tipos de aplicações, usualmente são utilizados inversores com Link-CC.

Esse Micro-inversor será responsável por fornecer a energia de forma autônoma e isolada da rede da energia elétrica pública, para uma motobomba de uma cisterna residencial.

As características elétricas básicas da motobomba são 220V, 60Hz e 1/3CV.

Os parâmetros que representam o circuito equivalente da motobomba precisarão ser encontrados, conforme (MANCUSSI, 2013).

A cisterna que está instalada a motobomba, é responsável por guardar a água de chuva que vem dos telhados, com propósito de utilização futura.

Sua aplicação tem como objetivo minimizar o impacto no meio ambiente, ou seja, visa que a residência seja parcialmente sustentável e ecológica.

A motobomba por sua vez, leva a água da chuva da cisterna para uma caixa de água sobre a casa, para que seja consumida nos vasos sanitários, lavação de pisos/carros ou molhar o jardim.

Atualmente a motobomba é alimentada pela energia elétrica da rede pública, ou seja, após implementação do sistema de energia renovável PV, permitirá com que esse sistema seja totalmente autônomo e independente das redes públicas e 100% de energia renovável na forma elétrica e hidráulica quanto a parte mencionada.

Ou seja, como resultado final, tem-se como objetivo ter parte de uma casa residencial trabalhando de forma OFF-Grid, desconectado do serviço público, a nível de energia elétrica e hidráulica.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivo específico, é necessário estudar de forma aprofundada a técnica do Micro-inversor com Link-CA monofásico (AMIRABADI; TOLIYAT; ALEXANDER, 2013) (AMIRABADI et al., 2014) (DOU-

SOKY; ABU-RUB, 2014).

Validar o correto funcionamento do Micro-inversor com carga resistiva, analisando as principais formas de onda a nível de entrada, Link CA e saída. Utilizar a ferramenta de simulação PSIM.

Validar o correto funcionamento do Micro-inversor com o circuito equivalente da motobomba, analisando as principais formas de onda a nível de entrada, Link CA e saída. Utilizar a ferramenta de simulação PSIM.

Projetar o protótipo do Micro-inversor com os detalhes de fabricação, providenciar as compras necessárias e fabricar.

Testar o correto funcionamento do Micro-inversor com carga resistiva e com a motobomba.

Comparar os resultados obtidos do simulado e do protótipo.

Validar os resultados obtidos, comparado aos objetivos.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Nos dias atuais, a energia elétrica ainda é um luxo para parte da população humana, parece estranho, aos olhos de quem não vive o problema, entretanto, é um fato.

Há 1,06 bilhões de pessoas (próximo a 14% da população mundial) que não dispõem de energia elétrica, dados de 2016 conforme (REN21, 2018).

Isso ocorre, principalmente nas populações de menor poder aquisitivo, a Índia, tem cerca de 48% da população que não tem acesso a energia elétrica, está ocorrendo grandes avanços quanto a redução desse índice, contudo em algumas regiões está ocorrendo de forma lenta.

A Ásia tem sido um exemplo positivo, quanto ao crescimento da população com acesso a energia elétrica, saindo de uma população sem acesso a energia próximo a 1 bilhão em 2000, para menos de 440 milhões em 2016. Esse salto se deu principalmente pelos países China, Bangladesh, Indonésia e Índia, conforme (REN21, 2018).

Muitas vezes existem dificuldades, que inviabilizam aos governos garantirem acesso a energia elétrica pública convencional, exemplo disso, são os casos das populações nas áreas rurais ou áreas remotas.

Conforme o IPEA (IPEA, 2019), o Brasil oferece acesso a energia elétrica a 99,8% da população, dados de 2017.

Tendo em vista, que a grande massa populacional do Brasil tem acesso a energia elétrica, o governo demonstra muitas vezes não ter essa preocupação. Pois, acesso a energia elétrica é também possibilitar preços baixos, faz parte do compromisso (REN21, 2018). Isso, não tem sido demonstrado a população do Brasil.

Em busca da redução do preço, a população muitas vezes tem buscado alternativas por conta própria, como a instalação de fontes de energias renováveis PV, com pouco incentivo por parte do governo.

Outras vezes, roubando energia, por diferentes classes sociais, como se tem visto em denúncias por meio de jornais. Nessa segunda alternativa, essa diferença é paga pela população que tem feito o que é certo.

É notório a preocupação das maiores potências do mundo quanto a necessidade da migração das formas de energias não renováveis pelas do tipo renováveis, conforme (REN21, 2018).

Isso se dá, pela importância do tema para a humanidade, as energias renováveis trazem inúmeras vantagens futuras: trata-se de uma fonte de energia sustentável, reduz bruscamente o impacto quanto

a poluição, trata-se de uma fonte de energia ilimitada. Ou seja, o governo que trabalha em prol dessa migração está beneficiando a sua população.

Isso pode ser feito pelo incentivo as pesquisas voltados a essa área, assim como, pelo incentivo a população e as indústrias, através dos investimentos voltados ao custeio das implementações dos sistemas de energias renováveis PV.

Sobre os 0,2% da população do Brasil que não tem acesso a energia elétrica, se dá na grande maioria pela população que mora em áreas de difícil acesso, como as áreas rurais ou remotas.

Voltado a esse público e a outros que visam ter um fornecimento de energia por fontes independentes OFF-Grid, é interessante a aplicação dos sistemas de energias renováveis PV OFF-Grid mais baratos.

Contudo, nos dias atuais, o preço de implantação de um sistema de energia renovável PV ainda é um desafio, atualmente esses sistemas são implantados por uma pequena parte da população que detém melhores condições financeiras.

Em virtude disso, os pesquisadores tem buscado de forma contínua, o aumento da eficiência, a redução do tamanho, o aumento da vida útil, a redução das manutenções e por consequência a redução dos custos dos sistemas de energia renováveis PV. Viabilizando ainda mais e tornando-os mais competitivos.

Dentro do sistema de energia renovável PV há duas grandes áreas de pesquisas, uma voltada aos módulos PV e uma segunda aos inversores, os inversores são responsáveis por fazer a interface entre a energia elétrica gerado pelo Módulo PV e a rede de energia elétrica a ser utilizada pela população, que pode ser OFF-Grid e On-Grid.

A respeito dos inversores que é o objetivo específico desse estudo, a maioria dos inversores apresentam os problemas mencionados anteriormente, grandes volumes quanto a construção física, curto tempo de vida do inversor, alto índice de manutenção, alto índice de harmônicas na corrente de saída, baixa eficiência, elevado custo de fabricação conforme (AMIRABADI; TOLIYAT; ALEXANDER, 2013) (AMIRABADI et al., 2014).

3 SISTEMA DE ENERGIA RENOVÁVEL FOTOVOLTAICO (PV)

Energia renovável PV é uma das fontes de energias com maior investimento em 2017 conforme (REN21, 2018), é uma comunidade mundial voltada a pesquisa, compartilhando experiências, possibilitando com que os países se desafiem em prol de um futuro melhor para a humanidade, visando uma redução das fontes de energias não renováveis e poluentes como as fósseis e nuclear. Substituindo-as por fontes renováveis.

Nessa organização há participação de várias organizações: governamentais, não governamentais, indústrias, pesquisadores, cientistas, acadêmicos e outros.

Mais de 900 especialistas de vários países fazem parte dessa organização.

O Brasil é um desses países.

3.1 GERADOR FOTOVOLTAICO (PV)

É o principal componente dentro de um sistema de energia renovável PV, trata-se do componente físico responsável por converter a energia solar em uma energia elétrica. Muito utilizado pela humanidade.

É possível afirmar, que a energia solar não será extinta por consequência dessa tecnologia, tendo em vista, que a energia solar estará disponível sendo utilizada ou não. Portanto, trata-se de uma energia renovável.

3.1.1 História

Essa seção visa apresentar uma evolução histórica a respeito da energia solar, tendo em vista a importância para a humanidade. Segundo (BURTON, 2016), o sol era utilizado para o conforto dos Romanos, reconhecido como, casa de banho na cidade Zippori, hoje Israel, a energia solar entrava pela janela, construída no sentido Sul, visando o aquecimento da água.

O fato teve grande relevância histórica, tal que, no século 6, nas construções particulares levou-se em conta a necessidade da chamada,

sala do sol. Assim como, nas construções públicas, onde decretou-se na época, o chamado “direito ao sol, com objetivo de garantir acesso a luz solar para todos.

Conforme (BURTON, 2016) é lembrado ainda que, na época muito pouco se tinha de conhecimento sobre a energia solar, quanto a sua dinâmica e possíveis aplicações tecnológicas. Isso ocorreu alguns séculos mais tarde.

Conforme (BURTON, 2016), no século XIX que se descobriu a possibilidade da geração da energia elétrica através da energia solar. Mais precisamente, em 1839, o físico francês Edmond Becquerel, descobriu o fenômeno, efeito “PhotoVoltaic (PV)”, através da inserção de um eletrodo numa solução condutora e expondo-os a luz solar.

A partir daí, compreendeu-se que esse fenômeno ocorre sempre que a energia do fóton encontra o material semicondutor, transferindo-a numa forma de uma energia elétrica por intermédio do átomo desse material.

Os materiais, Silício ou Platina geram essa energia elétrica, transferindo através dos eletrodos, logo, estes eletrodos conduzirão a corrente elétrica para a carga.

Mesmo que Becquerel não entendesse todo o princípio de funcionamento na época, ajudou quanto ao conhecimento dos princípios subjacentes, após evolução, possibilitando uma maior aplicação desses efeitos.

Em 1861 o matemático francês Auguste Mouchet com seu assistente Abel Pifre fabricaram o primeiro motor movido a energia solar e posteriormente o utilizaram em uma série de aplicações.

Após alguns anos, W. G. Adams e R. E. Day observaram um efeito semelhante sobre o Selênio solidificado, que originou um artigo influente, no *ProceedingsoftheRoyalSociety* possibilitando a uma série de novas tecnologias.

Em 1880 foram feitas as primeiras células PV, e as mesmas alcançaram uma eficiência entre 1% à 2%.

Essa conversão foi aprimorada e o efeito fotovoltaico mais popularizado pelo cientista alemão Heinrich Hertz em 1887. Com base nas descobertas de Hertz, em 1891 viabilizou-se o primeiro aquecedor solar, patenteado na época. Entre 1888 à 1897 várias patentes foram feitas sobre célula solar (PV) e foram concedidas aos químicos, físicos e engenheiros elétricos Russos e Americanos.

As células fotovoltaicas eram fabricadas com o mais puro silício cristalino, medido pelo medidor Czochralski, em homenagem ao cientista polaco Jan Czochralski, que ajudou a desenvolver as células fo-

tovoltaicas, essa descoberta ocorreu durante a investigação da cristalização.

Em 1905 Albert Einstein publicou um artigo sobre o efeito fotovoltaico numa forma quântica. Devido a sua outra grande descoberta, a teoria da relatividade, o artigo do efeito fotovoltaico chamou ainda mais a atenção. Em 1921, Einstein é homenageado pelo trabalho do efeito fotovoltaico.

Na segunda e terceira década do século XX encontrou-se duas grandes barreiras, vividas até nos dias atuais, o meio político e econômico. Essas dificuldades detêm um grande salto quanto a utilização das fontes de energia solar, assim como, se demonstram desfavoráveis a aplicação em massa das mesmas.

Em 1930 as indústrias de aquecedores solar praticamente pararam nos Estados Unidos, devido a uma grande reserva de gás natural na Califórnia.

O impacto sobre as indústrias que estavam com foco na energia solar, Willian Bailey, envolvido na comercialização dos aquecedores solar, teve que adequar seu projeto, calefator de água, com controle termostático a gás.

Comercializando-o como marketing na época.

Após a segunda guerra mundial, com queda do custo da energia elétrica, com a guerra comercial da indústria de gás oferecendo ainda mais os aquecedores a gás, reduziu-se drasticamente a popularidade dos aquecedores de água solar.

Entretanto, as inovações voltadas a energia solar não pararam por ali, visando torná-las mais viáveis economicamente e competitividade. Nos dias atuais os aquecedores solar são amplamente utilizados em todo o mundo.

O laboratório de Bell em New Jersey nos Estados Unidos desenvolvem grandes aplicações voltadas a energia solar, do aquecimento a outras, como as das células solar para atividades no espaço.

O pesquisador do laboratório Bell, Russell Shoemaker OHL, ao manusear amostras de silício, acabou criando de forma involuntária a junção P-N. OHL patenteia a célula solar com 1% de eficiência ainda em 1954.

Um grupo de cientistas do laboratório Bell, formado por Daryl Chapin, Gerald Pearson e Calvin Fuller apresentaram o primeiro experimento prático da célula solar. Foi feito de silício, em seguida, esse material se tornaria o primeiro chip de um computador.

Inicialmente os painéis fotovoltaicos PV tinham eficiência de 4%, chegando posteriormente a 11%. Esses painéis foram apresentados na

“National Academy of Science Meeting”.

O jornal “The New York Times” previam que as células fotovoltaicas armazenariam a energia ilimitada do sol ““limitless energy of the sun””.

Acabou sendo possível em virtude do desenvolvimento de várias áreas, como: a eletrônica de potência, a necessidade das redes de energia inteligentes, o controle de sistemas de energia distribuídos, a necessidade da automação e assim por diante.

No ano de 1970, Elio Burman desenvolveu as células PV com menor custo. Em 1973 houve embargo ao petróleo auxiliando as indústrias quanto ao crescimento do seguimento solar.

Nessa época, o departamento de energia dos Estados Unidos, fundou o programa federal da utilização fotovoltaica, oportunizando a instalação e teste de mais de 3000 sistemas PV. Teve grande importância, tendo em vista que a energia fornecida pelo sistema PV é uma fonte de energia intermitente, necessitando inovação tecnológica para integração com a rede de energia e cooperação das concessionárias de energia, questão apoiada pelo programa.

As células PV foram utilizadas em várias aplicações, entretanto, não chegou até o final do século XX. Por volta de 1980 passaram a comercializar e desenvolver as primeiras plantas CSP, foram instalados nos estados mais ensolarados dos Estados Unidos, assim como, em outras localidades do mundo, África, Europa, México e outros.

Haviam três quesitos obrigatórios para viabilizar as instalações dessas unidades de geração de energia solar: área de terra apropriada, linhas de transmissão de energia e um financiamento constante.

Com o desenvolvimento tecnológico e político há um estímulo crescente da utilização da energia solar no mundo, fazendo com que os custos da energia solar continuem a cair com o crescimento da economia, sendo cada vez mais utilizada de forma integrada a rede elétrica.

Uma das principais características da fonte de energia solar, visa a sustentabilidade de energia ao longo dos tempos. E tem se demonstrado ser uma das energias mais sustentáveis.

3.1.2 Energia fotovoltaica

A energia Fotovoltaica está entre as fontes de energias renováveis mais bem vistas no mundo atualmente, esse fato leva em consideração os estudos apresentados nesse capítulo.

3.1.2.1 Investimento/Capacidade das fontes renováveis na área Elétrica

A Fig. 3.1 apresenta os investimentos das diferentes formas de geração das energias renováveis, voltados a área elétrica. Assim como, a capacidade da produção elétrica pelas diferentes fontes de energias renováveis ao final de 2017, comparado a 2016.

O valor dos investimentos não contemplam os investimentos de uma Hidroelétrica com capacidade de 50MW, ao ser incluso chega há 310 bilhões USD em 2017 (REN21, 2018).

Quanto aos investimentos de 279 bilhões USD em 2017. Sendo que 160,8 bilhões USD foram destinados a energia PV, em segundo lugar com 107 bilhões USD foi para a energia eólica e a diferença foi para as outras fontes de energia renováveis (REN21, 2018).

Figura 3.1 – Investimento/Capacidade fontes renováveis na área elétrica em 2017.

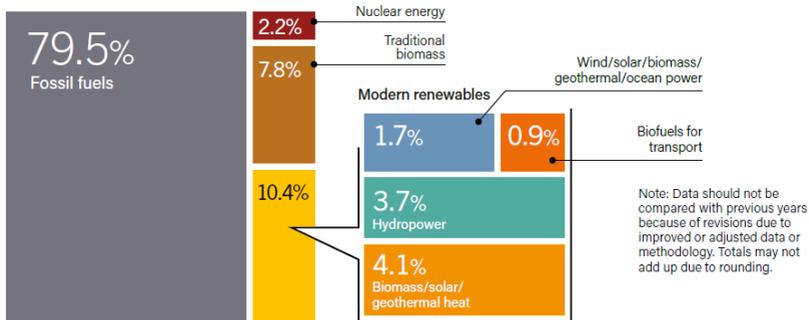
		2016	2017
INVESTMENT			
New investment (annual) in renewable power and fuels ¹	billion USD	274	279.8
POWER			
Renewable power capacity (including hydro)	GW	2,017	2,195
Renewable power capacity (not including hydro)	GW	922	1,081
 Hydropower capacity ²	GW	1,095	1,114
 Bio-power capacity	GW	114	122
 Bio-power generation (annual)	TWh	501	555
 Geothermal power capacity	GW	12.1	12.8
 Solar PV capacity ³	GW	303	402
 Concentrating solar thermal power (CSP) capacity	GW	4.8	4.9
 Wind power capacity	GW	487	539
 Ocean energy capacity	GW	0.5	0.5

Fonte: (REN21, 2018).

3.1.2.2 Consumo das fontes de energia no mundo

O consumo das diferentes fontes de energia no mundo são apresentadas através da Fig. 3.2 (REN21, 2018). E através dessa informação, é possível se ter uma boa visão quanto ao potencial e o desafio voltado as fontes de energias renováveis. Assim como, a necessidade dos investimentos voltados a essa área.

