

Topologia de Conversor MPPT de Estágio Único Baseado no Conversor de Célula Flutuante

Guilherme David Muller* Domingos Sávio Lyrio Simonetti*

* *Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico,
Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do
Espírito Santo, Vitória-ES-29060-970 - Brasil
(e-mails: guilherme.dmuller@gmail.com; d.simonetti@ele.ufes.br)*

Abstract: This article introduces a floating capacitor single stage DC-AC inverter inspired in the flying capacitor multilevel cell. A basic structure for the MPPT was elaborated applying incremental conductance algorithm acting in the phase angle of the sinusoidal PWM reference. The control strategy was simulated in the MATLAB/Simulink software for a 6.3 kWp photovoltaic panel and results have validate the converter proposition with harmonic current levels of acceptable inverting harmonic levels.

Resumo: Neste artigo é apresentado um inversor CC-CA de estágio único inspirado na célula do conversor multinível de capacitor flutuante. Uma estrutura básica para o controle MPPT foi elaborada através do algoritmo de condutância incremental atuando apenas no ângulo da moduladora do controle PWM. A estratégia de controle foi simulada no ambiente MATLAB/Simulink para um sistema fotovoltaico de 6,3 kWp a 25°C, e os testes validam o funcionamento do inversor com níveis de harmônicos compatíveis com a norma.

Keywords: Multilevel Converters; Flying Capacitor; Single Stage; MPPT; Control Strategy.

Palavras-chaves: Conversores Multiníveis; Capacitor Flutuante; Estágio Único; MPPT; Estratégia de Controle.

1. INTRODUÇÃO

Devido à alta crescente de instalações fotovoltaicas nos últimos anos ocasionados grande parte pela acessibilidade aos consumidores residenciais (geração distribuída), a energia fotovoltaica vem ganhando cada vez mais espaço na matriz energética brasileira, impulsionando o país a se desenvolver com sustentabilidade (Villalva, 2015).

No Brasil, de acordo com o relatório síntese do balanço energético nacional (BEN) de 2021, referente a 2020, emitido pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) a capacidade instalada na geração de energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira foi da ordem de 4,635 GW no final de 2020, um aumento de 2,643 GW em referência ao ano anterior, ou seja, em 2020 a capacidade instalada na geração fotovoltaica mais do que dobrou em relação a 2019 (EPE, 2021).

A geração fotovoltaica corresponde a 2,64% da matriz energética nacional, e tem a previsão de chegar a 4,89% ao final de 2026 (ONS, 2021). O uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, foi simplificado e incentivado por ações regulatórias, tais como a compensação de energia excedente (tarifação net metering) entre outros; proporcionando assim uma menor burocracia para a ligação do sistema fotovoltaico à rede da concessionária de energia elétrica.

O sistema fotovoltaico gera energia em tensão elétrica contínua (CC) e é necessária uma transformação dessa tensão contínua para alternada (CA), a fim de se conectar

à rede elétrica. Em geral, o arranjo de painéis é conectado a um conversor CC-CC que opera controlado por um algoritmo de busca do ponto de máxima potência (MPPT), mantendo a tensão CC de saída constante, e em seguida, conectado a um conversor CC-CA para a integração à rede.

Conversores CC-CA (frequentemente denominados de inversores de frequência) têm como principal função converter a tensão de uma fonte contínua em tensão alternada em sua saída, de valor médio nulo, simétrico em amplitude e frequência constante. Os níveis de tensão ou de corrente de saída nesses conversores podem ser fixos ou variáveis, assim como a sua frequência de chaveamento (Martins and Barbi, 2011).

A tensão de saída (CA) deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Os inversores são construídos com auxílio de dispositivos semicondutores de potência, que constituem chaves eletrônicas controláveis, podendo ser colocados em estado de condução ou de bloqueio por meio de um sinal de controle, e permitem assim a conversão de tensão CC para CA e vice-versa. Dependendo da velocidade de chaveamento e dos níveis de potência e tensão, são utilizados IGBT's ou MOSFET's nos inversores. Estes dispositivos operam com a estratégia de controle de modulação por largura de pulso (PWM), o que permite um bom controle sobre a forma de onda e o valor da tensão de saída (Mohan and et. al, 2003).

Os esforços nas técnicas de aprimoramento e evolução desses conversores tem sido constantes, e focam em diminuir

a distorção harmônica total (THD), obter tensões mais elevadas na saída e diminuição do número de componentes necessários, ou seja, focam na otimização desses conversores.

Visando a maximização da transferência de potência e consequentemente a minimização das perdas elétricas, proporcionando assim um aumento de eficiência na conversão de energia; e com o desenvolvimento tecnológico impulsionando o estudo e implementação de novas topologias de conversores e técnicas de controle, inclusive com realimentação instantânea de variável a controlar, a proposta deste trabalho consiste em apresentar um conversor com uma topologia com estágio único de conversão CC-CA inspirado no conversor multinível com capacitor flutuante. Para validação, uma estrutura de controle básica foi implementada com o método de condutância incremental modificado para o rastreamento do PMP (ponto de máxima potência) e controle feito através da modulação PS-PWM. As conclusões são apresentadas no final do artigo.

