



Associação Propagadora Esdeva
Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora – CES/JF
Curso de Engenharia Elétrica
Artigo de Iniciação Científica

TÍTULO: ESTUDO DA CONEXÃO DE MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS À REDE ELÉTRICA DE DISTRIBUIÇÃO

Alunos: Paulo Victor Lopes Pires, Tayrine de Carvalho Lima, Gessyelle Vilela de Oliveira; Prof. Orientador: Dalmo Cardoso da Silva Júnior

Linha de pesquisa: Eletrônica de Potência e Controle Automático

RESUMO

Este projeto de pesquisa é uma contribuição ao estudo da modelagem e controle de um conversor estático fonte de tensão usado para conectar um sistema de geração fotovoltaico à Rede Elétrica de Distribuição. O principal objetivo é modelar um módulo solar fotovoltaico, que permita investigar as características dinâmicas do arranjo, a partir de variações de irradiação solar e temperatura e modelar também o conversor eletrônico de interface CC-CA e a rede de distribuição. São apresentados estudos dos tipos e dos desempenhos de circuitos de sincronismo usados para sincronizar as tensões geradas pelos conversores estáticos com as tensões do sistema (rede elétrica), das técnicas de controle aplicadas a conversores fonte de tensão conectados em paralelo com a rede CA. Por fim, são apresentados os resultados de simulação que validam os modelos matemáticos adquiridos nos estudos.

Palavras-chave: Arranjo solar fotovoltaico, Conversor fonte de tensão, modelagem e controle de conversores, eletrônica de potência.

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia renovável e a eficiência energética são assuntos que vêm se tornando muito assíduos no cenário mundial. A busca por tecnologias eficientes

em termos de utilização da energia elétrica tem sido motivada por questões de natureza econômica e ambiental, visando o desenvolvimento sustentável. Com isso, os custos de implementação dos sistemas que utilizam recursos renováveis, como a energia solar e a eólica, por exemplo, diminuíram nos últimos anos devido à tecnologia e aos avanços na produção de materiais. O interesse pela utilização das fontes renováveis na produção de energia elétrica tem sido impulsionado pela sempre crescente demanda de energia, pelo esgotamento dos combustíveis fósseis, pela baixa eficiência global e pela poluição causada pelas usinas convencionais. Neste cenário, a energia solar fotovoltaica tem ganhado destaque por apresentar vantagens potenciais como o caráter sustentável da energia solar como combustível, impacto ambiental mínimo, possível redução das tarifas de energia pela livre disponibilidade da luz solar, longo tempo de vida funcional (mais de 30 anos com manutenção mínima), operação silenciosa, além da utilização de espaços inutilizáveis, como telhados, por exemplo.

Dessa forma, um novo paradigma de geração de energia que é menos dependente dos recursos de combustível fóssil vem se desenvolvendo, a fim de manter o padrão de vida e o crescimento sustentável que é a Geração Distribuída (GD). A GD pode ser definida como uma abordagem que emprega tecnologias de pequena escala para produzir eletricidade próximo aos usuários finais de consumo. As tecnologias de geração distribuída, geralmente, consistem em geradores modulares (em grande maioria renováveis), e estes oferecem uma série de benefícios potenciais. Em muitos casos, os geradores distribuídos podem fornecer eletricidade de baixo custo e com menos consequências ambientais do que os grandes geradores de energia da tradicional matriz energética. Em contraste com o uso de algumas centrais de grande escala localizadas longe dos centros de carga (a abordagem tradicional da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica), os sistemas de GD empregam inúmeras plantas, porém, pequenas que podem fornecer energia no local com pouca dependência da distribuição e da rede de transmissão. As GDs, como comentado, são normalmente conectadas nas redes de distribuição, podendo ter diferentes tecnologias de geração, como Microturbinas (MT), Módulos Solares Fotovoltaicos (PV), Células de Combustível, do inglês, Fuel Cell (FC), Turbinas Eólicas, do inglês Wind Turbine (WT), entre outras.

Corroborando com o que foi dito e com os contínuos avanços na tecnologia de semicondutores têm ocorrido um cenário promissor para a utilização de conversores

estáticos na conversão de energia elétrica e na interface com o sistema elétrico de potência. Devido à natureza da energia gerada pelas fontes alternativas, o uso de conversores estáticos CC-CA para condicionar a energia elétrica antes da mesma ser disponibilizada na rede CA é imprescindível.

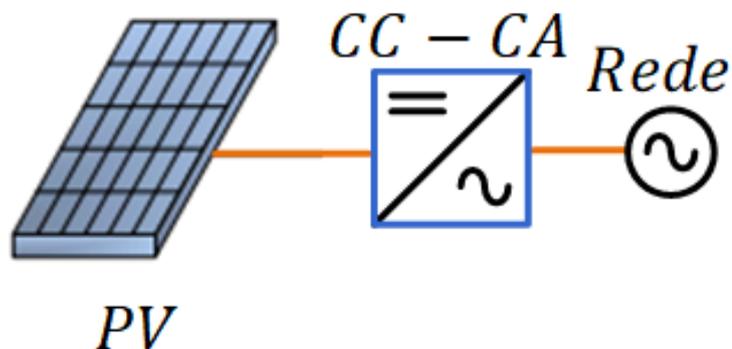
Portanto, este trabalho tem como objetivo a modelagem e o controle do conversor estático fonte de tensão usado para conectar o sistema de geração fotovoltaico à rede elétrica de distribuição, através de simulações computacionais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MODELO FOTOVOLTAICO (PV)

Os arranjos (ou painéis) fotovoltaicos são constituídos de várias células fotovoltaicas, que convertem a energia do sol em energia elétrica, fornecendo eletricidade para as residências, empresas e redes de distribuição. Na Figura 1, encontra-se um diagrama de blocos de um sistema de energia solar.

