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

FABRICIO HENRIQUE FERREIRA DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE STATCOM-MMC COMBINADO COM GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

VITÓRIA – ES DEZEMBRO/2018

FABRICIO HENRIQUE FERREIRA DOS SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE STATCOM-MMC COMBINADO COM GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Fabricio Henrique Ferreira dos Santos**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação

VITÓRIA – ES DEZEMBRO/2018

DESENVOLVIMENTO DE STATCOM-MMC COMBINADO COM GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Fabricio Henrique Ferreira dos Santos**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em (dia), de (mês) de (ano).

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Lucas Frizera Encarnação Universidade Federal do Espírito Santo – UFES Orientador

Prof^a. Dr^a. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas Universidade Federal do Espírito Santo – UFES Examinador

MSc. Thiago Silva Amorim Universidade Federal do Espírito Santo – UFES Examinador

À minha mãe e aos meus pais do coração, que não mediram esforços para que eu concluísse esta etapa da minha vida.

Agradeço primeiramente a minha mãe, Ailda Ferreira dos Santos, que, apesar de todas as adversidades enfrentadas ao longo de sua vida, nunca se deixou abalar e sempre fez tudo que estivesse ao seu alcance para que eu pudesse concretizar meus sonhos. Não menos importante, aos meus pais do coração, Manoel Bermudes Rocha e Flourdalisa Taveira Rocha, que sempre me deram amor e me trataram como filho. A minha irmã do coração e primeira amiga, Juliana, que me deu a honra de ser padrinho do Gustavo. Aos meus irmãos do coração que tanto amo, Marcelo, Ivan, Rogério e, em especial, ao já falecido Juninho. Ao meu padrasto, Geraldo Freitas de Aguiar, por todo apoio e suporte ao longo deste percurso.

Ao meu orientador Lucas Frizera Encarnação pelos votos de confiança, por todas as contribuições, pelo tempo disponibilizado e pela atenção.

As amizades que fiz ao longo desses anos de graduação e que se tornaram muito mais que simples colegas de curso, Alef, Birro, Leonardo e Thiago, ou de trabalho, Ângelo, Daniel, Diego, Ezequias, Gustavo, Hebertt, Mamutty, PC, Phelipe, Rohne, Vitor e Welington.

As amizades anteriores à graduação e que, apesar de todo o tempo, se mantiveram fortes, Adriano, Jean, Kristian, Patrícia e, em especial, a Sara que sempre me ajudou quando mais precisei.

Aos professores da graduação pelos conhecimentos e conselhos que foram de extrema importância para a minha formação.

RESUMO

Neste trabalho é proposto um inversor de frequência baseado na tecnologia de conversores modulares multiníveis para operar na geração solar fotovoltaica e que, simultaneamente, atuará como um compensador síncrono estático para suporte de reativo na rede elétrica. O texto traz uma breve descrição da topologia de conversor multinível adotada, com apresentação de trabalhos que motivaram a sua escolha, e discorre sobre as estratégias de chaveamento LS-PWM e PS-PWM, além de introduzir as características da injeção de terceiro harmônico. A modelagem do sistema fotovoltaico é composta pelo modelo do módulo fotovoltaico escolhido, para isso utilizou-se a folha de dados do fabricante e informações contidas na referência bibliográfica, e do conversor Buck, que foi dimensionado para atender as especificações deste projeto. A modelagem do MMC é apresentada desde a estratégia de chaveamento escolhida, com justificativa baseada em estudos anteriores, até a malha de controle desenvolvida, com descrição dos principais algoritmos que a compõe. Os resultados de simulação foram desenvolvidos no software PSCAD/EMTDC de forma a validar a estratégia de controle e chaveamento para, desta forma, verificar a eficácia do STATCOM-MMC tanto na correção do fator de potência quanto na regulação dos níveis de tensão da rede de distribuição enquanto fornece potência ativa provida da geração solar fotovoltaica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Conversor Modular Multinível de <i>n</i> módulos por fase16
Figura 2 – Módulo básico do <i>MMC</i> 16
Figura 3 – Módulo do MMC com geração solar fotovoltaica17
Figura 4 – Topologias de modulação multinível para altas frequências18
Figura 5 – Distribuição das portadoras triangulares da APOD19
Figura 6 – Distribuição das portadoras triangulares da PD19
Figura 7 – Distribuição das portadoras triangulares da POD20
Figura 8 – Distribuição das portadoras triangulares da <i>PS-PWM</i> 21
Figura 9 – Referência senoidal com injeção de terceiro harmônico22
Figura 10 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica23
Figura 11 – Bloco de fonte solar fotovoltaica no PSCAD/EMTDC24
Figura 12 – Curvas <i>I_{pv}xV_{pv}</i> do módulo simulado no PSCAD/EMTDC a 25°C25
Figura 13 – Curvas <i>P_{pv}xV_{pv}</i> do módulo simulado no PSCAD/EMTDC a 25°C
Figura 14 – Configuração do conversor <i>Buck</i>
Figura 15 – Malha de controle do conversor <i>Buck</i> no PSCAD/EMTDC27
Figura 16 – Curvas IxV do arranjo fotovoltaico e comportamento do MPPT a 25°C28
Figura 17 – Curvas PxV do arranjo fotovoltaico e comportamento do MPPT a 25°C28
Figura $18 - THD$ na tensão de linha do <i>MMC</i> x m_a x m_f para $n = 12$ sem aplicação da injeção
de terceiro harmônico em conjunto com (a) APOD (b) PD (c) POD e (d) PS29
Figura 19 – <i>THD</i> na tensão de linha do <i>MMC</i> x m_a x m_f para $n = 12$ com aplicação da injeção
de terceiro harmônico em conjunto com (a) APOD (b) PD (c) POD e (d) PS30
Figura 20 – Sistema elétrico com MMC conectado a barra regulada
Figura 21 – Algoritmo de controle do STATCOM-MMC operando como fonte de tensão
controlada
Figura 22 – Algoritmo de controle para a regulação dos níveis de tensão do sistema32
Figura 23 – Algoritmo de controle para a correção do fator de potência
Figura 24 – Algoritmo de controle para regulação nas tensões dos capacitores
Figura 25 – Algoritmo de controle para o cálculo das tensões de compensação
Figura 26 – Primeiro sistema elétrico simulado
Figura 27 – Potência reativa fornecida pela rede de distribuição e pelo MMC
Figura 28 – Potência ativa fornecida pela rede de distribuição e pelo MMC
Figura 29 – Potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos das células chopper da fase a37

Figura 30 – Tensão nos capacitores da fase a	.38
Figura 31 – Tensão na barra regulada e corrente do MMC da fase a	.38
Figura 32 – Tensão na barra regulada e corrente do MMC da fase a com zoom	. 39
Figura 33 – Segundo sistema elétrico simulado	. 39
Figura 34 – Tensão eficaz coletiva no barramento	.40
Figura 35 – Potência ativa fornecida pela rede de distribuição e pelo MMC	.40
Figura 36 – Potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos das células chopper da fase a	.41
Figura 37 – Tensão nos capacitores da fase a	.41
Figura 38 – Tensão na barra regulada e corrente do MMC da fase a	.42
Figura 39 – Tensão na barra regulada e corrente do MMC da fase a com zoom	.42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica em 2014 (%)	.12
Gráfico 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica em 2016 (%)	.12
Gráfico 3 – Oferta Interna de Energia Elétrica em 2017 (%)	.13