Figura 3.2 – Consumo das fontes de energia pelo mundo em 2016.



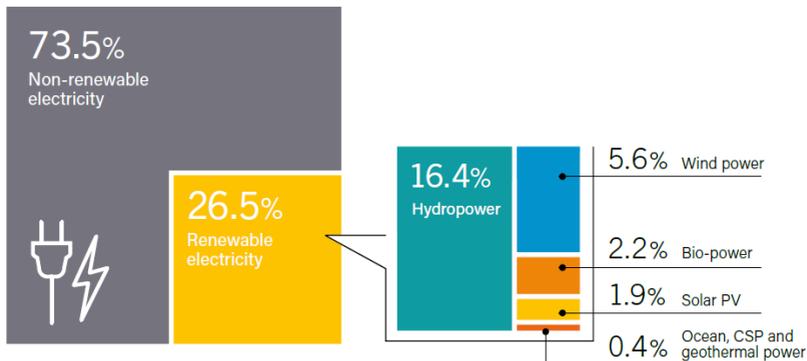
Fonte: (REN21, 2018).

3.1.2.3 Capacidade das fontes de energia elétrica

A Fig. 3.3 (REN21, 2018) apresenta a capacidade das diferentes fontes de energia, das não renováveis às renováveis.

Nas renováveis é apresentado o montante pelas diferentes tecnologias.

Figura 3.3 – Capacidade por fontes de energia ao final de 2017. das capacidades das fontes de energia ao final de 2017.png



Fonte: (REN21, 2018).

Com base na Fig. 3.3 é possível se ter uma boa idéia de como anda a capacidade das fontes de energia elétrica e o potencial, confirmando o comentado anteriormente.

3.1.2.4 Os 5 países com maiores investimentos nas fontes de energias renováveis

Através da Fig. 3.4 apresenta-se os cinco países que mais investiram nos diferentes segmentos das fontes de energias renováveis (REN21, 2018).

Figura 3.4 – Os 5 países que mais investiram nos segmentos das energias renováveis.

	1	2	3	4	5
Investment in renewable power and fuels (not including hydro over 50 MW)	China	United States	Japan	India	Germany
Investment in renewable power and fuels per unit GDP ¹	Marshall Islands	Rwanda	Solomon Islands	Guinea-Bissau	Serbia
 Geothermal power capacity	Indonesia	Turkey	Chile	Iceland	Honduras
 Hydropower capacity	China	Brazil	India	Angola	Turkey
 Solar PV capacity	China	United States	India	Japan	Turkey
 Concentrating solar thermal power (CSP) capacity ²	South Africa	-	-	-	-
 Wind power capacity	China	United States	Germany	United Kingdom	India
 Solar water heating capacity	China	Turkey	India	Brazil	United States
 Biodiesel production	United States	Brazil	Germany	Argentina	Indonesia
 Ethanol production	United States	Brazil	China	Canada	Thailand

Fonte: (REN21, 2018).

Através dessa informação é possível se ter uma ideia quanto ao direcionamento das formas de energias renováveis que mais lhe interessam aos países, muitas vezes motivados pelo lado econômico e político como mencionado anteriormente.

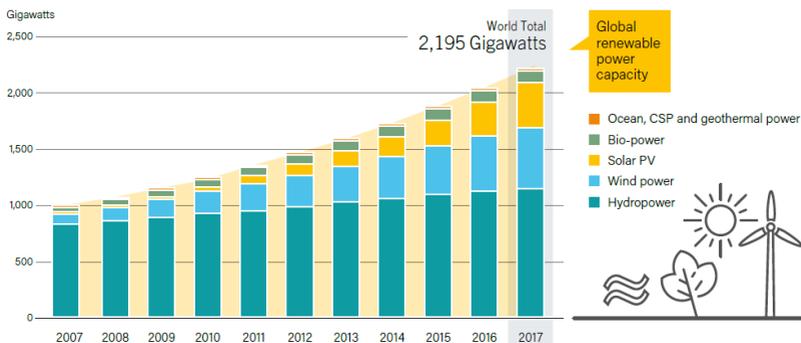
No caso do Brasil, está entre os cinco países que mais investiram nas formas de energia, hidroelétrica, aquecimento solar, biodiesel e ethanol. No seguimento das fontes de energia PV e Eólica, o Brasil não está entre os cinco maiores investidores.

O baixo investimento nas energias modernas (REN21, 2018) no Brasil pode ser devido as hidroelétricas existentes, ao baixo investimento comparado as grandes potências, a possibilidade de falta de interesse do governo quanto as fontes de energia modernas da área elétrica, questão política à econômico, pois, para o Brasil o combustível fóssil (Petróleo) é um grande negócio.

3.1.2.5 Capacidade energia elétrica renovável no mundo

Através da Fig. 3.5 se tem uma ideia quanto a uma tendência de crescimento das diferentes formas de energia elétrica renováveis no mundo, quanto a capacidade com base no período de 2007 ao final de 2017 (REN21, 2018).

Figura 3.5 – Capacidade energia elétrica renovável no mundo.



Fonte: (REN21, 2018).

Com base nessa informação, dá para se ter uma ideia de que as fontes de energias PV e Eólicas estão com a maior taxa de crescimento mundial. Ficando a PV em primeiro e a Eólica em segundo.

3.1.2.6 Capacidade/Incremento da energia PV mundial

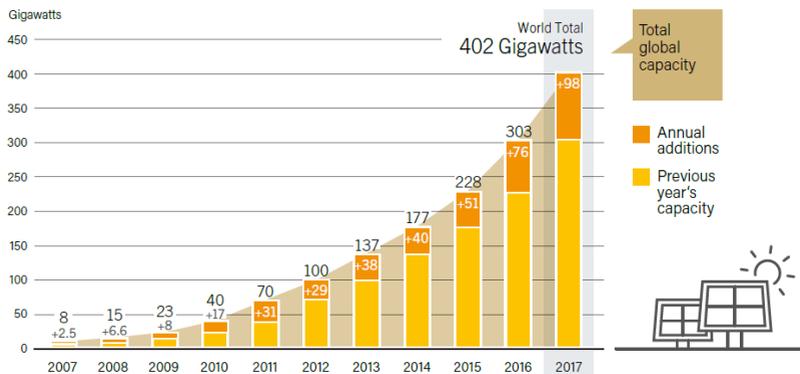
A Fig. 3.6 deixa claro a tendência de crescimento voltado a energia PV no mundo com base no período de 2007 ao final de 2017, mostrando-se que há uma confiança do mercado mundial (REN21, 2018).

3.1.2.7 Países que detêm maior capacidade da energia PV no mundo

Na Fig. 3.7 é apresentado as 10 países que detêm a maior capacidade de energia PV no mundo.

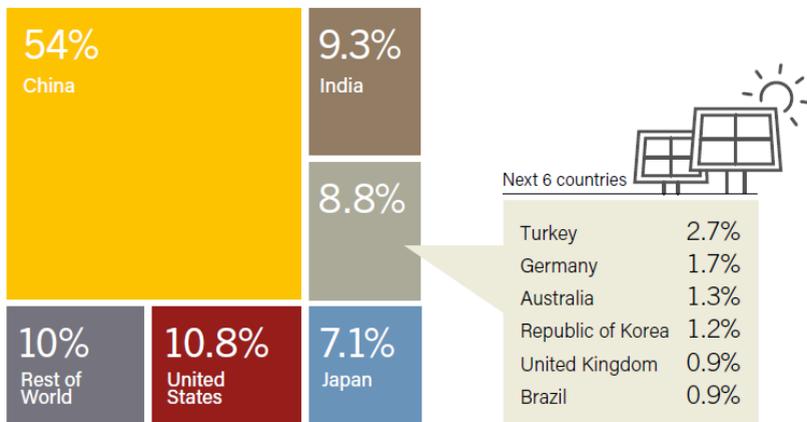
Através desse indicador é possível ter uma dimensão dos investimentos pelos países que mais investiram nessa área. O curioso é que o Brasil, mesmo não tendo muito investimento, ficou entre os dez países que mais aumentaram sua capacidade (REN21, 2018).

Figura 3.6 – Capacidade/Incremento da energia PV mundial.



Fonte: (REN21, 2018).

Figura 3.7 – Países que detêm maior capacidade ea energia PV no mundo.



Fonte: (REN21, 2018).

Informação importante, pois, estar entre os dez países com maior aumento de capacidade de energia PV é um ótimo sinal.

Esse crescimento no Brasil poderia ser melhor se houvesse mais incentivo por parte do governo.

3.1.2.8 Investimentos do Brasil em energias renováveis

A Fig. 3.8 apresenta os investimentos do Brasil entre 2007 à 2017 nos diversos segmentos das energias renovável, no segmento elétrico a combustível. Como pode ser visto, nos últimos anos tem investido um valor próximo a 6 bilhões USD, tendo em vista que não está entre as maiores potências do mundo, tem tipo uma boa participação (REN21, 2018).

Figura 3.8 – Investimentos do Brasil em energias renováveis de 2007 à 2017.



Fonte: (REN21, 2018).

Muitas vezes não são visíveis esses investimentos nas formas de energias renováveis tipo PV, por motivo de outras formas como as hidroelétricas, eólicas e bio combustíveis requererem grande parte desses investimentos.

3.1.2.9 Como o Brasil se encontra?

Conforme (IPEA, 2019) frente as metas assumidas na cúpula de desenvolvimento sustentável da assembleia geral das nações unidas da ONU, o Brasil, se comprometeu com 5 metas, onde, uma é abordada nesse tópico que é a meta 7.b, ou seja, até 2030, aumentar a infraestrutura e continuar aprimorando tecnologicamente quanto aos serviços modernos e sustentáveis de energia para todos (IPEA, 2019).

O Brasil apresentou um salto quanto a capacidade das energias renováveis e um recuo quanto a energia térmica fóssil em 2018, que é um ótimo sinal e pode ser visualizada através da Fig. 3.9.

Como pode ser visto na Fig. 3.9, houve um bom aumento da capacidade das energias renováveis, somando (hidráulica, biomassa, eólica e solar) saiu do patamar de 78,7% em 2013 para 83% em Dezembro de

Figura 3.9 – Capacidade das fontes de energia elétrica do Brasil em 2019.

Fontes de energia	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Hidráulica	67,9	66,7	65,1	64,4	63,7	63,8
Térmica fóssil ²	21,3	20,4	20,1	19,4	18,6	17,0
Térmica a biomassa	9,1	9,3	9,4	9,4	9,2	9,0
Eólica	1,7	3,6	5,4	6,7	7,80	8,8
Solar	0,0	0,0	0,0	0,1	0,70	1,4
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: (IPEA, 2019).

2018. Onde, a energia PV, saiu do patamar de 0,1% da capacidade total para 1,4% da capacidade total das fontes de energia renováveis nos últimos dois anos (IPEA, 2019).

A energia eólica também chamou a atenção, saiu de 1,7% para 8,8% de Dezembro de 2013 para Dezembro de 2018 (IPEA, 2019). Mostrando-se que o Brasil tem apostado bastante nessa tecnologia.

Analisando a Fig. 3.9, percebe-se que houve um crescimento próximo a linear nos anos 2017 e 2018. A pesquisa menciona a respeito de um crescimento exponencial voltado aos segmentos residenciais, prédios comerciais e industriais, pois, tem trazido uma boa relação no preço da energia comparada a energia oferecida pelas distribuidoras (IPEA, 2019).

O fato é que o Brasil tem tido um aumento da capacidade voltado a energia PV a partir de 2017, reforçando a importância do estudo em questão.

Conforme (IPEA, 2019) as fontes de energia distribuída como eólica, termelétrica, biomassa e hidroelétricas podem se tornar com tempo, custos inferiores ao do sistema PV, ganhando esse espaço.

Essa informação, mesmo que seja uma expectativa, pode desmotivar os investidores, aumentando o custo dos sistemas PV.

3.1.3 Células e módulos PV

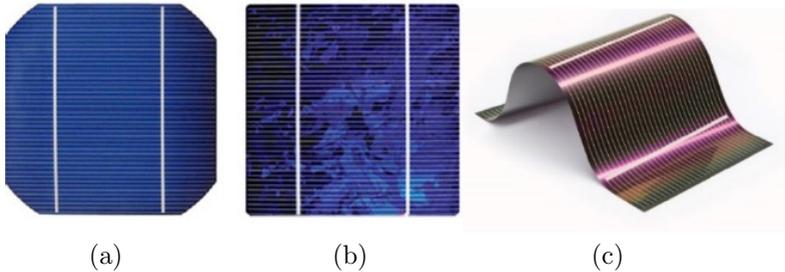
Nesse capítulo é abordado sobre as tecnologias envolvidas na área PV, sobre a capacidade produtiva mundial, a respeito do aumento da eficiência ao longo dos tempos, quanto as principais características PV e as diferentes configurações possíveis.

3.1.3.1 Tecnologia de células PV

As principais tecnologias de células PV são: monocristalina, multicristalina e filme fino.

Essas células estão sendo apresentadas na Fig. 3.10 (SILVA, 2018).

Figura 3.10 – Tecnologias de células PV: (a) monocristalina; (b) multicristalina; (c) filme fino.



Fonte: (SILVA, 2018).

3.1.3.2 % Produção mundial das tecnologias PV

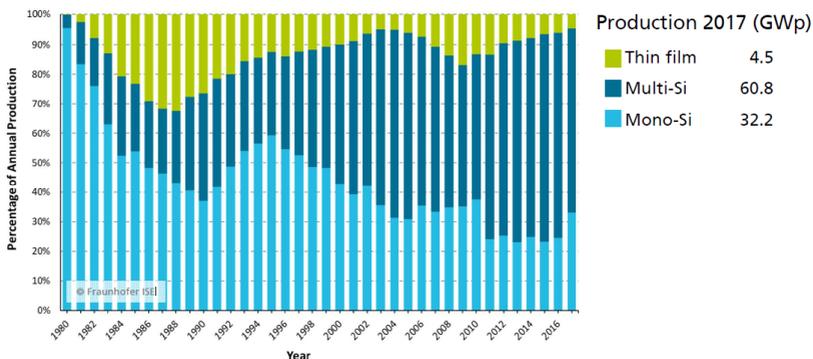
Através da Fig. 3.11 é possível visualizar o percentual do montante fabricado de cada tecnologia PV entre 1980 à 2017, mostrando-se numa forma de curva de tendência.

Outra informação possível de se obter, é que a tecnologia filme fino tem reduzido o percentual comparado ao montante fabricado ao longo dos últimos anos, assim como, em 2017 a tecnologia monocristalina aumentou o percentual de fabricação comparado as outras tecnologias.

3.1.3.3 Capacidade fabricada das tecnologias PV

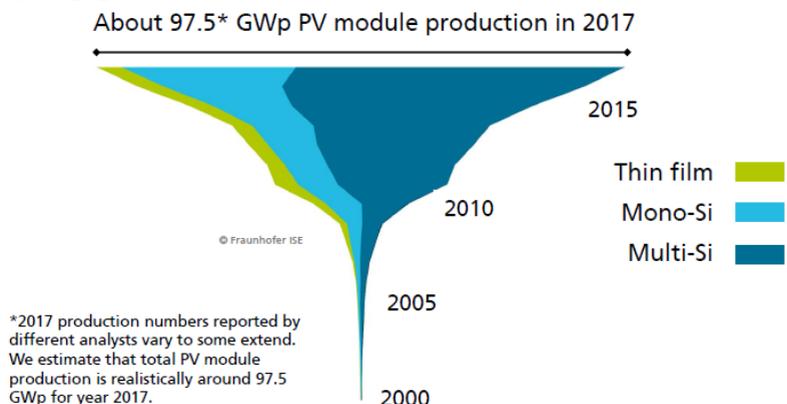
Conforme (FRAUNHOFER, 2019) foi apresentado na Fig. 3.12 a capacidade fabricada a nível de potência dentro das diferentes tecnologias PV, entre o período 2000 à 2017. Importante, os valores de 2017 foram estimados, baseados em diferentes analistas, chegando um valor próximo a 97,5 GWp (FRAUNHOFER, 2019).

Figura 3.11 – % Produção mundial das tecnologias PV entre 1980 à 2017.



Fonte: (FRAUNHOFER, 2019).

Figura 3.12 – Capacidade fabricada nas diferentes tecnologias PV entre 2000 à 2017.

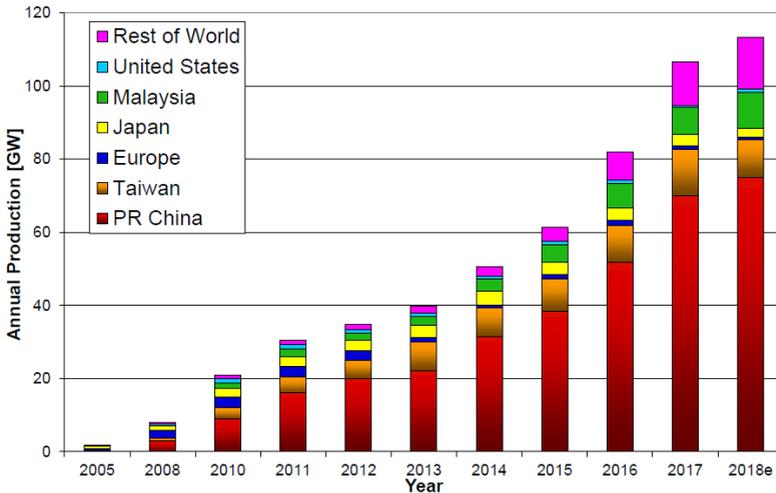


Fonte: (FRAUNHOFER, 2019).