Figura 1: Sistema de energia solar.



FONTE: Arquivo pessoal

Segundo RASHID (2014, p. 728), há dois tipos de células PV, as de placas planas e as de lentes convexas,

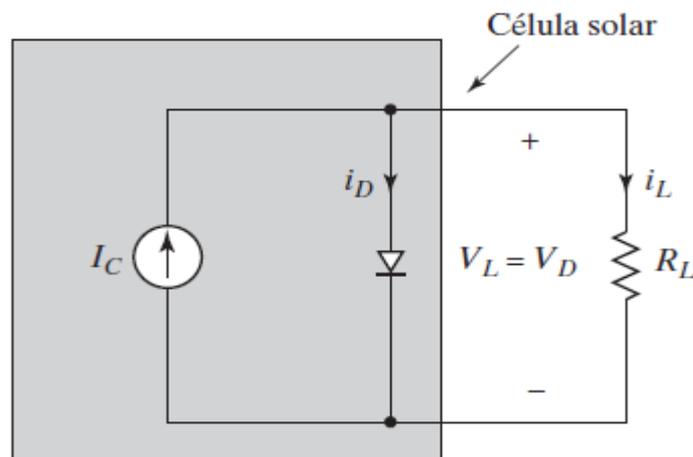
A PV de placa plana é retangular e plana, além de mais utilizada em aplicações comerciais. As células de placa plana são geralmente montadas em ângulos fixos que maximizam a exposição ao Sol durante todo o ano. Em sistemas mais flexíveis, o ângulo do painel solar varia para acompanhar a exposição solar ideal durante o dia. Lentes convexas que concentram células PV necessitam de menos material para a mesma potência de saída que a das células de placa plana; assim, elas são menores. No entanto, a concentração de células funciona melhor quando não há nuvens no céu. Em dias

nublados, a luz difusa ainda consegue produzir eletricidade nas células PV de placa plana, enquanto as células PV concentradas geram menos energia nessas condições.

Conforme CASARO, MARTINS (2008), “As células fotovoltaicas representam a menor unidade em um sistema fotovoltaico. Em geral, são fabricadas de silício monocristalino, policristalino ou amorfo. São classificadas como células cristalinas ou de filme finos”.

Já em RASHID (2014, p. 728), “A célula solar é semelhante a um diodo, mas seus elétrons adquirem energia a partir de fótons de luz. [...] A célula pode ser representada por um diodo reversamente polarizado e uma fonte de corrente” como pode ser observado na Figura 2.

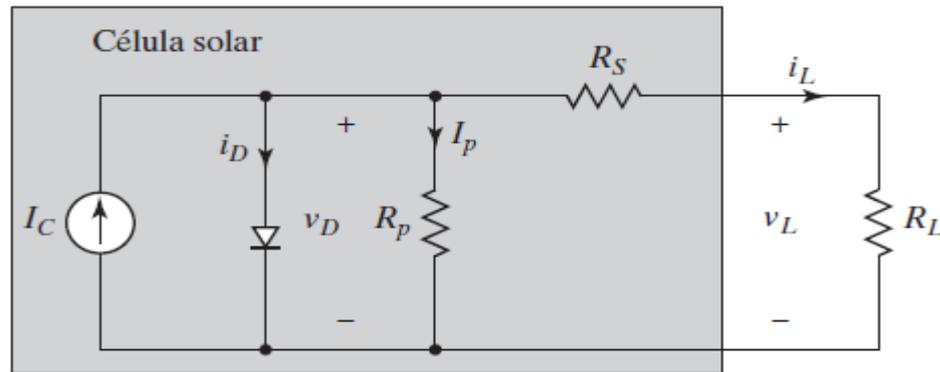
Figura 2. Modelo de célula solar ideal.



FONTE: RASHID, 2014

Conforme RASHID (2014, p. 731), “uma célula real (não ideal) tem perdas elétricas por conta dos vestígios no coletor e dos fios externos, por uma resistência em série R_S . A resistência interna do cristal é representada por uma resistência em paralelo R_P ” (Figura 3).

Figura 3: Modelo de uma célula solar real.



FONTE: RASHID, 2014

Segundo GOW, MANNING (1999), o equacionamento do circuito anterior (Figura 3) é expresso pela seguinte equação,

$$I_L = I_{ph} - I_r \left[e^{q(V_L + I_L R_s) / \eta K T} - 1 \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_p} \quad (1)$$

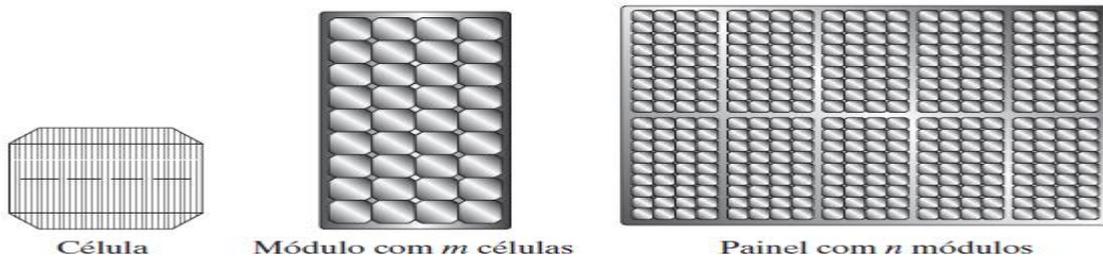
onde: V_L, I_L – são a tensão e a corrente de saída de uma célula solar; I_{ph} – fotocorrente; I_r – corrente de saturação reversa da célula; R_s, R_p – resistência série e paralela da célula; q – carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$); η – fator de qualidade da junção pn; k – constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} J/k$) e T – a temperatura ambiente em kelvin.

