



---

## Conexão de painéis solares fotovoltaicos a rede elétrica: estudo de caso de uma empresa do ramo varejista.<sup>1</sup>

*MENDES, Pedro Augusto Rezende<sup>2</sup>*  
*Centro Universitário Academia - UniAcademia*  
*JÚNIOR, Dalmo Cardoso da Silva<sup>3</sup>*  
*Centro Universitário Academia - UniAcademia*

### RESUMO

A busca por fontes renováveis, como a eólica e a solar, tem aumentado cada vez mais no mundo. Isso se deve ao fato dos problemas ambientais causados pelas formas tradicionais com que é gerada a energia. E a energia solar vem ganhando cada vez mais espaço no Brasil, principalmente pela redução dos custos das células solares, e pela otimização dos custos com energia. Logo, este trabalho aborda um estudo de caso sobre a conexão de um sistema de geração distribuída (usina fotovoltaica) à rede de distribuição de energia elétrica. Neste trabalho será apresentada uma metodologia estratégica de controle da corrente por meio de conversores fonte de tensão. Tal tipo de controle será exposto com a utilização de técnicas de rastreamento da frequência de operação da rede elétrica, o PLL. Além disto, será abordado um algoritmo de controle para rastreamento do ponto de máxima potência da usina fotovoltaica, a fim de extrair o seu máximo desempenho de geração de energia elétrica. Todas as simulações foram realizadas com dados reais através do *software* comercial *MATLAB/Simulink*.

**Palavras-chave:** Energia solar, eletrônica de potência, PLL, inversor.

## 1 INTRODUÇÃO

Apesar da diversidade de fontes primárias, que compõem a matriz energética mundial, como o carvão mineral, o petróleo, o urânio, gás natural, energia eólica, hidráulica, solar e a biomassa, a utilização de fontes esgotáveis, como os combustíveis

---

<sup>1</sup> Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário Academia - UniAcademia, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Academia - UniAcademia.

<sup>3</sup> Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário Academia - UniAcademia.

fosseis, são mais comumente utilizados que os demais. Por este motivo, a aplicação e viabilidade de fontes de energia renováveis têm aumentado muito nos últimos anos. Logo, o aproveitamento da energia solar se faz como uma alternativa interessante e necessária.

O aproveitamento da energia solar, considerada limpa e inesgotável, mesmo não sendo aproveitada em sua totalidade devido a razões naturais e técnicas, merece uma atenção devido ao seu grande potencial de exploração frente às recentes perspectivas mundiais. E a tecnologia que visa tal utilização da energia solar é chamada de conversão fotovoltaica, que é um meio de conversão direta da irradiação solar em energia elétrica, com o auxílio de dispositivos conhecidos como células fotovoltaicas (*photovoltaic* – PV). Várias dessas células compõem os módulos fotovoltaicos.

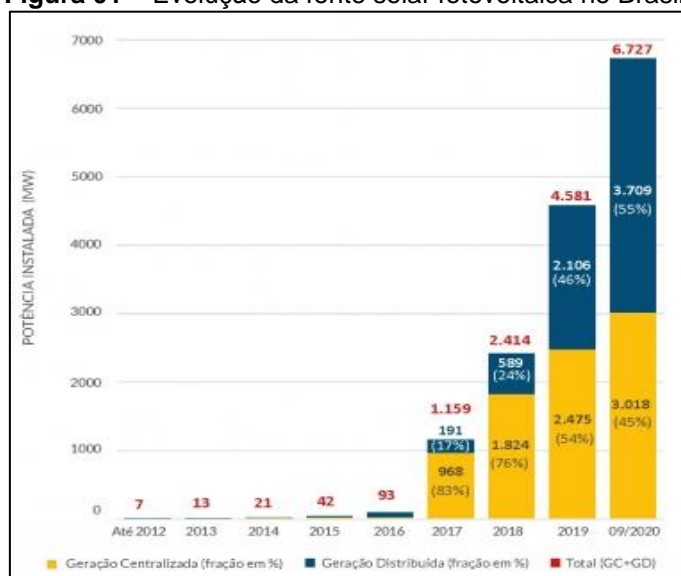
O grande destaque dessa tecnologia é o seu atendimento elétrico a regiões remotas, constituindo os sistemas PV isolados ou sistemas *off-grid*, onde não há conexões com a rede elétrica, sendo assim, são necessários componentes para o armazenamento da energia produzida. Em compensação, os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), ou sistemas *on-grid*, funcionam de maneira a injetar a energia produzida à rede elétrica da concessionária. Este último, sistemas PV conectados à rede, agrega o conceito de geração distribuída (GD), que é a geração de energia elétrica em pequena escala e mais próximo dos consumidores finais. Logo, a instalação de tais sistemas deixam de ser concentrada em um ponto para ser disseminada em sistemas distribuídos e de menor potência, que são as micro e minigerações.

Devido a este fato, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) como o intuito de reduzir as dificuldades fiscais, aprovou a Resolução Normativa nº 428/2012, do módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), estabelecendo procedimentos de acesso ao sistema de distribuição. Sendo que, o tipo de geração deve ser somente por fontes renováveis com microgeração e minigeração inferiores ou iguais a 100 kW e 1 MW, respectivamente. Permitindo também que, o fluxo de energia seja bidirecional e que o consumidor que fornece energia para a rede terá créditos de energia.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), o Brasil vem crescendo a cada ano em relação a potência instalada no país. Na Figura 01,

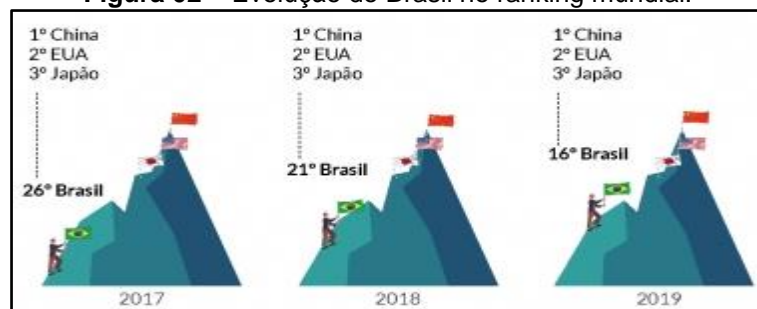
observa-se que no ano de 2020 o país apresenta 3.018 MW de geração centralizada e 3.709 MW de geração distribuída, totalizando 6.727 MW de potência instalada. Ainda segundo a ABSOLAR, Figura 02, em 2019 o Brasil concluiu o ano na 16ª posição no ranking mundial na evolução de energias renováveis.

**Figura 01** – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: ANEEL/ ABSOLAR.

**Figura 02** – Evolução do Brasil no ranking mundial.



Fonte: ABSOLAR, 2020.

## 1.1 OBJETIVOS

Considerando o que foi abordado, o objetivo inicial deste trabalho é entender os princípios básicos que envolvem a energia solar fotovoltaica e o estudo da conexão, através de simulação, de um sistema fotovoltaico à rede elétrica.

Além de tal estudo, o objetivo específico é a modelagem do painel fotovoltaico, assim como a modelagem e controle do conversor eletrônico de potência e qual o tipo de algoritmo utilizado para o rastreamento do ponto de máxima potência.

Os dados que utilizados para as análises são de uma usina solar, situada em empresa do ramo varejista, localizada para na BR – 040 em Juiz de Fora, Minas Gerais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O efeito fotovoltaico nada mais é que a geração de energia elétrica a partir da luz do Sol. Tal efeito, foi observado pela primeira vez em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel. Ele observou que determinados materiais, quando expostos à luz, produzem pequenas quantidades de corrente elétrica. Em 1876, o primeiro dispositivo fotovoltaico foi desenvolvido, porém somente em 1956, devido a “corrida espacial” e a busca por fornecimento de energia, que se iniciou a produção industrial.

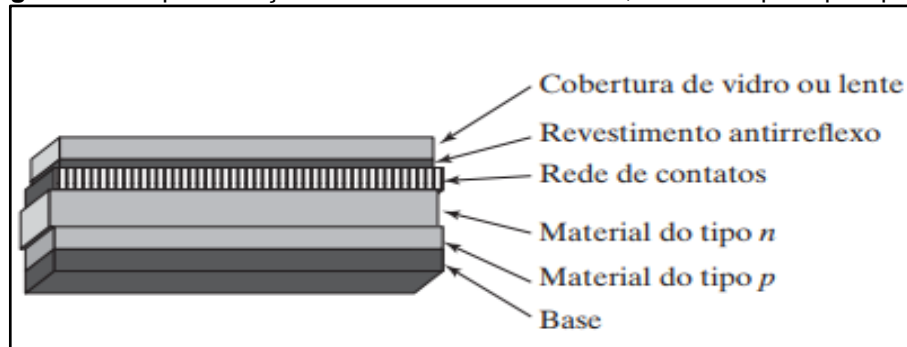
### **2.1. CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**

As células PV são compostas por materiais semicondutores, transformando a energia da luz solar em elétrica. Esses semicondutores têm a presença de duas bandas de energia: a banda de condução (onde não há elétrons) e a banda de valência (onde há a presença de elétrons). O semicondutor mais usado é o de silício, pelo fato de seus átomos que ao se interligarem, formam uma rede cristalina. Muito embora, existam diversos outros tipos de materiais utilizados além do silício, como o telureto de cádmio.

Pode-se adicionar átomos de gálio ou boro, por exemplo, em uma metade do silício, como um dopante P e na outra metade, fosforo ou lítio como dopantes N, formando assim a junção PN. A Figura 03 apresenta as principais partes de uma célula PV onde elétrons livres do lado N passam para o lado P, acumulando elétrons. O revestimento antirreflexo é o responsável por assegurar que entre o máximo de luz possível na célula, garantindo que uma quantidade mínima de luz seja refletida, e se uma junção do tipo PN for exposta a fótons de energia maior que a energia mínima necessária para um elétron deslocar da banda de valência para a banda de condução, ocorrerá uma aceleração das cargas e conseqüentemente uma corrente através da junção. Logo, o efeito fotovoltaico

é o deslocamento dessas cargas e a rede de contatos que fará esse deslocamento por meio de um material condutor.