2. CONVERSORES CC-CA

2.1 Estágios Conversores CC-CA

Normalmente, a interface do conversor da fonte (CC) para a rede é composta por dois estágios: o conversor CC-CC e o conversor CC-CA (Fig. 1(a)). Usualmente, o conversor CC-CC é um conversor boost controlado para encontrar o PMP. Uma solução alternativa, é o uso de um conversor de estágio único onde o conversor CC-CC é suprimido e toda a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico é processada utilizando apenas o conversor CC-CA; e para garantir a tensão CC necessária, o arranjo fotovoltaico deve ser conectado em associações série-paralelo a fim de garantir o nível de tensão desejado (Fig. 1(b)).

Na configuração clássica de dois estágios, o conversor CC-CC requer dispositivos adicionais aumentando assim as perdas por condução, resposta transitória lenta e maior custo; enquanto que no conversor de estágio único têm-se: melhor eficiência, melhor resposta transitória e principalmente o menor custo. Como principal desvantagem, no estágio único, uma estrutura de controle mais sofisticada é necessária, por não haver uma etapa só dedicada ao MPPT do sistema solar.

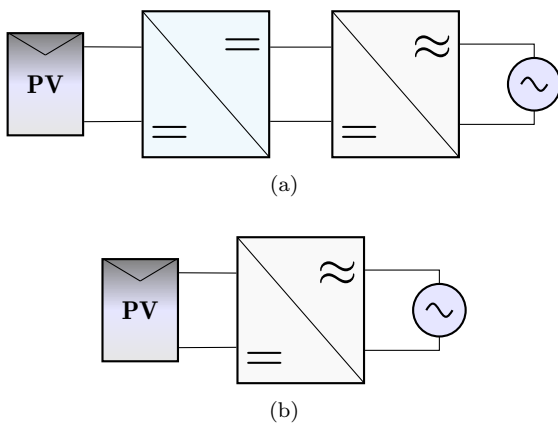


Figura 1. (a) Conversor CC-CA de dois estágios; (b) Conversor CC-CA de um estágio.

2.2 Conversores Multiníveis

Conversores multiníveis são conversores CC-CA que apresentam a tensão de saída na carga com diversos níveis ou degraus (Bressan, 2019). As três estruturas básicas de conversores multiníveis são:

- Com diodos de grameamento - NPC (Nabae et al., 1981);
- Capacitores flutuantes ou capacitores de grameamento - FC (Meynard and Foch, 1992);
- Ponte H em cascata - CHB (Baker, 1980).

Diversas topologias de conversores multiníveis, derivadas das estruturas básicas foram propostas, analisadas e ainda constituem objeto de estudo. Esses conversores permitem atingir tensões elevadas com baixo conteúdo harmônico sem o uso de transformadores (Camargo et al., 2018).

2.3 Conversor FC

O conversor multinível com capacitor flutuante, conhecido por conversor FC (Flying Capacitor), cuja topologia inicial surgiu em 1992 (Meynard and Foch, 1992), é composto por um braço de três níveis e quatro chaves por braço conforme apresentado na Fig. 2:

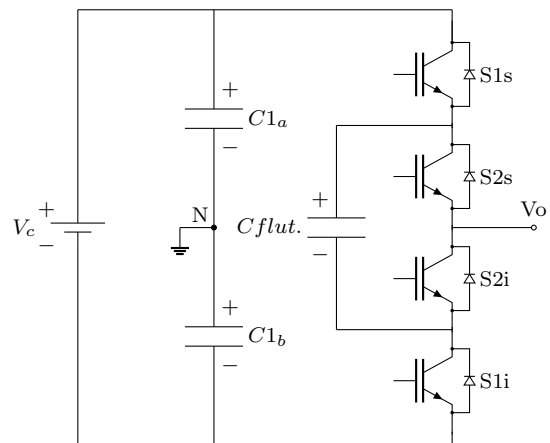


Figura 2. Braço inversor FC de três níveis.

O capacitor flutuante (grameamento) presente na topologia não é alimentado externamente por uma fonte isolada de tensão e, portanto, sua tensão deve ser controlada, ou seja, o conversor necessita de técnica de controle de tensão.

Essa topologia, pode ser estendida para n níveis de tensão, com a conexão em série das células FC (Bressan, 2019). A relação do número de capacitores flutuantes e o número de níveis de tensão do conversor é expresso por:

$$n_c = \frac{(n-1) \cdot (n-2)}{2} \quad (1)$$

Pela equação (1), observa-se que o número de capacitores flutuantes é aumentado com o número de níveis requeridos.

Considerando uma estrutura simétrica, a tensão máxima em todos os capacitores é dada em (2):

$$V_{cmax} = \frac{V_c}{(n-1)} \quad (2)$$

Como vantagens do conversor FC, pode-se enfatizar:

- A tensão sobre os interruptores bidirecionais é restringida diretamente pelos capacitores flutuantes, ou seja, sem a presença de diodos de grampeamento, por exemplo;
- Através da técnica de modulação é possível distribuir igualmente as correntes sobre os semicondutores e capacitores flutuantes;
- Limitação do estresse nas chaves por dv/dt .