Supondo um painel fotovoltaico da Figura 4, constituído de m células solares e n módulos PV, a potência de saída desse painel fotovoltaico é expressa por (2)

$$P = mnVI \quad (2)$$

onde: P representa a potência em Watt, V a tensão em Volts e I a corrente em Ampères.

Figura 4: Módulos e painéis fotovoltaicos.



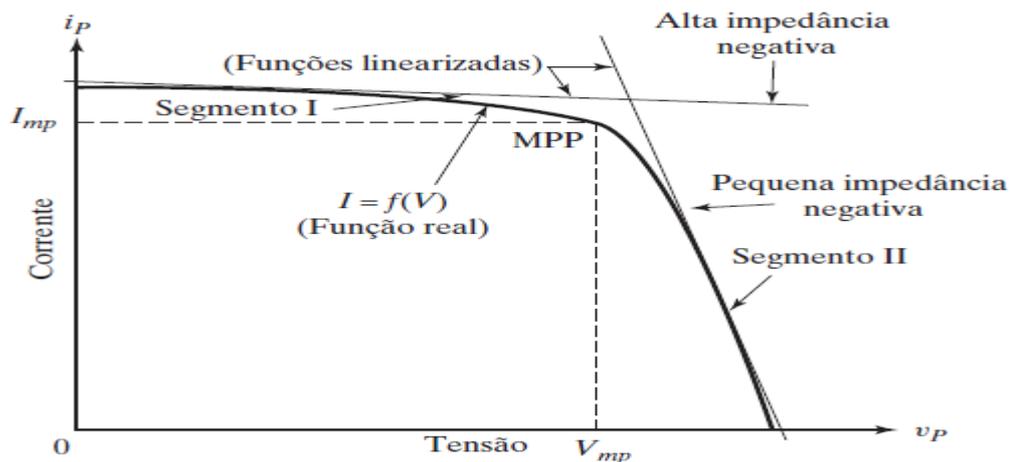
FONTE: RASHID, 2014

2.2 CARACTERÍSTICA TENSÃO-CORRENTE (V-I) DA CÉLULA FOTOVOLTACA

Conforme RASHID (2014, p. 734),

Um sistema PV é normalmente operado para produzir a potência máxima $P_{máx}$ em V_{mp} e I_{mp} . O ponto de operação é conhecido como ponto de potência máxima (MPP). A característica i em função de v é não linear e pode ser linearizada em dois segmentos (Figura 5): o segmento de tensão constante, para baixo $V_p > V_{mp}$ e o segmento de corrente constante, para o alto $V_p < V_{mp}$.

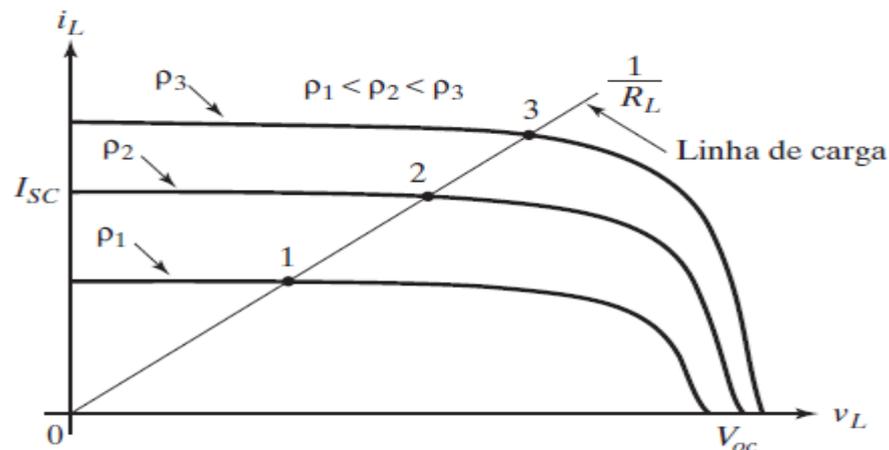
Figura 5: Linearização da curva I-V.



FONTE: Adaptado RASHID, 2014

De acordo com RASHID (2014, p. 731), “Qualquer aumento na irradiação ρ aumentará diretamente o valor da corrente solar I_C , da corrente de curto-circuito I_{SC} e da tensão V_{OC} ”, como pode ser visto na Figura 6.

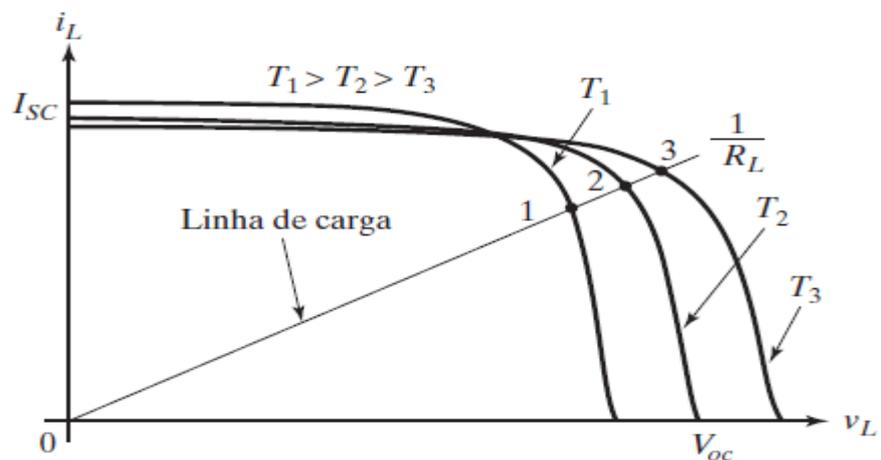
Figura 6: Efeito da irradiação nas células solares fotovoltaicas



FONTE: RASHID, 2014

Segundo RASHID (2014, p. 731), “A corrente de carga i_L depende de forma não linear da temperatura. Em consequência, a tensão de circuito aberto V_{oc} reduz quando a temperatura aumenta”, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Efeito da temperatura.



