



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE**

**KAMILLA MAIA BARRETO GUEDES**

**DESEMPENHO DE UM CONTROLE REPETITIVO EM UM  
SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE SOB  
CONDIÇÕES DE DISTORÇÃO**

**João Pessoa - PB  
2018**

**KAMILLA MAIA BARRETO GUEDES**

**DESEMPENHO DE UM CONTROLE REPETITIVO EM UM SISTEMA  
FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE SOB CONDIÇÕES DE  
DISTORÇÃO**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Darlan Alexandria Fernandes**

**Kleber Carneiro de Oliveira**

**João Pessoa - PB  
2018**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

G924d Guedes, Kamilla Maia Barreto.

Desempenho de um controle repetitivo em um sistema fotovoltaico conectado à rede sob condições de distorção / Kamilla Maia Barreto Guedes. - João Pessoa, 2018.

89 f. : il.

Orientação: Darlan Fernandes, Kleber Oliveira.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Sistema fotovoltaico. 2. Harmônicos de tensão. 3. Controle repetitivo. 4. Controle ressonante. I. Fernandes, Darlan. II. Oliveira, Kleber. III. Título.

UFPB/BC

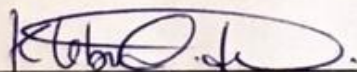
**KAMILLA MAIA BARRETO GUEDES**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**DESEMPENHO DE UM CONTROLE REPETITIVO EM UM  
SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE SOB  
CONDIÇÕES DE DISTORÇÃO**

**Comissão Examinadora:**

**Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes (Orientador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**



**Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira (Coorientador)**  
**Universidade Federal da Paraíba**

**Prof. Dr. Fabiano Salvadori**  
**Universidade Federal da Paraíba**



**Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida**  
**Universidade Federal da Paraíba**

**João Pessoa – PB**  
**2018**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que me permitiu chegar até aqui.

Agradeço com todo o meu coração aos meus pais que nunca mediram esforços e abriram mão de tantos sonhos para que seus filhos pudessem estudar. Muito obrigada por tudo! Sem vocês nada disso teria acontecido.

Aos meus irmãos por serem exemplos de determinação e força de vontade.

Ao meu esposo por acreditar tanto em mim, sempre me apoiar e aconselhar, ser meu braço direito e esquerdo.

Aos amigos que a vida me deu e aos colegas do LOSE pelo carinho, auxílio e torcida de sempre.

Aos meus orientadores, Darlan e Kleber, pela oportunidade, apoio e paciência. Aos demais membros da banca por sua valiosa contribuição.

## RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de utilização de um controle repetitivo em um sistema fotovoltaico conectado à rede a fim de torná-lo adequado à presença de distorções harmônicas de tensão oriundas da rede elétrica. O sistema utilizado é composto de módulo fotovoltaico, conversor CC-CC push-pull alimentado em corrente, inversor monofásico em ponte completa, filtro LCL e sistema de controle. Para este sistema, que funciona em tempo real, não é utilizada malha de captura de fase para a tensão da rede, reduzindo, portanto, a complexidade do sistema de controle. Como uma das consequências, o tempo de processamento é bastante reduzido, que é uma vantagem na implementação do sistema em tempo real. Resultados de simulação em ambiente Matlab<sup>®</sup> são apresentados, assim como os resultados experimentais obtidos no Laboratório de Otimização de Sistemas Elétricos – LOSE da Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Uma comparação entre o desempenho do controle repetitivo e do controle ressonante com relação à presença de harmônicos da rede é apresentada.

**Palavras-chave:** Sistema fotovoltaico, Harmônicos de tensão, Controle repetitivo, Controle ressonante.

## ABSTRACT

This work presents a methodology for the use of a repetitive-based control in a photovoltaic system connected to the grid in order to make it suitable to the presence of harmonic distortions of voltage coming from the electric grid. The system used is composed of photovoltaic module, current-fed push-pull DC-DC converter, single-phase full bridge inverter, LCL filter and control system. To this system, that works in real time, is not used phase locked loop for electric grid voltage, then there is a smaller processing time and system complexity. As one of the consequences, the processing time is quite reduced, it is an advantage in the execution of the system in real time. Simulation results in Matlab<sup>®</sup> are presented, as well as experimental results obtained in the Laboratory of Optimization of Electrical Systems of the Federal University of Paraíba - UFPB. A comparison between the performance of the repetitive-based control and the resonant control with respect to the presence of network voltage harmonics is presented.