Contudo, o conversor FC apresenta algumas desvantagens:

- Para elevado número de níveis, o conversor torna-se volumoso;
- A frequência de comutação dos semicondutores tem relação direta no tamanho dos capacitores flutuantes.

O conversor de capacitor flutuante de um braço (Fig. 2) pode sintetizar três níveis de tensão de saída, como pode ser observado na Tabela 1:

Tabela 1. Tensão de saída em função do estado das chaves no conversor de capacitor flutuante 3 níveis.

S1s	S2s	S1i	S2i	V _o
0	0	1	1	-V _c /2
0	1	1	0	0
1	0	0	1	0
1	1	0	0	V _c /2

Os pares de chaves S1s e S1i; S2s e S2i funcionam de forma complementar. Os estados das chaves influenciam na carga e descarga do capacitor flutuante, o que ocasiona a regulação de tensão independentemente da corrente de saída. No barramento CC, os capacitores C1_a e C1_b, servem para garantir que todos os capacitores estejam submetidos a mesma tensão do capacitor flutuante.

O estado redundante de chaveamento (V_{out}=0), pode ser utilizado para o balanceamento da tensão do capacitor flutuante e também para redução das perdas de comutação.

Em (Hamma et al., 1995), foi proposto um cálculo simplificado para o projeto dos capacitores flutuantes:

$$C_{flut.} = \frac{I_p}{f_p \cdot \Delta V_c \cdot n_p}, \quad (3)$$

onde, ΔV_c é a ondulação de tensão no capacitor flutuante (V), n_p é o número de portadoras triangulares, I_p é a corrente de saída (A) e f_p é a frequência das portadoras (Hz).

2.4 Filtros passivos para conversores

Os harmônicos causam muitos prejuízos aos sistemas elétricos devido às perdas e interferências, ocasionando uma deterioração na qualidade de energia. Para sistemas fotovoltaicos, a norma brasileira ABNT NBR 16149 (2013) estabelece os limites para a distorção harmônica total de corrente em 5% em relação à corrente fundamental na potência do inversor. Esse nível é muito mais rigoroso do que outros eletrodomésticos, pois os sistemas fotovoltaicos

são vistos como fonte de geração, e, portanto, estão sujeitos a padrões mais altos do que os sistemas de carga.

Com a finalidade de atenuar essas perdas e atender os limites em norma, normalmente são utilizados nos conversores filtros passivos passa-baixa do tipo L, LC ou LCL.

Os filtros L são de primeira ordem, possuindo assim na região de altas frequências atenuação de -20 dB/década após a frequência de corte. Utilizando a modulação PWM bipolar, a indutância do filtro L de maneira simplificada pode ser obtida a partir da equação (4) (Nardi, 2016):

$$L = \frac{V_{cc}}{4\sqrt{3} \cdot f_{sw} \cdot DHT_i \cdot I_o}, \quad (4)$$

onde V_{cc} é a tensão de entrada do inversor (V), f_{sw} é a frequência de chaveamento (Hz), DHT_i é a taxa de distorção de harmônicas de corrente (%) e I_o é a corrente elétrica eficaz de saída do conversor (A).

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

3.1 Conversor Proposto

A configuração do sistema proposto demonstrando a conexão do sistema solar com a rede elétrica (V_{grid}) é apresentada na Fig. 3.

Apesar de ter sua topologia baseada na estrutura monofásica FC, apresenta uma alteração significativa, onde a transferência de energia para a rede não se dá mais a partir de uma fonte conectada entre os extremos da célula de comutação, mas sim a partir do capacitor flutuante da célula FC. Ainda assim, a geração dos sinais de comando dos interruptores é idêntica ao da célula FC.

A fonte fotovoltaica pode ser composta por uma ou mais strings de módulos fotovoltaicos conectados com associações série/paralelo a fim de se obter os níveis desejados de tensão.

Na saída foi empregado um filtro passivo tipo L para filtragem dos harmônicos.

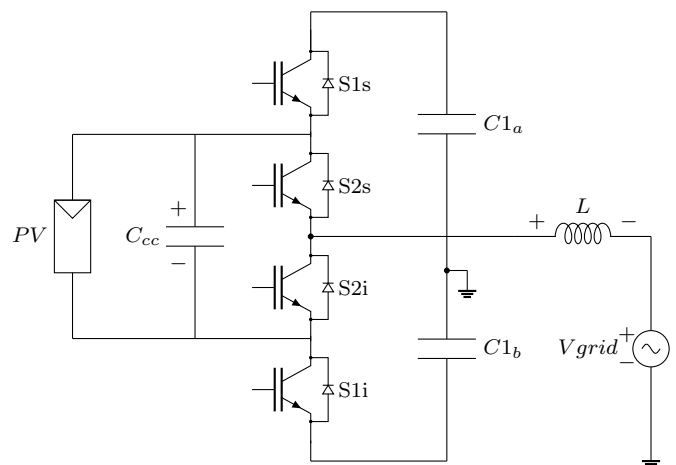


Figura 3. Topologia proposta de conversor CC-CA de estágio único.