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Combinação de chaveamento de uma célula chopper	17
Tabela 2 – Características do Modelo FS-270 em condições padrão de teste (1000 W/r	n² e
25°C)	24
Tabela 3 – Comparação das características do modelo FS-270 contidos no datasheet co	m o
módulo simulado em <i>NOTC</i> (800 W/m² e 45°C)	25
Tabela 4 – Conversor <i>Buck</i> projetado para o arranjo fotovoltaico	27
Tabela 5 – Valores dos ganhos dos controladores	33
Tabela 6 – Parâmetros do <i>MMC</i> simulado	34
Tabela 7 – Parâmetros do primeiro sistema simulado	35
Tabela 8 – Parâmetros do segundo sistema simulado	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APOD	Alternate Phase Opposition Disposition
CC	Corrente Contínua
ССМС	Capacitor-Clamped Multilevel Converter
DCMC	Diode-Clamped Multilevel Converter
IGBT	Insulated Gate BipolarTransistor
LEPAC	Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico
LS	Level Shifted
ММС	Modular Multilevel Converter
MME	Ministério de Minas e Energia
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NOCT	Normal Operating Cell Temperature
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
Р	Proporcional
PD	Phase Disposition
PI	Proporcional Integral
PLL	Phase Locked Loop
POD	Phase Opposition Disposition
PS	Phase Shifted
PWM	Pulse Width Modulation
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STATCOM	Static Synchronous Compensator
STC	Standart Test Conditions
SV	Spatial Vector
THD	Total Harmonic Distortion
THIPWM	Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	CONVERSORES MULTINÍVEIS	15
	2.1 Topologia	15
	2.2 Estratégias de Chaveamento	17
	2.2.1 Nível Deslocado	18
	2.2.2 Fase Deslocada	20
	2.2.3 Injeção de Terceiro Harmônico	21
3	MODELO DA PLANTA	23
	3.1 Sistema Fotovoltaico	23
	3.1.1 Módulo Fotovoltaico	24
	3.1.2 Conversor <i>Buck</i>	26
	3.2 STATCOM-MMC	28
	3.2.1 Estratégia de Chaveamento Adotada	28
	3.2.2 Estratégia de Controle	30
	3.2.3 Protótipo Simulado	33
4	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	35
	4.1 Correção do Fator de Potência	35
	4.2 Regulação dos Níveis de Tensão do Sistema	39
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	43
	5.1 Conclusões	43
	5.2 Trabalhos Futuros	44
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
A	NEXO A – FOLHA DE DADOS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO	48

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se utilizar recursos energéticos com maior consciência e com o objetivo de preservar o meio ambiente tem tornado cada vez maiores os investimentos no setor de geração sustentável de energia elétrica.

Os Gráficos 1, 2 e 3 apresentam um aumento de 7,1 pontos percentuais de participação das fontes renováveis na matriz de oferta interna de energia elétrica ao comparar os anos de 2014 e 2016, enquanto que em 2017 a expansão na oferta de algumas fontes como eólica e solar é digna de nota. Entre os anos de 2016 e 2017, a geração solar apresentou um aumento de 876% na sua oferta (MME, 2018, p.7) o que explicita o seu grande potencial por ser abundante na natureza, confiável, segura e não poluente.



Fonte: MME, (2015), p. 7.



Gráfico 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica em 2016 (%)

Fonte: MME, (2017), p. 8.



Fonte: MME, (2018), p. 8.

As fontes renováveis necessitam ser conectadas às redes de baixa e média tensão por meio de inversores de frequência, para que forneçam energia elétrica em corrente alternada a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua, além de manter o sistema elétrico operando no ponto de operação otimizado.

Estes inversores apresentam a capacidade de injetar potência tanto ativa quanto reativa, o que possibilita a utilização destes componentes para auxiliar na regulação de tensão e na correção do fator de potência que, comumente, se mostram necessárias nas redes de distribuição de baixa e média tensão pela crescente conexão de cargas reativas no sistema elétrico de potência. Entre as estratégias de controle que se destacam está o compensador síncrono estático (*Static Synchronous Compensator – STATCOM*), que atua na compensação de reativo ao injetar corrente reativa no sistema de forma controlada e apresenta consideráveis vantagens em relação ao seu predecessor, o compensador síncrono rotativo.

Os compensadores síncronos estáticos são compostos por dispositivos semicondutores de potência e necessitam de uma alta frequência de chaveamento para fornecer uma onda com baixos conteúdos harmônicos, o que contrasta com altos níveis de potência. Para contornar este problema, tornou-se comum a utilização de conversores multiníveis como *STATCOMs* (LEE; LEUNG; HUI; CHUNG, 2013, p. 1084).

Entre as topologias de conversores multiníveis, os conversores modulares multiníveis (*Modular Multilevel Converter – MMC*) proporcionam uma maior viabilidade para se projetar um *STATCOM* confiável e com menores custos (MOHAMMADI P.; TAVAKOLI B., 2009, p. 1),

através da ampliação do número de níveis é possível eliminar os transformadores de potência ao substituí-los por reatores que possuam preços mais acessíveis com o objetivo de permitir a transferência de potência com o SEP (HAGIWARA; AKAGI, 2009, p. 1737-1738). O uso desta topologia, junto a uma estratégia de controle adequada, pode mitigar alguns problemas que deterioram a qualidade de energia da rede, tais como afundamento ou elevação de tensão e baixo fator de potência.

Incentivado por este contexto, caracterizado pelas atuais necessidades de obter melhorias na qualidade de distribuição de energia e reduzir os danos causados pela exploração do meio ambiente, este projeto apresenta o desenvolvimento e a implementação por meio de simulação no *software* PSCAD/EMTDC de um protótipo para o Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico (LEPAC) de um *MMC* que estará atuando como *STATCOM* e faça uso de geração solar fotovoltaica como fonte própria de energia.

No Capítulo 2 deste trabalho é apresentada a topologia de conversor multinível adotada e são descritas algumas das principais estratégias de chaveamento multinível. No Capítulo 3 é retratado todo o modelo da planta que é composto pelo sistema fotovoltaico, pela estratégia de chaveamento escolhida e a malha de controle desenvolvida para o *STATCOM-MMC*. No Capítulo 4 é possível observar os resultados das simulações efetuadas para diferentes cenários e então identificar a funcionalidade do protótipo projetado. Por fim, o Capítulo 5 contém as observações e conclusões referentes a todo o trabalho realizado, além de apresentar sugestões de trabalhos futuros relacionados ao tema abordado.

2 **CONVERSORES MULTINÍVEIS**

2.1 Topologia

Os conversores multiníveis tem se destacado entre as demais topologias de conversores de potência ao possuir aplicação em tração de trens, propulsão de navios, conversão de energia, entre outros (RODRÍGUEZ et al., 2009, p. 1786). Entre os motivos do sucesso dessas topologias estão melhorias na qualidade do sinal e aumento da potência nominal do conversor em relação às demais (LIU; LOH; BLAABJERG, 2014, p. 1634).