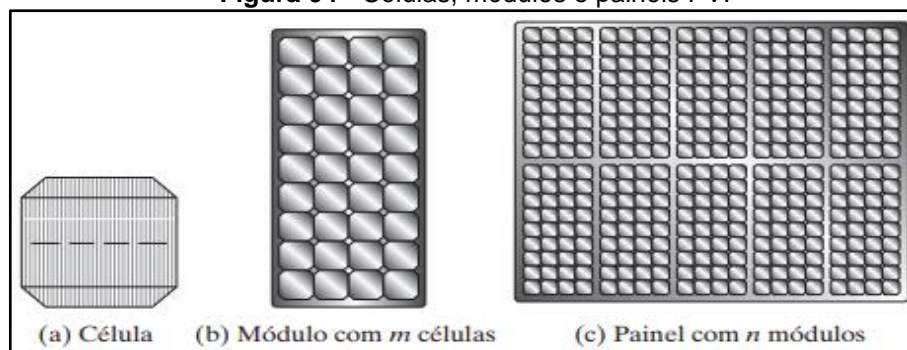
**Figura 03** - Representação de uma célula fotovoltaica, com suas principais partes.



Fonte: RASHID (2014).

Como mostrado na Figura 04, as células PV são os menores elementos de um arranjo PV e os mais básicos, sendo os responsáveis pela conversão da luz em energia solar. Ao serem combinadas em série e/ou paralelo, podem formar um módulo PV, e a combinação do módulo em série e/ou paralelo, pode originar os painéis PV.

**Figura 04** - Células, módulos e painéis PV.



Fonte: RASHID (2014).

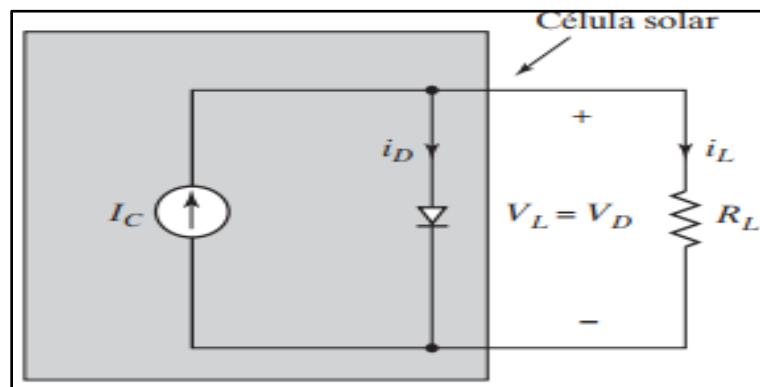
## 2.2. MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos são identificados por sua potência elétrica de pico ( $W_p$ ), e ao supor que um painel, como mostrado na Figura 04, seja composto de  $m$  células solares e  $n$  módulos PV, a potência de saída desse painel PV é dada por (1),

$$P = mnVI \quad (1)$$

Segundo RASHID (2014), as células PV têm seu funcionamento semelhante à de um diodo, polarizado reversamente e uma fonte de corrente, como ilustrado na Figura 05, demonstrando um modelo ideal de módulo PV.

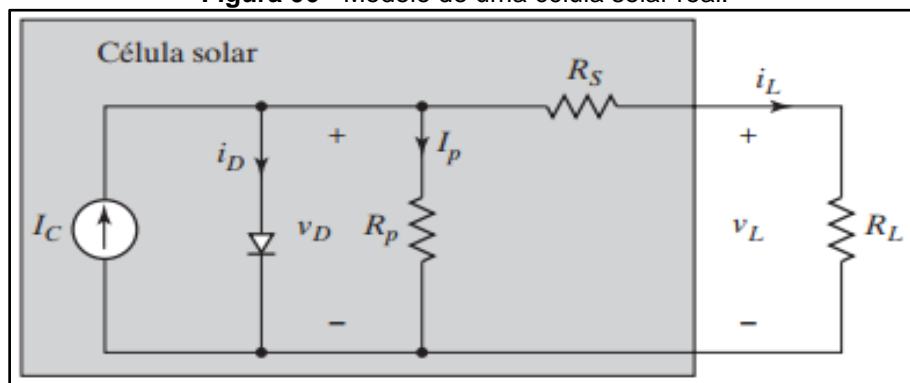
**Figura 05** - Modelo de uma célula solar com fonte de corrente.



Fonte: RASHID (2014).

Porém, para uma célula real, ou seja, uma célula PV não ideal, teremos outro tipo de circuito equivalente, conforme a Figura 06, onde as perdas elétricas são consideradas.

**Figura 06** - Modelo de uma célula solar real.



Fonte: RASHID (2014).

A corrente de saída desse circuito é expressa por (2)

$$I_L = I_{ph} - I_r \left[ e^{q(V_L + I_L R_s) / \eta K T} - 1 \right] - \frac{V_L + I_L R_s}{R_p} \quad (2)$$

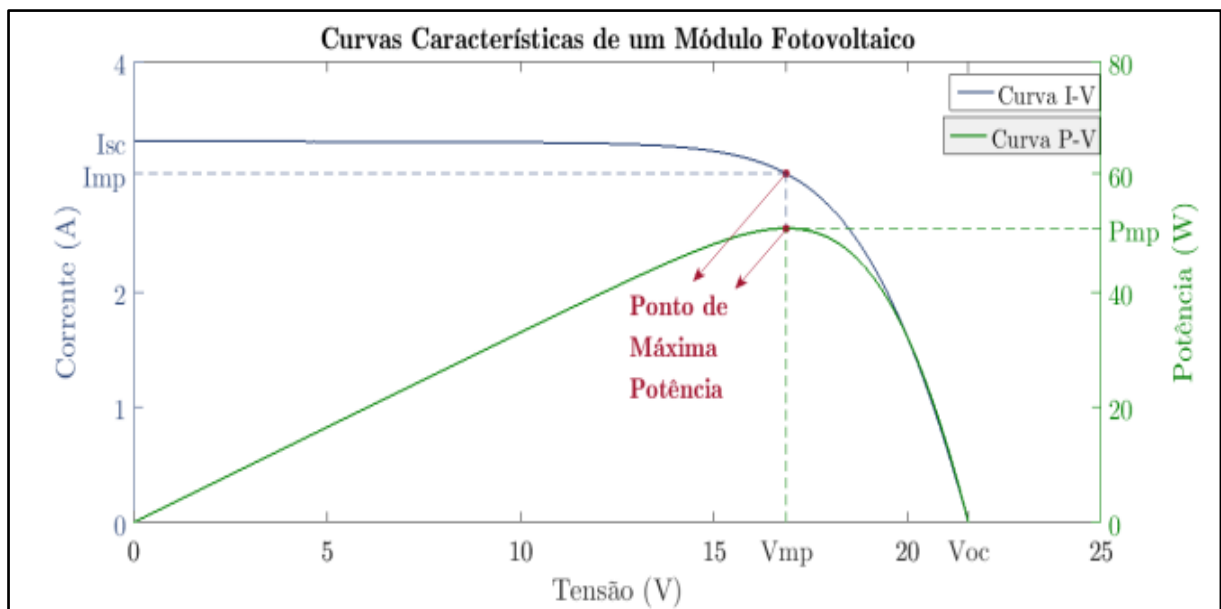
onde,  $V_L$  e  $I_L$  são a tensão e a corrente de saída da célula PV;  $I_{ph}$  é a Foto-corrente;  $I_r$  é a Corrente de saturação;  $R_s$  e  $R_p$  são as resistências série e paralela;  $q$  é a carga do elétron, ( $1,6 \times 10^{-19} C$ );  $k$  é a constante de Boltzmann, ( $1,38 \times 10^{-23} J/k$ );  $\eta$  é o fator de qualidade da junção p;  $T$  é a Temperatura ambiente em Kelvin.

A Equação (2) resultará na característica I-V (corrente – tensão) da célula PV.

### 2.3. CARACTERÍSTICA CORRENTE – TENSÃO

A Figura 07 aponta a curva característica de um módulo fotovoltaico. A curva é a representação dos valores de corrente de saída em função da tensão, curva corrente versus tensão (I-V). Essa curva é obtida, considerando condições padrões, ou seja, considerando a irradiação solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  e a temperatura da célula em  $25^\circ C$ .

**Figura 07** – Curva característica I – V de um módulo fotovoltaico.



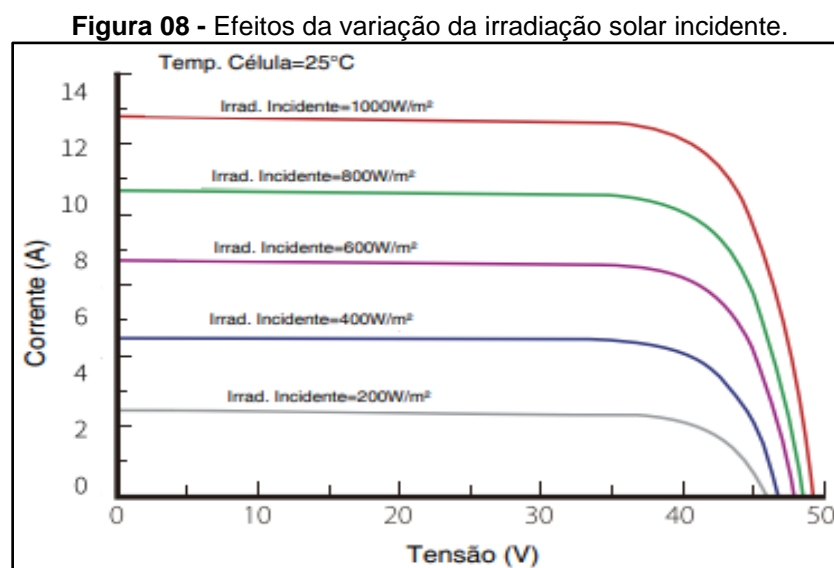
**Fonte:** DEOTTI (2017).

Através da curva I-V, atinge-se os parâmetros necessários para determinar a qualidade e o desempenho de um módulo fotovoltaico, em condições padrões de funcionamento. Como:

- Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ): valor máximo de corrente nos terminais, correspondendo a máxima corrente gerada pela célula;
- Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ): máximo valor que a tensão pode alcançar nos terminais;
- Ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ): localizada no ponto da curva I-V, onde observa-se a máxima transferência de potência das células que constituem o módulo para a carga conectada em seus terminais.

#### 2.4. RASTREADOR DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)

Há dois fatores que influenciam diretamente na tensão terminal e corrente de saída dos módulos, a variação da temperatura de operação da célula e a irradiação incidente. A foto-corrente gerada é dependente dos fótons incidente, logo, a corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ) varia linearmente com o aumento da radiação solar, conforme Figura 08.