3.2 Esforços de Tensão nos Interruptores

O esforço de tensão está relacionado com o valor máximo da tensão de bloqueio dos semicondutores. A Tabela 2 apresenta os esforços de tensão dos interruptores:

Tabela 2. Esforços de tensão nos interruptores.

S1s	S2s	S2i	S1i
$V_{oc}/8$	V_{oc}	V_{oc}	$V_{oc}/8$

Observa-se que o par de interruptores centrais, deve suportar a tensão total do barramento CC, onde V_{oc} é a máxima tensão de circuito aberto do arranjo fotovoltaico.

3.3 Esforços de Corrente nos Interruptores

Em (Bressan, 2019) foi feito o equacionamento dos esforços de corrente nos semicondutores para a modulação PS-PWM, onde o tempo morto foi desprezado.

O valor da corrente eficaz quase instantâneo nos interruptores é dado por:

$$I_{s_{rms}} = \frac{I_p}{2} \cdot \sqrt{\frac{3\pi + 8M_a + \cos(\Phi)}{6\pi}}, \quad (5)$$

onde I_p é a corrente de pico de saída do inversor (A), Φ é a defasagem entre a corrente de saída e o sinal de referência do inversor e M_a é o índice de modulação.

3.4 Cálculo do Capacitor do Barramento CC

Na topologia proposta, o capacitor flutuante deixa de existir. Nessa configuração, qualquer variação da tensão de saída é refletida de volta para o sistema fotovoltaico e a potência extraída dos módulos é reduzida. Portanto, o capacitor do barramento CC que atua como um sistema de amortecimento entre o sistema fotovoltaico e o inversor deve ser grande o suficiente para desacoplar o módulo fotovoltaico do inversor. Para a topologia utilizada, a tensão do módulo fotovoltaico é a mesma do capacitor (Fig. 3). O capacitor de barramento CC mínimo necessário deve ser otimizado de modo que mantenha a vantagem da abordagem de estágio único, evitando a utilização ineficiente da fonte fotovoltaica. A eficiência de utilização de um módulo fotovoltaico indica a potência real extraída do módulo fotovoltaico da sua potência máxima possível. A ondulação de tensão do módulo fotovoltaico, ΔV_c , tem uma relação direta com o tamanho do capacitor de acoplamento e sua tensão nominal. Além disso, existe uma relação direta entre a quantidade de energia que pode ser armazenada no capacitor e sua capacidade de transferência de energia (Tiku, 2015).

Considerando o conversor operando com um rendimento de 100%, tem-se a potência de entrada:

$$P_{in} = V_{ef} \cdot I_{ef} \cdot \left(\frac{1 - \cos(2wt)}{2} \right) = V_{in} \cdot I_{pv}(t) \quad (6)$$

O valor médio da corrente na saída do sistema fotovoltaico (painéis + capacitor) é a corrente do arranjo, enquanto a

componente alternada, com o dobro da frequência da rede, circula pelo capacitor.

$$\langle I_{pv} \rangle = \frac{P_{mp}}{V_{in}} \quad (7)$$

$$I_{pkpk} = 2 \cdot \langle I_{pv} \rangle \quad (8)$$

A reatância de um capacitor é dada por (9):

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C_{cc}} \quad (9)$$

$$\Delta V_c = X_c \cdot I_{pkpk} \quad (10)$$

Substituindo (8) em (10), tem-se:

$$\Delta V_c = X_c \cdot 2 \cdot \langle I_{pv} \rangle \quad (11)$$

Substituindo (9) em (11), tem-se:

$$\frac{\Delta V_c}{2 \langle I_{pv} \rangle} = \frac{1}{2\pi \cdot 2 \cdot f_{grid} \cdot C_{cc}} \quad (12)$$

Substituindo (7) em (12), o capacitor do barramento CC pode ser calculado por:

$$C_{cc} = \frac{P_{mp}}{2 \cdot V_{in} \cdot \pi \cdot f_{grid} \cdot \Delta V_c}, \quad (13)$$

onde P_{mp} é a potência máxima do sistema fotovoltaico (W), V_{in} é a tensão de máxima potência (V), f_{grid} é a frequência da rede (Hz) e ΔV_c é a ondulação de tensão admitida (V).