3.1.3.4 Onde estão os fabricantes das células/módulos PV?

Através da Fig. 3.13 é possível visualizar onde estão os maiores fabricantes de células e módulos PV a nível de capacidades no mundo no período 2005 à 2018, sendo que o valor de 2018 também é um valor estimado (JÄGER-WALDAU, 2018).

Figura 3.13 – Países que produziram células/módulos PV entre 2005 à 2018.



Fonte: (JäGER-WALDAU, 2018).

3.1.3.5 Evolução da eficiência das diferentes tecnologias PV

A Fig. 3.14 apresenta dados históricos quanto a evolução da eficiência das diferentes tecnologias de células PV entre 1976 à 2019 (NREL, 2019).

Os resultados alcançado foram obtidos através de ensaios em laboratórios, algumas das tecnologias nem são disponíveis ao mercado.

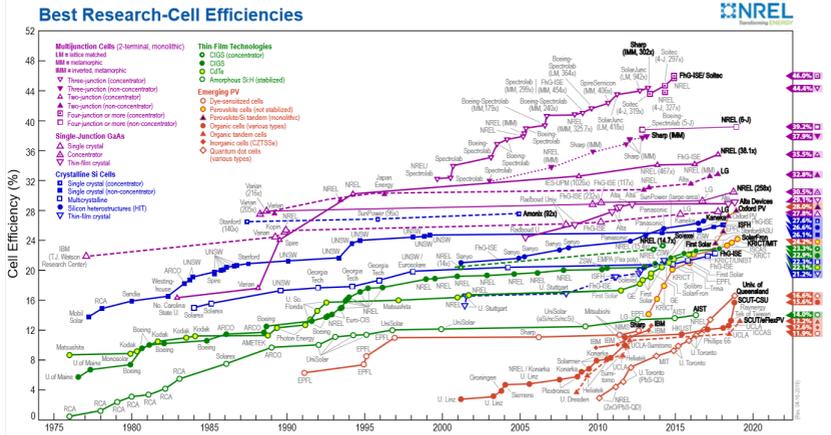
3.1.3.6 Eficiência das principais tecnologias de células e módulos

A Fig. 3.15 apresenta a eficiência das células e módulos sobre as principais tecnologias PV, resultados obtidos em laboratório em 2018 (JäGER-WALDAU, 2018).

3.1.3.7 Características construtiva dos módulos PV

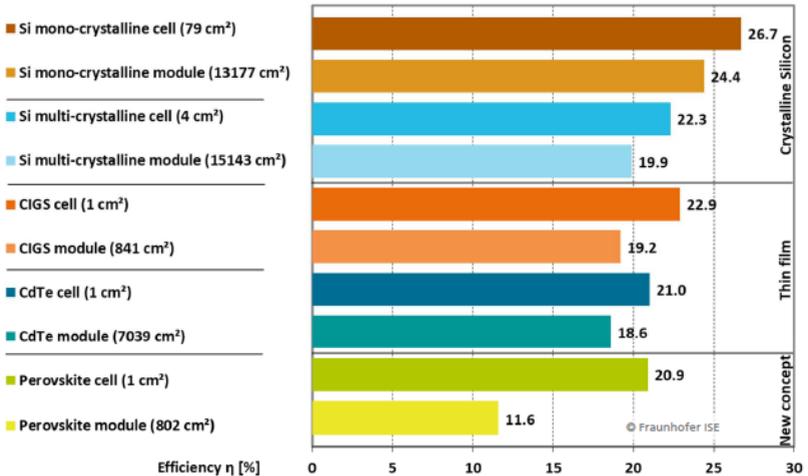
Essa seção traz uma visão sobre a construção física dos módulos fotovoltaicos, pois, os diferentes módulos são muito similares, veja através

Figura 3.14 – Eficiência das diferentes tecnologias PV obtidos em laboratório entre 1976 à 2019.



Fonte: (NREL, 2019).

Figura 3.15 – Eficiência das células e módulos das principais tecnologias PV em 2018.



Fonte: (JÄGER-WALDAU, 2018).

da Fig. 3.16 os elementos que compõem o módulo fotovoltaico (PORTALSOLAR, 2019).

Figura 3.16 – Características construtiva dos módulos PV.



Fonte: (PORTALSOLAR, 2019).

- *Moldura de Alumínio* - Parte da estrutura mecânica do módulo PV;
- *Vidro Especial* - Tem como objetivo principal proteger o conjunto de células dos choques mecânicos, tendo em vista que as células PV são sensíveis e fundamentais para o funcionamento do sistema. Assim como, evitar o contato elétrico do usuário de forma involuntária. O vidro deve ter boa condutividade de incidência da luz, deve ser ante-reflexivo e outros detalhes podem ser buscados em (Walwil et al., 2017);
- *Película Encapsulante* - Normalmente é utilizado o EVA, visa aumentar a resistência mecânica das células PV, boa isolamento elétrica com o mundo externo, evita por meio do ambiente externo o desgaste prematura das células PV, eliminando a umidade, reduzindo os raios UV. Entretanto, deve permitir uma boa condutividade da incidência de luz (SILVA, 2018);
- *Células Fotovoltaicas* - Célula fotovoltaica ou PV, é o coração do módulo PV, trata-se do elemento responsável em converter a energia solar em energia elétrica, esse componente é a parte mais cara do sistema e é sensível a choques mecânico;
- *Backsheet (fundo protetor)* - Chapa trazeira, tem como objetivo principal o fechamento traseiro do módulo PV, não requer

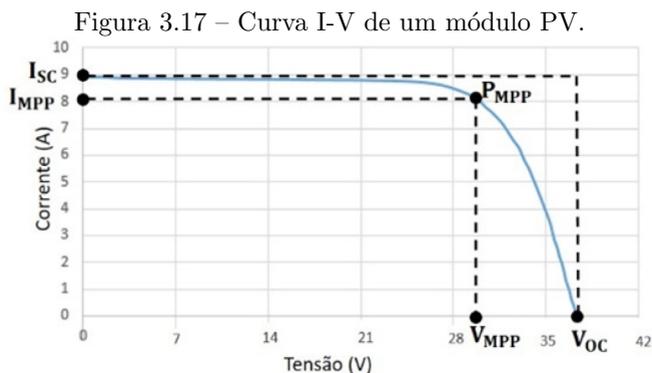
transparência, deve ter boa resistência climática, a chama, bom isolamento elétrico e boa aderência ao encapsulamento (SILVA, 2018);

- *Caixa de Juncao* - Caixa de ligação, polos positivo e negativo no módulo PV, assim como, acomodação dos diodos *bypass* (SILVA, 2018);

3.1.3.8 Características elétricas dos módulos PV

As principais características elétricas dos módulos PV são apresentadas na Fig. 3.17, conforme (SILVA, 2018), (PORTALSOLAR, 2011).

Essa mesma figura apresenta a curva para se obter a máxima potência do módulo P_{MPP} .



Fonte: (SILVA, 2018).

Todas as características elétricas dos módulos PV estão descritas conforme segue:

- V_{OC} - Tensão de circuito aberto;
- I_{SC} - Corrente de curto-circuito;
- V_{MPP} - Tensão de máxima potência;
- I_{MPP} - Corrente de máxima potência;
- P_{MPP} - Potência máxima;
- FF - Fator de forma;

- *Toler.neg.P_{MPP}* - Máxima tolerância negativa, é a máxima variação negativa quanto a potência de saída do módulo, dentro dos critérios dos ensaios STC.
- *Toler.pos.P_{MPP}* - Máxima tolerância positiva, é a máxima variação positiva quanto a potência de saída do módulo, dentro dos critérios dos ensaios STC.
- *Coef.Temp.P_{MPP}* - Coeficiente de temperatura *P_{MPP}*, é a taxa de variação da potência/°C, muito utilizado para simulações.
- *Coef.Temp.V_{OC}* - Coeficiente de temperatura *V_{OC}*, é a taxa de variação da tensão/°C, muito utilizado para simulações.
- *Coef.Temp.I_{SC}* - Coeficiente de temperatura *I_{SC}*, é a taxa de variação da corrente/°C, muito utilizado para simulações.

O fator de forma *FF* pode ser encontrado através da equação 3.1 (SILVA, 2018). Também reconhecido como fator de preenchimento, que tem como objetivo auxiliar na avaliação do desempenho da célula/módulo PV, células de alta qualidade alcançam um *FF*_{0,7} (CARVALHO, 2014).

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.1)$$

A Fig. 3.18 apresenta uma comparação da eficiência entre os diferentes materiais aplicados nas três tecnologias, assim como, evidencia a qualidade das células PV através do *FF* (MARKVART; CASTAÑER, 2003).

Uma característica perceptiva na Fig. 3.18 é a relação direta do parâmetro *FF* com o parâmetro da eficiência do módulo.

O circuito equivalente de uma célula ou módulo PV real pode ser visto através da Fig. 3.19 (ZHENG; LI, 2014).

Conforme (DEMONTI, 2003), se o diodo *bypass* de silício fosse ideal, o valor da tensão sobre ele seria 0,65V. Entretanto, como foi mencionado, existem perdas internas, cujo o valor de tensão alcançada na simulação feita por (DEMONTI, 2003) resultaram 0,62V nos terminais com o circuito de saída aberto.

I_L é a corrente foto gerada através da junção P-N do semicondutor, *R_{SH}* representa a resistência do caminho da corrente de fuga e *R_S* representa as perdas internas da célula (SILVA, 2018).

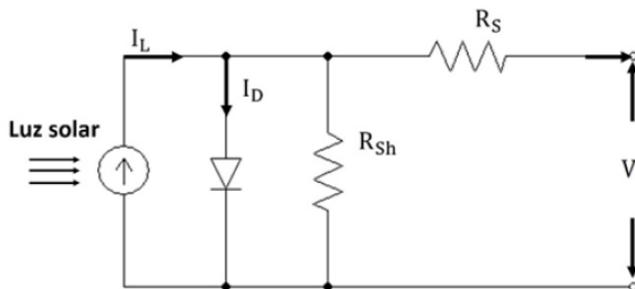
Há dois parâmetros externos que influenciam muito quanto a geração de energia das células/módulos PV.

Figura 3.18 – Dados de diferentes tipos de células PV.

	Efficiency (%)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	FF (%)
<i>Crystalline: single junction</i>				
c-Si	24.7	42.2	0.706	82.8
GaAs	25.1	28.2	1.022	87.1
InP	21.9	29.3	0.878	85.4
<i>Crystalline: multijunction</i>				
GaInP/GaAs/Ge tandem	31.0	14.11	2.548	86.2
<i>Thin-film: single junction</i>				
CdTe	16.5	25.9	0.845	75.5
CIGS	18.9	34.8	0.696	78.0
<i>Thin-film: multijunction</i>				
a-Si/a-SiGe tandem	13.5	7.72	2.375	74.4
<i>Photoelectrochemical</i>				
Dye-sensitised TiO ₂	11.0	19.4	0.795	71.0

Fonte: (MARKVART; CASTANER, 2003).

Figura 3.19 – Circuito equivalente de uma célula PV real.

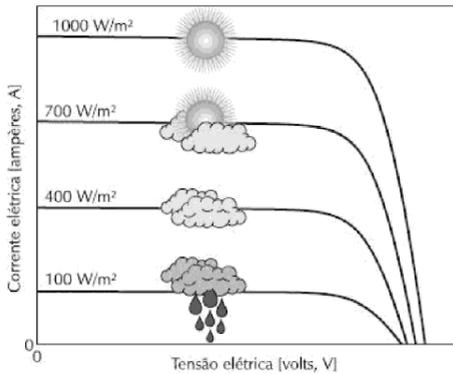


Fonte: (SILVA, 2018).

A primeira é a radiação solar, a variação pode ser observada na Fig. 3.20, traz maior interferência na corrente de saída do gerador fotovoltaico (GAZOLI; VILLALVA, 2012).

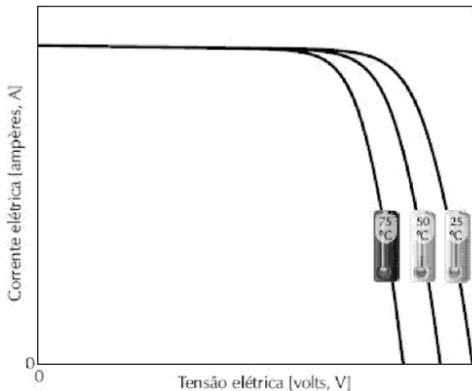
A segunda é a temperatura, a variação pode ser observada na Fig. 3.21, traz maior interferência na tensão do gerador fotovoltaico (GAZOLI; VILLALVA, 2012).

Figura 3.20 – Comportamento da corrente x tensão com a variação da radiação.



Fonte: (GAZOLI; VILLALVA, 2012).

Figura 3.21 – Comportamento da corrente x tensão com a variação da temperatura.



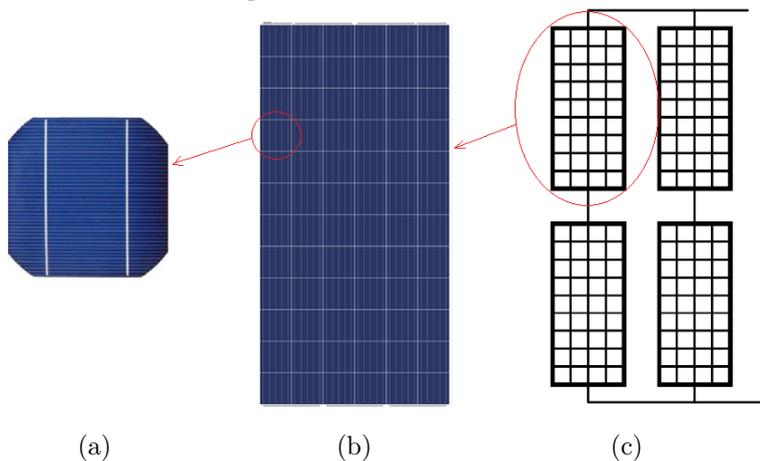
Fonte: (GAZOLI; VILLALVA, 2012).

3.1.3.9 Configuração das células e módulos PV

A Fig. 3.22 apresenta diferentes configurações de células à módulos PV, sendo, (a) uma célula PV, (b) um módulo PV (conjunto de células PV) e (c) uma configuração de módulos PV em série e paralelo.

O conceito de configuração série e paralelo, serve para o correto

Figura 3.22 – Célula e módulo PV: (a) Célula PV; (b) Módulo PV; (c) Módulos PV em série e paralelo.



Fonte: Autor.

arranjo de um conjunto de células PV ou um conjunto de módulos PV, pois, são análogos.

Isso é feito para se conseguir uma tensão ou uma corrente de saída adequada.

A Fig. 3.23 apresenta exemplos de arranjos de módulos PV, (a) Módulos PV em série, (b) módulos PV em paralelo e (c) módulos PV em série e paralelo.

Ao analisar o circuito em série apresentado na Fig. 3.23 (a), a corrente que percorre o circuito é única, portanto, a corrente de saída é a mesma que percorre os dois módulos PV e pode ser representada através da equação 3.2.

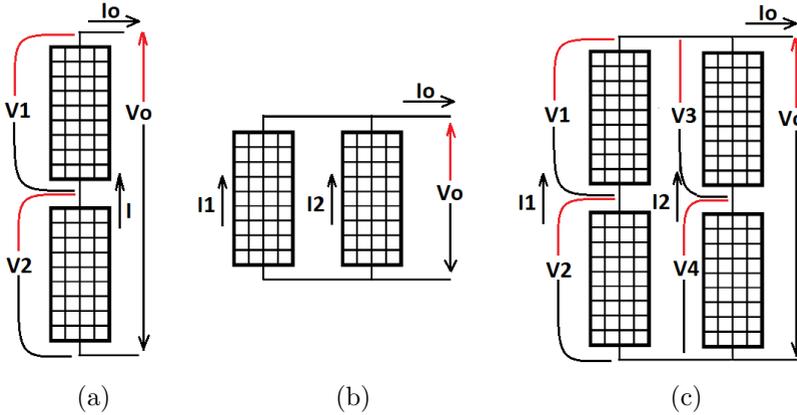
Assim como, a tensão de saída desse mesmo circuito é a soma das tensões dos módulos e pode ser obtida através da equação 3.3 (GAZOLI; VILLALVA, 2012).

$$I_o = I \quad (3.2)$$

$$V_o = V_1 + V_2 \quad (3.3)$$

Quanto ao circuito em paralelo, representado pela Fig. 3.23 (b), a corrente de saída é obtida através da equação 3.4, no caso dessa configuração, a tensão de saída será a mesma sobre os dois módulos (GAZOLI;

Figura 3.23 – Configuração de módulos PV: (a) Módulos PV em série; (b) Módulo PV em paralelo; (c) Módulos PV em série e paralelo.



Fonte: Autor.

VILLALVA, 2012).

$$I_o = I_1 + I_2 \quad (3.4)$$

No circuito série e paralelo representado pela Fig. 3.23 (c), segue os conceitos vistos anteriormente, ou seja, a corrente de saída é obtida conforme equação 3.4, enquanto a tensão de saída, pode ser encontrada através da equação 3.5 (GAZOLI; VILLALVA, 2012).

$$V_o = V_1 + V_2 = V_3 + V_4 \quad (3.5)$$

3.1.4 Comparação de módulos PV

Foram analisados quatro módulos PV de diferentes fabricantes e montado uma tabela conforme o proposto no estudo (SILVA, 2018).