Entre as topologias de conversores multiníveis estão os conversores grampeados a capacitor (*Capacitor-Clamped Multilevel Converter – CCMC*), conversores grampeados a diodo (*Diode-Clamped Multilevel Converter – DCMC*) e os conversores modulares multiníveis (*MMC*) (FRAQUELO et al., 2008, p. 154) (RODRÍGUEZ et al., 2009, p. 1789-1791). Os conversores *MMC* foram propostos pela Siemens em 2001 (MARQUARDT; LENISCA; HILDINGER, 2002, p.155-161) e tem sido alvo de um maior número de estudos nos últimos anos. Entre os fatores de destaque estão o *design* e controle de menor complexibilidade em relação às demais topologias, facilidade no transporte, flexibilidade para ampliação dos níveis de potência (GLINKA; MARQUARDT, 2004, p. 17) e alta qualidade da forma de onda de tensão para baixas frequências de chaveamento (RAJAN; SEYEZHAIM, 2014, p. 4850).

O *MMC* é composto por módulos, que são constituídos cada um por uma célula *chopper*, conectados em série, na qual possuem alimentação independente entre si. Na Figura 1 observase um conversor modular multinível composto por n módulos por fase, que resultam em uma tensão de fase com n + 1 níveis e uma menor distorção harmônica total (*THD*) quanto maior for o valor de n.

As células *chopper* são compostas por duas chaves semicondutoras do tipo *IGBT* em série e seus respectivos circuitos *snubber*, além de um capacitor em paralelo com o conjunto (HAGIWARA; AKAGI, 2008, p. 155). A Figura 2 apresenta a célula com configuração *chopper*.



Figura 1 – Conversor Modular Multinível de n módulos por fase

Fonte: Produção do próprio autor.



Fonte: Produção do próprio autor.

Nesta configuração, o sinal de ativação de uma chave semicondutora sempre será o complemento do seu par que compõe o respectivo módulo, desta forma a queda de tensão V_{cjx} irá variar de acordo com a Tabela 1, onde V_{Cjx} é a tensão no capacitor, sendo *j* o número e *x* a fase referente ao módulo.

	Ramo Positivo	
V_{cjx}	S_{1j}	S_{2j}
0	0	1
V_{Cjx}	1	0
R	lamo Negativo	
V_{cjx}	S_{1j}	S_{2j}
0	0	1
$-V_{Cjx}$	1	0

Tabela 1 - Combinação de chaveamento de uma célula chopper

A topologia tradicional de conversor modular multinível aplicado em um sistema de geração solar fotovoltaica utiliza-se de um *link* CC externo (PEREZ et al., 2013, p. 6993-6994), porém este trabalho utilizará como referência estudos que não requerem o *link* CC externo e que se utiliza de controle de Seguimento do Ponto de Potência Máxima (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*) individual para cada célula *chopper* (STRINGFELLOW; SUMMERS; BETZ, 2016, p. 1-4) para que seja possível a atuação do *MMC* como um compensador síncrono estático. A Figura 3 apresenta o módulo que compõe o *STATCOM-MMC* desenvolvido ao longo deste projeto.



Fonte: Produção do próprio autor.

2.2 Estratégias de Chaveamento

Para a implementação de um *MMC*, a escolha da estratégia de chaveamento é de extrema importância pois a mesma está relacionada com a qualidade da forma de onda e a inserção de harmônico na tensão de saída. A Figura 4 apresenta algumas das estratégias de chaveamento

Fonte: Produção própria do autor.

convencionais para altas frequências, com destaque para as estratégias de Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation – PWM*) com Nível Deslocado (*Level Shifted – LS*) e com Fase Deslocada (*Phase Shifted – PS*) que serão apresentadas a seguir, assim como a injeção de terceiro harmônico (*Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation – THIPWM*).



Figura 4 - Topologias de modulação multinível para altas frequências

Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.1 Nível Deslocado

A LS-PWM se subdivide em APOD (Alternate Phase Opposition Disposition), PD (Phase Disposition) e POD (Phase Opposition Disposition) as quais apresentam n portadoras triangulares de mesma amplitude e frequência, porém com níveis diferentes (RAJAN; SEYEZHAIM, 2014, p. 4852-4854) e (RODRÍGUEZ et al., 2009, p. 1793-1795). A amplitude das portadoras triangulares (A_c) se relacionam com a amplitude da referência senoidal (A_r) através do índice de modulação de amplitude (m_a) que é especificado em (1).

$$m_a = \frac{2A_r}{nA_c} \tag{1}$$

Para todas as ramificações da modulação *LS-PWM*, a frequência equivalente de chaveamento (f_s) é igual a frequência das portadoras triangulares (f_c) . Além disso, a relação entre a frequência equivalente de chaveamento e a frequência da referência senoidal (f_r) é chamada de índice de modulação de frequência (m_f) , cujo a expressão é apresentada na equação (2) (RAJAN; SEYEZHAIM, 2014, p. 4852).

$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \tag{2}$$

As subdivisões da estratégia de Nível Deslocado se diferenciam entre si pela defasagem das portadoras triangulares. No caso da *APOD* as triangulares estão defasadas em 180° entre si, na *PD* as portadoras estão todas em fase enquanto que na *POD* as portadoras referentes ao ramo positivo estão em fase entre si mas defasadas 180° em relação as portadoras do ramo negativo (RAJAN; SEYEZHAIM, 2014, p. 4853-4854). As Figuras 5, 6 e 7 apresentam a distribuição das portadoras triangulares citadas anteriormente, deixando visíveis as características das portadoras triangulares e do sinal de referência.





Fonte: Produção do próprio autor.





Fonte: Produção do próprio autor.



Figura 7 - Distribuição das portadoras triangulares da POD

Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.2 Fase Deslocada

A estratégia de Modulação por Largura de Pulso de Fase Deslocada (*PS-PWM*) possui portadoras de mesma amplitude e nível. Desta forma, o índice de modulação de amplitude é definido pela equação (3).

$$m_a = \frac{A_r}{A_c} \tag{3}$$

Porém, as portadoras possuem defasagem entre si em função do número de módulos por fase dada pela equação (4) (RODRÍGUEZ et al., 2009, p. 1792-1793).

$$\phi = \frac{360^{\circ}}{n} \tag{4}$$

Além disso, a frequência equivalente de chaveamento é o produto do número de níveis do conversor com a frequência das portadoras (RODRÍGUEZ et al., 2009, p. 1792-1793). Por consequência, o índice de modulação de frequência para esta estratégia pode ser determinado pela equação (5).

$$m_f = \frac{nf_c}{f_r} \tag{5}$$

As características descritas são observadas na Figura 8, onde a distribuição das portadoras triangulares é ilustrada.



Figura 8 - Distribuição das portadoras triangulares da PS-PWM

Fonte: Produção do próprio autor.