3.5 Cálculo dos Capacitores Auxiliares

Nesses capacitores o controle de tensão e corrente ocorre de forma automática. A frequência nesses capacitores é a mesma da rede e a variação máxima de tensão que ocorre nos capacitores, é a mesma tensão do arranjo fotovoltaico.

$$\Delta V_{caux} = V_{in} \quad (14)$$

$$V_{in} = X_c \cdot I_{pk} \quad (15)$$

A corrente de pico que deve ser suportada pelos capacitores é dependente da corrente de saída e pode ser dada por:

$$I_{pk} = \sqrt{2} \cdot I_o, \quad (16)$$

onde a corrente eficaz de saída pode ser dada por:

$$I_o = \frac{P_{mp}}{V_{grid}} \quad (17)$$

Substituindo as equações (16) e (17) em (15), tem-se:

$$X_c = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{in} \cdot V_{grid}}{2 \cdot P_{mp}} \quad (18)$$

Substituindo (18) em (9), e evidenciando C_{aux} , pode-se calcular os capacitores auxiliares:

$$C_{aux} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_{mp}}{2 \cdot \pi \cdot f_{grid} \cdot V_{in} \cdot V_{grid}}, \quad (19)$$

onde V_{grid} é a tensão eficaz da rede elétrica (V).

4. RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)

Em um painel fotovoltaico, procura-se ao máximo a utilização de todo o potencial energético para geração de energia elétrica. Essa otimização se dá através do rastreamento de máxima potência conhecido como MPPT (maximum power point tracking) (Pinho and Galdino, 2014). Um gerador fotovoltaico submetido a uma irradiância solar uniforme tem curvas I-V e P-V com formato conforme pode ser visto na Fig. 4:

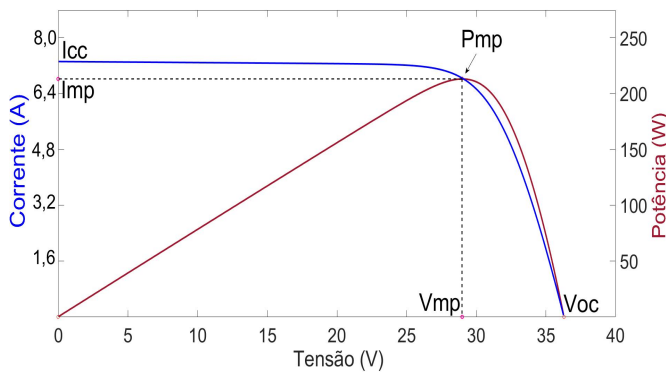


Figura 4. Curvas IxV e PxV do módulo fotovoltaico Soltech 1STH-215-P.

Na curva da potência em função da tensão (P-V), pode ser observado um único ponto com derivada nula, ou seja, quando nessa curva atinge-se um máximo na função; esse ponto é conhecido como o ponto de máxima potência (PMP), o ponto no qual o produto da tensão pela corrente tem o seu maior valor. Os valores de corrente e tensão de máxima potência são dependentes das condições de irradiância solar, da temperatura de operação do painel e massa do ar. Como essas grandezas, principalmente a irradiância, variam ao longo do dia, o ponto de máxima potência desloca-se. Com isso, deve haver um mecanismo de controle eletrônico que monitore as características da curva V-I para manter o módulo solar operando sempre no ponto de máxima potência.

A tarefa desse rastreamento (MPPT) em um sistema de conversão de energia elétrica, é ajustar continuamente o sistema para que seja extraída a máxima potência dos módulos fotovoltaicos, independente das condições climáticas ou da rede elétrica. Considerando que o painel solar tem características não ideais de tensão-corrente e as condições como irradiância, temperatura ambiente e vento são imprevisíveis, o rastreador deve lidar com um sistema não linear e variante no tempo. Dentre vários algoritmos que podem ser utilizados a fim de implementar o MPPT temos: perturbe & observe, condutância incremental, capacitância parasita, tensão constante e outros; sendo que os dois primeiros citados são os mais utilizados.

O algoritmo de condutância incremental foi escolhido como estratégia MPPT neste artigo por não oscilar em torno do ponto de máxima potência como ocorre com o perturbe & observe, e por rastrear mais rapidamente o aumento e a diminuição das condições de irradiância com maior precisão. Em outras palavras, é um método mais avançado.

Esse algoritmo baseia-se no ponto de máxima potência (PMP), no qual o coeficiente angular da potência em relação à tensão é zero, à direita do ponto o coeficiente angular é menor do que zero, e à esquerda, este coeficiente é maior do que zero, conforme pode ser visto na Fig. 5:

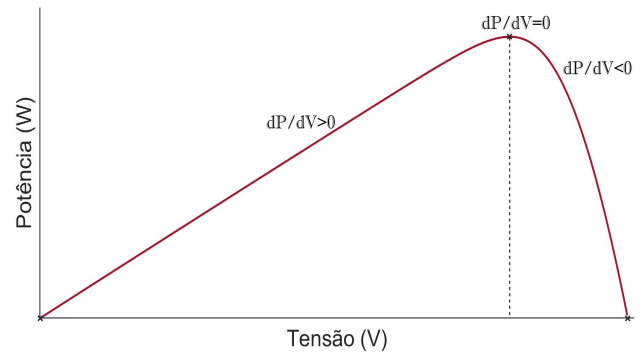


Figura 5. MPPT através do método condutância incremental.