FONTE: RASHID, 2014

2.3 CONVERSORES FONTE DE TENSÃO CC-CA

Os inversores, também conhecidos como conversores CC-CA, têm como função, converter a tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA simétrica, com amplitude e frequência desejada (RASHID, 2014).

Conforme AHMED (2000, p. 350), “Os inversores são circuitos estáticos (isto é, não têm partes móveis) que convertem potência CC em potência CA com a frequência e tensão ou corrente de saída desejada”.

Segundo RASHID (2014, p. 243),

A forma de onda da tensão de saída de um inversor ideal deve ser senoidal. Na prática, porém, ela não é senoidal e contém determinadas harmônicas. Para aplicações de baixa e média potência, tensões com onda quadrada ou quase quadrada podem ser aceitáveis, mas para aplicações de alta potência são necessárias formas de onda senoidais com baixa distorção. Com a disponibilidade de dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, os conteúdos harmônicos da tensão de saída podem ser significativamente minimizados ou reduzidos por meio de técnicas de chaveamento.

Os inversores podem ser de dois tipos, monofásicos e trifásicos, sendo este, o objetivo do presente trabalho. As técnicas de chaveamentos podem ser através de dispositivos chaveados como BJTs, MOSFETs, IGBTs, MCTs, SITs e GTOs (RASHID, 2014).

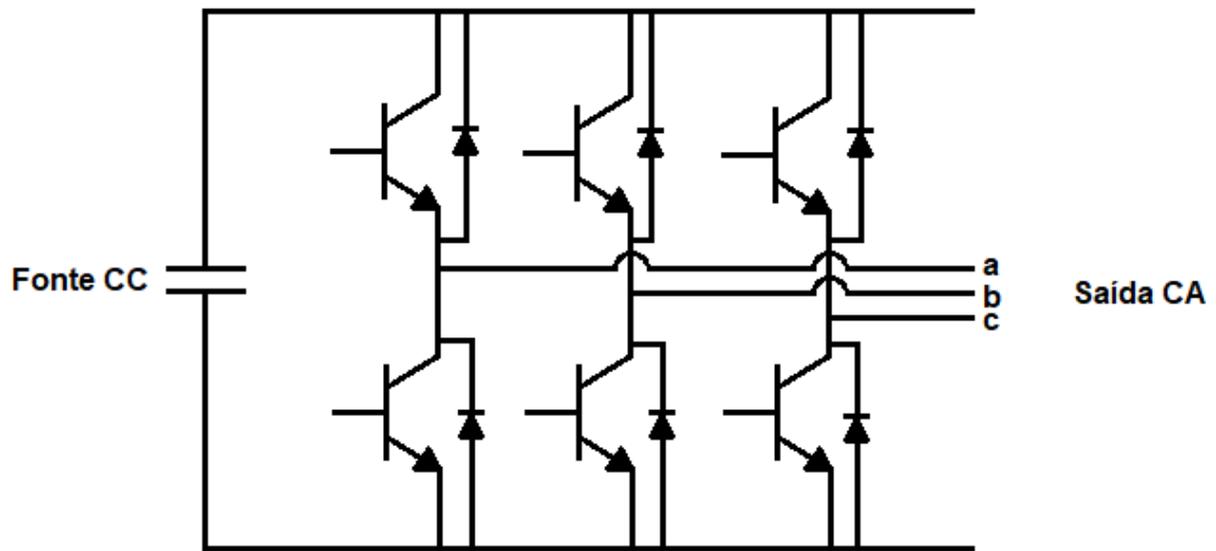
“A maioria das aplicações de inversores requer algum modo de controle da tensão e/ou corrente de saída CA. Vários métodos usados para isso podem ser classificados em três grandes categorias” (AHMED, 2000, p. 363).

- Controle da tensão de entrada CC, fornecida para o inversor;
- Controle da tensão de saída CA do inversor;
- Controle da corrente de saída do inversor. (objetivo do trabalho)

“O circuito do inversor trifásico muda a tensão de entrada CC para uma tensão de saída variável trifásica de frequência desejável. A tensão CC pode ser obtida de uma fonte CC ou de uma tensão CA retificada” (AHMED, 2000, p. 376). No presente trabalho, o inversor trifásico recebe tensão CC de um arranjo solar fotovoltaico.

Em aplicações de alta potência, como as redes de distribuição, normalmente utilizam-se inversores trifásicos. O presente trabalho utilizou um inversor trifásico estático controlado no modo de corrente, constituído de seis dispositivos chaveados, sendo dois desses para cada braço (Figura 8). As tensões de saídas do inversor trifásico estão defasadas em 120° .

Figura 8: Inversor trifásico.



FONTE: Arquivo pessoal

“A modulação por largura de pulso (do inglês, *Pulse Width Modulation*, PWM) é o método mais comum para controlar a tensão. Nela, a tensão de saída é uma onda modulada por largura de pulso, controlada pela variação da duração dos pulsos” (AHMED, 2000, p. 365).

Segundo RASHID (2004), o controle de tensão (ou modulação) dos inversores podem ser: modulação por largura de pulso, modulação trapezoidal, modulação escada, modulação degrau, modulação por injeção harmônica e modulação por delta.