2.2.3 Injeção de Terceiro Harmônico

Utilizada em conjunto com a topologia de Modulação por Largura de Pulso, a injeção de terceiro harmônico não altera as portadoras mas adiciona terceiro harmônico nas referências senoidais (IBRAHIM et al., 2014, p. 224). Desta forma, as referências para cada fase serão determinadas pelas equações (6), (7) e (8):

$$V_{ran} = K(A_r sen\omega t + \frac{A_r}{6} sen3\omega t)$$
(6)

$$V_{rbn} = K(A_r sen(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{A_r}{6} sen3\omega t)$$
⁽⁷⁾

$$V_{rcn} = K(A_r sen(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{A_r}{6} sen3\omega t)$$
(8)

Onde,

$$K = \frac{2}{\sqrt{3}} \tag{9}$$

Apesar da inserção de harmônico, as componentes não estarão presentes na tensão de linha pelo fato das ondas moduladoras serem iguais e desta forma as componentes serão anuladas. Essa topologia é capaz de reduzir a componente harmônica na corrente e aumentar em aproximadamente 15,5% a tensão (IBRAHIM; HOSSAIN; BUGIS; MAHADI; HASIM, 2014, p. 224). Pode-se visualizar a referência senoidal representada pela equação (6) na Figura 9.





Fonte: Produção do próprio autor.

3 MODELO DA PLANTA

3.1 Sistema Fotovoltaico

Uma célula fotovoltaica pode ser representada por um circuito composto por uma fonte de corrente, um diodo e dois resistores que representam as não idealidades do circuito. A Figura 10 apresenta o esquemático citado, onde R_p representa as impurezas e defeitos da estrutura enquanto R_s se origina da resistência do material semicondutor (CASARO; MARTINS, 2008, p. 142).

Figura 10 - Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar o comportamento das correntes e das tensões, conclui-se que o circuito pode ser representado pela equação (10).

$$I_{pv} = I_{ph} - I_r [e^{q(V_{pv} + IR_s)} / \eta kT - 1] - \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{R_n}$$
(10)

Onde:

- V_{pv} , I_{pv} Tensão e corrente nos terminais de saída da célula fotovoltaica;
- *I*_{ph} Fotocorrente;
- *Ir* Corrente de saturação reversa da célula fotovoltaica;
- q Carga do elétron, 1,6x10⁻¹⁹ C;
- η Fator de qualidade da junção p-n;
- k Constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23}$ J/K;
- T Temperatura ambiente, em K.

3.1.1 Módulo Fotovoltaico

Para suprir a necessidade de maiores valores de tensão e corrente, as células fotovoltaicas são conectadas em séries e assim formam o módulo fotovoltaico. São fabricados inúmeros modelos de módulos fotovoltaicos com diferentes valores de potência, tensão e corrente. A folha de dados fornecida pelo fabricante apresenta o desempenho elétrico do módulo nas condições padrão (*Standart Test Conditions – STC*), 1000 W/m² e 25°C, e nas condições de teste normais em operação (*Normal Operating Cell Temperature – NOCT*), 800 W/m² e 20°C.

Para este trabalho, escolheu-se o modelo FS-270 fabricado pela *First Solar* pois está entre alguns modelos comercializados cujos parâmetros não contidos na folha de dados (Anexo A) foram determinados pela literatura (RAHMAN; VARMA; VANDERHEIDE, 2013, p. 217-229). Os parâmetros do módulo podem ser observados na Tabela 2. O circuito contido na Figura 11 foi simulado no PSCAD/EMTDC para gerar as curvas $I_{pv}xV_{pv}$ e $P_{pv}xV_{pv}$, para isso uma fonte de tensão variável foi conectada em paralelo com o módulo.

Tabela 2 - Características do Modelo FS-270 em condições padrão de teste (1000 W/m² e 25°C)

Potência nominal de saída (W _p)	70
Tensão na máxima potência (V)	65,5
Corrente na máxima potência (A)	1,07
Tensão de circuito aberto (V)	88,0
Corrente de curto-circuito (A)	1,23
Número de células em série	116
Coeficiente de temperatura para corrente	0,04%/°C
Coeficiente de temperatura para a tensão	0,25%/°C
Fator de idealidade do diodo	3,105
Resistência série (Ω)	0,02919
Resistência shunt (Ω)	2043,11

Fonte: RAHMAN; VARMA; VANDERHEIDE, (2013), p. 226.



Figura 11 – Bloco de fonte solar fotovoltaica no PSCAD/EMTDC

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 3 pode-se observar os valores para condições de teste normais em operação contidos na folha de dados do fabricante do módulo comparados aos valores medidos durante a simulação, nota-se que os erros, calculados pela equação (11), são menores que 4% o que torna válido o modelo adotado.

$$Erro (\%) = \left| \frac{valor \ medido - valor \ do \ datasheet}{valor \ do \ datasheet} \right| x100 \tag{11}$$

Tabela 3 – Comparação das características do modelo FS-270 contidos no *datasheet* com o módulo simulado em NOTC (800 W/m² e 45°C)

Parâmetro	Datasheet	Simulação	Erro (%)
Potência nominal (+/- 5%) (W _p)	52,5	50,47	3,87
Tensão na potência nominal (V)	61,4	59,63	2,88
Corrente na potência nominal (A)	0,86	0,8464	1,58
Tensão de circuito aberto (V)	81,8	81,36	0,54
Corrente de curto-circuito (A)	1,01	0,9937	1,61
Fonte: Produção do próprio autor.			

Desta forma, as Figuras 12 e 13 contêm as curvas $I_{pv} X V_{pv}$ e $P_{pv} X V_{pv}$ para diferentes valores de irradiação a 25°C.



Figura 12 – Curvas IpvXVpv do módulo simulado no PSCAD/EMTDC a 25°C

Fonte: Produção do próprio autor.



Figura 13 – Curvas P_{pv}XV_{pv} do módulo simulado no PSCAD/EMTDC a 25°C



3.1.2 Conversor Buck

O arranjo fotovoltaico é conectado a um conversor CC-CC estático com o intuito de estabilizar a tensão de saída para então efetuar a conexão na célula chopper. Neste projeto, foi escolhido o conversor Buck por atuar como um abaixador de tensão, ou seja, a tensão média de saída é menor que a tensão média de entrada. A Figura 14 apresenta o esquemático do Conversor Buck.



Fonte: Produção do próprio autor.

Neste projeto, serão conectados 6 módulos FS-270 em série e em apenas uma única string ao respectivo conversor CC-CC. Com essa configuração, tem-se capacidade de 420 W, tensão e corrente de entrada no ponto de máxima potência de 393 V e 1,07 A e, para a mesma condição, tensão de saída de 250V. Os valores dos componentes para as características do arranjo fotovoltaico estão na Tabela 4, estes componentes foram dimensionados com base no artigo publicado por Kauke (2015).

Frequência de chaveamento (Hz)	500
<i>Ripple</i> de corrente (%)	5
<i>Ripple</i> de tensão de saída (%)	5
<i>Ripple</i> de tensão de entrada (%)	0,7
Indutância, L (H)	2,17
Capacitância de saída, C_o (µF)	547
Capacitância de entrada, C_i (µF)	305
Enntes Due los 2 de materie autor	

Tabela 4 – Conversor Buck projetado para o arranjo fotovoltaico

Fonte: Produção do próprio autor.

A malha de controle do conversor pode ser observada na Figura 15, ela faz uso do componente *MPPT* disponível no PSCAD e no qual possibilita-se escolher a estratégia de seguimento do ponto de potência máxima, que utiliza-se os valores de tensão e corrente do arranjo fotovoltaico após o filtro passa-baixa com frequência de corte igual a 100 Hz. Nota-se que o valor de saída do componente *MPPT* citado é utilizado com o objetivo de se identificar o erro em relação ao valor de tensão do arranjo fotovoltaico que, após o controlador PI, será a razão cíclica que será comparada a uma triangular com frequência de 500 Hz. Para as simulações, o método *MPPT* escolhido foi o de condutância incremental.