O algoritmo da condutância incremental pode ser implementado a partir da seguinte relação:

$$P = V \cdot I \quad (20)$$

Derivando-se a equação (20), tem-se:

$$\frac{d(VI)}{dV} = V \frac{dI}{dV} + I = 0 \quad (21)$$

A partir dessa relação, temos no PMP:

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (22)$$

À direita do PMP:

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (23)$$

À esquerda do PMP:

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (24)$$

Para o conversor apresentado, o algoritmo de condutância incremental foi modificado para atuar no ângulo da moduladora do sinal PWM, cuja amplitude é sempre unitária, rastreando a máxima potência com base na perturbação do defasamento da moduladora em relação a V_{grid} e observação desses valores. Assim, o algoritmo estará rastreando o ponto de máxima potência até que a condição da eq. (22) esteja satisfeita, isto é, o ponto onde a derivada é nula e consequentemente a potência do sistema é máxima.

Utilizando as equações (22), (23) e (24), foi elaborado um fluxograma do método de condutância incremental modificado apresentado na Fig. 6:

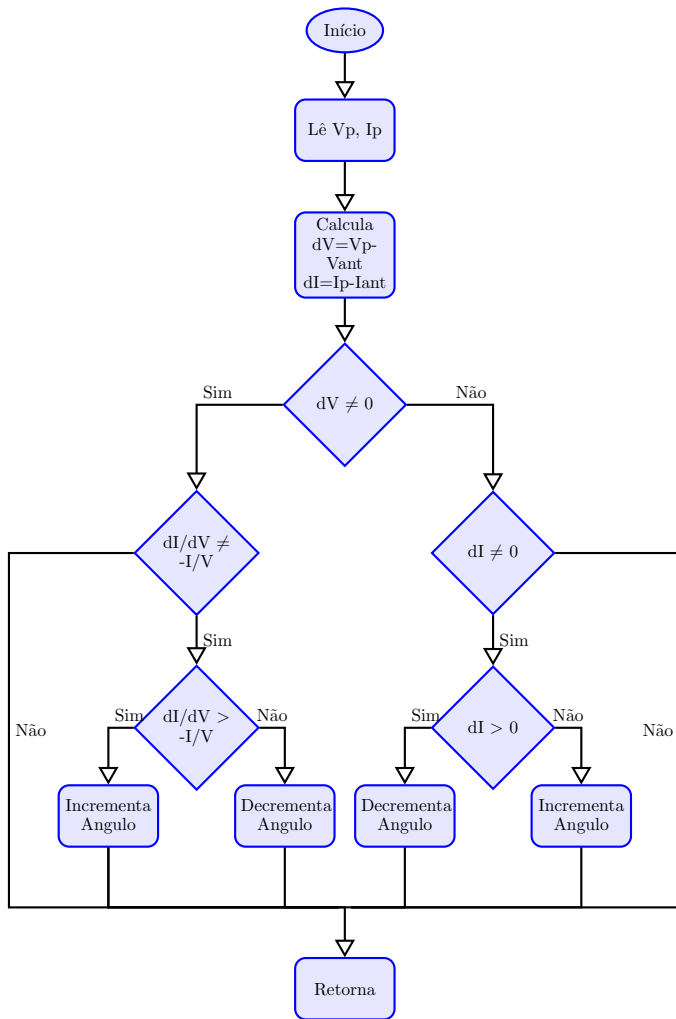


Figura 6. Fluxograma do método condutância incremental modificado.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O sistema simulado está representado na Fig. 7.

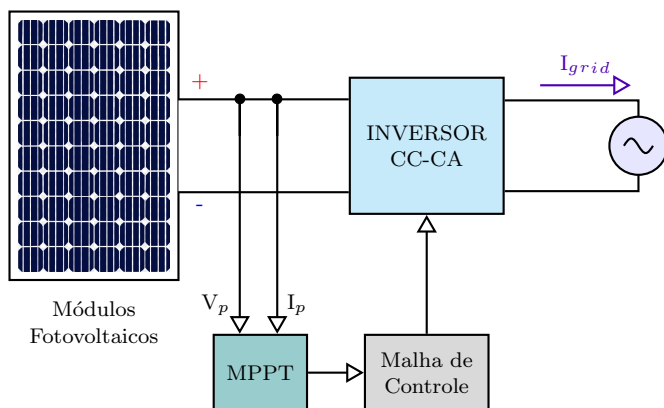


Figura 7. Estratégia de controle da simulação.

Foram utilizadas 2 strings de 15 módulos fotovoltaicos, totalizando 30 módulos, da marca Soltech e modelo 1STH-215-P, cujas características totais do arranjo são apresentadas na Fig. 8.