**Key-words:** Photovoltaic system, Voltage harmonics, Repetitive control, Resonant control.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Número de micro e minigeradores instalados e consumidores que receberam créditos de geração até 23/05/2017 no Brasil. Fonte: [adaptado de 13].	18
<b>Figura 2</b> – Número de conexões de micro e minigeração distribuída por estado brasileiro até 23/05/2017. Fonte: [8].	19
<b>Figura 3</b> – Conexão por tipo de fonte no Brasil para micro e minigeração distribuída. Fonte: [adaptado de 13].	20
<b>Figura 4</b> – Estrutura simplificada de representação de um sistema fotovoltaico na geração distribuída. Fonte: autora.	21
<b>Figura 5</b> - Decomposição em componentes harmônicas de um sinal periódico. Fonte: autora.	22
<b>Figura 6</b> – Configuração básica do sistema. Fonte: autora.	27
<b>Figura 7</b> – Conversor push-pull alimentado em corrente. Fonte: autora.	28
<b>Figura 8</b> – Primeiro modo de chaveamento do conversor push-pull. Fonte: autora.	28
<b>Figura 9</b> – Segundo modo de chaveamento do conversor push-pull. Fonte: autora.	29
<b>Figura 10</b> – Terceiro modo de chaveamento do conversor push-pull. Fonte: autora.	29
<b>Figura 11</b> – Quarto modo de chaveamento do conversor push-pull. Fonte: autora.	30
<b>Figura 12</b> - Inversor em ponte completa monofásico. Fonte: autora.	31
<b>Figura 13</b> - Sinais para comparação na modulação PWM senoidal bipolar. Fonte: autora.	32
<b>Figura 14</b> – Tensão na saída do inversor para o PWM senoidal bipolar. Fonte: autora.	32
<b>Figura 15</b> – Sinais para comparação na modulação PWM senoidal unipolar. Fonte: autora.	33
<b>Figura 16</b> - Tensão na saída do inversor para o PWM senoidal unipolar. Fonte: autora.	33
<b>Figura 17</b> – Circuito equivalente do inversor, filtro e rede. Fonte: autora.	34
<b>Figura 18</b> – Topologia de um filtro LCL. Fonte: autora.	35
<b>Figura 19</b> – Diagrama de Bode para um filtro LCL. Fonte: adaptado de [26].	35
<b>Figura 20</b> - Controle da tensão no barramento CC e controle da corrente CA. Fonte: autora.	37
<b>Figura 21</b> – Diagrama de Bode para o controlador proporcional ressonante. Fonte: autora.	40
<b>Figura 22</b> – Configuração básica do controle repetitivo. Fonte: autora.	41

<b>Figura 23</b> – Resposta em frequência do controlador repetitivo. Fonte: autora. ....	42
<b>Figura 24</b> - Estrutura do controle repetitivo utilizado. Fonte: autora. ....	43
<b>Figura 25</b> – Diagrama de Bode do filtro $S1(z)$ . ....	45
<b>Figura 26</b> – Diagrama de Bode de $S2(z)$ . ....	46
<b>Figura 27</b> – Diagrama de Bode de $SzP(z)$ . ....	47
<b>Figura 28</b> – Diagrama polar de $H_z$ . ....	48
<b>Figura 29</b> - Estrutura de simulação. Fonte: autora. ....	50
<b>Figura 30</b> - Curva da corrente-tensão e potência-tensão do painel fotovoltaico utilizado. ....	52
<b>Figura 31</b> - Conexão dos painéis no arranjo fotovoltaico. Fonte: autora. ....	52
<b>Figura 32</b> - Tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico. ....	53
<b>Figura 33</b> - Corrente que sai do arranjo fotovoltaico. ....	54
<b>Figura 34</b> - Potência entregue ao sistema pelo arranjo fotovoltaico. ....	55
<b>Figura 35</b> - Tensão no barramento CC do inversor. ....	56
<b>Figura 36</b> – Tensão de referência ( $\times 100$ ) para o PWM e tensão no capacitor do filtro LCL utilizando controle proporcional ressonante e rede senoidal. ....	57
<b>Figura 37</b> – Corrente de referência ( $\times 2$ ) e corrente medida na saída do inversor utilizando controle proporcional ressonante e rede senoidal. ....	58
<b>Figura 38</b> – Corrente ( $\times 10$ ) e tensão no PCC utilizando controle proporcional ressonante e rede senoidal. ....	59
<b>Figura 39</b> – Tensão de referência para o PWM e tensão no capacitor do filtro utilizando controle repetitivo e rede senoidal. ....	60
<b>Figura 40</b> – Corrente de referência ( $\times 2$ ) e corrente medida na saída do inversor utilizando controle repetitivo e rede senoidal. ....	61
<b>Figura 41</b> – Tensão e corrente ( $\times 10$ ) no PCC utilizando controle repetitivo e rede senoidal. ....	62
<b>Figura 42</b> – Tensão no capacitor do filtro e tensão de referência ( $\times 100$ ) para o PWM utilizando controle proporcional ressonante e rede distorcida. ....	63
<b>Figura 43</b> – Corrente de referência ( $\times 2$ ) e corrente na saída do inversor utilizando controle proporcional ressonante e rede distorcida. ....	64
<b>Figura 44</b> – Tensão e corrente ( $\times 10$ ) no PCC utilizando controle proporcional ressonante e rede distorcida. ....	65
<b>Figura 45</b> – Tensão de referência para o PWM e tensão no capacitor do filtro LCL utilizando controle repetitivo e rede distorcida. ....	66
<b>Figura 46</b> – Corrente de referência ( $\times 2$ ) e corrente medida na saída do inversor utilizando controle repetitivo e rede distorcida. ....	67