O presente trabalho utilizou a modulação por largura de pulso. O objetivo da modulação, além de controlar a tensão de saída, é eliminar ou reduzir os conteúdos harmônicos, responsáveis pela baixa eficiência dos inversores.

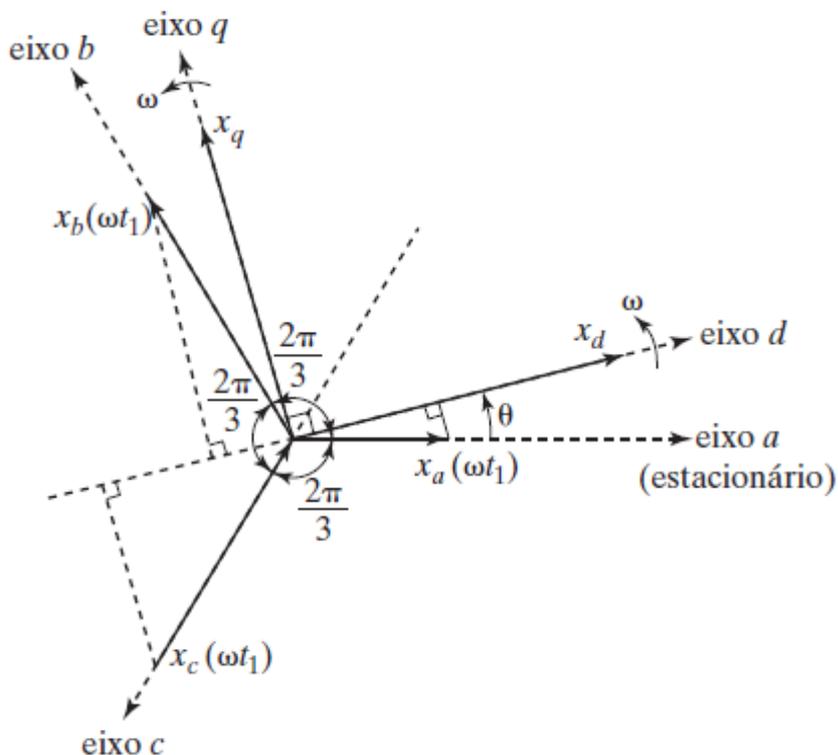
2.4 TRANSFORMADA DE PARK

Para simplificar a análise da conversão de energia no inversor trifásico, ou seja, transformar o sistema trifásico em bifásico, existem dois métodos: transformada d-q (sistema de coordenadas síncronas em eixo direto e quadratura) e a transformada α - β (bifásico estacionário). Essa pesquisa utilizou a transformada d-q, também conhecida como transformada de Park.

Conforme RASHID (2014, p. 833), “as variáveis trifásicas no sistema estacionário abc, podem ser transformadas em variáveis bifásicas em um sistema de

referência rotativo definido pelos eixos d (direto) e q (quadratura) perpendiculares entre si” como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9. Sistema abc para o sistema dq.



FONTE: RASHID, 2014

Segundo RASHID (2014, p. 834), “A transformação das variáveis abc para o sistema dq é conhecido como abc/dq, e pode ser expressa na forma matricial” como em (3).

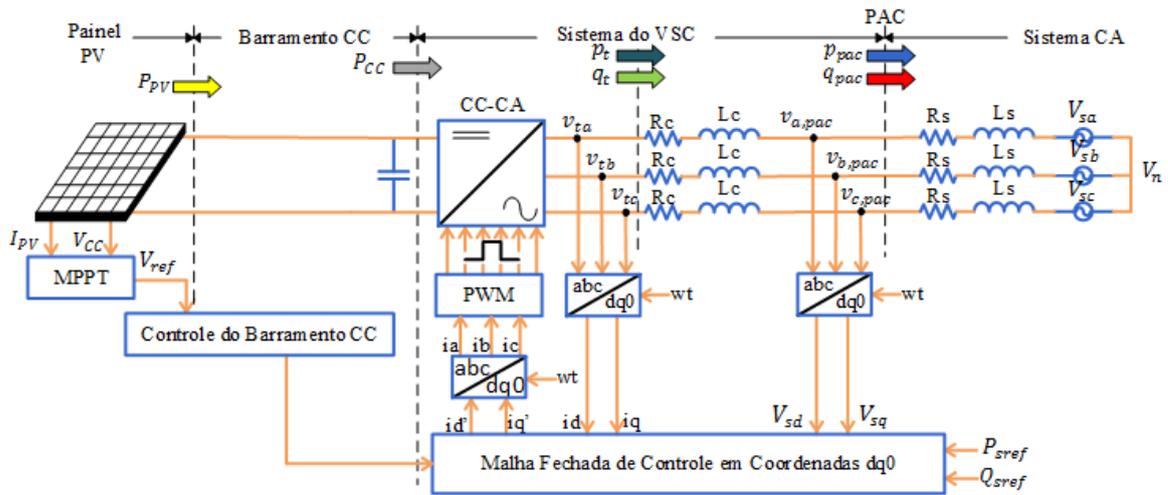
$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta - 2\pi/3) & -\text{sen}(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 METODOLOGIA

Na operação do conversor fonte de tensão, (do inglês, *Voltage-Sourced Converter*, VSC) existe a necessidade de controle da potência ativa e reativa que fluem pelo VSC. Uma das estratégias utilizadas é conhecida como controle no modo

de corrente (do inglês, *Current-Mode Control, CMC*). Neste modo, as potências injetadas na rede elétrica são controladas pela amplitude e fase das correntes sintetizadas em relação à tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Este modo de controle será estudado nesta seção. A modelagem foi baseada em Yazdani e Iravani (2010).