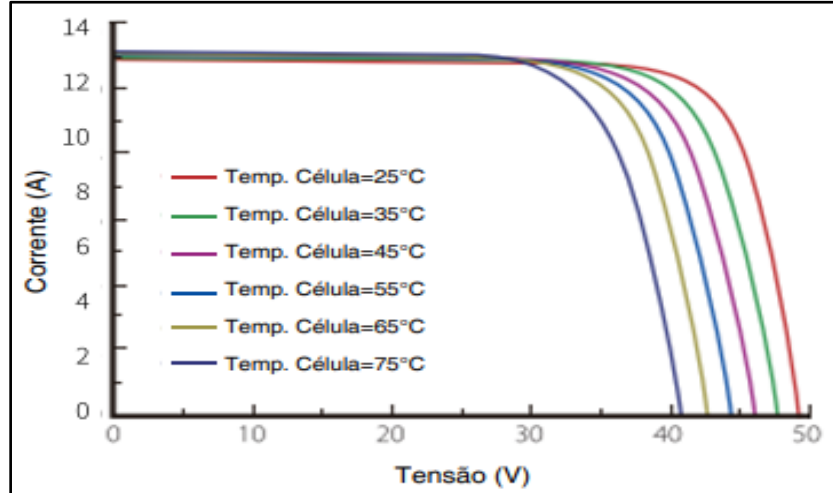


Fonte: Datasheet do fabricante do painel solar LONGI.



A Figura 09, reflete a variação da temperatura de operação da célula. Nessa Figura, observa-se que a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) diminui nitidamente, alterando o ponto de máxima potência.

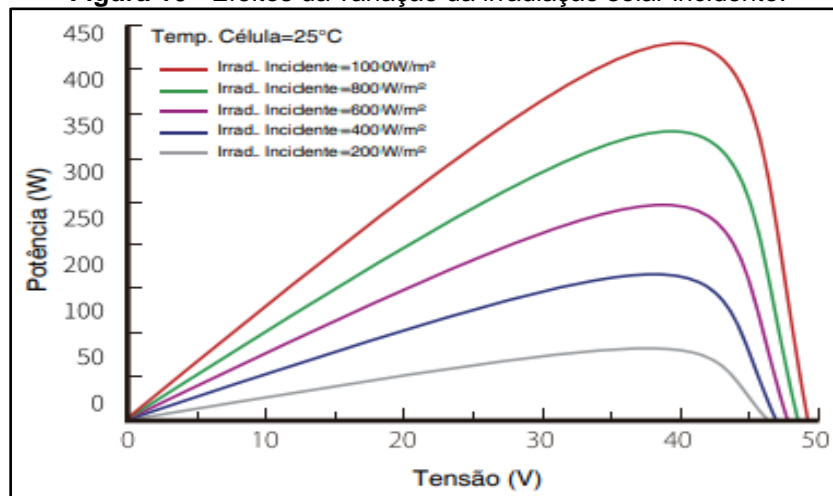
**Figura 09** - Efeitos da variação de temperatura de operação da célula PV.



Fonte: Datasheet do fabricante do painel solar LONGI.

A Figura 10, expressa a variação da irradiação solar de operação da célula, com a temperatura fixa em 25°C, e com a diminuição da irradiação a potência tende a diminuir, assim como a tensão.

**Figura 10** - Efeitos da variação da irradiação solar incidente.



Fonte: Datasheet do fabricante do painel solar LONGI.

Dessa forma, existe apenas um ponto da curva em que os valores de tensão ,  $V_{mp}$ , e corrente,  $I_{mp}$ , se relacionam à potência máxima da célula PV, conhecido como o ponto de máxima potência MPP (*Maximum Power Point*). A potência no MPP,  $P_{mp}$ , é o produto da tensão  $V_{mp}$  pela corrente  $I_{mp}$ .

Para diferentes valores de irradiação solar e temperaturas de operação, teremos diferentes MPP's, e para garantir que a transferência de potência gerada pela fonte seja máxima, é necessário a implementação de alguma técnica para buscar o MPP. Quando o sistema não opera no MPP, a potência que é fornecida para a carga é inferior à máxima potência que poderia ser transferida.

## 2.5. CONVERSORES FONTE DE TENSÃO CC – CA

Os conversores CC-CA (inversor), ou CA-CC (retificador), são dispositivos eletrônicos que têm como função converter a tensão de entrada CC em CA ou vice-versa, de forma a garantir a frequência e tensão e/ou corrente de saída desejada.

Os inversores podem ser monofásicos, bifásicos ou trifásicos. Para um inversor ideal, sua tensão de saída deve ser senoidal. Porém, na prática, a tensão de saída não é senoidal e contém níveis de distorções harmônicas características [RASHID].

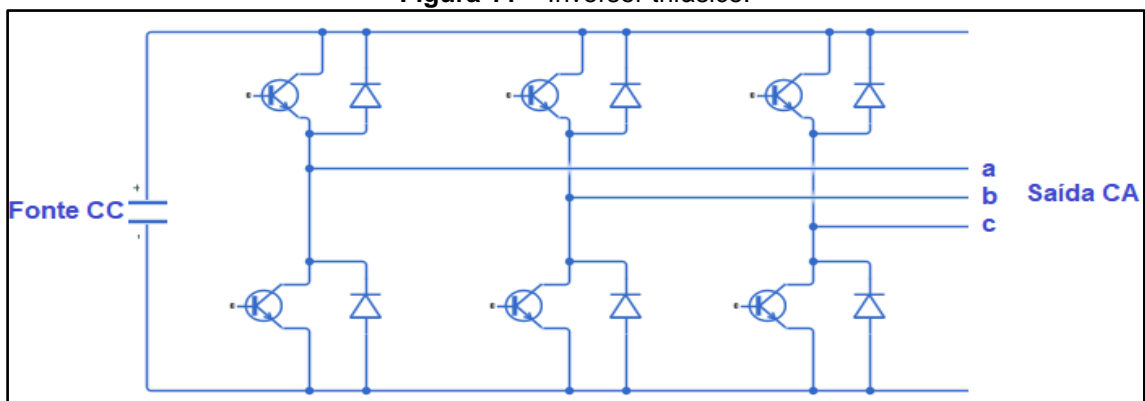
Os principais conversores CC-CA trifásicos (objetivo do trabalho) são os Inversores Fonte de Tensão (VSC – *Voltage Source Converters*), com uma fonte de tensão contínua, e os Inversores Fonte de Corrente (CSC – *Current Source Converters*), com uma fonte primária do tipo fonte de corrente contínua. Esses inversores utilizam de técnicas de chaveamento para comutar os dispositivos como MOSFETs, IGBTs, GTOs, BJT's e SITs (CAMARGO, 2016). Tais características de conversão concedem determinados padrões de controle do inversor para a tensão e/ou corrente de saída CA, logo, podem ser classificados em três categorias:

- Controle da tensão de entrada CC;
- Controle da tensão de saída CA do inversor;
- Controle da corrente de saída do inversor.

Para este trabalho, os inversores irão converter uma corrente CC, fornecida pelo arranjo fotovoltaico, para uma corrente CA de saída variável trifásica por meio do controle

de corrente, efetuado pelo chaveamento dos seis dispositivos semicondutores, conforme a Figura 11. O controle desse tipo de chaveamento se dará pela modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*), sendo o método mais comum que pode conferir ao inversor a característica de atuação como fonte controlada e se comportar perante a rede CA como fonte de tensão ou de corrente controlada.

**Figura 11 – Inversor trifásico.**



**Fonte:** Autor.

Um ponto interessante que vale ser mencionado é a detecção de ilhamento ou anti-ilhamento, que é uma função obrigatória nos inversores que são utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Esta função garante que o sistema fotovoltaico seja desligado caso ocorra faltas na rede elétrica, como quedas de energia ou desligamento para manutenção da rede da concessionária, e é religado automaticamente quando a rede é ligada novamente (ALVES, 2016). Ou seja, tal função garante que o sistema não injete energia na rede, enquanto ela estiver desligada. No entanto, a função de anti-ilhamento não é escopo deste trabalho.

## 2.6. TRANSFORMADA DE PARK

As grandezas de fase de sinais elétricos podem ser representadas por vetores espaciais, tornando as equações dos sistemas elétricos mais compactas por meio de notações matriciais. E, por vezes, é conveniente a mudança de coordenadas do sistema estacionário  $abc$  para um sistema mais simples dos modelos matemáticos, como os sistemas referenciais  $\alpha\beta 0$  ou o  $dq0$  (sendo este, o sistema referencial adotado para este trabalho). O sistema proposto por Park utiliza de uma transformação que permite a

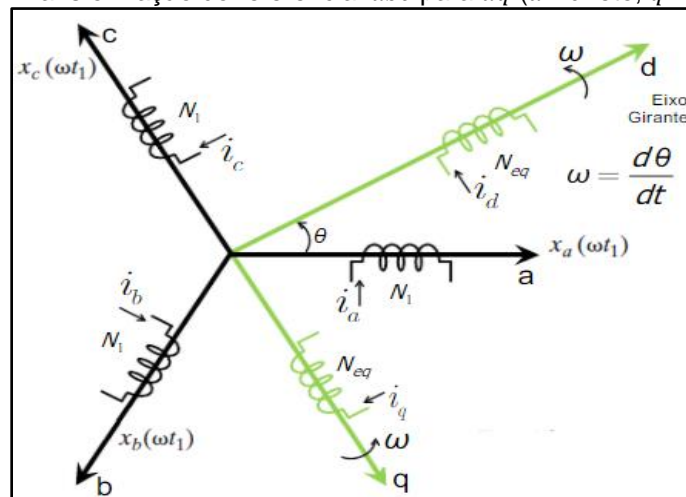
representação dos sinais trifásicos em função do tempo em um sistema de coordenadas  $dq0$  síncrono.

A matriz de transformação de Park, também conhecida por “transformação  $abc/dq0$ ”, é dada por (3).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_d \\ \mathbf{x}_q \\ \mathbf{x}_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta - 2\pi/3) & -\text{sen}(\theta - 4\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a \\ \mathbf{x}_b \\ \mathbf{x}_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

sendo  $\theta$  a posição angular do eixo  $d$ , em relação à fase  $a$ , conforme a Figura 12.