Fonte: Produção do próprio autor.

As Figuras 16 e 17 comprovam a eficácia da malha de controle adotada em conjunto com o conversor e o arranjo definidos anteriormente ao apresentar o comportamento do *MPPT* quando ocorre variação da irradiação incidida sobre o sistema fotovoltaico.



Figura 16 - Curvas IxV do arranjo fotovoltaico e comportamento do MPPT a 25°C

Fonte: Produção do próprio autor.



Figura 17 - Curvas PxV do arranjo fotovoltaico e comportamento do MPPT a 25°C

Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 STATCOM-MMC

3.2.1 Estratégia de Chaveamento Adotada

A definição da estratégia de chaveamento a ser utilizada neste trabalho, dentre todas as descritas, se deu através de estudos e simulações efetuados em projetos de pesquisa anteriores. Ao variar o ponto de operação do *MMC* identificou-se que ao utilizar-se *PD-PWM* em conjunto com *THIPWM* atingiu-se os melhores resultados quando comparado com as demais estratégias (SANTOS, 2016, p. 6-9), como ilustram as Figuras 18 e 19 que exibem as superfícies do *THD* da tensão de linha do *MMC* de 13 níveis em função de $m_f e m_a$.

Ao analisar as Figuras 18 e 19, identificou-se que as estratégia *PD-PWM* com injeção de terceiro harmônico apresentou *THD* mínimo igual a 3,829%, o menor entre todas as modulações estudadas, e uma amplitude de medição igual a aproximadamente 3,947%, a segunda menor. Enquanto que *PD-PWM* sem a injeção de terceiro harmônico apresentou a menor amplitude de medição, 3,886%, porém a distorção harmônica total mínima foi igual a 4,799% o que não justificaria a sua utilização.

Por fim, a *PD-PWM* com *THIPWM* também apresentou resultados satisfatórios ao ser utilizada com a estratégia de malha de controle que será descrita na próxima seção (SANTOS, 2017, p. 8-11).



Figura 18 – *THD* na tensão de linha do *MMC* x m_a x m_f para n = 12 sem aplicação da injeção de terceiro harmônico em conjunto com (a) *APOD* (b) *PD* (c) *POD* e (d) *PS*

Fonte: Adaptado de SANTOS, (2016), p. 6.



Figura 19 – *THD* na tensão de linha do *MMC* x m_a x m_f para n = 12 com aplicação da injeção de terceiro harmônico em conjunto com (a) *APOD* (b) *PD* (c) *POD* e (d) *PS*

Fonte: Adaptado de SANTOS, (2016), p. 7.

3.2.2 Estratégia de Controle

Será analisada a estratégia de malha de controle para o *STATCOM-MMC* atuando como fonte de tensão, estudada em projetos de pesquisa anteriores (SANTOS, 2017, p. 4-5). A Figura 20 exibe um sistema elétrico com *STATCOM-MMC* conectado a barra regulada, com o objetivo de efetuar a regulação de tensão ou compensação de fator de potência de acordo com as necessidades da rede e seu modo de operação.





Fonte: Produção do próprio autor

Nesta configuração se utiliza apenas as medições de tensão e corrente da rede para obter a potência reativa e a amplitude das tensões de compensação enquanto que para o cálculo da

defasagem destas tensões se utiliza a potência ativa calculada com a média aritmética das tensões medidas nos capacitores do *MMC* ($V_{Cmédio}$) definida pela equação (12) e, desta forma, age sobre a tensão de saída do inversor (CAMPINHO, 2009, p. 41). A Figura 21 apresenta o algoritmo de controle para a operação como fonte de tensão controlada.

$$V_{Cmédio} = \frac{1}{3n} \left(\sum_{j=1}^{n} V_{Cja} + \sum_{j=1}^{n} V_{Cjb} + \sum_{j=1}^{n} V_{Cjc} \right)$$
(12)

Figura 21 – Algoritmo de controle do STATCOM-MMC operando como fonte de tensão controlada



Fonte: Produção do próprio autor.

O algoritmo de controle é composto por dois componentes dignos de destaque, o *PLL (Phase Locked Loop)* e detector de sequência positiva. O objetivo destes componentes é detectar a fase e a frequência, no caso do *PLL*, e detectar a componente fundamental de sequência positiva do sinal de entrada (CAMPINHO, 2009, p. 25-31).

Para efetuar a regulação das tensões do sistema, se utiliza a componente fundamental de sequência positiva para se calcular a tensão eficaz coletiva da tensão de entrada dada pela equação (13).

$$V_{col} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{V_{\alpha}^{+2} + V_{\beta}^{+2}}$$
(13)

Utiliza-se então o erro entre um valor referência, que neste projeto é igual a 1,0 p.u., e o valor de tensão coletiva para gerar, com um controlador PI, a amplitude ($/A_V$). A Figura 22 ilustra o algoritmo para a regulação de tensão.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para efetuar a correção do fator de potência utiliza-se a tensão do barramento e a corrente na rede após a transformação para o referencial $\alpha\beta$ e então calcula-se a potência reativa através da teoria p-q (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007, p. 41-102). Por fim, um filtro passa-baixa remove a parcela oscilante da potência reativa e a amplitude da tensão (*/A_{FP}/*) do *STATCOM-MMC* é gerada após o controlador PI, como é ilustrado na Figura 23.



Fonte: Produção própria do autor.

O controle da potência ativa é efetuada com o objetivo de manter as tensões nos capacitores do *MMC* iguais ao valor pré-definido no projeto e, desta forma, transferir para a carga a máxima potência gerada pelo sistema fotovoltaico. Para isso, um sinal de defasagem é gerado após o PI que possui como entrada a parcela constante do erro entre a tensão de referência e $V_{Cmédio}$, que é igual ao valor desejado para V_{Cjx} . O algoritmo está contido na Figura 24.

Figura 24 - Algoritmo de controle para regulação nas tensões dos capacitores



Fonte: Produção própria do autor.

A Figura 25 mostra que através da amplitude e da defasagem obtida, gera-se as tensões de compensação na referência $\alpha\beta$ e, após o controlador P, ocorre a transformação destes sinais para o referencial ABC para então obter-se os sinais de disparo através da estratégia de chaveamento descrita neste trabalho.

Figura 25 - Algoritmo de controle para o cálculo das tensões de compensação



Fonte: Produção própria do autor.

A Tabela 5 apresenta os valores dos ganhos obtidos, por estimativa, referentes aos controladores da estratégia descrita nessa seção onde K_p e K_i são, respectivamente, os ganhos proporcional e integral.

Tabe	la 5	_	Val	ores dos	ganhos	dos	control	adores
				17			7	

Controlador	Kp	$\mathbf{K}_{\mathbf{i}}$
PI_1	0,2	100
PI_2	0,1	10
PI ₃	1,5	10
Р	0,666	-

Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.3 Protótipo Simulado

Por se tratar de um protótipo, o inversor foi projetado para operar em baixa tensão e os parâmetros podem ser observados na Tabela 6. Nota-se que o índice de modulação de

frequência foi escolhido após estudos anteriores apresentarem melhores resultados, em relação a qualidade de energia, quando se utiliza a estratégia de chaveamento já definida (SANTOS, 2016, p. 6-9) e pela necessidade de m_f possuir valor impar e múltiplo de 3 (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 1995, p. 207-208).