Figura 10: Visão geral do controlador de corrente associado à rede elétrica



FONTE: Arquivo pessoal

De acordo com a Figura 10, observa-se que a dinâmica do lado CA é determinada conforme as equações abaixo:

$$L_f \frac{di_a}{dt} = -R_f i_a + V_{ta} - V_{sa} \quad (4)$$

$$L_f \frac{di_b}{dt} = -R_f i_b + V_{tb} - V_{sb} \quad (5)$$

$$L_f \frac{di_c}{dt} = -R_f i_c + V_{tc} - V_{sc} \quad (6)$$

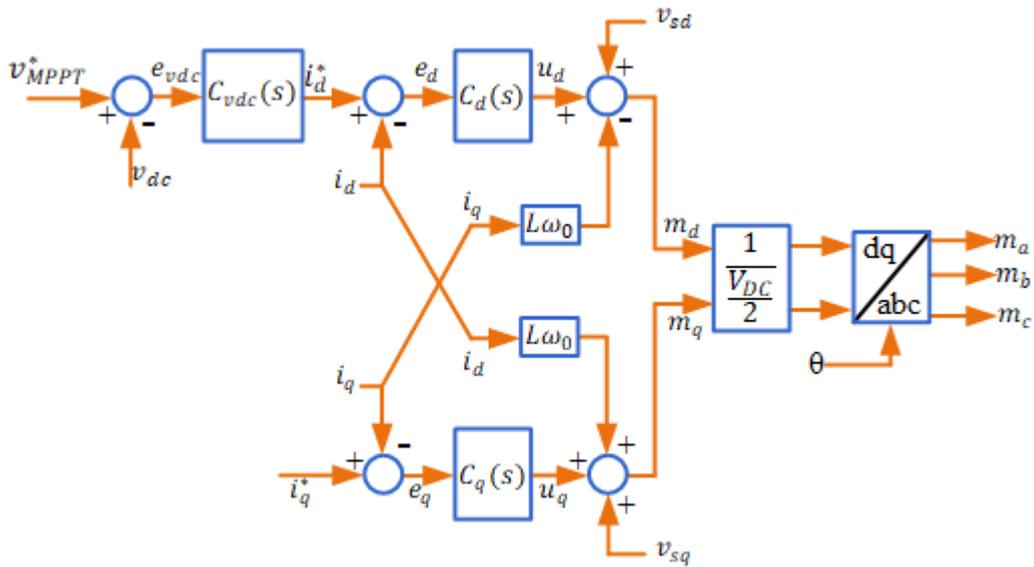
Aplicando a transformada de Park em (4), (5) e (6) e assumindo condições de estado permanente, tem-se em (7) e (8) a dinâmica do lado CA no sistema de coordenadas dq .

$$L_f \frac{di_d}{dt} = L_f \omega_0 i_q - R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (7)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = L_f \omega_0 i_d - R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (8)$$

A Figura (11) ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle da corrente no sistema de coordenadas síncrono. Pode-se observar que o acoplamento entre i_{sd} e i_{sq} é eliminado pela compensação *feed-forward* de desacoplamento.

Figura 11: Diagrama de blocos do sistema de controle de corrente



FONTE: Arquivo pessoal

Após aplicar o desacoplamento das dinâmicas dos eixos d e q , pode-se considerar o sistema expresso por:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + V_{td} - V_{sd} \quad (9)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + V_{tq} - V_{sq} \quad (10)$$

Conforme (9) e (10), observa-se que há uma relação entre as tensões de saída do inversor e da rede elétrica. A primeira, (V_t) é modelada como a entrada de controle, já a segunda, (V_s), como um distúrbio. A fim de simplificar o equacionamento, essa relação pode ser modelada como uma única ação de controle, u_d para (11) e u_q para (12), resultando em:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = -R_f i_d + u_d \quad (11)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -R_f i_q + u_q \quad (12)$$

Aplicando-se a transformada inversa de Laplace em (11) e (12), tem-se

$$L_f i_d s = -R_f i_d + u_d \quad (13)$$

$$L_f i_q s = -R_f i_q + u_q \quad (14)$$

Nesse caso, a função de transferência do sistema pode ser expressa por:

$$\frac{i_d}{u_d} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (15)$$

$$\frac{i_q}{u_q} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (16)$$

Para esse sistema, tem-se a malha simplificada de controle no sistema de coordenadas síncrono dq . Pode-se perceber que o comportamento das componentes dq é idêntico, possibilitando, portanto, o projeto do controlador em apenas um eixo, mas os mesmos ganhos serão aplicados em ambas as malhas de controle.

Sabe-se ainda que quando se faz uso da transformada de Park, suas componentes passam a possuir um comportamento estacionário no tempo, uma vez que esse sistema é de coordenadas girantes. Com isso, as correntes i_d e i_q nas respectivas malhas de controle devem seguir referências constantes, o que permite o uso de um controlador PI, segundo o princípio do modelo interno.

A função de transferência característica do controlador PI pode ser escrita como:

$$C(s) = \frac{K_{p,i} s + K_{i,i}}{s} \quad (17)$$

em que $K_{p,i}$ é o ganho proporcional em (H/s) e $K_{i,i}$ o ganho integral em (Ω/s) do controlador PI da malha de controle da corrente.