**Figura 12** – Transformação do referencial  $abc$  para  $dq$  ( $d$  - direto,  $q$  - quadratura).



**Fonte:** Autor.

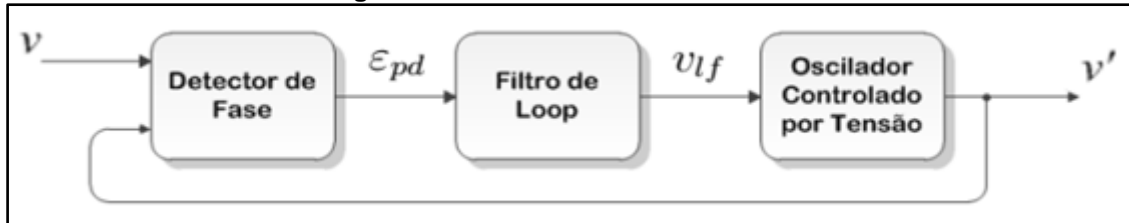
## 2.7. PLL (PHASE-LOCKED LOOP)

Phase Locked Loop (PLL) é o responsável por fornecer um sinal de referência de fase em sincronia com o sistema de corrente alternada em questão (JOVCIC, 2003). O PLL é amplamente utilizado na eletrônica de potência seja na forma de software quanto na forma de hardware (BRASIL, 2013).

Em aplicações com os conversores de potência conectados à rede elétrica, o PLL é como um sistema de controle em malha-fechada realimentado, estimando e sincronizando o conversor com a componente fundamental da rede. Para isso, é executada uma comparação do sinal de fase da saída com o sinal de entrada, atuando

na diferença, ou seja, no erro. Pode-se afirmar que as técnicas de PLL possuem três estruturas básicas (SILVA e LOPES, 2004), de acordo com a Figura 13 e 14.

**Figura 13** – Estrutura básica de um PLL.

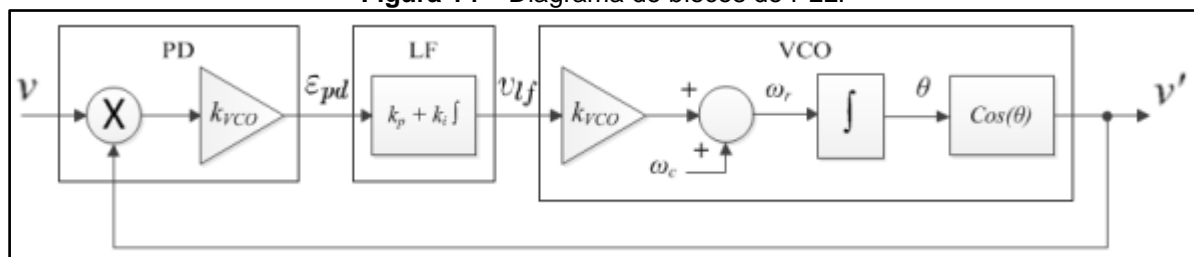


Fonte: Autor.

Na Figura 13 observa-se que a saída do Detector de fase (*Phase Detector*) gera um erro ( $\epsilon_{pd}$ ) que é a diferença de fase entre a referência ( $v$ ) e o sinal de saída ( $v'$ ). O filtro de loop (*Loop Filter*) é como um dispositivo cujo funcionamento tem uma função de transferência de um filtro passivo, geralmente sendo controlado por um controlador PI (Proporcional Integral). E o oscilador controlado por tensão (VCO - *Voltage Controlled Oscillator*) trata-se de um dispositivo não linear, que produz respostas oscilantes em uma frequência controlada pela tensão de entrada ( $v_{lf}$ ), que fora determinada pela resposta do filtro (*Loop Filter*), sendo o sinal CC do erro.

A Figura 14 é a representação do diagrama de blocos do PLL de forma mais detalhada, com o somatório das tensões no bloco do detector de fase sendo tratado por um ganho que gera um erro, e neste erro é aplicado ganhos característicos de um filtro passivo. Já no oscilador controlado por tensão, teremos outro somatório para comparação do sinal que vem do filtro com o sinal da frequência de entrada ( $\omega_c$ ), de forma a rastrear qual é a frequência da rede pela diferença dos sinais. Logo,  $\omega_t$  é a frequência que o PLL obteve da rede.

**Figura 14** – Diagrama de blocos do PLL.



Fonte: Autor.

### 3 METODOLOGIA

O principal objetivo de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica é a geração de energia para o consumo local, com o intuito de reduzir o consumo da rede pública podendo até gerar excedentes em créditos de energia. Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCRs) podem ser centralizados, como grandes usinas de geração, assim como mini e microssistemas descentralizados da geração distribuída, que podem ser instalados para qualquer tipo de consumidor final.

#### 3.1. PARÂMETROS DA USINA FOTOVOLTAICA

A usina utilizada como estudo de caso utiliza módulos policristalinos, tecnologia mais confiável, disponível e acessível, sendo predominante no mercado mundial nos empreendimentos fotovoltaicos.

Esta usina dispõe de um sistema fotovoltaico de 1.002,24 kWp de potência instalada (840 kW de potência total CA), sendo capaz de abastecer 550 residências com consumo médio de 200 kWh por mês, módulos FV de 435 Wp do fabricante LONGI, dispostos em 128 *strings* série em paralelo e 14 inversores SUNGROW de 60 kW de potência nominal, com saída de 380 V a 60 Hz, e que após a conversão para corrente elétrica alternada, a tensão elétrica será elevada para média tensão na faixa de 22 kV (CEMIG, CP009 2012). Esta energia gerada e injetada na rede será compensada no consumo de sete instalações da empresa do ramo varejista.

##### 3.1.1. DADOS DO PAINEL SOLAR

A escolha dos módulos foi realizada considerando fatores comerciais e técnicos. Conforme o catálogo apresentado pelo fabricante, os módulos utilizados possuem as características dispostas na Tabela 01.

**Tabela 01 – Características técnicas do módulo fotovoltaico.**

<b>Características do módulo fotovoltaico</b>			
Fabricante		LONGI	
Modelo		LR4 – 72HPH – 435M	
Tipo de célula		Silício Policristalino	
Número de células		144 (6 x 24)	
<b>Condições elétricas</b>			
		STC <sup>4</sup>	NOTC <sup>5</sup>
Potência nominal	[Wp]	435	322,22
Tensão nominal	[V]	40,8	37,7
Corrente nominal	[A]	10,67	8,56
Tensão em circuito aberto ( $V_{oc}$ )	[V]	49,4	46,1
Corrente em circuito aberto ( $I_{sc}$ )	[A]	11,26	9,08
Coeficiente de temperatura ( $P_{mpp}$ )	[%/ °C]	-0,37	

**Fonte:** Informações de catálogo do fabricante LONGI.

### 3.1.2. DADOS DO INVERSOR

A escolha do inversor, equipamento responsável pela conversão da energia gerada pelos módulos em CC para CA, se deu pelos fatores comerciais e técnicos, assim como os módulos. Suas características estão descritas na Tabela 02.

4 STC: Condições Padrão de Teste” (STC – *Standard Testing Conditions*). Irradiância 1.000 W/m<sup>2</sup>, temperatura 25°C.

5 NOCT: Temperatura Nominal de Operação da Célula (NOCT – *Nominal Operating Cell Temperature*). Irradiância 800 W/m<sup>2</sup>, temperatura ambiente 20°C.

**Tabela 02** – Características técnicas do inversor fotovoltaico.

<b>Características do inversor fotovoltaico</b>		
Fabricante		SUNGROW
Modelo		SG60KTL
<b>Características de entrada (CC)</b>		
Máxima tensão de entrada	[V]	1.000
Faixa de tensão de operação MPPT	[V]	570 – 950
Máxima corrente de entrada	[A]	120
Número de MPPT	Un.	1
Número de pares de entrada	Un.	14
<b>Características de saída (CA)</b>		
Potência nominal	[kW]	60
Máxima corrente de saída	[A]	96
Tensão nominal de saída	[V]	310 – 480
Faixa de frequência de operação	[Hz]	50 / 60
FP na potência nominal		0,99
Eficiência máxima	%	98,9
Máxima distorção harmônica total (THD)	%	≤ 3

**Fonte:** Informações de catálogo do fabricante SUNGROW.

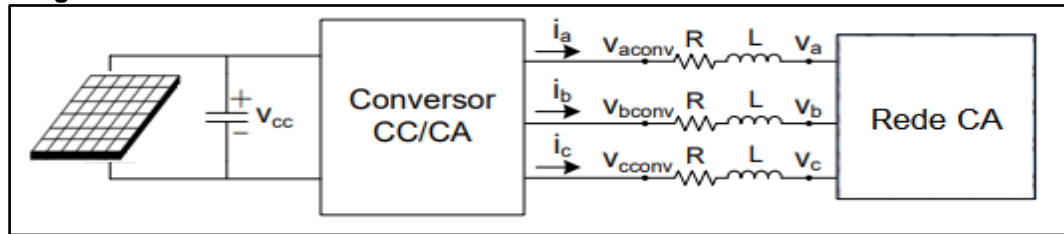
### 3.2. MODELAGEM DO ARRANJO FOTOVOLTAICO

As potências ativas e reativas que passam pelo conversor fonte de tensão (VSC) têm a necessidade de serem controladas para uma maior qualidade de entrega da corrente que será injetada na rede (ABDALRAHMAN, 2012), levando em consideração a compensação harmônica e dinâmica do controle. Dito isso, o controle no modo de corrente (CMC - *Current-Mode Control*) é a estratégia que será adotada devido a sua rápida resposta.

A Figura 15 ilustra o circuito básico e simplificado do conversor.



**Figura 15** – Conversor trifásico CC-CA conectado à rede elétrica com filtros indutivos.



Fonte: Autor.

Considerando a impedância das resistências e dos indutores,, temos as seguintes equações das correntes por fase,

$$v_{aconv}(t) - v_a(t) = R i_a(t) + L \frac{di_a(t)}{dt} \quad (4)$$

$$v_{bconv}(t) - v_b(t) = R i_b(t) + L \frac{di_b(t)}{dt} \quad (5)$$

$$v_{cconv}(t) - v_c(t) = R i_c(t) + L \frac{di_c(t)}{dt} \quad (6),$$

Ou podemos reescrevê-las de modo simplificado,

$$v_{a,b,c,conv}(t) - v_{a,b,c}(t) = R i_{a,b,c}(t) + L \frac{di_{a,b,c}(t)}{dt} \quad (7)$$

onde  $v_{a,b,c,conv}$  são as tensões da saída do conversor,  $v_{a,b,c}$  são as tensões da rede e  $i_{a,b,c}$  são as correntes injetadas na rede elétrica.

Aplicando as transformações de Park, coordenadas  $abc$  para  $dq$  em (7),

$$v_{dconv}(t) - v_d(t) = R i_d(t) + L \frac{di_d(t)}{dt} - \omega L i_q(t) \quad (8)$$

$$v_{qconv}(t) - v_q(t) = R i_q(t) + L \frac{di_q(t)}{dt} + \omega L i_d(t) \quad (9),$$

em que  $\omega$  é a frequência angular da rede.