<b>Figura 47</b> – Tensão e corrente (x10) no PCC utilizando controle repetitivo e rede distorcida. .....	68
<b>Figura 48</b> – Bancada experimental utilizada. ....	70
<b>Figura 49</b> - Simulador de arranjo solar. Fonte: [32]. ....	71
<b>Figura 50</b> – Conversor push-pull utilizado. Fonte: autora. ....	72
<b>Figura 51</b> - Inversor de tensão. Fonte: autora. ....	72
<b>Figura 52</b> – Componentes do filtro LCL utilizado. Fonte: autora. ....	73
<b>Figura 53</b> - Fonte de tensão para a alimentação dos circuitos passivos. Fonte: autora. ....	73
<b>Figura 54</b> - Módulo eZdsp F28335. Fonte: autora. ....	74
<b>Figura 55</b> - Circuito de condicionamento: (a) Tensão. (b) Corrente. Fonte: autora. ....	75
<b>Figura 56</b> – Variador de tensão utilizado. Fonte: autora. ....	75
<b>Figura 57</b> – Variador de tensão trifásico. Fonte: autora ....	76
<b>Figura 58</b> – Tensão da rede com distorção harmônica. ....	77
<b>Figura 59</b> – Tensão da rede senoidal e corrente no PCC utilizando controle ressonante. ....	78
<b>Figura 60</b> – Tensão da rede distorcida e corrente no PCC utilizando controle proporcional ressonante. ....	79
<b>Figura 61</b> - Tensão e corrente no PCC utilizando o controle repetitivo e fonte senoidal. ....	80
<b>Figura 62</b> – Tensão e corrente no PCC utilizando o controle repetitivo e fonte distorcida. ...	81

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Limites de distorção na corrente. Fonte: [20].....	23
<b>Tabela 2</b> - Resposta às condições anormais de tensão. Fonte: [20].....	24
<b>Tabela 3</b> – Características do painel fotovoltaico para um irradiância de $1000 \text{ W/m}^2$ e também $600 \text{ W/m}^2$ , considerando a temperatura igual a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . ....	51
<b>Tabela 4</b> - Desempenho obtido por cada controlador em simulação utilizando o Matlab <sup>®</sup> /Simulink. ....	68
<b>Tabela 5</b> – Desempenho experimental obtido por cada controlador. ....	82

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

AIE	Agência Internacional de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCS	Code Composer Studio®
DSC	<i>Digital Signal Controller</i> - Controlador Digital de Sinais
FP	Fator de Potência
FPB	Filtro Passa-Baixas
GD	Geração Distribuída
PCC	Ponto Comum de Conexão
PCH	Pequenas Centrais Hidroelétricas
PI	Proporcional Integral
PLL	<i>Phase locked loop</i> – Malha de Captura de Fase
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
Proinfa	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PV	<i>Photovoltaic</i> – Fotovoltaico
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> – Modulação por Largura de Pulso
RMS	<i>Root Mean Square</i> – Valor eficaz
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SIN	Sistema Interligado Nacional
SPWM	<i>Senoidal Pulse-Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Pulso Senoidal
TDH	Taxa de Distorção Harmônica
ZOH	<i>Zero Order Hold</i> – Segurador de Ordem Zero