Tabela 6 – Parâmetros do MMC simulado

Número de módulos por fase, n	4
Tensão média nos capacitores, $V_{Cmédio}$ (V)	250
Índice de modulação de frequência, m_f	21
Indutância, l (mH)	3,0
Capacitância, C (mF)	8,0
Fonte: Produção do próprio autor.	

Destaca-se o método utilizado para validação do capacitor selecionado pois o mesmo deve suportar o arranjo fotovoltaico ao qual está conectado. Por meio da simulação identificou-se o intervalo cuja a carga seria máxima e, com a curva da corrente sobre o capacitor, o cálculo foi efetuado pela equação (14).

$$Q = \int i(t) dt \tag{14}$$

Após isso, utilizou-se a equação (15) para identificar a capacitância necessária para uma *ripple* de tensão (ΔV_{Cjx}) de 5% do valor projetado para V_{Cjx} , ou seja 12,5 V.

$$C \ge \frac{Q}{\Delta V_{Cjx}} \tag{15}$$

Desta forma, identificou-se que a carga Q será de 96 mC o que resulta num intervalo de $C \ge 7,7$ mF o que torna a escolha feita anteriormente aceitável.

4 **RESULTADOS DE SIMULAÇÃO**

Para uma análise completa do projeto apresentado foram efetuadas duas simulações com o *software* PSCAD/EMTDC, na qual o *STATCOM-MMC* atua, primeiramente, com o objetivo de corrigir o fator de potência e, no outro caso, na regulação do nível de tensão no barramento.

4.1 Correção do Fator de Potência

Neste modo de operação, o *STATCOM-MMC* é conectado ao barramento no instante t = 6,0s, para que os capacitores estejam devidamente carregados, e a carga indutiva, já presente no circuito, será substituída quando t = 11,0s por uma carga também indutiva mas que apresente maior demanda como ilustra o esquemático. Os parâmetros do sistema elétrico simulado nesta etapa podem ser observados na Tabela 7.



Figura 26 - Primeiro sistema elétrico simulado

Fonte: Produção própria do autor.

T 1 1 7		1		• .	• 1	1
l'abela / _	Parametros	do	nrimeiro	sistema	simil	ado
	1 arametros	uo	primeno	sistema	Sinnar	auo

Tensão nominal de linha, V _{fonte} (V)	220
Tensão base do sistema (V)	311
Frequência do sistema (Hz)	60,0
Indutância de linha, l _{linha} (mH)	1,00
Resistência da primeira carga, $R_{I}(\Omega)$	3,30
Indutância da primeira carga, l_1 (mH)	4,60
Resistência da segunda carga, $R_2(\Omega)$	2,50
Indutância da segunda carga, l_2 (mH)	3,92
Irradiação (W/m ²)	1000,0
Temperatura (°C)	25,0

Fonte: Produção do próprio autor.

Pelas Figuras 27 e 28, nota-se que, ao ser conectado na rede, o conversor modular multinível injeta potência reativa no sistema de forma a aproximar o fator de potência a um e, simultaneamente, fornece potência ativa. Observa-se que ao alterar a carga ocorre uma pequena oscilação na potência ativa pois é necessário que o controle da regulação das tensões dos capacitores estabilize para o novo ponto de operação do inversor.



Figura 27 - Potência reativa fornecida pela rede de distribuição e pelo MMC

Fonte: Produção própria do autor.



Figura 28 – Potência ativa fornecida pela rede de distribuição e pelo MMC

A Figura 29 apresenta a potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos referentes a cada célula *chopper* da fase *a*, percebe-se que os valores medidos tendem a estar próximos do ponto de

Fonte: Produção própria do autor.

potência máxima e não houve grande variação quando a carga foi alterada, sendo que inicialmente dois dos arranjos fotovoltaicos apresentaram potência até 29,85 W menor que as demais até ocorrer a estabilização. A potência média gerada pelos sistema fotovoltaico foi igual a 5016,0 W, para estes cálculos desconsiderou-se os períodos de transitório do inversor.



Figura 29 - Potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos das células chopper da fase a

Apesar de em nenhum momento o ΔV_{Cjx} ultrapassar o valor pré-definido, as tensões médias nos capacitores nunca se igualaram a 250 V, mesmo com $V_{Cmédio}$ sendo satisfeito durante toda simulação. Esse comportamento é justificado pelo fato da regulação das tensões nos capacitores não ser efetuado individualmente e sim em função da média aritmética destas variáveis, a Figura 30 explicita o que foi descrito.

Fonte: Produção própria do autor.





Fonte: Produção própria do autor.

Pelas Figuras 31 e 32, percebe-se que a defasagem da corrente do *MMC* em relação a tensão na barra regulada possui característica capacitiva pois é fornecida potência reativa capaz de drenar a exigida pela respectiva carga conectada à rede.





Fonte: Produção própria do autor.



Fonte: Produção própria do autor.

4.2 Regulação dos Níveis de Tensão do Sistema

Assim como no caso anterior, o *MMC* foi conectado ao barramento quando t = 6,0s porém o que se alterou em t = 11,0s foi o valor da indutância de linha e não a carga, como mostra a Figura 33. A Tabela 8 apresenta os parâmetros do sistema simulado.





Fonte: Produção própria do autor.

Tabela 8 - Parâmetros do segundo sistema simulado

Tensão nominal de linha, V _{fonte} (V)	220
Tensão base do sistema (V)	311
Frequência do sistema (Hz)	60,0
Primeira indutância de linha, <i>l_{linhal}</i> (mH)	1,00
Segunda indutância de linha, <i>l_{linha2}</i> (mH)	2,00
Resistência da carga, $R_{carga}(\Omega)$	3,30
Indutância da carga, <i>l_{carga}</i> (mH)	4,60
Irradiação (W/m²)	1000,0
Temperatura (°C)	25,0

Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar a curva da tensão eficaz coletiva do barramento, contida na Figura 34, nota-se que o afundamento de tensão foi contornado e atingiu-se um sobressinal de 1,48% quando o *MMC* foi conectado à rede. Nota-se que a alteração na indutância de linha não ocasionou mudanças relevantes no comportamento da tensão eficaz coletiva.



Figura 34 - Tensão eficaz coletiva no barramento

Pelas Figuras 35 e 36, nota-se que o controle *MPPT*, assim como na simulação anterior, manteve os valores de potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos próximos do ponto de potência máxima, ao longo desta etapa a potência média gerada pelos sistema fotovoltaico foi de 5018,8 W.



Figura 35 – Potência ativa fornecida pela rede de distribuição e pelo MMC

Fonte: Produção própria do autor.

Fonte: Produção própria do autor.



Figura 36 – Potência gerada pelos arranjos fotovoltaicos das células chopper da fase a

Fonte: Produção própria do autor.

De forma similar a primeira simulação, a média das tensões nos capacitores alcançou o valor desejado enquanto o MMC estivesse conectado a barra regulada, entretanto os valores de V_{Cjx} não se igualaram ao previsto. A Figura 37 ilustra as tensões dos capacitores referentes a fase a.