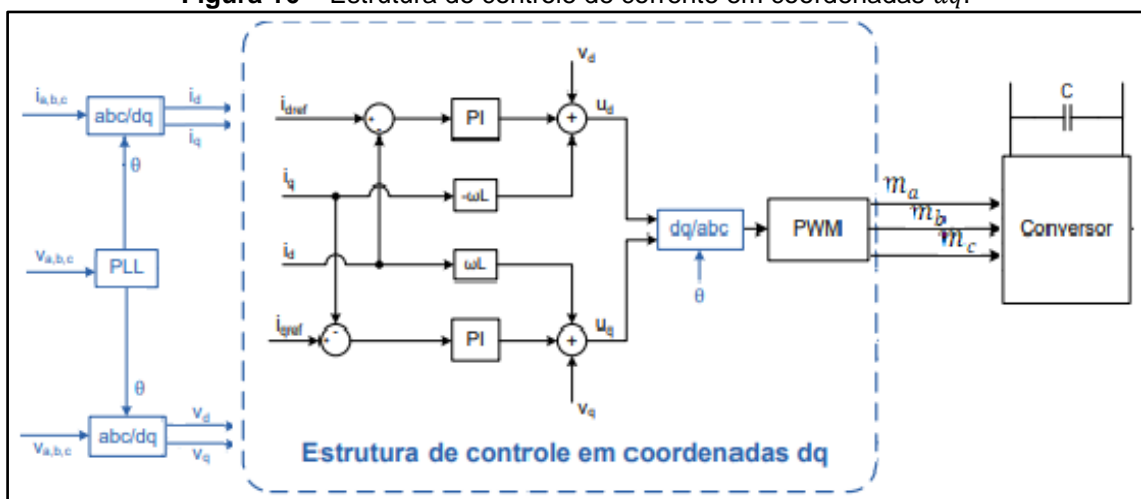
Os termos  $\omega Li_d(t)$  e  $-\omega Li_q(t)$ , termos de acoplamento dos eixos  $d$  e  $q$  dificultam o controle de modo a impedir o controle independente das variáveis  $dq$ , logo é possível realizar um controle de forma a considerar o sistema desacoplado, e (8) e (9) podem ser reescritas como (10) e (11) como equações já no domínio da frequência (s):

$$\mathbf{V}_{d\text{conv}}(\mathbf{s}) - \mathbf{V}_d(\mathbf{s}) = \mathbf{R}\mathbf{I}_d(\mathbf{s}) + \mathbf{s}\mathbf{L}\mathbf{I}_d(\mathbf{s}) \quad (10)$$

$$\mathbf{V}_{q\text{conv}}(\mathbf{s}) - \mathbf{V}_q(\mathbf{s}) = \mathbf{R}\mathbf{I}_q(\mathbf{s}) + \mathbf{s}\mathbf{L}\mathbf{I}_q(\mathbf{s}) \quad (11).$$

A Figura 16 ilustra a estrutura de modo geral do controle de corrente nas coordenadas  $dq$ . É perceptível um erro a partir da diferença entre a corrente medida na rede  $i_d$  e  $i_q$  e a corrente de referência  $i_{dref}$  e  $i_{qref}$ . A partir de tal diferença, um sinal de tensão é gerado pelo controlador PI. Este sinal é somado pelas tensões medidas da rede  $v_d$  e  $v_q$  e pelos termos cruzados  $\omega Li_d$  e  $-\omega Li_q$ . A soma dos termos cruzados possibilita o desacoplamento do sistema, ou seja, as componentes das correntes injetadas  $d$  e  $q$  podem ser controladas de maneira independente. Logo, os termos  $v_d$  e  $v_q$  efetivam uma compensação antecipatória de *feed-forward*, e o somatório dessas componentes resulta nas tensões de controle  $u_d$  e  $u_q$  que passam pela transformada inversa  $dq/abc$ , sendo geradas novas tensões de referência,  $m_a$ ,  $m_b$  e  $m_c$ , para os sinais PWM de chaveamento do conversor.

**Figura 16** – Estrutura do controle de corrente em coordenadas  $dq$ .



Fonte: Autor.

Pode-se reescrever (10) e (11) de forma a relacionar os termos de controle  $u_d$  e  $u_q$  com as correntes  $i_d$  e  $i_q$  para obtermos a função de transferência  $G(s)$  que modela o conversor controlado por PWM.

$$\frac{I_d(s)}{U_d(s)} = \frac{1}{sL + R} \quad (12)$$

$$\frac{I_q(s)}{U_q(s)} = \frac{1}{sL + R} \quad (13)$$

Pelas correntes  $i_d$  e  $i_q$  apresentarem características idênticas e estacionárias no tempo devido ao seu comportamento de sistema de coordenadas girantes, podemos projetar um controlador em apenas um eixo, porém com os mesmos ganhos aplicados nas duas malhas de controle. Logo tal característica permite o uso de um controlador PI com sua função de transferência característica definida por:

$$G(s) = \frac{K_{p,i}s + K_{i,i}}{s} \quad (14)$$

onde  $K_{p,i}$  é o ganho proporcional e o  $K_{i,i}$  ganho integral do controlador PI.

Para simplificação, foi respeitada apenas a dinâmica da componente  $d$ . Considerando uma multiplicação entre (12) e (14) teremos uma função de transferência em malha aberta, em que o sistema terá um polo em  $s = -R/L$ . Logo, o zero do controlador PI,  $s = -K_{i,i}/K_{p,i}$ , será igual ao polo do sistema, que ao aplicar a técnica de cancelamento de polos e zeros podemos inferir que a função de transferência para controle em malha aberta é:

$$M_{aberta,i}(s) = \frac{K_{p,i}}{sL} \quad (15)$$

E a função de transferência em malha fechada será:

$$M_{fechada,i}(s) = \frac{1}{s\left(\frac{L}{K_{p,i}}\right) + 1} \quad (16)$$

Ao analisar a função de transferência de primeira ordem, podemos facilmente comparar com (16) para projetar os valores de  $K_{p,i}$  e  $K_{i,i}$ . Onde a constante de tempo  $\tau_i$  equivale a parcela  $-L/K_{p,i}$ . Logo, temos:

$$K_{p,i} = \frac{L}{\tau_i} \quad (17)$$

$$K_{i,i} = \frac{R}{\tau_i} \quad (18)$$

Os valores para  $\tau_i$  podem ser compreendidos entre  $0,5 \text{ ms} \leq \tau_i \leq 5 \text{ ms}$ , em sistemas de frequência da fundamental 60 Hz (RASHID, 2012). Para o controle proposto, o  $\tau_i$  adotado foi de  $2 \text{ ms}$ ,  $R = 0,25 \Omega$  e  $L = 2 \text{ mH}$ .

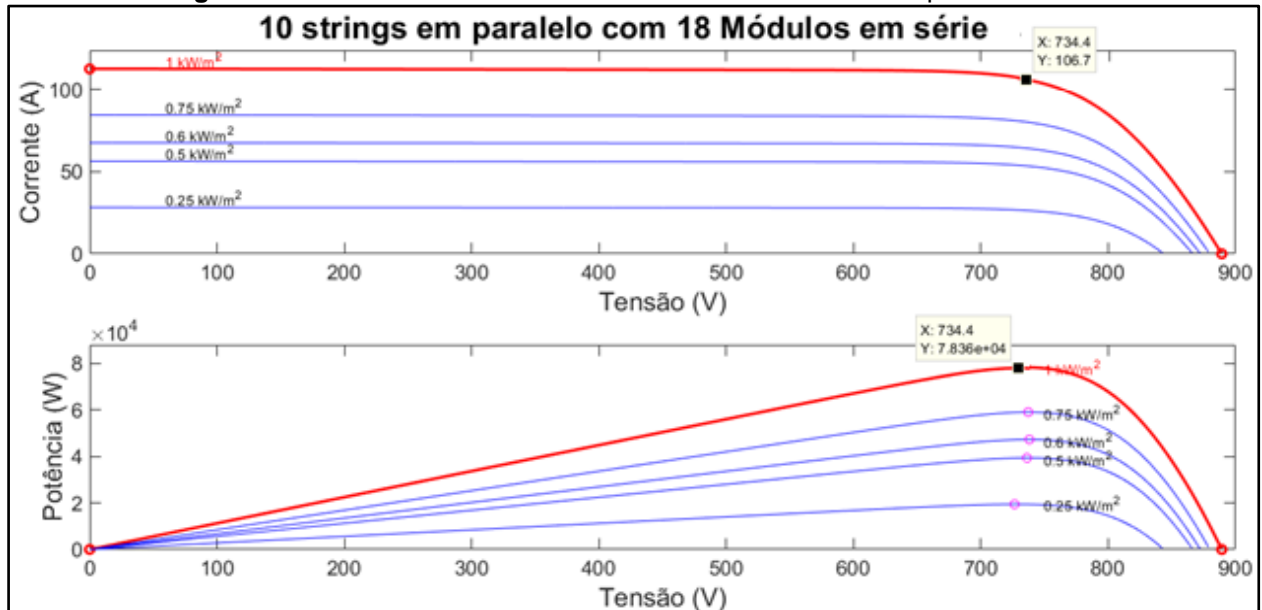
Substituindo os valores em (17) e (18), teremos um  $K_{p,i} = 1 \text{ H/s}$  e  $K_{i,i} = 125 \Omega/\text{s}$ , que são os ganhos dos controladores PI utilizados.

#### 4 ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Conforme visto no capítulo 3, seção 3.1.1, os parâmetros de configuração para o conjunto dos painéis solares foram os mesmos do painel do tipo LONGI LR4 – 72HPH – 435M. Ressaltando que para a tensão e corrente de projeto na carga fossem obtidos, foi disposto de um conjunto de painéis organizados em 10 *strings* em paralelo, e 18 módulos conectados em série por *string*. Esta parcela do sistema é ligada a apenas um inversor da SUNGROW SG60KTL. Tal prática foi adotada para simplificação das simulações, uma vez que os resultados obtidos podem ser relacionados com o restante do sistema da usina solar e, conseqüentemente, chegar aos níveis totais informados de tensão, corrente e potência.

A Figura 17 ilustra as curvas de corrente x tensão e potência x tensão referente a diferentes níveis de irradiação sobre o sistema escolhido para simulações.