As características foram obtidas com base nos datasheets dos fabricantes (CANADIAN, 2018), (DAH, 20...), (AMERISOLAR, 2017), (UP-SOLAR, 20...).

A tabela 3.1 apresenta a classificação máxima de potência em Watts (P_{MMT}) e todas as demais características nos módulos PV, obtidas em laboratório, conforme critérios de ensaios STC.

STC é a uma das melhores condições para o bom funcionamento dos módulos, ou seja, os módulos são expostos a uma radiação de

1000W/m² com a temperatura ambiente de 25°C, sem presença de vento (PORTALSOLAR, 2011).

A tabela 3.2 apresenta os dados com base nos critérios de ensaio NOCT, diferentes das condições ideais, e ao mesmo tempo, são os parâmetros que mais se aproximam as condições reais.

É usual a utilização dos parâmetros dessa segunda tabela pelos projetistas, para um melhor dimensionamento.

No critério NOCT, os módulos estão expostos a uma condição de radiação menor, de 800W/m² com a temperatura ambiente em 20°C e a velocidade do vento de 1m/s (PORTALSOLAR, 2011).

O parâmetro da massa de Ar é a mesma, para as duas tabelas 3.1 e 3.2, ou seja AM=1,5.

Tabela 3.1 – Características dos módulos PV com regime STC.

Parâmetros	Canadian CS6U-325P	Dahsolar DHP72-320	Amerisolar AS6P340W	UpSolar UP-M335P
P_{MPP}	325W	320W	340W	335W
V_{MPP}	37V	37,1V	37,5V	37,3V
I_{MPP}	8,78A	8,63A	9,07A	8,98A
V_{OC}	45,5V	45,8V	46,1V	47,0V
I_{SC}	9,34A	9,1A	9,5A	9,22A
<i>Coef.Temp.</i>	-0,31%/°C	-0,32%/°C	-0,31%/°C	-0,30%/°C
V_{OC}	-141mV/°C	-147mV/°C	-143mV/°C	-141mV/°C
<i>Coef.Temp.</i>	-0,40%/°C	-0,41%/°C	-0,41%/°C	-0,40%/°C
P_{MPP}	-1,3W/°C	-1,31W/°C	-1,39W/°C	-1,34W/°C
<i>Coef.Temp.</i>	0,05%/°C	0,05%/°C	0,05%/°C	0,05%/°C
I_{SC}	4,67mA/°C	4,55mA/°C	4,75mA/°C	4,61mA/°C
<i>Toler.neg.</i>	0%	0%	0%	0%
P_{MPP} tol-				
<i>Toler.pos.</i>	1,54%	1,56%	3%	3%
P_{MPP} tol+				
Eficiência, η	16,72%	16,51%	17,52%	17,3%
Preço no Brasil	R\$740,44	R\$612,00 ++	R\$720,00	R\$875,00
Preço/W	R\$2,28	R\$612,00 ++	R\$2,12	R\$2,61

Fonte: (CANADIAN, 2018; DAH, 20--; AMERISOLAR, 2017; UPSOLAR, 20--)

Tabela 3.2 – Características dos módulos PV com regime NOCT.

Parâmetros	Canadian CS6U-325P	Dahsolar DHP72-320	Amerisolar AS6P340W	UpSolar UP-M335P
P_{MPP}	239W	238W	251W	–
V_{MPP}	34V	34,4V	34,2V	–
I_{MPP}	7,03A	6,92A	7,34A	–
V_{OC}	42,4V	42,5V	42,5V	–
I_{SC}	7,54A	7,35A	7,7A	–

Fonte: (CANADIAN, 2018; DAH, 20...; AMERISOLAR, 2017; UPSOLAR, 20...)

Com base nos parâmetros avaliados nas tabelas 3.1 3.2, foi optado por adquirir dois módulos Dahsolar DHP72-320, que serão responsáveis pelo fornecimento de energia do Micro-inversor monofásico sistema OFF-Grid em estudo.

3.2 CONVERSORES ESTÁTICOS CC-CC / CC-CA / CA-CA

Nesse capítulo se apresenta algumas arquiteturas básicas quanto aos diferentes conversores CC-CC / CC-CA / CA-CA e um breve conceito das topologias.

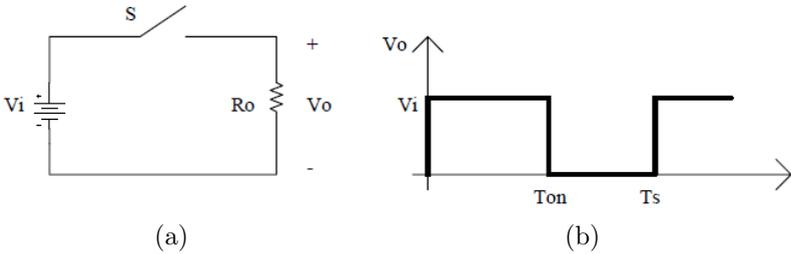
3.2.1 Conversores estáticos CC-CC

As topologias básica dos conversores CC-CC, são os conversor Buck, Boost e Buck-Boost.

3.2.1.1 Princípio dos conversores estáticos CC-CC

Conforme (PETRY, 2001), os conversores estáticos CC-CC são compostos por componentes semicondutores de potência que fazem o papel das chaves e por componentes passivos, como capacitores e indutores, sendo responsáveis pelo fluxo de energia entre a fonte de entrada e de saída. A Fig. 3.24 apresenta um circuito básico de um conversor CC-CC sem os elementos passivos.

Figura 3.24 – Conversor CC-CC: (a) Circuito básico; (b) Forma de onda do conversor CC-CC.



Fonte: (PETRY, 2001).

As equações que fundamentam o funcionamento do conversor CC-CC, como a equação 3.6 (PETRY, 2001), responsável por determinar o intervalo de comutação T_s .

$$T_s = \frac{1}{F_s} \quad (3.6)$$

Sendo que, F_s é a frequência de comutação, conforme mencionado por (PETRY, 2001), essa frequência normalmente é bastante elevada, no intuito de reduzir o tamanho dos componentes magnéticos e capacitivos do conversor. A razão cíclica D que define, a taxa das chaves eletrônicas ligadas T_{on} em relação ao intervalo de comutação T_s é dada pela equação 3.7 (PETRY, 2001).

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (3.7)$$

Assim como, a tensão média desse conversor é definida pela equação 3.8 (PETRY, 2001).

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_{on}} V_i dt = V_i \frac{T_{on}}{T_s} \quad (3.8)$$

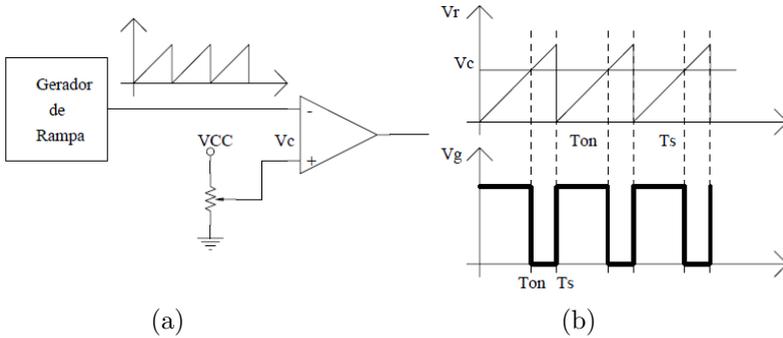
Portanto, é possível afirmar que o ganho estático do conversor D é obtido através da relação dada entre a tensão de saída e a tensão de entrada, conforme a equação 3.9 (PETRY, 2001).

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (3.9)$$

Referente ao sinal responsável por garantir a manobra das chaves

de potência, pode ser feita através de uma forma fixa ou variável num intervalo de comutação, muitas vezes essas formas são obtidas pela técnica PWM como é mostrado através da Fig. 3.25(a)(b) (PETRY, 2001).

Figura 3.25 – Exemplo sinal PWM: (a) Circuito eletrônico; (b) Formas de onda.

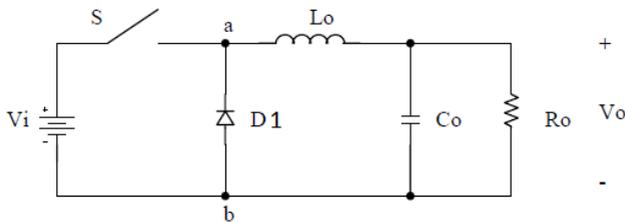


Fonte: (PETRY, 2001).

3.2.1.2 Conversor Buck

Conforme (PETRY, 2001), é um conversor CC-CC abaixador de tensão. Cujas características principais é ter uma fonte de tensão como entrada e como saída uma fonte de corrente. O circuito elétrico básico desse conversor é apresentada através da Fig. 3.26 (PETRY, 2001).

Figura 3.26 – Circuito elétrico de um conversor Buck.



Fonte: (PETRY, 2001) (Adaptada pelo Autor).

O funcionamento do conversor Buck é descrito através de duas etapas, sendo:

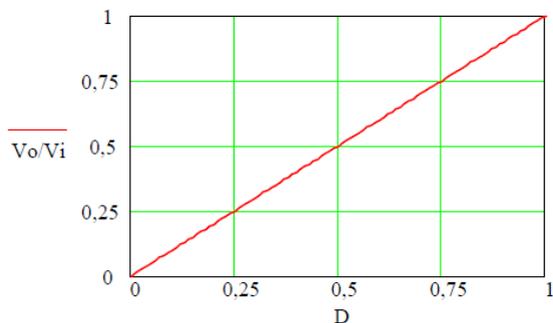
Etapa 1 ($0, DT_s$): É o período que a chave S da Fig. 3.26 estará conduzindo. Durante esse período haverá a condução da corrente através da bobina L_o e saída, nessa etapa a fonte de tensão carrega o indutor através da sua magnetização, assim como, fornece energia para sua saída, conforme (PETRY, 2001).

Etapa 2 ($DT_s, (1 - D)T_s$): É o período que a chave S não estará conduzindo, ou seja, estará aberta. Quando a chave estiver aberta o diodo D1 entrará em condução, permitindo com que a energia armazenada no indutor seja descarregada no circuito de saída, desmagnetizando o indutor L_o (PETRY, 2001).

Os valores de tensão, e ganho do conversor podem ser obtidos utilizando as equações fundamentais dos conversores CC-CC, através das equações 3.8 e 3.9.

A Fig. 3.27 (PETRY, 2001) apresenta o comportamento do ganho estático da tensão da saída em relação a tensão de entrada versus a razão cíclica D do chaveamento.

Figura 3.27 – Ganho estático versus razão cíclica D no conversor Buck.



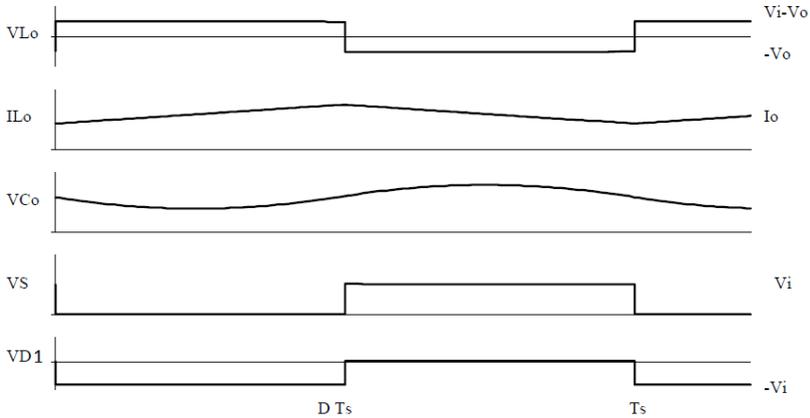
Fonte: (PETRY, 2001).

O comportamento do conversor Buck pode ser melhor entendido através das suas principais formas de onda, essas formas são apresentadas através da Fig. 3.28 (PETRY, 2001).

As formas de onda apresentadas na Fig. 3.28 apresentam o funcionamento do conversor Buck no modo de condução contínua, existem tres formas de condução (PETRY, 2001):

- 1º Modo - Contínua, onde a corrente no indutor IL_o não se anula ao longo das comutações da chave.
- 2º Modo - Descontínua, onde a corrente no indutor IL_o se anula

Figura 3.28 – Principais forma de ondas do conversor Buck.



Fonte: (PETRY, 2001) (Adaptada pelo Autor).

no ciclo de comutação;

- 3º Modo - Crítica, onde a corrente no indutor IL_o está próximo a se anular no ciclo de comutação.

Os conversores Buck apresentam algumas características intrínsecas a técnica, conforme segue (PETRY, 2001):

- É um conversor abaixador de tensão, ou seja, a tensão de saída sempre será menor ou igual a tensão da entrada;
- Corrente de saída contínua;
- Corrente de entrada descontínua.

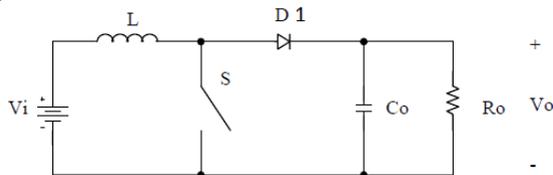
3.2.1.3 Conversor Boost

Conforme (PETRY, 2001), trata-se de um conversor CC-CC elevador de tensão.

As principais características são, ter uma fonte de corrente como entrada e como saída uma fonte de tensão.

O circuito elétrico básico desse conversor é apresentada através da Fig. 3.29 (PETRY, 2001).

Figura 3.29 – Circuito elétrico de um conversor Boost.



Fonte: (PETRY, 2001) (Adaptada pelo Autor).

O funcionamento do conversor Boost também é descrito através de duas etapas, sendo:

Etapa 1 ($0, DT_s$): É o período que a chave S da Fig. 3.29 estará conduzindo.

Durante esse período haverá a condução da corrente através da bobina L_o , nessa etapa a fonte de tensão carrega o indutor através da sua magnetização (PETRY, 2001).

Etapa 2 ($DT_s, (1 - D)T_s$): É o período que a chave S não estará conduzindo, ou seja, estará aberta.

Quando a chave estiver aberta o diodo D1 entrará em condução, permitindo com que a tensão de entrada V_i somada a energia armazenada no indutor seja descarregada no circuito de saída, desmagnetizando o indutor L_o (PETRY, 2001).

Conforme mencionado no circuito Boost a tensão média do indutor L deve ser nula como é apresentado na Fig. 3.30 (PETRY, 2001), portanto a equação que define a tensão e o ganho estático do conversor podem ser obtidos através das equações 3.10 para a tensão e 3.11 para o ganho.

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{DT_s} V_i dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{(1-D)T_s} (V_o - V_i) dt \quad (3.10)$$

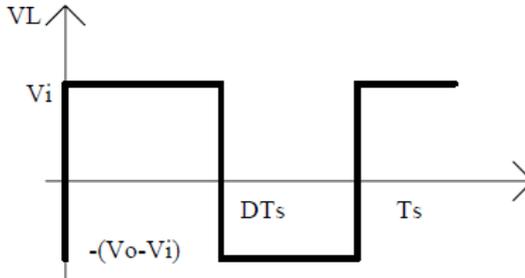
Portanto, é possível afirmar que o ganho estático do conversor D é obtido através da equação 3.11 (PETRY, 2001).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (3.11)$$

A Fig. 3.31 (PETRY, 2001) apresenta o comportamento do ganho estático da tensão da saída em relação a tensão de entrada versus a razão cíclica D do chaveamento.

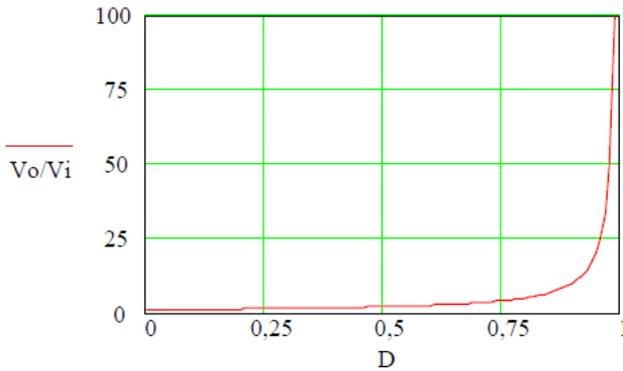
O comportamento do conversor Boost pode ser visto através das

Figura 3.30 – Tensão no indutor do conversor Boost.



Fonte: (PETRY, 2001).

Figura 3.31 – Ganho estático versus razão cíclica D no conversor Boost.



Fonte: (PETRY, 2001).

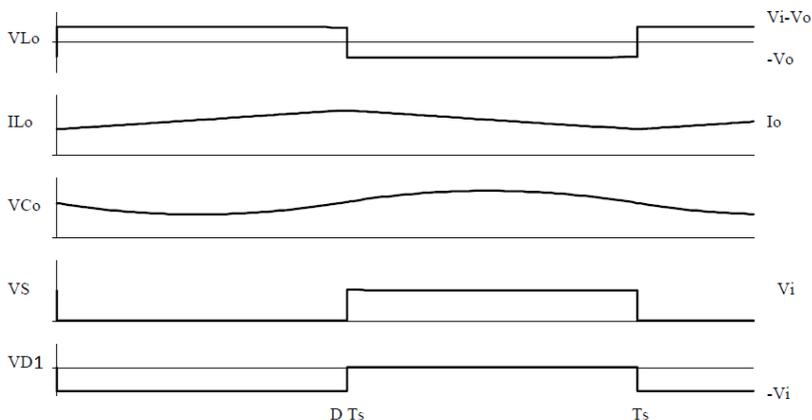
suas principais formas de onda, essas formas são apresentadas através da Fig. 3.32 (PETRY, 2001).