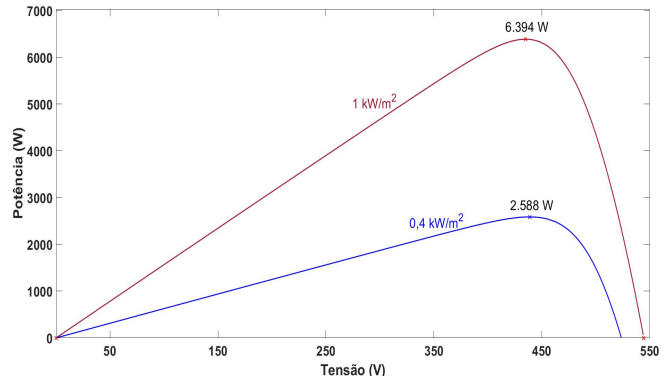


Figura 8. Curvas P_xV para irradiancias de 1000W/m² e 400W/m², 25°C.

Nesta simulação efetuada, o filtro de saída foi calculado utilizando a equação (4), considerando uma máxima distorção de corrente de 5%, e corrente eficaz considerando a máxima potência do sistema (6394,5 [W] /127 [V]). O capacitor do barramento CC foi calculado utilizando a equação (13), considerando uma variação máxima de tensão (ΔV_c) de 15V. Os capacitores auxiliares foram calculados através da equação (19). Para ambos os cálculos a tensão média de entrada considerada foi de 435V.

Na tabela a seguir pode ser visto os parâmetros utilizados na simulação:

Tabela 3. Parâmetros do sistema utilizados na simulação.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Frequência de chaveamento	f_{sw}	4,86 kHz
Tensão da rede (rms)	V_{grid}	127 V
Capacitores auxiliares	$C1_a, C1_b$	470 μ F
Capacitor barramento CC	C_{cc}	5x470 μ F
Filtro de saída	L	5 mH
Máxima potência painel	PMP	213,15 W
Máxima potência do sistema	PMP _t	6.394,5 W

Utilizando a mesma estrutura de controle PWM para o conversor FC tradicional (PS-PWM), o algoritmo de condutância incremental atuando no ângulo da moduladora, e utilizando como parâmetros os dados da tabela 3, os resultados simulados foram obtidos do ambiente Simulink presente no software MATLAB e podem ser vistos a seguir.

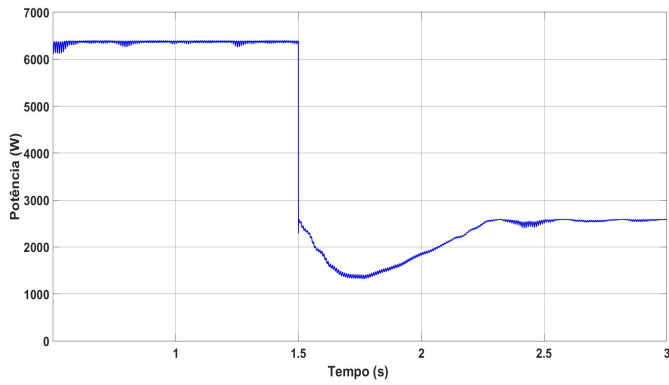


Figura 9. Potência entregue pelo sistema solar variando a irradiância de 1000W/m^2 para 400W/m^2 em $t=1.5$ s.

Na figura 9 pode-se observar que o conversor proposto atua nos pontos de máxima potência (PMP) do conjunto, apresentados na Fig. 8 com a variação da irradiância de 1000W/m^2 para 400W/m^2 .

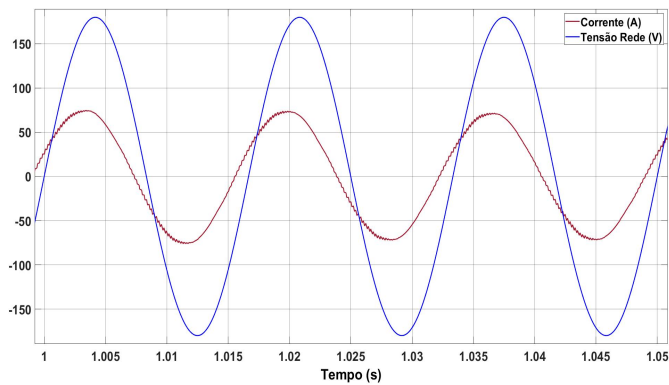


Figura 10. Tensão da rede e corrente entregue para irradiância de 1000W/m^2 .

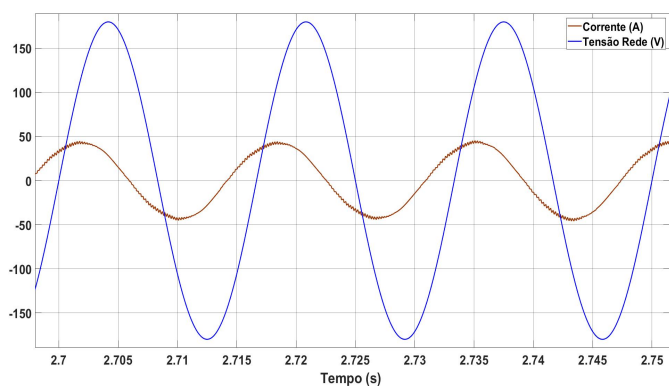


Figura 11. Tensão da rede e corrente entregue para irradiância de 400W/m^2 .