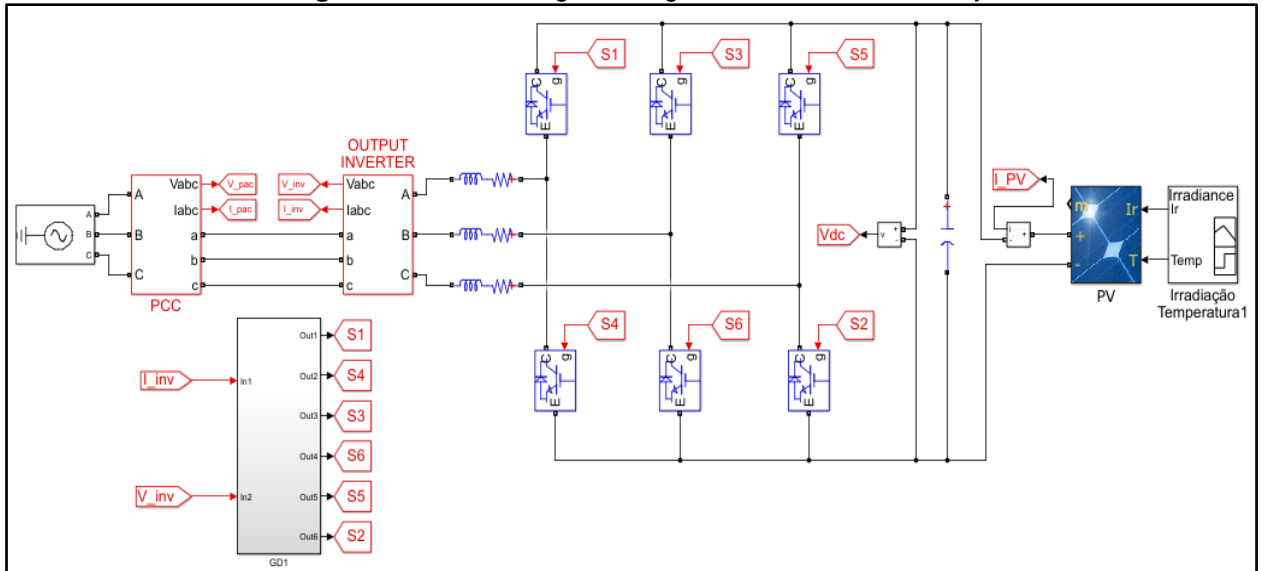
**Figura 17 –** Curvas características da corrente versus tensão e potência versus tensão.



Fonte: Autor.

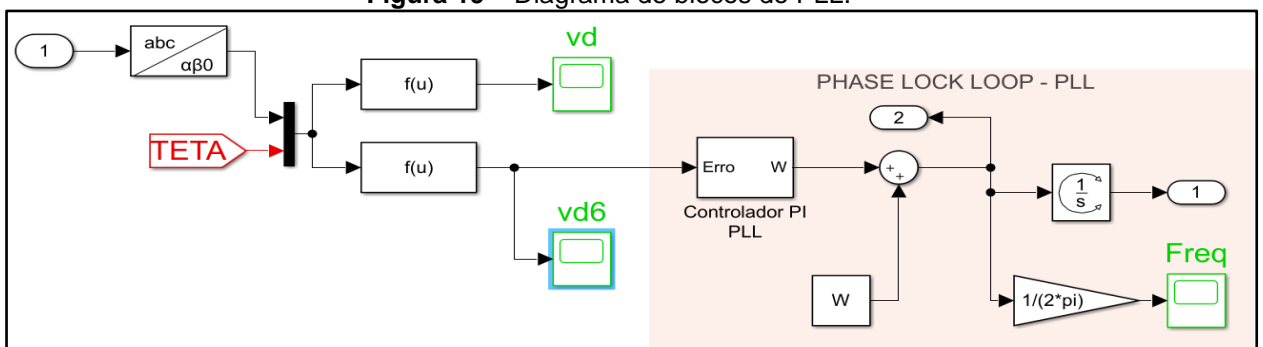
Mesmo que não seja o objetivo deste trabalho, pode-se observar pela Figura 17 que há diferentes valores para corrente e potência do sistema devido a variações da irradiação solar. Foi considerado os valores de  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$  de irradiação e temperatura de  $25^\circ \text{C}$ .

A estrutura do arranjo fotovoltaico está representada na Figura 18, onde observa-se o inversor, que está conecta ao arranjo PV (CC) na entrada e conectado à rede elétrica (CA) em sua saída, e pode-se notar ainda as chaves do conversor trifásico de dois níveis. O bloco “GD1” é o responsável pelos controles de rastreamento da frequência do inversor, assim como o controle do esquema de chaveamento dele.

**Figura 18 – Estrutura geral, diagrama de blocos, do arranjo PV.**


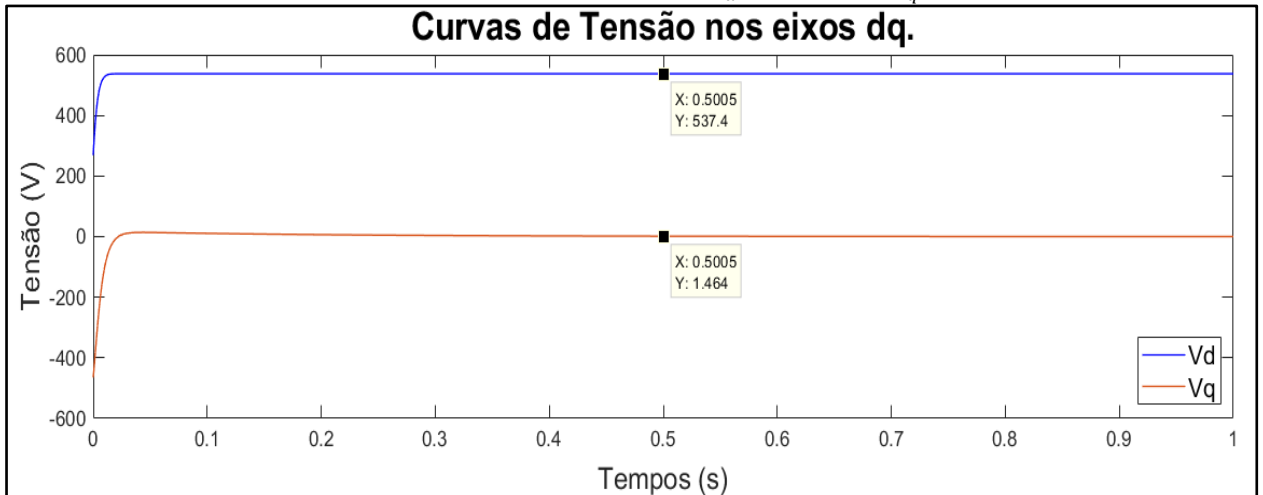
Fonte: Autor.

A Figura 19 apresenta a estrutura do diagrama de blocos do rastreamento da frequência da rede. Enquanto a Figura 20 ilustra curvas das tensões  $v_{a,b,c}$  já convertidas pela transformada de Park ( $v_d = 537,4 V$  e  $v_q = 1,464 V$ ).

**Figura 19 – Diagrama de blocos do PLL.**


Fonte: Autor.

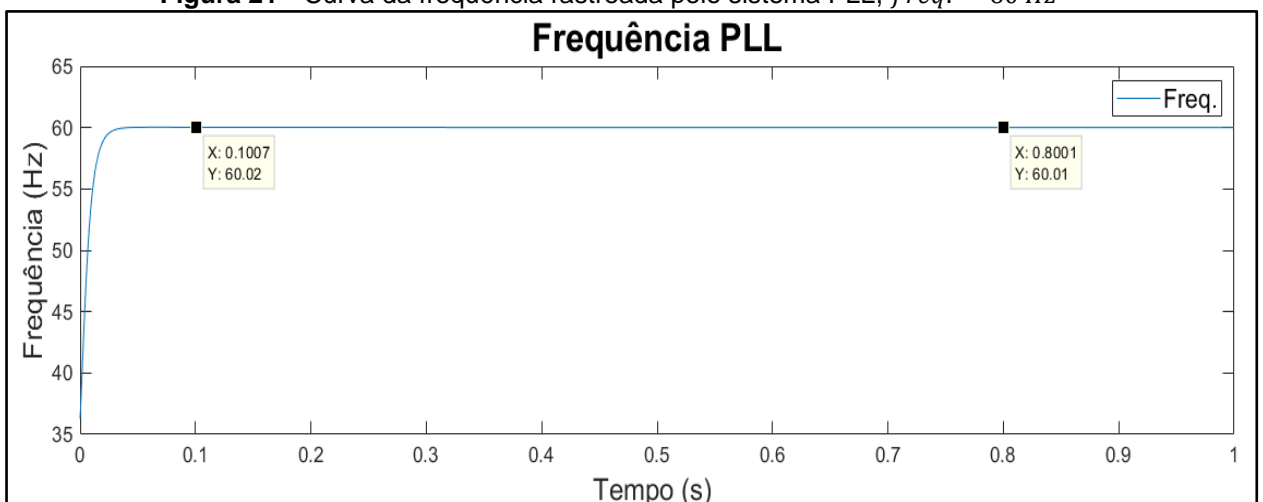
**Figura 20** - Curvas das tensões dos eixos  $dq$ .  $V_d = 537,4 V$  e  $V_q = 1,464 V$ .



Fonte: Autor.

Após a conversão das  $v_{a,b,c}$  para  $v_d$  e  $v_q$ , como foi ilustrado pela Figura 20, a tensão de  $v_q$  tende a zero (0) e por este motivo é levada ao bloco do PLL como um sinal de erro, que será somado à frequência da rede elétrica, gerando dessa forma, o sinal da frequência rastreada da rede pelo sistema, conforme mostrado pela Figura 21. Logo, pode-se notar o correto funcionamento do PLL no sistema de conexão do arranjo PV com a rede elétrica.