Figura 37 – Tensão nos capacitores da fase a

Assim como quando atuou na correção do fator de potência, a corrente do conversor modular multinível se mostrou adiantada em relação a tensão do barramento pois para regular os níveis de tensão foi necessário drenar corrente capacitiva da rede. As Figuras 38 e 39 ilustram as características citadas neste parágrafo.

Fonte: Produção própria do autor.



Figura 38 – Tensão na barra regulada e corrente do MMC da fase a

Fonte: Produção própria do autor.



Fonte: Produção própria do autor.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a implementação por meio de simulações em *software* de um conversor multinível do tipo *MMC* que opera na geração solar fotovoltaica e, simultaneamente, atua como um compensador síncrono estático.

Inicialmente, foi introduzida a topologia de conversor multinível adotada e as principais estratégias de modulação multinível com destaque para as estratégias *LS-PWM* e *PS-PWM*. Também foi descrita a injeção de terceiro harmônico, que pode ser utilizada em conjunto com as estratégias retratadas com o objetivo de reduzir as componentes harmônicas na corrente e aumentar a potência fornecida sem ocorrência de sobremodulação.

Antes de iniciar o desenvolvimento da malha de controle do *MMC* foi necessário concentrar-se na modelagem do sistema fotovoltaico. Para isso utilizou-se os parâmetros obtidos na folha de dados do módulo escolhido, FS-270 da *First Solar*, e no artigo publicado por Rahman, Varma e Vanderheide (2013) para então modela-lo no *software* PSCAD. Pela Tabela 3, notou-se que o os resultados obtidos em condições normais de operação atingiram valores de erro menores que 4% em relação aos dados disponibilizados pelo fabricante. Para concluir esta etapa, dimensionou-se o conversor *Buck* e então validou-se a estratégia de *MPPT* adotada para que os arranjos fotovoltaicos apresentassem desempenho otimizado após conectados as respectivas células *chopper*.

Em seguida, justificou-se, por meio de resultados obtidos em projetos de pesquisa anteriores, a escolha da estratégia de chaveamento *PD-PWM* com injeção de terceiro harmônico e então elaborou-se a malha de controle do inversor, que é visto pelo sistema como uma fonte de tensão controlada. Através das medições de tensão e corrente da rede de distribuição, além das medições das tensões nos capacitores, controla-se a amplitude e fase da tensão do conversor modular multinível, logo as correntes de compensação são controladas de forma indireta.

Mediante simulações de um protótipo do *STATCOM-MMC* proposto, verificou-se que os objetivos foram atingidos quando operou tanto na correção do fator de potência quanto na regulação da tensão do barramento, além do fornecimento de potência ativa provida pelos

arranjos fotovoltaicos também ter sido bem sucedido. Entretanto, notou-se pelas Figuras 31 e 38 que a corrente do *STATCOM-MMC* apresentou um comportamento mais oscilatório quando o objetivo era a correção do fator de potência.

De acordo com as Figuras 29 e 36, observa-se que o controle *MPPT*, quando o inversor foi conectado à rede, mostrou-se mais lento quando o objetivo era a correção do fator de potência. Por outro lado, em ambos os casos notou-se que, inicialmente, dois dos arranjos fotovoltaicos apresentaram valores de potência menores e se mostraram mais lentos que os demais.

Em ambos os cenários representados no Capítulo 4, identificou-se que as tensões sobre os capacitores não apresentaram os valores individuais que seriam desejados, apesar da média aritmética ter sido satisfeita. Este comportamento poderia interferir no *MPPT* caso o ponto de operação do *STATCOM-MMC* resulte em valores muito altos para as quedas de tensão sobre alguns capacitores, apesar de sempre satisfazer o valor de $V_{Cmédio}$, ocasionando problemas na identificação no ponto ótimo de operação do arranjo fotovoltaico conectado ao respectivo módulo do inversor. Para contornar estas possíveis situações, faz-se necessário o desenvolvido de um controle de potência ativa individual para cada célula *chopper*.

5.2 Trabalhos Futuros

O tema abordado ao longo deste projeto não se encontra esgotado, podendo ser efetuadas melhorias na malha de controle apresentada, implementação de uma metodologia diferente de malha de controle e uma análise mais completa relacionada ao sistema fotovoltaico. Sendo assim, são indicados os seguintes itens para trabalhos futuros:

- a) Implementação do controle de potência ativa individual para cada célula *chopper*;
- b) Desenvolvimento da malha de controle que utiliza a corrente como referência, para fins de comparação com a metodologia proposta;
- c) Estudos referentes ao comportamento do STATCOM-MMC quando os arranjos fotovoltaicos de cada célula *chopper* forem submetidos a diferentes níveis de sombreamento entre si, visando contornar possíveis problemas;

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAGI, H.; WATANABE, E. I.; AREDES, M. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 2007. Cap. 3, p. 41-108.

CAMPINHO, R. M. Estudo Comparativo entre DSTATCOM Operando como Fonte de Corrente Controlada e como fonte de Tensão Controlada. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

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

FRANQUELO, L. G.; RODRÍGUEZ, J.; LEON, J. L.; KOURO, S.; PORTILLO, R.; PRATS, M. A. M. The Age of Multilevel Converters Arrives. **IEEE Industrial Eletronics Magazine**, v. 2, p. 28-32, jun. 2008.

GLINKA, M.; MARQUARDT, R. A. A New AC/AC-Multilevel Converter Family Applied to a Single-Phase Converter. **Power Eletronics and Drive System, 2003. PEDS 2003. The Fifth Internacional Conference on**, v. 1, p. 16-23, nov. 2003.

HAGIWARA, M.; AKAGI, H. PWM Control and Experiment of Modular Multilevel Converter. **Power Eletronic Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE**, p. 154-161, jun. 2008.

_____. Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters. **IEEE Transaction on Power Eletronics**, v. 24, n. 7, p. 1737-1746, jul. 2009.

HAUKE, B. Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage. Application Report – Texas Instruments: Low Power DC/DC Applications, ago. 2015.

IBRAHIM, Z. B.; HOSSAIN, L.; BUGIS, I. B.; MAHADI, N. M. N.; HASIM, A. S. A. Simulation Investigation of SPWM, THIPWM and SVPWM Techniques for a Three Phase Voltage Source Inverter. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems**, v. 4, n. 2, p. 223-232, jun. 2014.

LEE, C. K.; LEUNG, J. S. K.; HUI, S. Y. R.; CHUNG, H. S. H. Circuit-Level Comparison of STATCOM Technologies. **IEEE Transaction on Power Electronics**, v. 18, n. 4, p. 1084-1092, jul. 2003.

LIU, H.; LOH, P. C.; BLAABJERG, F. Generalized Modular Multilevel Converter and Modulation. **The 2014 International Power Eletronics Conference**, p. 1634-1638, mai. 2014.

MARQUARDT, R.; LESNICAR, A.; HILDINGER, J. Modulares Stromrichterkonzept für Netzkupplungsanwendungen bel hohen Spannungen. **ETG-Fachtagung, Bauelemente der Leislungselektronik und ihre Anwendungen**, p. 55-61, abr. 2002.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2014**. Brasília, 2015.