Sendo assim, considerando apenas a dinâmica em componente d , a multiplicação de (15) por (17) fornece a função de transferência em malha aberta do controle de corrente, conforme a seguir:

$$M_{a,i}(s) = \left(\frac{K_{p,i}}{L_f s} \right) \frac{s + \frac{K_{i,i}}{K_{p,i}}}{s + \frac{R_f}{L_f}} \quad (18)$$

É possível observar em (18) que o sistema possui um polo em $s = -R_f/L_f$. Pela técnica de cancelamento de polos e zeros, o zero do controlador PI, ou seja, $s = -K_{i,i}/K_{p,i}$ deve estar situado em cima do polo da função de transferência. Assim, estabelece-se a relação:

$$\frac{K_{i,i}}{K_{p,i}} = \frac{R_f}{L_f} \quad (19)$$

Após esse cancelamento, é fácil perceber que a função de transferência em malha aberta da planta de controle se transforma em:

$$M_{a,i}(s) = \frac{K_{p,i}}{L_f s} \quad (20)$$

E a função de transferência em malha fechada é dada por:

$$M_{f,i}(s) = \frac{1}{\frac{L_f}{K_{p,i}} s + 1} \quad (21)$$

Como observado em (21), a função de transferência é de primeira ordem. Sabe-se que função de transferência em malha fechada do primeiro grau é apresentada conforme a seguir:

$$M_f(s) = \frac{1}{\tau_i s + 1} \quad (22)$$

em que τ_i é a constante de tempo do sistema em (s).

Sendo assim, comparando as Equações (21) e (22), pode-se determinar o valor de $K_{p,i}$:

$$K_{p,i} = \frac{L_f}{\tau_i} \quad (23)$$

E substituindo (23) em (19), é possível determinar o valor de $K_{i,i}$:

$$K_{i,i} = \frac{R_f}{\tau_i} \quad (24)$$

Yazdani e Iravani (2010) sugerem que a constante de tempo deve ser $0,5 \text{ ms} \leq \tau_i \leq 5 \text{ ms}$ para sistemas cuja a frequência fundamental é $f = 60 \text{ Hz}$. Assumindo, então, uma constante de tempo $\tau_i = 1 \text{ ms}$ e, conforme já mencionado, $R_f = 0,5 \Omega$ e $L_f = 1 \text{ mH}$, tem-se os seguintes parâmetros do controlador de corrente:

Tabela 1: Parâmetros

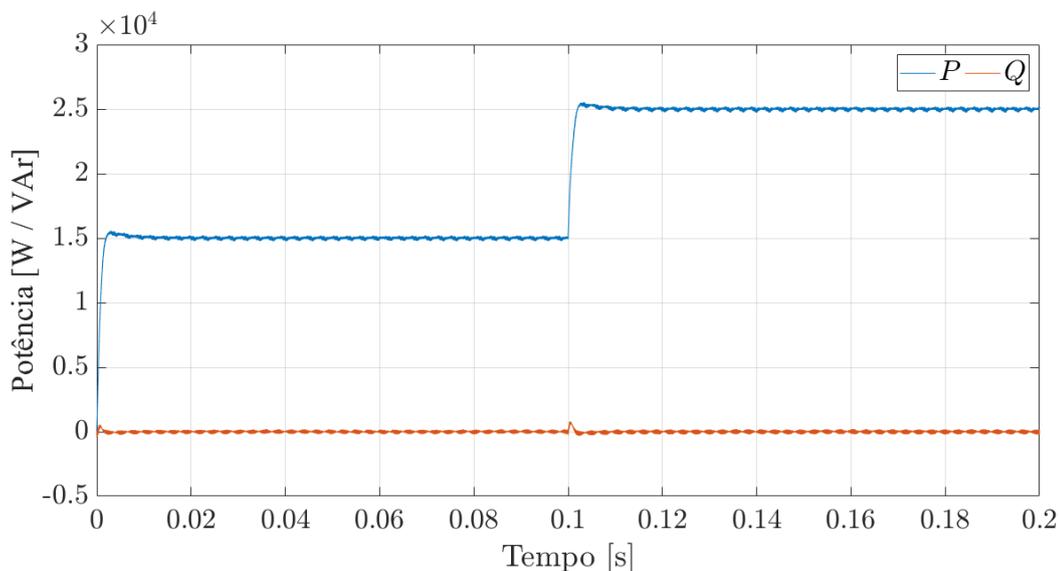
Parâmetro	Valor
$K_{p,i}$	1 H/s
$K_{i,i}$	50 Ω/s

Fonte: Arquivo pessoal

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

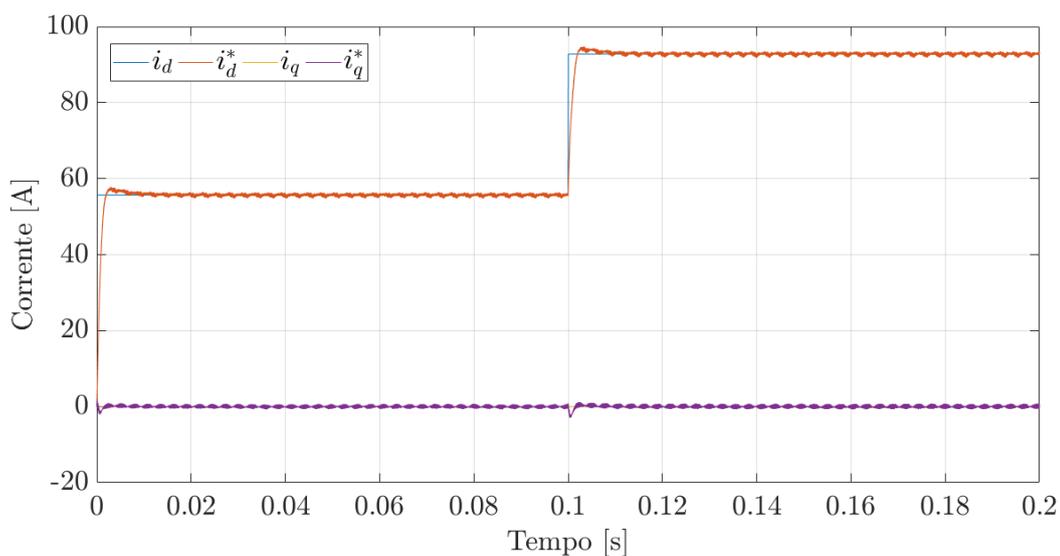
De acordo com o controlador de corrente apresentado na seção metodologia, e simulado no *software* MATLAB, obtêm-se os seguintes resultados (Figuras 12, 13 e 14).