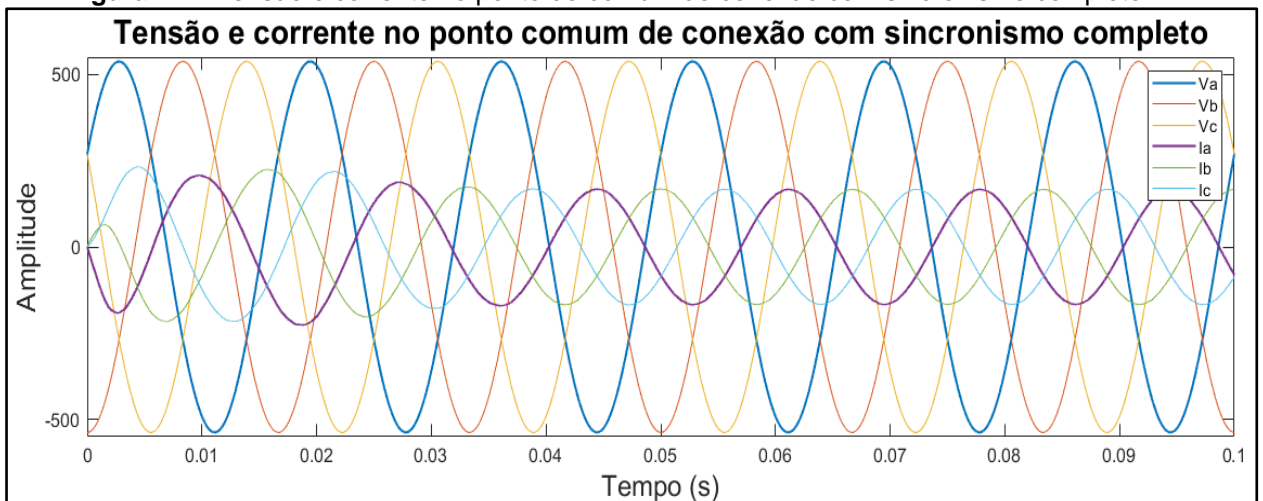
**Figura 21** - Curva da frequência rastreada pelo sistema PLL,  $freq. = 60 Hz$



Fonte: Autor.

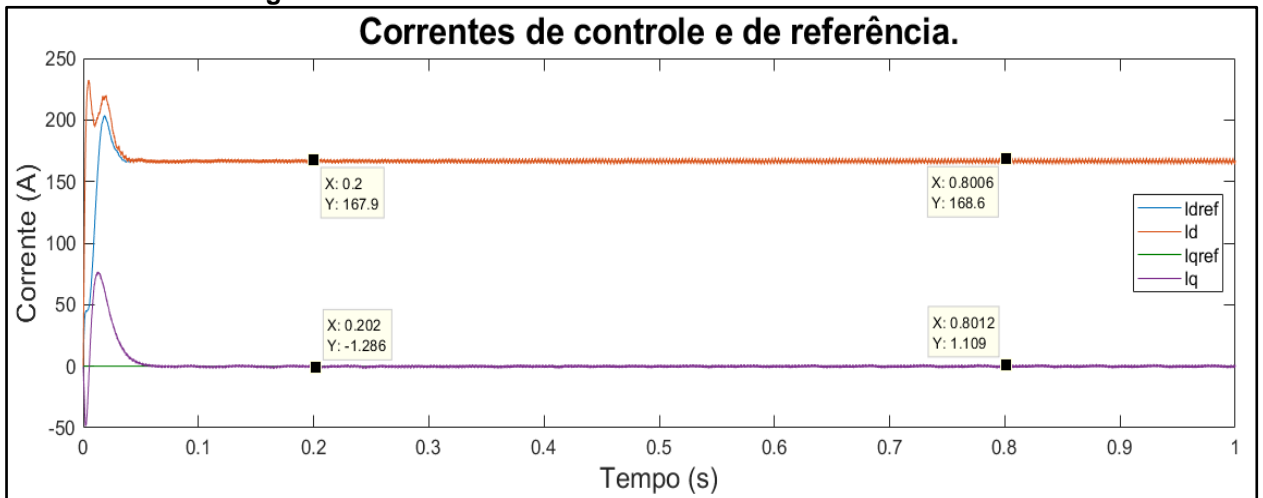
Pode-se observar que as correntes estão sincronizadas com as tensões da rede, o que pode ser um comprovante da eficiência de sincronia do PLL, da mesma forma com que a tensão do elo CC (barramento) ter sido estabilizada na tensão de pico, em 537,4 V (tensão de referência), o que comprova a eficiência da malha de controle de tensão do inversor. A Figura 22 ilustra a tensão em sincronia com a corrente de forma ampliada ( $t = 0$  a 0,1 segundos).

**Figura 22** – Tensão e corrente no ponto de comum de conexão com sincronismo completo.



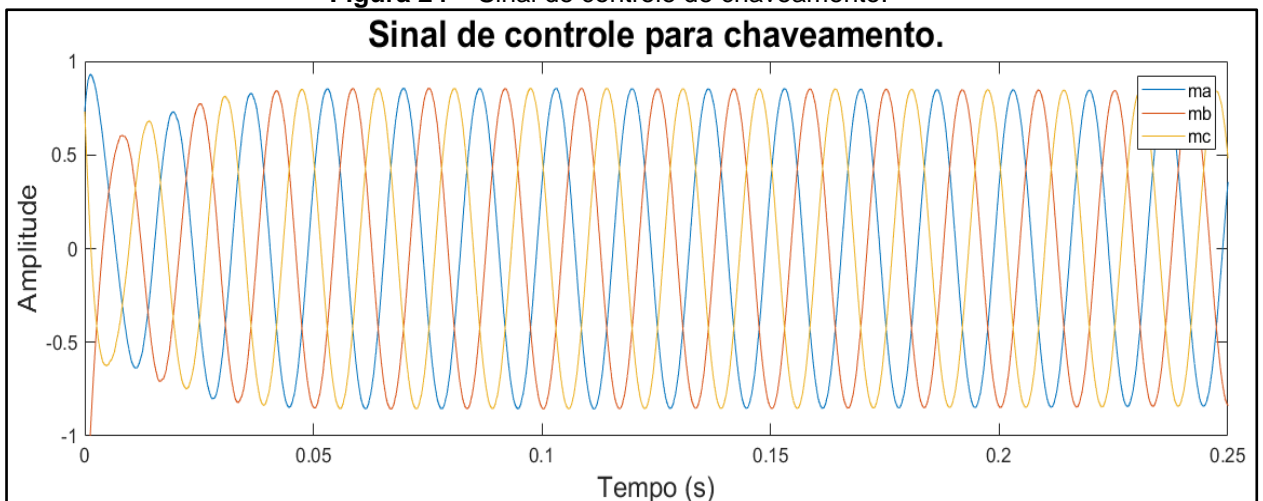
Utilizando a diferença entre as correntes de referência ( $I_{dref}$  e  $I_{qref}$ ) e as correntes medidas pela rede ( $I_d$  e  $I_q$ ), Figura 23, teremos as variáveis de controle  $u_d$  e  $u_q$ . Tais variáveis serão somadas com a compensação *feed-forward* (variáveis  $v_d$  e  $v_q$ ) e com as variáveis de controle  $I_d$  e  $I_q$ .



**Figura 23 – Curvas das correntes de controle e de referência.**


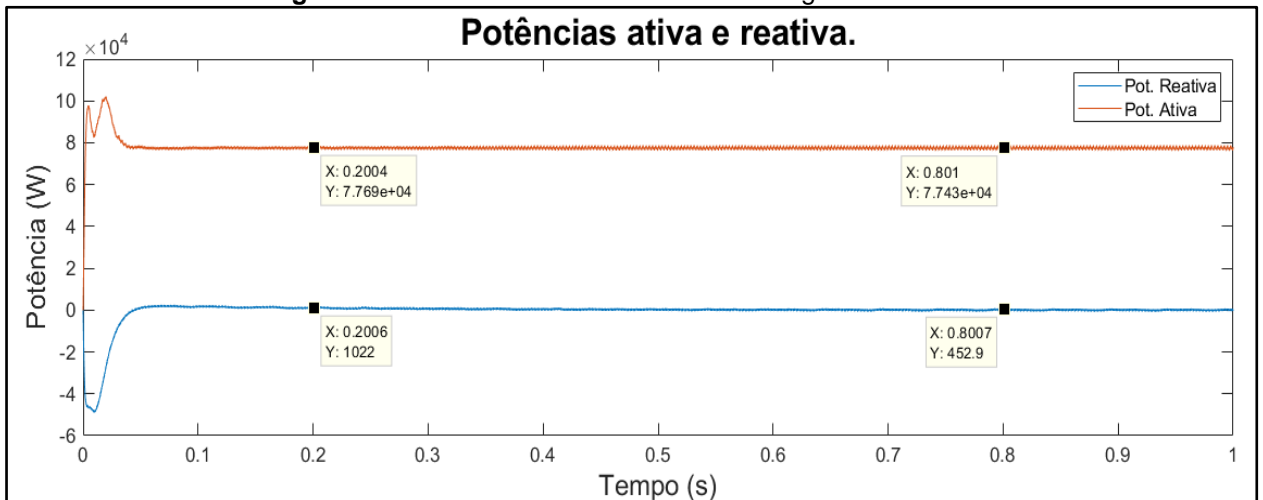
Fonte: Autor.

O resultado de tal operação será as contribuições  $m_d$  e  $m_q$ , que serão convertidas pela transformada inversa  $dq/abc$ , gerando assim os sinais de pulso para o chaveamento do inversor, conforme a Figura 24.

**Figura 24 – Sinal de controle de chaveamento.**


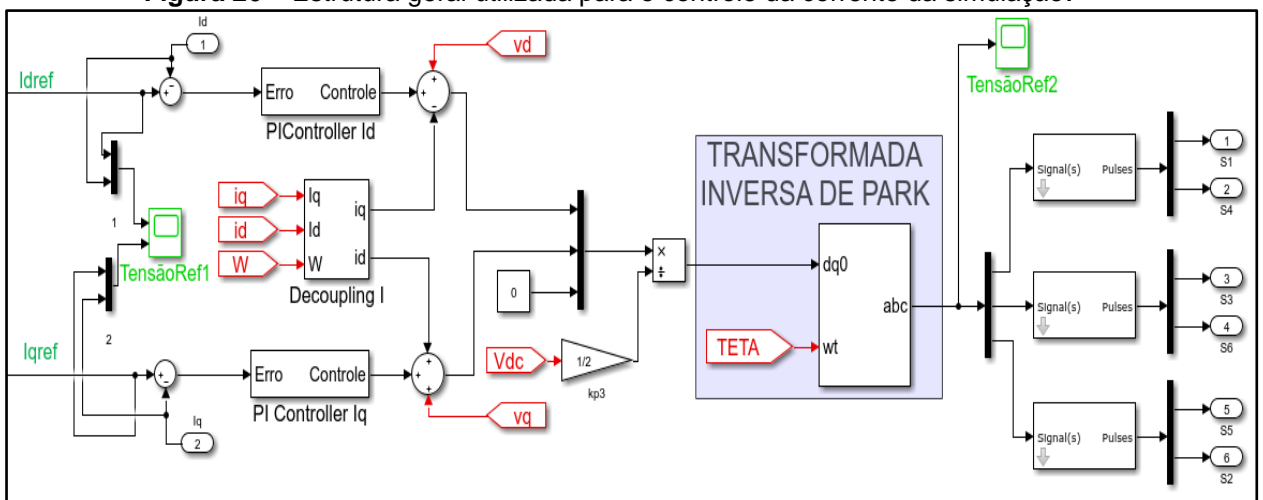
Fonte: Autor.