Nas figuras 10 e 11 pode-se observar a tensão e corrente da rede com a variação da irradiância. Observa-se também que o ponto de máxima potência não ocorre com o fator de potência unitário.

O valor de THDi total foi de 2,78%, abaixo do limite estabelecido pela legislação brasileira, conforme pode ser visto na Fig. 12:

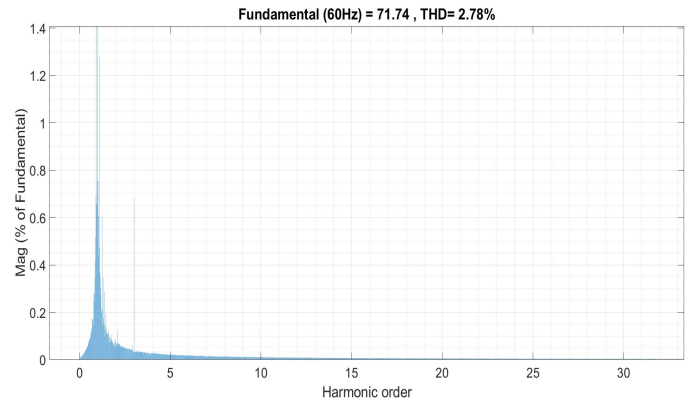


Figura 12. Espectro harmônico da corrente injetada na rede para uma irradiância de 1000W/m^2 .

6. CONCLUSÕES

Com o aumento cada vez mais expressivo da geração elétrica fotovoltaica, é necessário estudar técnicas para o aprimoramento do processamento de energia e conexão à rede elétrica com o intuito de melhorar a qualidade de energia elétrica para o sistema com o menor custo possível.

Nesse artigo foi apresentado um novo conversor de estágio único modificado a partir do conversor de célula flutuante CC-CA para sistemas fotovoltaicos monofásicos.

Utilizando o algoritmo de condutância incremental como método MPPT atuando no ângulo da moduladora, um conversor de 6,3 kW foi testado no ambiente Simulink presente no software MATLAB onde foi obtido desempenhos satisfatórios. O controle do sistema extraiu a máxima potência do conversor com alto fator de potência para a condição nominal, e mesmo com irradiâncias mais baixas o ponto de máxima potência do sistema foi alcançado. Os valores dos níveis de corrente entregue e de harmônicas (THD_i) foram os esperados, validando assim o conversor para futuras aplicações. O conversor opera com tensão nominal nos dois interruptores principais, e tensão reduzida nos dois interruptores secundários, reduzindo perdas por comutação. Os autores estão trabalhando na tentativa de operar no ponto de máxima potência e fator de potência unitário.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 16149 (2013). Sistemas Fotovoltaicos (FV) - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. 18 p.
- Baker, R.H. (1980). Us patent 4,210,826. URL <https://patentimages.storage.googleapis.com/f3/5f/d4/c6cd8b0351bfbe/US4210826.pdf>.
- Bressan, M.V. (2019). Conversor multinível em ponte completa de conversores com capacitores flutuantes. *Tese (Doutorado em Eng. Elétrica) - Universidade Federal do estado de Santa Catarina (UFSC)*, 183 f.

- Camargo, R.S., Nunes, W.T., and Simonetti, D.S.L. (2018). Design and Analysis Methodology for Modular Multilevel Converters (MMC). *IEEE Latin America Transactions*, 16, 1105–1112. doi:10.1109/TLA.2018.8362144. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8362144>.
- EPE (2021). Balanço energético nacional - relatório síntese. 173 f. URL https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf.
- Hamma, F., Meynard, T.A., Tourkhani, F., and Viarouge, P. (1995). Characteristics and design of multilevel choppers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1208–1214. doi:10.1109/PESC.1995.474968. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/474968>.
- Martins, D.C. and Barbi, I. (2011). *Introdução ao estudo dos conversores CC-CA*. Florianópolis, 3 edition.
- Meynard, T.A. and Foch, H. (1992). Multi-Level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-Source Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 397–403. doi:10.1109/PESC.1992.254717. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/254717>.
- Mohan, N. and et. al (2003). *Power Electronics - Converters, Applications and Desing*. John Wiley and Sons, New York - USA, 3 edition.
- Nabae, A., Takahashi, I., and Akagi, H. (1981). A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-17, 518–523. doi:10.1109/TIA.1981.4503992. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/4503992>.
- Nardi, C. (2016). Dimensionamento de filtros passivos para conversores estáticos de energia. *Dissertação (Mestrado em Eng. Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná*, 162 f.
- ONS (2021). O sistema em números. URL <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- Pinho, J.T. and Galdino, M.A. (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *CEPEL-CRESESB*, 2 ed., 530 f.
- Tiku, D. (2015). Modular Multilevel MMI(HB) Topology for Single-Stage Grid Connected PV Plant. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1–8. doi:10.1049/cp.2015.0086. URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/7140568>.
- Villalva, M.G. (2015). Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações. *Editora Saraiva*, 2 ed., 224 p.