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	Energia Solar Fotovoltaica .....	16
1.2	Geração Distribuída de Energia Elétrica .....	17
1.3	Qualidade de Energia em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede .....	21
1.4	Motivação .....	25
1.5	Objetivos do Trabalho .....	25
1.5.1	Objetivos Específicos .....	26
1.6	Estrutura do Trabalho .....	26
<b>2</b>	<b>SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE .....</b>	<b>27</b>
2.1	Conversor CC-CC Push-Pull Alimentado em Corrente .....	27
2.2	Inversor em Ponte Completa Monofásico .....	30
2.3	Filtro LCL.....	34
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE CONTROLE.....</b>	<b>37</b>
3.1	Controle Proporcional Ressonante .....	38
3.2	Controle Repetitivo .....	40
3.2.1	Dimensionamento da Estrutura do Controle Repetitivo.....	44
<b>4</b>	<b>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....</b>	<b>49</b>
4.1	Cenário de Simulação .....	49
4.2	Desempenho do Arranjo Fotovoltaico.....	51
4.3	Comportamento da Tensão de Saída do Conversor <i>Push-Pull</i> .....	55
4.4	Desempenho da Conexão do Inversor com a Rede Elétrica Senoidal.....	56
4.4.1	Controle Proporcional Ressonante .....	57
4.4.2	Controle Repetitivo .....	59
4.5	Desempenho da Conexão do Inversor com a Rede Elétrica com Distorção .....	62
4.5.1	Controle Proporcional Ressonante .....	63

4.5.2	Controle Repetitivo .....	65
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>70</b>
5.1	Bancada Experimental .....	70
5.2	Resultados Experimentais com o Controle Proporcional Ressonante.....	77
5.3	Resultados Experimentais com o Controle Repetitivo .....	79
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>
	<b>ANEXO.....</b>	<b>89</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial e os consequentes avanços tecnológicos que ocorreram, a energia elétrica passou a ser fundamental para todos e sua necessidade é cada vez mais crescente.

Na matriz de energia elétrica brasileira, a fonte de energia com maior participação é a de origem hídrica. Porém, sabe-se que as usinas deste tipo de fonte estão geralmente localizadas em regiões remotas do país. Portanto, a utilização da fonte hídrica para geração de energia elétrica exige um investimento pesado em infraestrutura, uma vez que há a necessidade de construção de grandes linhas de transmissão e distribuição de energia, além da utilização de inúmeros equipamentos para que o consumidor final seja abastecido. Quando a hidroelétrica é insuficiente, as usinas termoeletricas são as mais utilizadas para geração de eletricidade. Estas utilizam a queima de combustíveis (gás natural, derivados de petróleo, carvão mineral e biomassa) para a geração de energia elétrica. O seu grau de poluição está relacionado a quantidade e ao tipo de combustível utilizado no processo.

Com o crescimento do consumo de energia elétrica, aumenta-se a dependência por energia elétrica procedente de térmicas convencionais, que utilizam como fonte os combustíveis fósseis, uma vez que a fonte hídrica de energia não consegue atender a toda a demanda existente. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, haverá um aumento de 3,2% ao ano no consumo total de energia elétrica entre os anos de 2013 e 2050, o que justifica ainda mais a necessidade de outras fontes de energia [1].

Analisando o potencial de fontes alternativas de energia, estas têm capacidade de suprir parte da demanda de energia existente e também atender comunidades mais isoladas que não são atendidas pelas linhas de transmissão.

As fontes de energia renovável, em particular a fotovoltaica, têm experimentado um grande desenvolvimento nos anos recentes, principalmente devido ao aumento do aquecimento global e também aos subsídios dados pelos governos mundiais a essas fontes [2] [3]. Dentre as várias fontes de energia renovável existentes, a fotovoltaica é prevista para ter a maior geração até o fim deste século, acima de 60% da energia total produzida por fontes renováveis [4] [5].

Com a diminuição dos custos dos módulos fotovoltaicos devido ao aumento em sua produção e participação de novos fabricantes, assim como resoluções e programas que estimulam o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, houve uma grande expansão da energia fotovoltaica no Brasil nos últimos anos.

Segundo informações do Ministério de Minas e Energia [6], o Brasil contava com 61,7 MW de geração solar em 2016. Em 2017, para dados de até o mês de outubro, este número passou a 126,6 MW.

## 1.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, que é a unidade fundamental desse processo de conversão, um dispositivo fabricado utilizando material semicondutor [7].

Inicialmente, o desenvolvimento da tecnologia apoiou-se na busca de fontes de energia para sistemas instalados em localidades remotas. O segundo agente impulsionador foi a chamada “corrida espacial”. A célula fotovoltaica era, e continua sendo, o meio mais adequado (menor custo, peso e maior segurança) para fornecer a quantidade de energia necessária para longos períodos de alimentação de equipamentos eletroeletrônicos no espaço [7].