A potência ativa que foi entregue à rede elétrica foi de 77.430 W, comprovando que o rendimento é de aproximadamente 98,81%, como pode-se observar a Figura 25.

**Figura 25 – Potências ativas e reativas entregues a rede.**


Fonte: Autor.

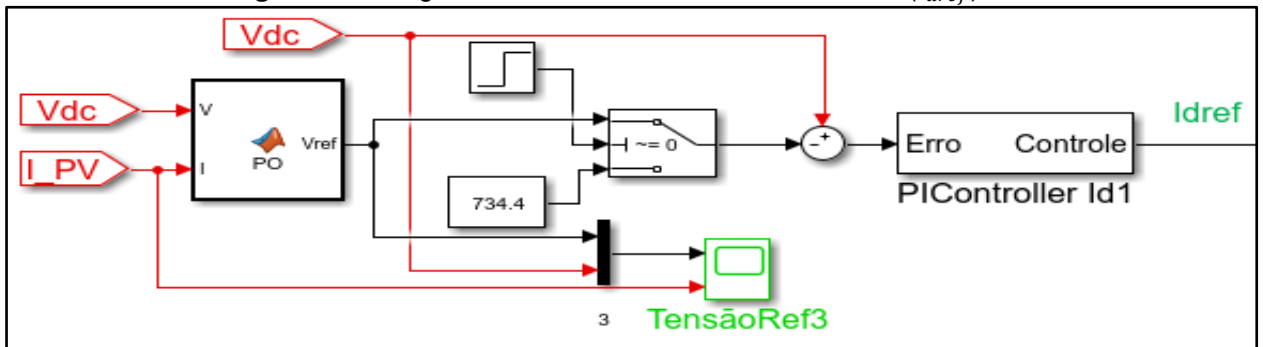
A Figura 26 apresenta a estrutura de controle da corrente utilizado para esta simulação com o seguinte diagrama de blocos.

**Figura 26 – Estrutura geral utilizada para o controle da corrente da simulação.**


Fonte: Autor.

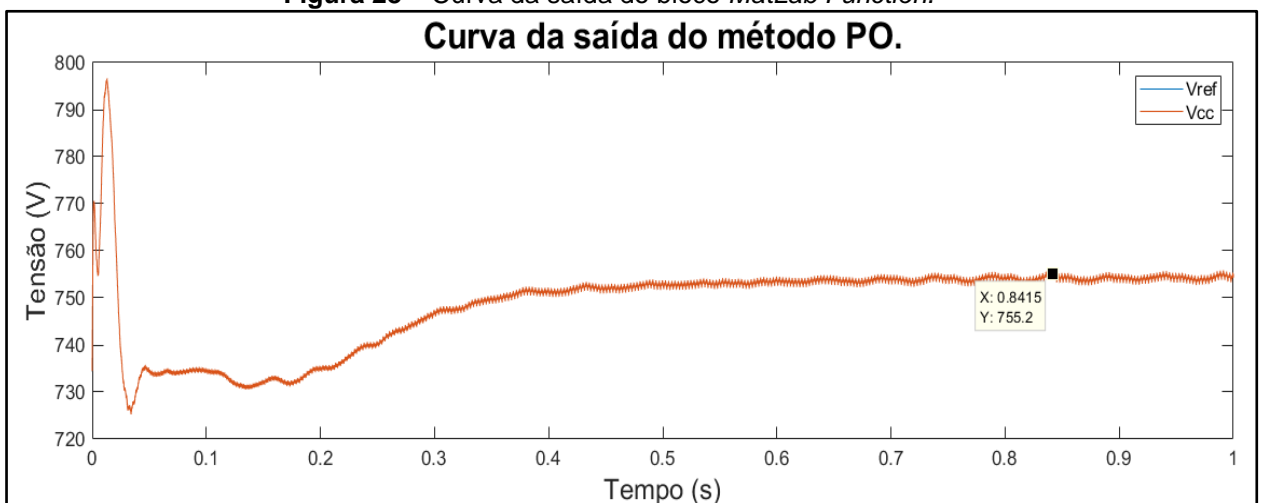
Como pode ser observado na Figura 23 a tensão em  $I_{qref}$  tende a zero, conforme citado na seção 3.2 deste trabalho, é possível trabalhar com o controle de apenas um eixo com um controlador PI, cuja função de transferência característica é descrita por (14).

O eixo em  $I_{dref}$ , que é o eixo utilizado para o controle, possui o sistema de MPPT do sistema fotovoltaico, descrito pela Figura 27, onde foi implementado o bloco do *MatLab Function* com o método Perturba e Observa (P&O).

**Figura 27 – Diagrama de blocos de controle em um eixo ( $I_{dref}$ ).**


Fonte: Autor.

A Figura 28 traz o comportamento da saída do bloco do *MatLab Function*. Bloco responsável pela extração da máxima potência do sistema.

**Figura 28 – Curva da saída do bloco *MatLab Function*.**


Fonte: Autor.

A partir da Figura 28 é possível observar a tensão CC de referência dada pelo algoritmo P&O, a fim de que essa tensão sendo atendida, o arranjo solar fotovoltaico está operando em seu ponto de máxima potência. Através do controle da tensão do barramento CC bem ajustado, é possível observar também que a tensão CC segue com eficácia sua referência. A fim de garantir mais estabilidade ao sistema de controle, o algoritmo P&O foi posto em funcionamento a partir do instante  $t = 0,1$  s, como pode ser visto que ele ajustou a tensão de referência para bem próximo dos valores nominais nessa condição.

## 5 CONCLUSÕES FINAIS

Foram realizadas algumas simulações na plataforma *MatLab/Simulink* com o objetivo de comprovar a efetividade do controle de corrente para um inversor fonte de tensão e técnicas de sincronismo angular de sistemas como sistemas de energias renováveis. Como visto no capítulo anterior, as simulações apresentaram um bom desempenho no controle da corrente a ser injetada na rede pelo inversor, e a possibilidade de controle da tensão no barramento CC, obtendo uma tensão na entrada do inversor condizente com o projeto e sem oscilações significativas. Desse modo, comprovando que a conexão da usina solar com a rede elétrica, perante os resultados das simulações, tem um funcionamento de maneira satisfatória.

Com os conceitos abordados no decorrer deste trabalho foi possível compreender a importância das simulações, uma vez que elas permitem analisar inúmeras hipóteses para comprovação de métodos e teorias, a fim de extrair o máximo desempenho do projeto. Como por exemplo, foi possível conferir de forma clara como o método Perturba e Observa (P&O) extrai do sistema o seu maior desempenho.

Em relação a geração de energia fotovoltaica em si, pode-se destacar que há uma crescente no país. Logo, este trabalho pode servir de base para futuras instalações de pequeno, médio ou grande porte de geração de energia solar em compreender os princípios básicos da conexão de um arranjo fotovoltaico com a rede elétrica do país.

### **ABSTRACT**

The search for renewable sources, such as wind and solar, has been increasing in the world. This is since the environmental problems caused by the traditional ways in which energy is generated. And solar energy is gaining more and more space in Brazil, mainly due to the reduction of solar cell costs, and by the optimization of energy costs. Therefore, this work addresses a case study on the connection of a distributed generation system (photovoltaic plant) to the electricity distribution network. In this work, a strategic current control methodology using voltage source converters will be presented. This type of control will be exposed to the use of techniques to track the frequency of operation of the electrical network, the PLL. In addition, a control algorithm

for tracking the point of the maximum power of the photovoltaic plant will be approached, to extract its maximum electric power generation performance. All simulations were performed with real data using the commercial software MATLAB/Simulink.

**Keywords:** Solar energy, power electronics, PLL, inverter.

## REFERÊNCIAS

ABDALRAHMAN, A., ZEKRY, A., ALSHAZLY, A. “**Simulation and Implementation of Grid-connected Inverters**”, International Journal of Computer Applications, v. 60, n. 4, pp. 41–49, dez. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST, Módulo 3 Acesso ao Sistema de Distribuição.**”

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: “**Resolução Normativa N°: 428**”, de 17 de abril de 2012.

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

ALVES, Guilherme Henrique. **Projeto e Análise da Viabilidade Econômica da Instalação de Painéis Fotovoltaicos no Setor Industrial**. Orientador: Ricardo Quadros Machado. 2016, 106f. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Infográfico ABSOLAR**. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>>. Acesso em: 15 de novembro de 2020.

BRASIL, Thiago Americano do. **Modelagem Matemática de Algoritmos Phase-Locked Loop baseados em controladores proporcionais integrais e proposta de um novo algoritmo baseado em estratégia fuzzy**. Orientador: Maurício Aredes. 2013, 111f. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CAMARGO, Lucas Tamanini. **Projeto de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. Orientador: Silvia Galvão de Souza Gomes. 2017, 101f. TCC (Graduação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

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.

Contribuições Cemig, **Consulta Pública CP009 – Contribuições para análise dos impactos da aplicação do Decreto nº 97.280**, de 16 de dezembro de 1988 (padronização das tensões). Belo Horizonte – MG, 30 de março de 2012.

DEOTTI, Lucas Meirelles Pires. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de um Sistema de Microgeração Fotovoltaica Residencial com Autoconsumo Remoto**. Orientador: Flávio Vanderson Gomes. 2017, 190 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

D. Jovcic, “**Phase locked loop system for FACTS**,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, n. 3, pp. 1116-1124, 2003.

PINHO, J.T; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

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

RIBEIRO, Mariana Rabelo. **Conexão de um Sistema Solar Fotovoltaico à Rede de Distribuição de Energia Elétrica**. Orientador: Maurício Aredes. 2015, 61f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

S. Silva, B. Lopes, B. J. C. Filho, R. Campana e W. Bosventura, “**Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems**”, em *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, 2004.

SILVA, Felipe Ismael Gomes. **Técnicas de Sincronização de Sistemas de Geração de Energia Renováveis com a Rede Elétrica**. Orientador: Pedro

Machado de Almeida. 2016, 56f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

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