A forma de onda apresentado na Fig. 3.32, apresenta o funcionamento do conversor Boost no modo de condução contínua, ou seja, a corrente no indutor IL não chega a ser nula durante a razão cíclica.

Os conversores Boost apresentam algumas características intrínsecas a técnica, segue abaixo (PETRY, 2001):

- É um conversor elevador de tensão, ou seja, a tensão de saída sempre será maior ou igual a tensão da entrada;
- Corrente de saída descontínua;

Figura 3.32 – Principais forma de ondas do conversor Boost.



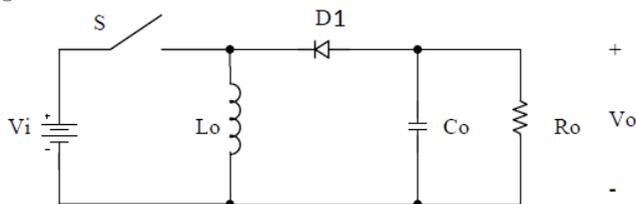
Fonte: (PETRY, 2001) (Adaptada pelo Autor).

- Corrente da entrada contínua.

3.2.1.4 Conversor Buck-Boost

Conforme (PETRY, 2001), trata-se de um conversor CC-CC abaixador e elevador de tensão. As principais características são ter uma fonte de tensão como entrada e saída. O circuito elétrico básico desse conversor é apresentada através da Fig. 3.33 (PETRY, 2001).

Figura 3.33 – Circuito elétrico de um conversor Buck-Boost.



Fonte: (PETRY, 2001) (Adaptada pelo Autor).

O funcionamento do conversor Buck-Boost também é descrito através de duas etapas, sendo:

Etapla 1 ($0, DT_s$): É o período que a chave S da Fig. 3.33 estará

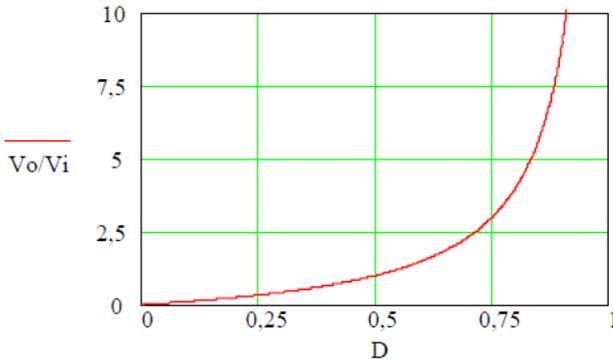
conduzindo. Durante esse período haverá a magnetização da bobina L energizando-a, nessa etapa a fonte de tensão faz sua magnetização, conforme (PETRY, 2001).

Etapa 2 ($DT_s, (1 - D)T_s$): É o período que a chave S não estará conduzindo, ou seja, estará aberta. Quando a chave estiver aberta o diodo D1 entrará em condução, permitindo com que a energia armazenada no indutor seja descarregada no circuito de saída, desmagnetizando o indutor L_o (PETRY, 2001).

Os valores de tensão, e ganho do conversor podem ser obtidos utilizando-se das equações fundamentais dos conversores CC-CC, equações 3.8 e 3.9.

A Fig. 3.34 (PETRY, 2001) apresenta o comportamento do ganho estático da tensão da saída em relação a tensão de entrada versus a razão cíclica D do chaveamento.

Figura 3.34 – Ganho estático versus razão cíclica D no conversor Buck-Boost.



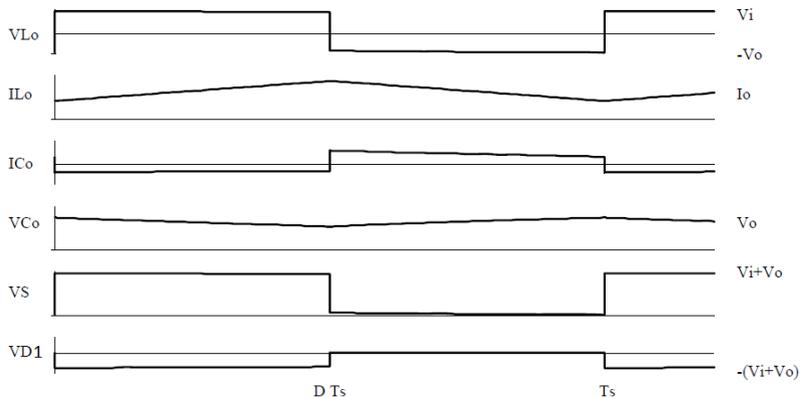
Fonte: (PETRY, 2001).

O comportamento do conversor Buck-Boost pode ser visto através das suas principais formas de onda, essas formas são apresentadas através da Fig.3.35 (PETRY, 2001).

A forma de onda apresentado na Fig. 3.35, apresenta o funcionamento do conversor Buck-Boost no modo de condução contínua, ou seja, a corrente no indutor IL não chega a ser nula durante a razão cíclica (PETRY, 2001):

Os conversores Buck-Boost apresentam algumas características intrínsecas a técnica, segue abaixo (PETRY, 2001):

Figura 3.35 – Principais forma de ondas do conversor Buck-Boost.



Fonte: (PETRY, 2001).

- É um conversor abaixador e elevador de tensão, ou seja, grande flexibilidade quanto a variação da tensão;
- Corrente de saída descontínua.
- Corrente de entrada descontínua.

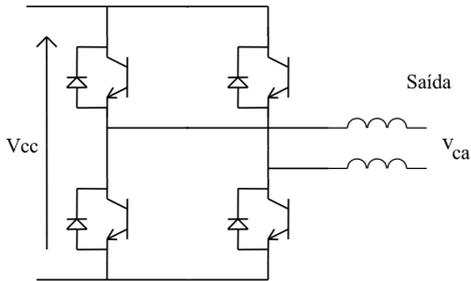
3.2.2 Conversores estáticos CC-CA (Inversores)

Os conversores CC-CA apresentam duas configurações quanto as fontes de entrada, o VSI e o CSI.

A Fig. 3.36 (POMILIO,) adaptada pelo autor para um sistema monofásico apresenta um inversor do tipo VSI na sua forma básica, onde a fonte de origem é uma tensão, que pode ser fornecida por uma fonte de tensão ou por um capacitor que é responsável pelo armazenamento da energia num Link CC.

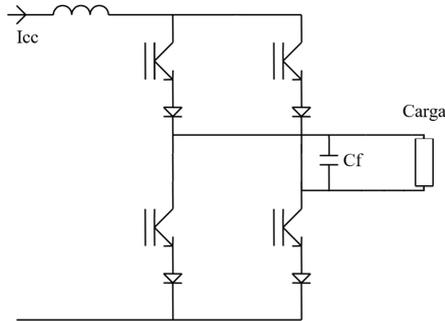
A segunda configuração, quanto a fonte de entrada como corrente CSI, é apresentada na Fig. 3.37 (POMILIO,) adaptada pelo autor para um sistema monofásico básico, análogo ao inversor VSI, o inversor CSI é alimentado por uma fonte de corrente ou por uma bobina que armazena energia e sempre que solicitado irá descarregar a energia através de corrente para a carga.

Figura 3.36 – Conversor CC-CA monofásico VSI.



Fonte: (POMILIO,) (Adaptada pelo Autor).

Figura 3.37 – Conversor CC-CA monofásico CSI.



Fonte: (POMILIO,) (Adaptada pelo Autor).

3.2.2.1 Conversor CC-CA monofásico meia ponte

A Fig. 3.38 (PETRY; MOIA, 2014) apresenta uma configuração básica de conversor CC-CA monofásica meia ponte.

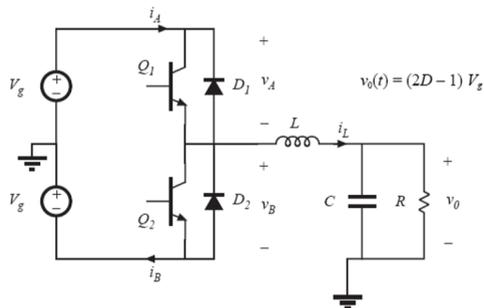
A razão cíclica D responsável pela amplitude da tensão da saída é obtida através da equação 3.12 (PETRY; MOIA, 2014).

$$V_o(t) = (2D - 1)V_g \quad (3.12)$$

A Fig. 3.39 (PETRY; MOIA, 2014) apresenta a curva da tensão em relação a razão cíclica.

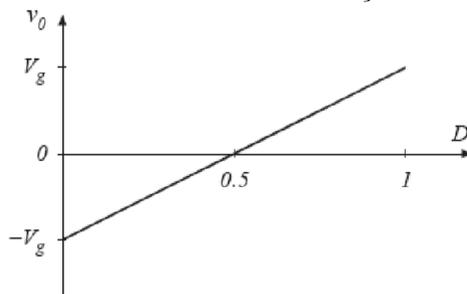
A razão cíclica D responsável por gerar uma função senoidal na tensão de saída é dada pela equação 3.13 (PETRY; MOIA, 2014).

Figura 3.38 – Conversor CC-CA monofásico meia ponte.



Fonte: (PETRY; MOIA, 2014)

Figura 3.39 – Curva da tensão em relação a razão cíclica.



Fonte: (PETRY; MOIA, 2014)

$$D(t) = 0.5 + D_m \text{sen}(\omega t) \quad (3.13)$$

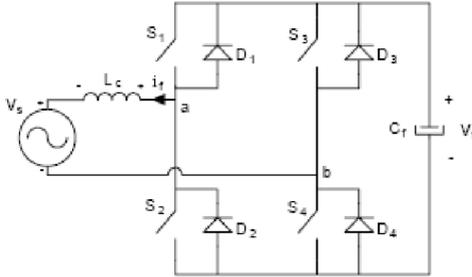
A corrente na carga i_L pode ser obtida através da equação 3.14 (PETRY; MOIA, 2014).

$$i_L(t) = \frac{v_o(t)}{R} = (2D - 1) \frac{V_g}{R} \quad (3.14)$$

3.2.2.2 Conversor CC-CA monofásico ponte completa

A Fig. 3.40 (PETRY; MOIA, 2014) apresenta um Inversor CC-CA Ponte completa, onde a tensão de entrada é fornecida pelo capacitor V_f e a tensão de saída V_s .

Figura 3.40 – Conversor CC-CA monofásico ponte completa.



Fonte: (PETRY; MOIA, 2014)

Sobre o conversor CC-CA apresentado na Fig. 3.40 com controle tipo SPWM bipolar, a tensão de saída V_{ab} pode ser obtida através das equação 3.15 ou 3.16 (PETRY; MOIA, 2014).

$$V_{ab} = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{D \cdot T_s} V_f \cdot dt + \int_{D \cdot T_s}^{T_s} -V_f \cdot dt \right) \quad (3.15)$$

$$V_{ab} = V_f \cdot (2 \cdot D - 1) \quad (3.16)$$

A razão cíclica $D(t)$ responsável por gerar uma função senoidal na tensão de saída do conversor CC-CA ponte completa sobre controle SPWM bipolar é dada pela equação 3.17 (PETRY; MOIA, 2014).

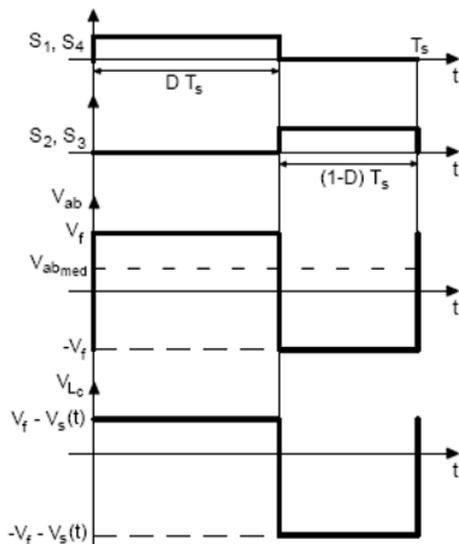
$$D(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{ab_pk}}{V_f} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (3.17)$$

O índice de modulação MI que traz a relação da amplitude máxima de saída V_{ab_pk} sobre a amplitude da tensão de entrada V_f é dada pela equação 3.18 (PETRY; MOIA, 2014).

$$MI = \frac{V_{ab_pk}}{V_f} \quad (3.18)$$

A Fig. 3.41 (PETRY; MOIA, 2014) apresenta a Tensão de saída V_{ab} , o estado lógico das chaves e a tensão do indutor V_{L_c} do inversor CC-CA apresentado na Fig. 3.40.

Figura 3.41 – Formas de onda da tensão de saída do conversor CC-CA ponte completa SPWM bipolar.



Fonte: (PETRY; MOIA, 2014)

3.2.2.3 Conversor CC-CA multinível tipo cascata simétrica

A Fig. 3.42 (POMILIO,) apresenta uma configuração de um conversor CC-CA Multinível do tipo cascata simétrica.

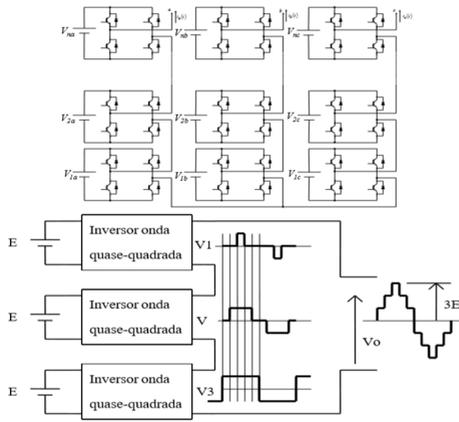
É apresentado de uma forma simples, o exemplo de uma topologia de conversor multinível com suas respectivas formas de onda, nos estágios e na saída.

3.2.3 Conversor estático CA-CA

Uma topologia de conversor estático CA-CA é apresentado na Fig. 3.43 (PETRY; MOIA, 2014).

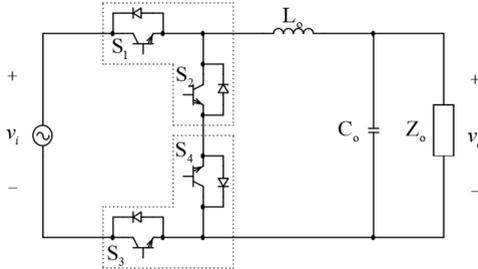
A Fig. 3.44 (PETRY; MOIA, 2014) apresenta a forma de onda da tensão de entrada v_i e o chaveamento das chaves com a utilização do controle PWM.

Figura 3.42 – Conversor CC-CA multinível tipo cascata simétrica.



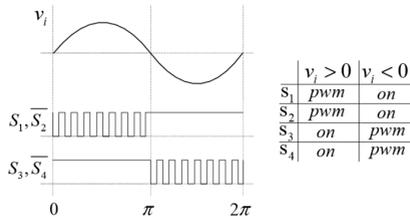
Fonte: (POMILIO,)

Figura 3.43 – Conversor CA-CA monofásico.



Fonte: (PETRY; MOIA, 2014).

Figura 3.44 – Formas de onda da tensão de entrada e PWM nas chaves.



Fonte: (PETRY; MOIA, 2014)

3.3 CARGA MICRO-INVERSOR

A carga do Micro-inversor foi dimensionada com base nas seguintes características:

- Ser capaz de suprir a potência de uma motobomba monofásica de 1/3CV, com o uso de partida Soft-Start;
- Potência máxima (Pm) oferecida pelos módulos PV;

A motobomba que será utilizado como carga pode ser visualizada através das Fig. 3.45.

Figura 3.45 – Motobomba instalada na cisterna.



Fonte: Autor.

As informações técnicas foram obtidas com base na placa de identificação do fabricante da motobomba Fig. 3.46 e na placa de identificação do motor que fica dentro do envólucro da motobomba 3.47.

Portanto, a potência em Watts durante o regime de trabalho normal da motobomba pode ser obtida através da equação 3.21, tendo em vista a relação de conversão apresentada na equação 3.19.

$$1CV = 736W \quad (3.19)$$

Assim sendo,

$$1/3CV = \frac{736W}{3} = 245,33W \quad (3.20)$$

Quanto a potência máxima Pm a ser fornecida pelos módulos PV, seguiu-se os seguintes passos:

Figura 3.46 – Placa de identificação na motobomba.



Fonte: Autor.

Figura 3.47 – Placa de identificação do motor da motobomba.



Fonte: Autor.

Primeiro foi definido o módulo a ser adquirido, analisando a tabela 3.1, comparado as características dos fabricantes sobre o regime de testes STC e o custo no momento da aquisição, optou-se pela aquisição do módulo DAHSOLAR DHP72-320, conforme informado anteriormente.

Segundo passo, foi identificado a potência máxima do módulo, considerando os parâmetros da tabela 3.2 pelo regime de testes NOCT, que mais se igualam ao regime normal de funcionamento, conforme informado anteriormente.

Com base na tabela 3.2 a potência máxima do módulo PV sobre o regime NOCT é de 238W.

Sendo assim, será considerado dois módulos PV em paralelo, disponibilizando uma potência máxima de 476W, com uma tensão de 34,4V e 6,92A.

Portanto, o Micro-inversor terá como potência máxima da fonte de 476W, lembrando que esta potência não será disponibilizada na sua saída, em virtude de não dispormos de um Micro-inversor ideal, sem perdas, mostrado através da própria eficiência na simulação.

3.3.1 Resistiva

Nos primeiros ensaios de simulação do Micro-inversor foi utilizado cargas lineares, portanto utilizou-se vários valores de resistência.