_____. Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2016. Brasília, 2017.

_____. Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2017. Brasília, 2018.

MOHAMMADI P., H.; TAVAKOLI B., M. New Transformerless STATCOM Topology of Compensating Unbalanced Medium-Voltage Loads. **2009 13th European Conference on Power Eletronics and Applications**, set. 2009.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics: Convertres, Applications and Design**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 1995. Cap. 8, p. 200-248.

PEREZ, M.; ARANCIBIA, D.; KOURO, S.; RODRÍGUEZ, J. Modular Multilevel Converter with Integrated Storage for Solar Photovoltaic Applications. **IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, p. 6993-6998, nov. 2013.

RAJAN, M. S.; SEYEZHAIM, R. Comparative Study of Multicarrier PWM Techniques for a Modular Multilevel Inverter. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 5, n. 6, p 4850-4865, dez. 2013 e jan. 2014.

RHAMAN, S. A.; VARMA, R. K.; VANDERHEIDE, T. Generalised Model of a Photovoltaic Panel. **IET Renewable Power Generation**, v. 8, p 217-229, ago. 2013.

RODRÍGUEZ, J.; FRANQUELO, L. G.; KOUROS, S.; LEON, J. I.; PORTILLO, R. C.; PRATS, M. A. M.; PEREZ, M. A. Multilevel Converters: An Enabling Technology for High-Power Applications. **Proceedings of IEEE**, v. 97, n. 11, p. 1786-1817, out. 2009.

SANTOS, F. H. F. **Análise das Estratégias de Chaveamento de Conversores Modulares Multiníveis (MMC)**. 2016. Relatório Final de Pesquisa – Programa Institucional de Iniciação Científica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

_____. Integração dos Estudos de Estratégia de Chaveamento e de Malha de Controle para Otimização do STATCOM-MMC. 2017. Relatório Final de Pesquisa – Programa Institucional de Iniciação Científica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

STRINGFELLOW, J. D.; SUMMERS, T. J.; BETZ, R. E. Control of the Modular Multilevel Converter as a Photovoltaic Interface Under Unbalanced Irradiance Conditions with MPPT of Each PV Array. **IEEE 2nd Annual Southern Power Eletronics Conference (SPEC)**, dez. 2016.

ANEXO A – FOLHA DE DADOS DO MÓDULO FOTOVOLTAICO





First Solar FS Series 2 PV Module

Thin film solutions for high performance PV systems

First Solar[®] FS Series 2[™] PV Modules are IEC 61646 and IEC 61730 certified for use in systems up to 1000 VDC, UL Listed (600VDC), and meet the requirements of Safety Class II. First Solar provides cost effective thin film module solutions to leading solar project developers and system integrators for large scale, grid-connected solar power plants. First Solar application engineers provide technical support and comprehensive product documentation to support the design, installation, and long term operations of high performance PV systems.



WARRANTY

- Material and workmanship warranty for five (5) years and a power output warranty of 90% of the nominal output power rating (P_{MPP}+/-5%) during the first ten (10) years and 80% during twenty-five (25) years subject to the warranty terms and conditions.
- Modules are life cycle managed with a collection and recycling program, providing module owners with no cost, pre-funded, end-of-life take back, and recycling of the modules.

All specifications and warranties apply only to products sold and installed in North America. For applications outside of North America, please refer to the Global Datasheet (PD-5-401-02).

The First Solar logo, First Solar 🍽, and all products denoted with 🖲 are registered trademarks, and those denoted with a 🐃 are trademarks of First Solar, Inc.

First Solar (US) Tel: 877 850 3757 info@firstsolar.com

First Solar (Europe) Tel: +800 3757 3757 info@firstsolar.de

www.firstsolar.com

PD-5-401-02 NA MAY 2011

ELECTRICAL SPECIFICATIONS

MODEL NUMBERS AND RATINGS AT STC ¹ *						
Nominal Values		FS-270	FS-272	FS-275	FS-277	FS-280
Nominal Power(+/-5%)	P _{MPP} (W)	70	72.5	75	77.5	80
Voltage at P _{MAX}	$V_{MPP}(V)$	65.5	66.6	68.2	69.9	71.2
Current at P _{MAX}	I _{MPP} (A)	1.07	1.09	1.10	1.11	1.12
Open Circuit Voltage	V _{oc} (V)	88.0	88.7	89.6	90.5	91.5
Short Circuit Current	I _{sc} (A)	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22
Maximum System Voltage	V _{SYS} (V)	1000 (600 UL ²)				
Temperature Coefficient of P _{MPP}	T _K (P _{MPP})			- 0.25 %/°C		
Temperature Coefficient of V _{oc} , high temp (>25°C)	$T_K(V_{\text{OC, high temp}})$	-0.25%/°C				
Temperature Coefficient of V _{oc} , low temp (-40°C to + 25°C)	$T_K(V_{\text{OC, low temp}})$	- 0.20 %/°C				
Temperature Coefficient of Isc	T _K (I _{SC})	+0.04%/°C				
Limiting Reverse Current	I _R (A)	2				
Maximum Series Fuse	I _{CF} (A)			2		

MODEL NUMBERS AND RATINGS AT 800W/m ² , NOCT ³ 45°C, AM 1.5*						
Nominal Values		FS-270	FS-272	FS-275	FS-277	FS-280
Nominal Power(+/-5%)	P _{MPP} (W)	52.5	54.4	56.3	58.1	60.0
Voltage at P _{MAX}	$V_{MPP}(V)$	61.4	62.4	63.9	65.5	66.8
Current at P _{MAX}	I _{MPP} (A)	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90
Open Circuit Voltage	V _{oc} (V)	81.8	82.5	83.3	84.2	85.1
Short Circuit Current	I _{sc} (A)	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00

MECHANICAL DESCRIPTION

Length	1200mm	Thickness	6.8mm		
Width	600mm	Area	0.72m ²		
Weight	12kg	Leadwire	4.0mm², 610mm		
Connectors	Solarline 1 type connector				
Bypass Diode	None				
Cell Type	CdS/CdTe semiconductor, 116 active cells				
Frame Material	None				
Cover Type	3.2mm heat strengthened front glass laminated to 3.2mm tempered back glass				
Encapsulation	Laminate material with edge seal				

MECHANICAL DRAWING



* All ratings +/-10%, unless specified otherwise Specifications are subject to change.

¹ Standard Test Conditions (STC) 1000W/m², AM 1.5, 25°C

² Required to maintain UL compliance

³ Nominal Operating Cell Temperature: Module operation temperature at 800W/ m² irradiance, 20°C air temperature, 1m/s wind speed.

High Performance PV System Solutions

Key Features:

- Produces high energy output across a wide range of climatic conditions with excellent temperature response coefficient
- Proven to perform as predicted with a high Performance Ratio (PR)
- Frameless laminate is robust, cost-effective and recyclable, and does not require module grounding
- Manufactured in highly automated, state-of-the-art facilities certified to ISO 9001:2008 and ISO 14001:2004 quality and environmental management standards
- Tested by leading international institutes and certified for reliability and safety:
 - Certified to IEC 61646
 - Certified to IEC 61730
 - CE Marking
 - Safety Class II @ 1000 V
- © Copyright 2011, First Solar, Inc.
- UL 1703 and ULC 1703 Listed (Class C Fire Rating)
- Eligible CSI PV Module
- FSEC Certified





www.firstsolar.com

FS Series 2 PV Module PD-5-401-02 NA MAY 2011