Figura 12: Gráfico de Potência Ativa P e Potência Reativa Q versus Tempo.



FONTE: Arquivo pessoal

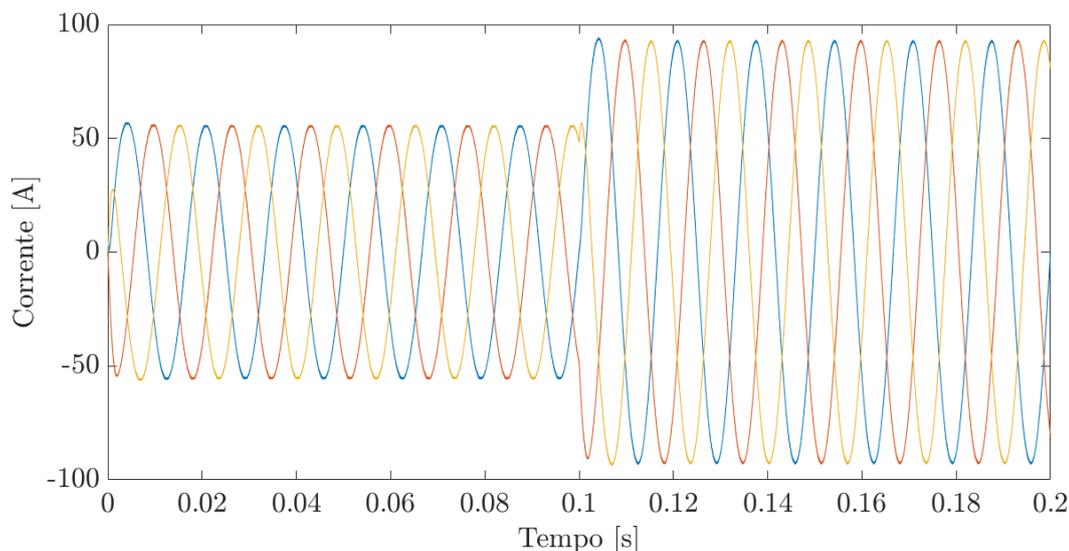
Figura 13: Gráfico de corrente direta i_d e corrente quadratura i_q versus Tempo.



FONTE: Arquivo pessoal

Com o aumento da intensidade da corrente injetada (Figura 14) no controlador de corrente, observa-se nas figuras anteriores, que a potência ativa e a corrente direta aumentam proporcionalmente, ao contrário da potência reativa e da corrente quadratura, que permanecem praticamente invariável, evidenciando a eficiência do controlador de corrente, juntamente com o inversor, entre o painel fotovoltaico e a rede de distribuição.

Figura 14: Gráfico da Corrente trifásica versus Tempo.



FONTE: Arquivo pessoal

Eficiência percebida do controlador de corrente, pois a potência reativa praticamente não variou, portanto, as componentes harmônicas, ruídos e interferências eletromagnéticas estão sendo “rejeitadas”. Esses três parâmetros são os maiores responsáveis por sobreaquecerem o sistema e diminuir a eficiência.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos, conclui-se a eficácia dos controladores de corrente e do arquivo de simulação do modelo do arranjo fotovoltaico através do *software* MATLAB.

Ressalta-se a importância do controlador de corrente, juntamente com o inversor, para conversão CC em AC, entre o painel solar fotovoltaico e a rede elétrica de distribuição, pois o painel fotovoltaico fornece tensão e corrente contínua, e a rede elétrica é de característica alternada.

O presente trabalho poderá ser utilizado como fonte de consulta aos estudantes e profissionais para levar adiante a pesquisa do respectivo trabalho, bem como, aprimorá-lo.

ABSTRACT

This research project is a contribution to the modelling and control study of a static converter voltage source used to connect a photovoltaic generation system to the Distribution Grid. The main objective is to model a photovoltaic solar module, which allows investigating the dynamic characteristics of the arrangement, from variations of solar irradiation and temperature, to model also the DC-AC interface electronic converter and the distribution network. Studies of the types and performances of synchronism circuits used to synchronize the voltages generated by static converters with the voltages of the system (electrical grid) of the control techniques applied to voltage source converters connected in parallel with the AC grid are presented. Therefore, the simulation results that validate the mathematical models acquired in the studies are presented.

Key words: Photovoltaic solar array, Voltage source converter, converter modeling and control, power electronics.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de Potência**. 1. ed. .Editora Prentice Hall, São Paulo, SP, 2000.

CASARO, M. M., and MARTINS, D. C. **Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação**. *Eletrônica de Potência* 13, 3(2008), 141–146.

GOW, J. A., and MANNING, C. D. **Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies**, *IEE Proc. on Electric Power Applications*, vol. 146, no. 2, p. 193-200, March 1999.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. Editora Pearson, São Paulo, SP, 2014.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. **Voltage-Sourced Converters in Power Systems: Modeling, Control, and Applications**, Wiley IEEE Press, 2010.