A principal característica do valor das resistências são, gerar uma demanda na saída do Micro-inversor quanto a potência, possibilitando avaliar a eficiência do Micro-inversor.

Os valores das resistências são obtidos a partir da tensão de saída V_o , a potência máxima desejada P_m da fonte geradora PV e o percentual da potência desejada, no caso das simulações, optou-se pelo incremento de 10% da potência a cada teste. Portanto, os valores das resistências foram obtidos com base na equação 3.21.

$$R = \frac{V_o^2}{P_m * \%P_m} \quad (3.21)$$

Possibilitando a montagem da tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Percentual da potência e resistência na carga.

<i>Percentual P_m</i>	<i>Potência</i>	<i>Resistência</i>
10%	47,6 W	1016,60 Ω
20%	95,2 W	508,30 Ω
30%	142,8 W	338,87 Ω
40%	190,44 W	254,15 Ω
50%	238,05 W	203,32 Ω
60%	285,66 W	169,43 Ω
70%	333,27 W	145,23 Ω
80%	380,88 W	127,08 Ω
90%	428,49 W	112,96 Ω
100%	476 W	101,66 Ω

3.3.2 Motor monofásico com capacitor permanente

Os motores monofásicos são bastante utilizados nas residências, assim como, são utilizados nas indústrias, entretanto em menor proporção comparado aos trifásicos.

Os motores monofásicos trazem um grande benefício, não requerem uma rede de alimentação trifásica, tendo em vista que o maior número de residências utilizam redes monofásicas.

Os motores monofásicos são viáveis para pequenas aplicações, normalmente inferiores a 10CV.

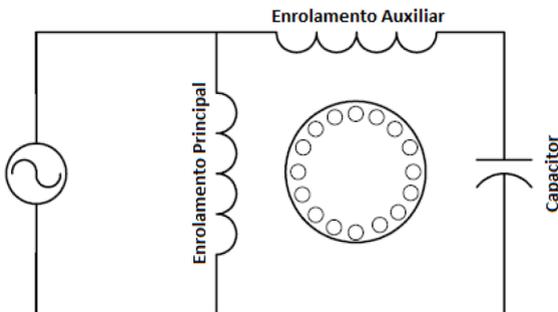
Quanto a partida dos motores monofásicos conforme (MANCUSSI, 2013), os mesmos são projetados para dispor de uma segunda fase fictícia, gerando um campo girante para a partida.

Quanto aos tipos de motores monofásicos, os mesmos são classificados com base nos métodos de partida e os nomes dos tipos se baseiam no método, divididos em três tipos:

- Motor de fase dividida;
- Motor de capacitor de partida;
- Motor de capacitor permanente;

O motor que será utilizado como carga é do tipo capacitor permanente e pode ser visualizado através da Fig. 3.47. Quanto ao circuito equivalente desse motor, pode ser representado conforme Fig. 3.48.

Figura 3.48 – Circuito equivalente do motor monofásico com capacitor permanente.



Fonte: (BIM, 2012) (MANCUSSI, 2013).

Conforme (MANCUSSI, 2013), o motor monofásico com capacitor permanente, comparado aos outros tipos de motores monofásicos, tem um fator de potência melhor.

Isso se dá, devido as características do enrolamento auxiliar, por não ser tipo desacoplado, favorecendo a um ganho quanto ao desempenho do motor e a redução dos custos de manutenção e fabricação devido a sua construção simples.

O funcionamento do motor ocorre devido a defasagem da corrente entre a bobina principal e a auxiliar, existente por causa da construção física dos enrolamentos e da influência do capacitor permanente na bobina auxiliar.

Em virtude da técnica com capacitor permanente, o torque será menor do que com a técnica de um capacitor de partida, mas traz outros benefícios citados anteriormente.

Quanto ao valor da capacitância ideal, o projeto se baseia no regime contínuo, levando em conta a necessidade da defasagem da corrente entre as bobinas de 90° elétricos (FITZGERALD, 2006).

3.3.2.1 Como obter os parâmetros do motor monofásico?

O estudo não visa aprofundar-se a respeito do motor monofásico, entretanto, se faz necessário a obtenção dos parâmetros responsáveis pelo modelo matemático do mesmo, portanto, os passos necessários para obtenção dos parâmetros do motor monofásico de capacitor permanente serão apresentados nessa seção, conforme (MANCUSSI, 2013).

Conforme (MANCUSSI, 2013), trata-se do método clássico de obtenção dos parâmetros, onde parte do teste é feito sobre condição do motor com rotor bloqueado e outra parte com o motor a vazio.

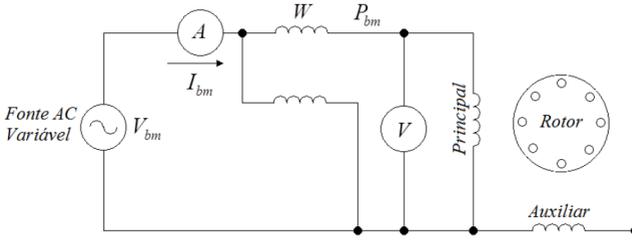
3.3.2.2 Ensaios com rotor bloqueado

Conforme (MANCUSSI, 2013), os ensaios a partir do motor com rotor bloqueado são divididos em duas etapas:

- Alimentar o motor com a bobina auxiliar aberta;
- Alimentar o motor com a bobina principal aberta;

A primeira etapa com rotor bloqueado e bobina auxiliar aberta, pode ser representado conforme a Fig. 3.49, segundo (GURU; HIZIROGLU, 2000) (MANCUSSI, 2013).

Figura 3.49 – Circuito equivalente do ensaio com rotor bloqueado e bobina auxiliar aberta.



Fonte: (GURU; HIZIROGLU, 2000) (MANCUSSI, 2013).

Segundo (MANCUSSI, 2013), a partir das condições citadas para os ensaios referente a primeira etapa, deve ser alimentado o motor com tensão alternada, aumentando a tensão de forma progressiva até que seja alcançado o valor da corrente nominal do motor, durante esse evento, será observado os valores de tensão, corrente e potência.

Quanto a segunda etapa, com o rotor bloqueado e com a bobina principal aberta, conforme (MANCUSSI, 2013), será repetido o processo de ensaio aplicado na primeira etapa, a diferença está na bobina que está aberta.

Após obtenção dos dados de ensaios, inicia-se o processo de identificação dos parâmetros do motor.

Primeiramente encontra-se alguns parâmetros com base nos ensaios da primeira etapa, que é com a bobina auxiliar aberta, ou seja, os parâmetros possíveis a serem analisados são voltados a bobina principal bm , portanto é denominado por (MANCUSSI, 2013), como sendo, V_{bm} , I_{bm} e P_{bm} , que representam a tensão, a corrente e a potência encontrada nos ensaios da bobina principal.

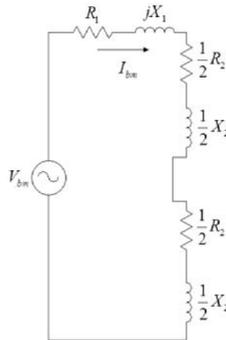
Segundo (GURU; HIZIROGLU, 2000) (MANCUSSI, 2013), o circuito equivalente do motor monofásico com rotor bloqueado e bobina auxiliar aberta, pode ser, também representada pela Fig. 3.50.

A partir dos parâmetros obtidos nos ensaios práticos é possível buscar os demais parâmetros, iniciando-se pela impedância da bobina principal Z_{bm} através da equação 3.22.

$$Z_{bm} = \frac{V_{bm}}{I_{bm}} \quad (3.22)$$

Posteriormente a resistência da bobina principal R_{bm} , que pode ser obtida através da equação 3.23.

Figura 3.50 – Circuito equivalente do ensaio com rotor bloqueado e bobina auxiliar aberta.



Fonte: (GURU; HIZIROGLU, 2000) (MANCUSSI, 2013).

$$R_{bm} = \frac{P_{bm}}{I_{bm}^2} \quad (3.23)$$

A reatância da bobina principal X_{bm} , pode ser obtida através da equação 3.24.

$$X_{bm} = \sqrt{Z_{bm}^2 - R_{bm}^2} \quad (3.24)$$

Com base na Fig. 3.50 é necessário obter os valores das resistências R_1 e R_2 e os valores das reatâncias X_1 e X_2 , isso é possível através da equação 3.25 e 3.26 respectivamente.

$$R_{bm} = R_1 + R_2 \quad (3.25)$$

$$X_{bm} = X_1 + X_2 \quad (3.26)$$

Levando em consideração que a resistência do primário pode ser obtida através da medição direta sobre a bobina principal do motor, a equação 3.25 pode ser trabalhada conforme a equação 3.27.

$$R_2 = R_{bm} - R_1 \quad (3.27)$$

Assumindo que as reatâncias X_1 e X_2 sejam iguais, a equação 3.25 pode ser expressa através da equação 3.28.

$$X_1 = X_2 = \frac{X_{bm}}{2} \quad (3.28)$$

Quanto aos ensaios da segunda etapa, com rotor bloqueado e o enrolamento principal aberto, análogo aos ensaios do enrolamento auxiliar aberto, os parâmetros a serem identificados são com base na bobina auxiliar ba , conforme segue V_{ba} , I_{ba} e P_{ba} , conforme (GURU; HIZIROGLU, 2000) (MANCUSSI, 2013).

A resistência do enrolamento auxiliar é obtido através da equação 3.29.

$$R_{ba} = \frac{P_{ba}}{I_{ba}^2} \quad (3.29)$$

A resistência do rotor é obtida através da equação 3.30.

$$R_{2a} = R_{ba} - R_a \quad (3.30)$$

Sendo que R_a é a resistência associada ao capacitor.

A relação das espiras é obtida através da equação 3.31.

$$a = \sqrt{\frac{R_{2a}}{R_2}} \quad (3.31)$$

3.3.2.3 Ensaio com motor em vazio

Segundo (MANCUSSI, 2013), o ensaio consiste em alimentar o motor com a tensão nominal e com o enrolamento auxiliar aberto. Também é observado os valores da tensão, corrente e potência. O circuito equivalente dessa ensaio pode ser visualizado através da Fig. 3.51.

Conforme (MANCUSSI, 2013), a reatância do circuito pode ser obtida através da equação 3.32.

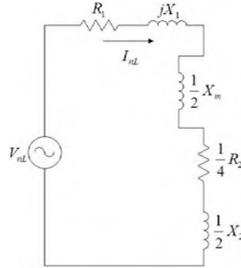
$$X_{nL} = \sqrt{Z_{nL}^2 - R_{nL}^2} \quad (3.32)$$

Com base na Fig. 3.51 é possível obter a reatância total da carga através da equação 3.33.

$$X_{nL} = X_1 + \frac{X_m}{2} + \frac{X_2}{2} \quad (3.33)$$

Com base na equação 3.28 e equação 3.33, é possível obter a seguinte equação 3.34.

Figura 3.51 – Circuito equivalente do ensaio com motor em vazio e enrolamento auxiliar aberto.



Fonte: (GURU; HIZIROGLU, 2000) (MANCUSSI, 2013).

$$X_1 + \frac{X_2}{2} = \frac{3}{4}X_{bm} \quad (3.34)$$

Sendo assim, a reatância de magnetização X_m pode ser obtida segunda a equação 3.35.

$$X_m = 2X_{nL} - \frac{3}{2}X_{bm} \quad (3.35)$$

Enquanto, as perdas rotacionais são obtidas a partir da equação 3.36.

$$P_r = P_{nL} - I_{nL}^2 \left(R_1 + \frac{1}{4}R_2 \right) \quad (3.36)$$

Os ensaios com o motor da Motobomba a ser implementado o sistema de energia renovável PV, assim como, as estratificações dos parâmetros com base nos estudos dessa seção, serão obtidos após trabalho de qualificação.

4 TOPOLOGIA E FUNCIONAMENTO DO MICRO-INVERSOR PROPOSTO

Na Fig. 4.1 é apresentado a topologia do conversor proposto CC-CA-CA, nessa configuração há dois conversores internos, o primeiro um CC-CA e o segundo um CA-CA.

O primeiro conversor converte a tensão CC em uma tensão CA de alta frequência com o auxílio do circuito intermediário LC, também conhecido como circuito tanque, responsável pela frequência de ressonância da energia.

Este primeiro conversor é responsável pela carga do LINK CA, isso é feito através do correto chaveamento das chaves S0, S1, S2 e S3 em conjunto com o circuito tanque LC.

O segundo conversor CA-CA é responsável por converter a fonte de tensão CA do circuito tanque de alta frequência em uma tensão CA de frequência desejada, nesse caso numa tensão de 220Vrms e 60Hz.

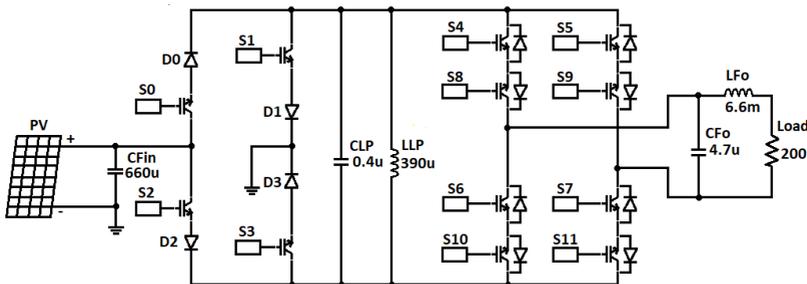
O circuito ressonante traz uma importante característica dessa proposta, conforme (AMIRABADI; TOLIYAT; ALEXANDER, 2013) (DOUSOKY; ABU-RUB, 2014) (AMIRABADI et al., 2014), segue:

- Redução de tamanho e peso - Pois, não necessita de um sistema de armazenamento de energia como os usuais do Link CC e pelo contrário o circuito LC responsáveis pela ressonância requerem pequenos volumes;
- Redução por perdas de chaveamento - Em virtude do Link CA e um ótimo controle é possível aplicar a técnica de chaveamento suave ZVS, evitando assim, surtos de corrente durante a transição do estado aberto para fechado, conforme (HARB; ZHANG; BALOG, 2013), ao se aplicar as técnicas de controle ZVS e ZCS é possível reduzir as perdas por chaveamento das chaves ao nível de 70% to 80%, permitindo que se possa trabalhar com frequências de chaveamento dos IGBTs com frequências acima de 200 kHz (PERIN; BASCOPÉ, 1997).
- Redução de Harmônicas da Corrente de Saída - Através do Link CA e o correto controle da aplicação ZVS, é possível oferecer um excelente conversor multi-nível, capaz de fazer a conversão de uma fonte de energia em outra, trazendo uma grande redução de harmônicas;
- Grande Velocidade Dinâmica de Incremento ou Decremento da

Tensão - Através dos resultados das simulações foi possível constatar uma grande velocidade de resposta dinâmica de correção quanto a tensão de saída em relação ao desejado, sendo perfeito para aplicação em sistemas off-grid e on-grid;

- Isolação entre a Tensão de Entrada e Saída - Através desse conversor é possível constatar através da Fig. 4.16 que há um bom intervalo de tempo entre o momento de chaveamento da carga do Link CA feito pelo conversor CC-CA e o chaveamento do conversor CA-CA responsável pela descarga do Link CA para a carga da saída, o chaveamento dos dois conversores podem ocorrer ao mesmo tempo, quando o nível de tensão "VPV", "VLP" e "Vo" forem iguais. Entretanto, isso pode ser evitado através de um bom controle, ou seja, trata-se de uma decisão do usuário, por esse motivo, convencionou-se como sendo um conversor com isolação. Entretanto, se for necessário a isolação galvânica, é possível ser feito através da substituição do indutor do circuito LC por um transformador de alta frequência (Flyback);

Figura 4.1 – Topologia do micro-inversor proposto.



Fonte: Autor.

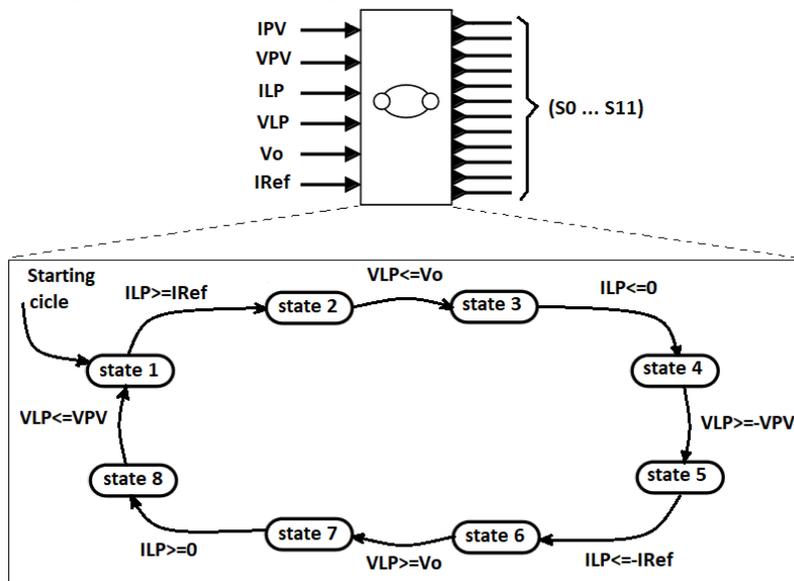
4.1 CONTROLE DO MICRO-INVERSOR

Na Fig. 4.2 é apresentado o modelo do atuador da máquina de estados proposto para o conversor e o FSM que está dentro do modelo do atuador, conforme (LEE; SESHIA, 2017) (DOUSOKY; ABU-RUB, 2014).

O controle é feito com base no FSM, nesse sistema se tem os pré requisitos e as transições necessárias quanto as mudanças dos estados.

Os critérios de ações se baseiam na proposta do conversor e na técnica de chaveamento "ZVS". Sendo que cada estado é representado por uma série de ações e mudanças necessárias.

Figura 4.2 – Representação FSM como atuador do conversor.



Fonte: Autor.

Na Fig. 3.15 é apresentado o sistema FSM, responsável por controlar todo o controle lógico quanto a simulação do Micro-inversor, foram utilizadas técnicas de sistema embarcado, da leitura de sinais analógicos (sensores VPV, VLP, ILP,...), criação de rotinas responsáveis pelos pré-requisitos do sistema FSM e interfaceamento quanto as tomadas de ações nas saídas digitais como as chaves (S0, S1, S2...). Estando ligadas "ON" em nível alto e desligadas "OFF" em nível baixo.

No Micro-inversor proposto não é desejável aplicar as técnicas de controle PWM, usualmente utilizados nos conversores buck-boost CC-AC. Em virtude do Link-CA gerado pelo circuito ressonante e pela própria proposta de chaveamento suave (ZVS), no intuito de trazer os benefícios como a redução das perdas por chaveamento e a redução das harmônicas na corrente de saída.

Como a proposta está sobre um condição de um Micro-inversor com Link CA para um sistema OFF-Grid, é necessário que seja gerado

uma tensão de referência "VRef".

Esta tensão é gerada através da programação do sistema embarcado, a sua forma é obtida a partir da frequência de saída e amplitude da tensão eficaz desejada.

Essa tensão de referência não aparece na topologia do Micro-inversor, pois trata-se de um parâmetro interno do sistema de controle.

Um segundo parâmetro, cuja a dinâmica é definido pelo programador é o da corrente de referência "IRef", este parâmetro tem uma grande interferência quanto ao comportamento do fluxo de energia no Link CA quanto a sua amplitude. Conforme (DOUSOKY; ABU-RUB, 2014) (AMIRABADI et al., 2014) a maioria das propostas utilizam da técnica de controle MPPT.

Na simulação proposta, utilizou-se de um controle simplificado sobre o parâmetro "IRef", isso é possível em virtude das características da alta demanda de energia para a carga resistiva estar no pico da tensão de saída "Vo", portanto, é possível considerar que a grandeza "IRef" deve crescer de uma forma linear. No caso de cargas reativas, haverá a necessidade de uma reavaliação, pretende-se simular com a carga reativa utilizando-se da mesma técnica para avaliar os resultados.

A respeito da corrente "IRef", será composta pela soma das correntes dos módulos PV (I_m) multiplicada por um ganho.

O ganho mínimo é 1 e o máximo é 2, sua variação se dá ao longo do tempo, com base numa onda triangular, sendo que o off-set é de 1 e o fim de escala é 2, a frequência desta forma de onda é 2 vezes a frequência da tensão de saída "Vo".

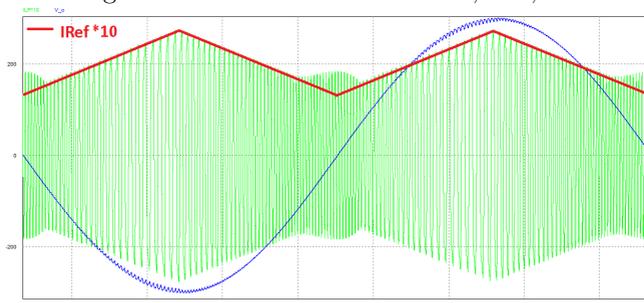
O comportamento desta forma de onda é facilmente implementado, suas características são de fácil aplicação em sistemas de cargas resistivas, conforme simulação e podem ser visualizado através da Fig. 4.3.

Visando uma melhora do controle do Micro-inversor, será aplicado numa segunda etapa, a técnica de controle MPPT, também utilizada nas propostas (DOUSOKY; ABU-RUB, 2014) (AMIRABADI et al., 2014).

Após implementação da técnica MPPT, será possível uma comparação dos resultados com a técnica aplicada apresentada na Fig. 4.3.

Importante, quanto ao controle geral do Micro-inversor proposto, é possível afirmar que o mesmo requer uma maior complexidade de programação para o correto funcionamento, comparado aos sistemas convencionais com controle PWM, entretanto é notório a velocidade dinâmica quanto a resposta de correção da tensão desejada, mostrando o potencial quanto a sua aplicabilidade em sistemas OFF-Grid e grande

Figura 4.3 – Formas de onda IRef, ILP, Vo.



Fonte: Autor.

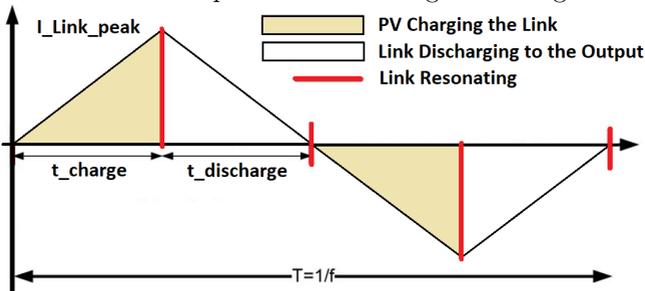
potencial para sistemas ON-Grid.

O Micro-inversor proposto é um conversor tipo multi-nível.

4.2 FUNCIONAMENTO DO MICRO-INVERSOR

Conforme (AMIRABADI; TOLIYAT; ALEXANDER, 2013) o ciclo do fluxo de energia do conversor proposto entre o Link CA, o módulo "PV" e a carga monofásica pode ser representado através da Fig. 4.4.

Figura 4.4 – Ciclo de comportamento de carga e descarga do Link CA.



Fonte: Autor.

A Fig. 4.4 apresenta o ciclo de funcionamento do Micro-Inversor, sendo que esse ciclo é dividido em 8 estados, onde 4 são referente aos estados de transferência de carga e 4 são responsáveis pelos estados de ressonância.

4.2.1 Estado 1 (Energização)

O Estado 1 é o estado responsável pela energização do Link CA, ou seja, o circuito LC é energizado para se fazer a carga do indutor através de sua magnetização, isso é feito através das chaves S0 e S3 conforme a Fig. 4.5.

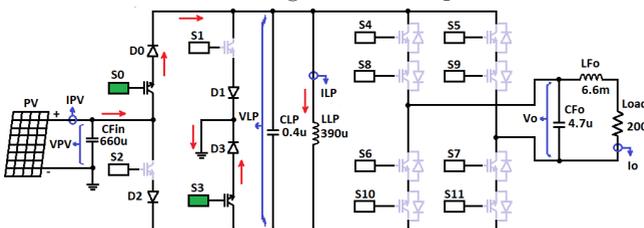
Os gates das chaves são colocados em estado alto (ON), enquanto a tensão sobre a chave ainda está polarizada de forma indireta, para se obter como resultado a técnica ZVS, isso é possível através do circuito ressonante do Link CA como carga desse conversor.

Através da estratégia de antecipação do ligar as chaves com a tensão indireta é possível se obter o perfeito funcionamento da técnica de chaveamento ZVS, por consequência, a mínima corrente desejada irá circular sobre as chaves, evitando as perdas indesejadas no momento do ligar as chaves.

Ou seja, não irá ocorrer um surto de corrente sobre as chaves no momento do chaveamento ON, portanto, a corrente que irá circular nas chaves será iniciada a partir da corrente ainda existente no circuito LC, chegando a corrente máxima desejada por "I_{Ref}".

Quando a corrente de carga chegar a corrente "I_{Ref}", as chaves S0 e S3 serão desligadas (OFF), nesse momento do desligamento o capacitor do circuito de ressonante LC irá auxiliar através da sua característica de acumulador de tensão, minimizando as perdas no desligamento.

Figura 4.5 – Estado 1 - Carga semi-ciclo positivo do Link CA.



Fonte: Autor.

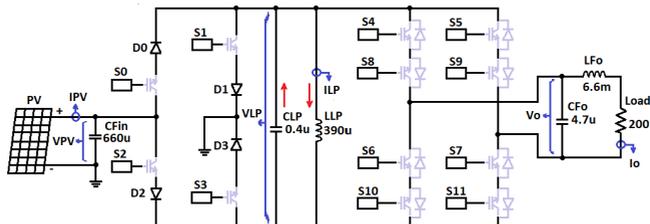
4.2.2 Estado 2 (Ressonância parcial)

O estado 2 é o momento que a energia do Link CA entra em ressonância de forma parcial, para que isso ocorra, todas as chaves do micro-inversor são desligadas (OFF).

Nesse momento a energia do circuito LC entra em ressonância como é mostrado através da Fig. 4.6, no caso do estado 2 a tensão decresce, o estado 2 é finalizado de duas formas diferentes: Quando há necessidade do incremento da tensão "Vo", o estado 2 é finalizado quanto ocorrer a transição da tensão do Link CA pelo eixo zero Volts no sentido semiciclo negativo do Link CA, a segunda possibilidade é quando se deseja o decremento da tensão "Vo", nesse caso, o estado 2 será finalizado sempre que a tensão do Link CA ultrapassar a tensão de pico da tensão de saída desejada, no caso em questão a tensão de piso da saída é 311V, tendo em vista que a tensão desejada na saída é 220Vrms, 60Hz.

Importante, durante a transição dos estados 2 e 3 o circuito LC continuará em regime de ressonância, até que a tensão do Link CA "VLP" se iguale a tensão de saída "Vo", ocorrendo assim o chaveamento ZVS.

Figura 4.6 – Estado 2, 4 6 e 8 - Ressonância Link CA.



Fonte: Autor.

4.2.3 Estado 3 (Desenergização)

No estado 3 ocorre o processo de desenergização do circuito CA, isso é possível através da transferência de energia para a tensão de saída "Vo", entretanto, nesse estado isso pode ocorrer através de uma das quatro formas por ciclo, vide as formas possíveis:

Situação 1, sempre que haja necessidade de incremento do semi-

ciclo positivo da tensão de saída "Vo" é chaveado (ON) as chaves S9 e S10 como apresentado na Fig. 4.7.

Situação 2, sempre que haja necessidade de incremento do semi-ciclo negativo da tensão de saída "Vo" é chaveado (ON) as chaves S8 e S11 como apresentado na Fig. 4.8.

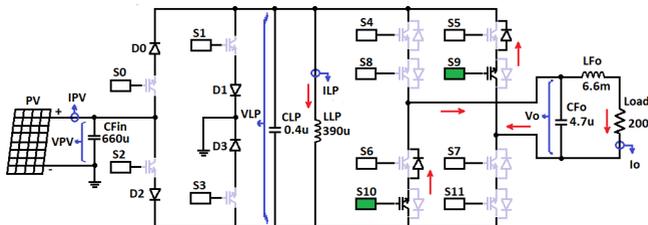
Situação 3, sempre que haja necessidade de decremento do semi-ciclo positivo da tensão de saída "Vo" é chaveado (ON) as chaves S5 e S6 como apresentado na Fig. 4.9.

Situação 3, sempre que haja necessidade de decremento do semi-ciclo negativo da tensão de saída "Vo" é chaveado (ON) as chaves S4 e S7 como apresentado na Fig. 4.10.

Importante, sempre que haja necessidade de ligar as chaves (ON), a lógica de chaveamento deverá obedecer os comentários do estado 1, ou seja, os gates devem ser ligados de forma antecipada, ainda com a tensão indireta sobre as chaves, permitindo com que a tensão do circuito ressonante permita o chaveamento ZVS.

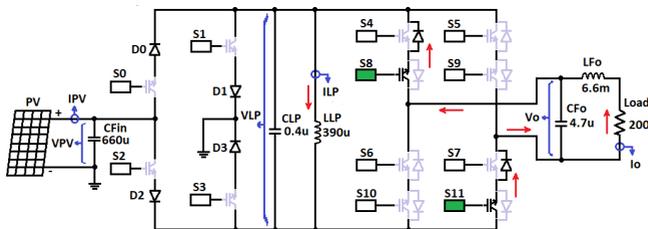
Quanto ao desligamento, o capacitor "Cfo" irá auxiliar no momento do desligamento, evitando perdas no desligamento.

Figura 4.7 – Estado 3 - Incremento da tensão do Semi-Ciclo positivo.



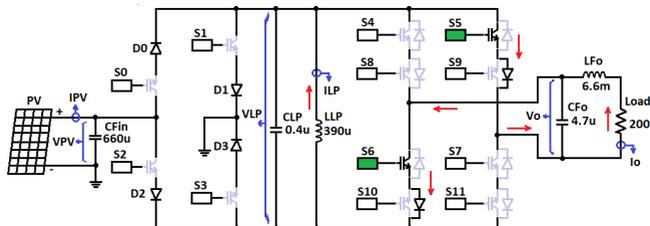
Fonte: Autor.

Figura 4.8 – Estado 3 - Incremento da tensão do semi-ciclo negativo.



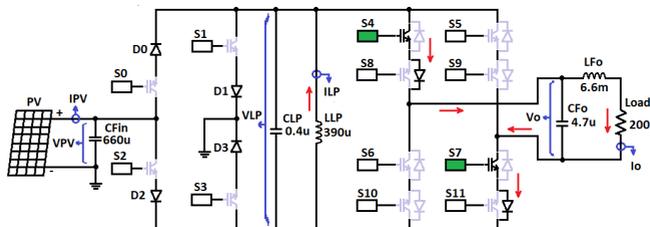
Fonte: Autor.

Figura 4.9 – Estado 3 - Decremento da tensão do semi-ciclo positivo.



Fonte: Autor.

Figura 4.10 – Estado 3 - Decremento da tensão do semi-ciclo negativo.



Fonte: Autor.

4.2.4 Estado 4 (Ressonância parcial)

No estado 4, ocorre um novo momento da ressonância parcial do Link CA, similar ao estado 2, quando todas as chaves estiverem desligadas (OFF) como apresentado na Fig. 4.6, o fluxo de energia continuará em ressonância dentro do circuito LC como mostra na Fig. 4.16, até que a tensão do Link CA "VLP" se iguale a tensão de entrada "VPV".

4.2.5 Estado 5 à 8 (Similar aos estados 1 à 4)

Os estados 5 à 8 são similares aos estados 1 à -4, a principal diferença está na direção do sentido da corrente no Link CA.

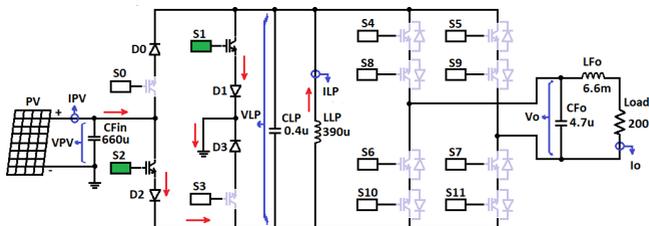
Como resultado dessa inversão, há duas chaves por perna do conversor CC-CA possibilitando a carga do Link CA, ou seja, quanto a corrente do Link CA estiver no sentido contrário o par de outras duas chaves serão ligadas como é mostrado na Fig. 4.11.

Assim como, no conversor CA-CA, responsável pela descarga,

cada perna do conversor há 4 chaves, para possibilitar a descarga do circuito do Link CA, assim como, se houver necessidade armazenar energia no Link CA com origem na tensão de saída do conversor, ou seja, no segundo conversor há uma ponte H bidirecional, podendo regenerar energia para o Link CA, diferente do primeiro conversor, que é unidirecional, pois, não temos como devolver a energia ao módulo PV.

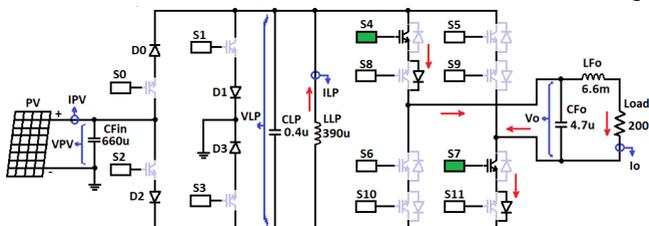
Similar ao conversor CC-CA, o conversor CA-CA também trabalha com o outro par de chaves, cada qual com seu papel. Detalhes do fluxo de energia são mostrados no seus respectivos estados: estado 5 na Fig. 4.11, estado 6 e 8 Fig. 4.6, estado 7 Fig. 4.12, Fig. 4.13, Fig. 4.14, Fig. 4.15.

Figura 4.11 – Estado 5 - Carga semi-ciclo negativo do Link CA.



Fonte: Autor.

Figura 4.12 – Estado 7 - Incremento da tensão do semi-ciclo positivo.

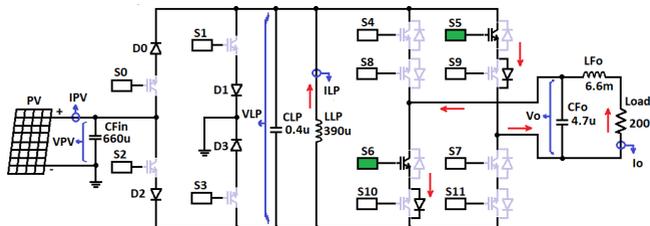


Fonte: Autor.

4.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

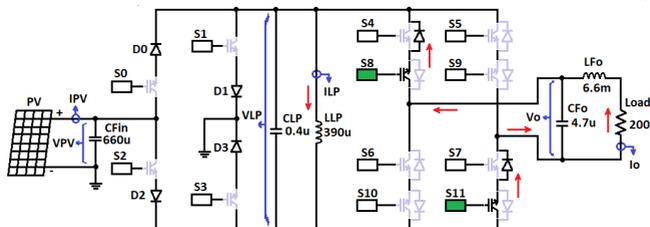
A ferramenta de simulação PSIM foi utilizada para simular o Micro-inversor monofásico com Link CA proposto, na tabela 4.1 é apresentado os valores dos parâmetros utilizados.

Figura 4.13 – Estado 7 - Incremento da tensão do semi-ciclo negativo.



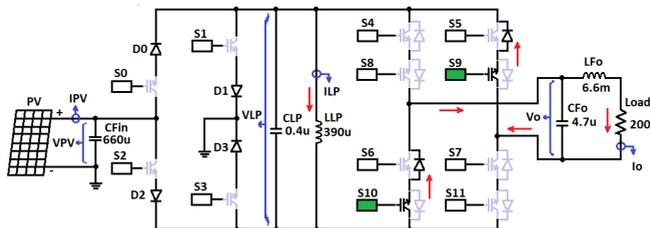
Fonte: Autor.

Figura 4.14 – Estado 7 - Decremento da tensão do semi-ciclo positivo.



Fonte: Autor.

Figura 4.15 – Estado 7 - Decremento da tensão do semi-ciclo negativo.



Fonte: Autor.

Na Fig. 4.16 são apresentadas algumas formas de ondas, possibilitando a constatação do funcionamento completo do fluxo de energia do circuito LC, da fonte de entrada e da fonte gerada na saída.

Pode-se reparar que a corrente de entrada "IPV", responsável pela carga do circuito ressonante, ocorre num tempo diferente da corrente de saída "Io", responsável pela descarga do circuito LC na saída.

As formas de onda estão sendo apresentadas sem os respectivos filtros (forma pulsante), ou seja, apresenta uma isolação entre a carga

Tabela 4.1 – Parametros do micro-inversor proposto.

Parâmetro	Valor
Tensão Máxima Nominal PV (V_m)	34.4 V
Corrente máxima Nominal (I_m)	6.92 A x 2 = 13.84 A
Tensão de Saída (V_o)	220 Vrms
Frequência de Saída	60 Hz
Indutância do Link (LLP)	390 μ H
Capacitância do Link (CLP)	0.4 μ H
Corrente de Pico do Link (I_{Ref}) ^a	27.69 A
Frequência do Link	12.74 KHz
Capacitância do Filtro (CFi)	660 μ H
Capacitância do Filtro (CFo)	4.7 μ H
Indutância do Filtro (LFo)	6.6mH

^aCorrente de Pico "IRef" varia com controle do ganho.

e a entrada, comprovando o mencionado anteriormente quanto a um sistema isolado por componentes de potência de estado sólidos.

É importante lembrar que ao longo do tempo, quando a tensão de saída "Vo" em módulo, a tensão de ressonância "VLP" em módulo e a tensão "VPV" forem iguais, as correntes "IPV" e "Io" podem ocorrer ao mesmo tempo.

Isso irá ocorrer num curtíssimo tempo ao longo do ciclo da tensão da saída, entretanto poderá ocorrer.

É possível eliminar essa condição através da programação do sistema embarcado. E se for de suma importância é possível implementar a isolamento galvânica através da substituição do indutor por um transformador de alta frequência (Flyback), como mencionado anteriormente.

Uma segunda informação sobre a Fig. 4.16 é quanto a aplicação da técnica de chaveamento suave ZVS, quando a tensão "VLP" se iguala a tensão "VPV" possibilitando a carga do circuito LC e quando a tensão "VLP" se iguala a tensão "Vo" possibilitando a descarga do circuito LC na saída, há uma transição de corrente normal, sem qualquer surto de corrente, comprovando a adequada utilização da técnica de chaveamento ZVS.

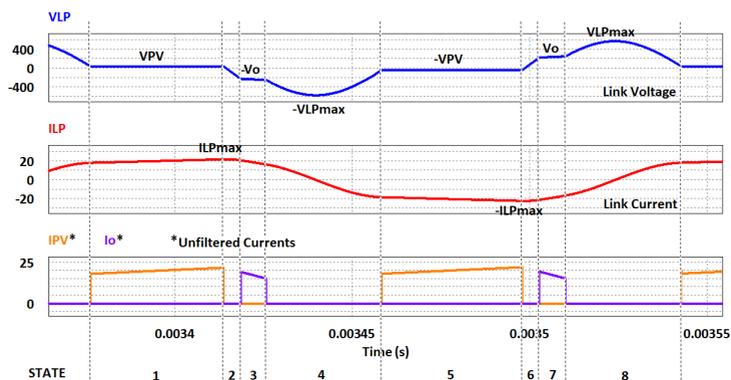
A terceira informação possível através dessas formas de onda, é o tempo desproporcional entre o tempo de carga do circuito LC e o tempo de descarga do circuito LC, este efeito ocorre devido a desproporcionalidade entre a tensão de entrada 34,4 VCC e a tensão de saída

220 VCA rms.

O ideal é que a tensão de entrada seja próximo a tensão de saída. Entretanto, para o estudo em questão, algumas premissas são importantes: ser um sistema compacto, baixa potência e barato.

Uma outra constatação possível de se fazer ao ver a Fig. 4.16 é que as tensões e as correntes dessas formas de onda estão ocorrendo da melhor forma possível.

Figura 4.16 – Formas de onda do ciclo do fluxo de energia.



Fonte: Autor.

A Fig. 4.17 apresenta as formas de onda da entrada quanto a tensão "VPV" e corrente "IPV", assim como, as formas de onda da saída quanto a tensão "Vo" e corrente "Io" com os respectivos filtros.

É possível constatar que a potência realizada na fonte de entrada não é bem distribuída ao longo do ciclo, ha uma concentração da demanda do fluxo de energia, demonstrando que pode ser reavaliado o filtro "CFi" ou até mesmo avaliara a viabilidade de substituição por um filtro indutivo e capacitivo.

Importante, quanto a distribuição da energia não uniforme na fonte de entrada, deve ser considerado que se trata de um sistema com saída monofásico, ou seja, a demanda de energia não será constante no circuito intermediário, como comumente é nos circuitos trifásicos equilibrados. Reforçando a característica de fluxo de energia não distribuído.

Quanto as simulações, os parâmetros foram mantidas nos ensaios do Micro-inversor proposto, foram alternados os valores de carga quanto as resistências, para se obtenção da carga progressiva de 10% da potência máxima até que fosse alcançado a potência máxima dos

módulos PV "Pm".

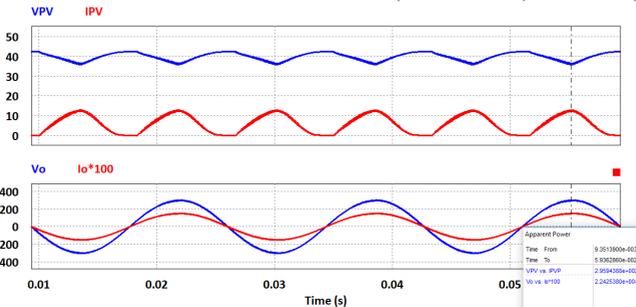
O Micro-inversor respondeu de forma adequada entregando na saída 70% da potência máxima dos módulos PV. Conforme (ANEEL, 2018) estabelece critérios de qualidade das fontes de alimentação, estes critérios são: adequado, precário, crítico. Todos, como possíveis de utilização.

Na condição de fornecimento adequada a tensão de linha deverá ser fornecida no regime contínuo entre $(202V \leq TL \leq 231)V_{rms}$ e a frequência entre 59,9 e 60,1 Hz.

Durante a simulação com carga em 70% da potência, a tensão de saída "Vo" foi de 205V rms 60 Hz.

As simulações entre 80% to 100% não forneceram fontes de energia adequada, seguindo os critérios (ANEEL, 2018), é importante lembrar que a eficiência do Micro-inversor encontrado na simulação a 70% da potência foi de 75,14%. Ou seja, se considerar essa mesma eficiência para uma carga de 80% de potência na saída, necessitaria de uma potência na entrada superior a atual 100% disponibilizado pela fonte de entrada, por isso, é fácil constatar que não poderia ser fornecido uma tensão de saída adequada. Não está se tratando de um Micro-inversor dentro de condições ideais e sim reais.

Figura 4.17 – Formas de onda da entrada (VPV, IPV) e saída (Vo, Io).



Fonte: Autor.

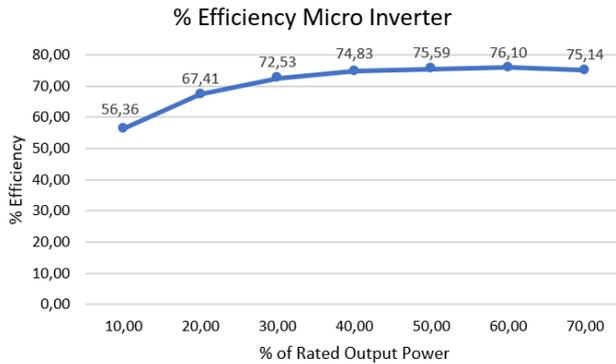
4.4 CONCLUSÃO

Analisando os resultados obtidos, é possível afirmar que se trata de uma grande oportunidade quanto a aplicabilidade da topologia proposta do Micro-inversor monofásico com Link CA, mesmo que, no

projeto atual se alcançou uma eficiência máxima de 76,1% com uma potência na carga de 60% da potência máxima de entrada, conforme Fig. 4.18, resultando numa potência ativa de 255,17 W.

Portanto, com os respectivos resultados de simulação é possível afirmar, que se trata de uma proposta arrojada e com ótimo potencial.

Figura 4.18 – % Eficiência do micro inversor proposto.



Fonte: Autor.

5 PLANO DE TRABALHO

Nesse capítulo é apresentado o plano de trabalho das atividades já realizadas e a serem realizadas, visando alcançar os objetivos do projeto em estudo, o status de cada atividade pode ser obtido através do cronograma no Apêndice A.

Algumas atividades do cronograma não serão abordadas aqui, contudo fazem parte do Mestrado.

Sobre as principais atividades do Projeto, seguem:

- * Estudo de pesquisa recentes feitos por grupos da área - Foram realizados estudos quanto a diferentes topologias propostas no meio acadêmico. Constatado como sendo uma proposta interessante de aplicação no sistema de energia renovável PV o Conversor do Link CA monofásico.

- * Simulação no PSIM da proposta do conversor estático em estudo - Simulado o conversor Link-CA monofásico proposto no PSIM, resultados podem ser visualizados no Capítulo IV.

- * Revisão Bibliográfica - Realizado.

- * Realização dos cálculos para o projeto - Realizado parcialmente para a simulação do conversor.

- * Escrita do trabalho para qualificação - Realizado.

- * Exame de qualificação - Agendado.

- * Projetar o circuito de potência - Refinamento do Projeto será feito após a qualificação.

- * Projetar os circuitos auxiliares - Será feito após a qualificação.

- * Levantamento e aquisição do Hardware (da potência ao controlador). - Após finalização do Projeto.

- * A montagem do Hardware, os ensaios com o Hardware, a escrita final da dissertação, a defesa da dissertação e as correções sugeridas na defesa da dissertação. - Serão feitas mais a frente.

REFERÊNCIAS

AMERISOLAR. **Datasheet AS-6P 300W - 400W**.

AMERISOLAR, Disponível em: <<https://www.weamerisolar.eu/wp-content/uploads/2017/03/AS-6P-Module-Specification.pdf>. >. Acesso em: 17 mai. 2019.

AMIRABADI, M. et al. High-frequency ac-link pv inverter. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 61, n. 1, p. 281–291, Jan 2014. ISSN 0278-0046.

AMIRABADI, M.; TOLIYAT, H. A.; ALEXANDER, W. C. A multiport ac link pv inverter with reduced size and weight for stand-alone application. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 5, p. 2217–2228, Sep. 2013. ISSN 0093-9994.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – qualidade da energia elétrica**. [S.l.], 2018.

BIM, E. **Máquinas Elétricas E Acionamento**. Second. [S.l.]: Elsevier, 2012. ISBN 9788535259230.

BURTON, V. **Renewable Energy : Sources, Applications and Emerging Technologies**. Nova Science Publishers, Inc, 2016.

Disponível em:

<<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1367372br&site=ehost-live>. >. Acesso em: 24 abr. 2019.

CANADIAN. **Datasheet CS6U-325-330W-335P**. CANADIAN, Disponível em:

<<http://recursos.minhacasasolar.com.br/MediaCenter/Datasheet-Painel-Solar-Canadian-Solar-325W-330W-CS6U-P.pdf>. >. Acesso em: 17 mai. 2019.

CARVALHO, A. L. C. D.

Metodologia para análise, caracterização e simulação de células fotovoltaicas. UFMG, Disponível em:

<<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1083M.PDF>. >. Acesso em: 15 mai. 2019.

DAH. **Datasheet DHP72 315W - 330W**. DAH, Disponível em: <<https://pt.dahsolarpv.com/uploadfile/downloads/DHP72>> Acesso em: 17 mai. 2019.

De Doncker, R. W. et al. Power electronic devices for renewable power systems. In: **2010 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices IC's (ISPSD)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 19–25. ISSN 1946-0201.

DEMONTE, R. **PROCESSAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA PROVENIENTE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**. UFSC, Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/84572/192007.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

DOUSOKY, G. M.; ABU-RUB, H. Single-phase zvs ac-link inverter for pv-grid connection at mppt operation. In: **IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 2253–2258. ISSN 1553-572X.

FITZGERALD, A. E. **Máquinas Elétricas Com introdução à Eletrônica de Potência**. Sixth. [S.l.]: Artmed Editora S.A, 2006. ISBN 9788560031047.

FRAUNHOFER, I. **PHOTOVOLTAICS REPORT**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, Disponível em:

<<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Report.pdf>>. Acesso em: 09 mai. 2019.

GAZOLI, J. R.; VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e aplicações - sistemas isolados e conectados à rede**. Second. [S.l.]: Érica, 2012. ISBN 9788536504162.

GURU, B. S.; HIZIROGLU, H. R. **Electric Machinery and Transformers**. third. [S.l.]: Oxford University Press, 2000. ISBN 9780195138900.

HARB, S.; ZHANG, H.; BALOG, R. S. Ac-link, single-phase, photovoltaic module integrated inverter. In: **2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 177–182. ISSN 1048-2334.

IPEA. **ODS 7 - Assegurar o Acesso Confiável, Sustentável, Moderno e a Preço Acessível à Energia Para Todos**. IPEA,

Disponível em:

<http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/190502_cad>. Acesso em: 07 mai. 2019.

JäGER-WALDAU, A. **PV Status Report 2018**. Publications Office of the European Union, 2018. Disponível em:

<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC113626/pv_stat>. Acesso em: 09 mai. 2019.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach**. Second. [S.l.]: MIT Press, 2017. ISBN 9780262533812.

MANCUSSI, B. E. P. **PULSAÇÃO DE CONJUGADO EM MOTORES MONOFÁSICOS DE CAPACITOR PERMANENTE ALIMENTADOS POR TENSÕES NÃO SENOIDAIS**. Bauru - SP: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista, Área de concentração Engenharia Elétrica, Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87210/mancussi_bep_me>. Acesso em: 22 abr. 2019.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**. Elsevier Science, 2003. Disponível em:

<<https://books.google.com.br/books?id=gf6oN2Hl3RYC>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

NREL. **Best Research-Cell Efficiency Chart**. NREL, Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>. Acesso em: 10 mai. 2019.

PERIN, A. J.; BASCOPE, R. T. **O Transistor IGBT Aplicado em Eletrônica de Potência**. [S.l.]: Sagra, 1997. ISBN 9788524105326.

PETRY, C. A. **Introdução aos Conversores CC-CC**. Petry, Clóvis Antônio, Disponível em:

<http://www.professorpetry.com.br/Bases_Dados/Apostilas_Tutoriais/Introducao>. Acesso em: 24 mai. 2019.

PETRY, C. A.; MOIA, J. **Conversores CC-CA e CA-CA**. Clóvis Antônio Petry, Disponível em:

<http://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Con>. Acesso em: 14 jun. 2019.

POMILIO, J. A. **CONVERSORES CC/CA - INVERSORES:** Eletrônica de potência para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdffiles/it744/cap5.pdf>>. Acesso em: 25 mai. 2019.

PORTALSOLAR. **Folha de Dados do Painel Solar – O Que Você Precisa Saber.** PORTALSOLAR, Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/folha-de-dados-do-painel-solar—o-que-voce-precisa-saber.html>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

PORTALSOLAR. **Como Funciona o Painel Solar Fotovoltaico – Placas Fotovoltaicas.** PORTALSOLAR, Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-o-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 15 mai. 2019.

REN21. **Renewables 2018 Global Status Report.** REN21, 2018. Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2019.

SILVA, A. M. **Estudo e análise de desempenho de geradores fotovoltaicos distribuídos com vistas à avaliação de procedimentos para identificação de sinais de degradação e suas respectivas causas.** Uberlândia - MG: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24946/5/EstudoAnaliseDesempenho>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

UPSOLAR. **Datasheet UP-M325P-M350P.** UPSOLAR, Disponível em: <http://www.upsolar.com/uploads/UploadFile/2018_EU-P7-8>. Acesso em: 17 mai. 2019.

Walwil, H. M. et al. Comparative studies of encapsulation and glass surface modification impacts on pv performance in a desert climate. **Solar Energy**, v. 142, n. 5, p. 288–298, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.020>> .

ZHENG, H.; LI, S. Shading and bypass diode impacts to energy extraction of pv arrays under different converter configurations. **Renewable Energy**, 2014.

APÊNDICE A – Cronograma