A partir da primeira década dos anos 2000, a indústria fotovoltaica consolidou-se nos mercados desenvolvidos pelo aumento da demanda e da escala de produção que, aliadas a desenvolvimentos tecnológicos específicos, viabilizaram a redução de preços e a consequente penetração maior no mercado. Esse desenvolvimento tecnológico ocorreu principalmente na Alemanha, nos Estados Unidos e no Japão, com participação secundária de Itália, Espanha e Noruega [8].

Alguns motivos fizeram com que a energia solar fotovoltaica se tornasse ainda mais interessante para os brasileiros, como a grande disponibilidade de radiação solar no país, a redução dos preços dos módulos solares (que passou de cerca de 23 US\$/W em 1980 para 1 US\$/W em 2012), bem como a existência de altas tarifas de energia elétrica para consumidores residenciais, uma vez que o Brasil possui a 14<sup>a</sup> tarifa mais alta e ocupa o 2<sup>o</sup> lugar em relação à carga tributária em *ranking* que compara o Brasil com os 28 países-membros da Agência Internacional de Energia (AIE) [9],[10].

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), decretado em 2004, foi instituído com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Interligado Nacional (SIN) [11]. Ainda que não venha a abranger a energia fotovoltaica, o Proinfa representou um passo importante para o avanço das políticas que apoiam a introdução no mercado de fontes de energia renováveis.

A Resolução Normativa ANEEL nº 482 a Resolução Normativa nº 687, de 2012 e 2016, respectivamente, diminuíram as barreiras para o desenvolvimento do setor fotovoltaico no Brasil. Um dos pontos que são abordados é o fato de o consumidor poder gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

Um sistema fotovoltaico pode ser classificado em três categorias distintas: sistema isolado, híbrido e conectado à rede. É de interesse para este trabalho os sistemas conectados à rede.

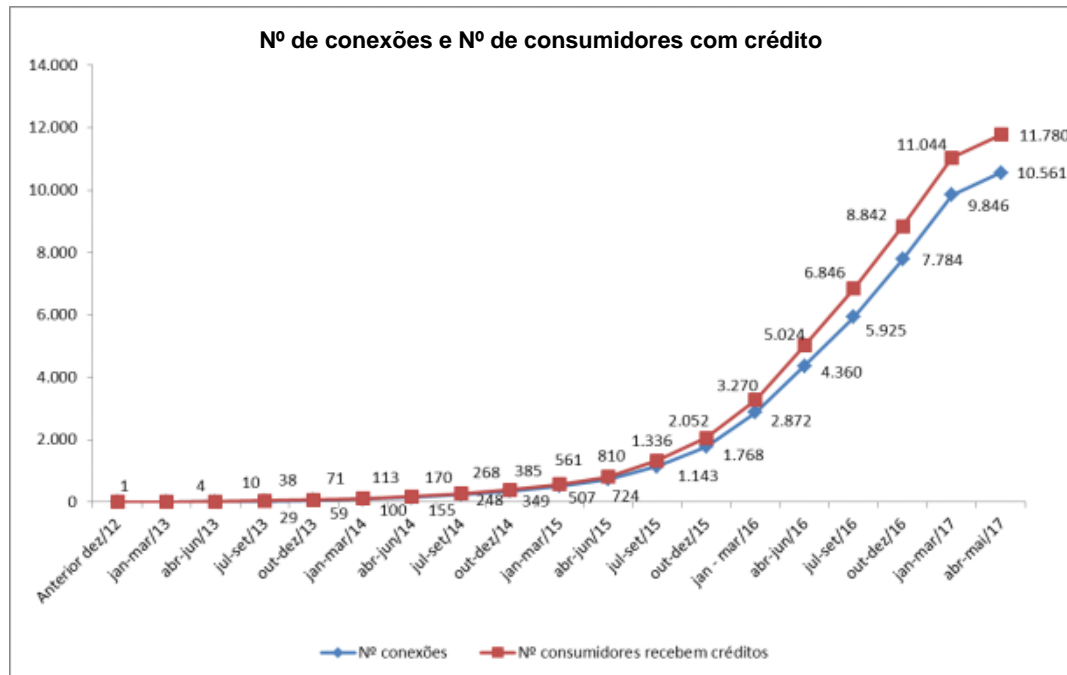
## **1.2 Geração Distribuída de Energia Elétrica**

A geração distribuída (GD) pode ser definida como a produção de energia por meio de pequenos geradores incluídos na rede elétrica ao longo do sistema de distribuição. Ela pode ser classificada em dois tipos: reserva de energia ou fonte de energia. A segunda forma de geração distribuída, isto é, como fonte de energia, ganhou mais espaço no mercado brasileiro após a Resolução da ANEEL nº 482/2012.

Esta resolução define que a microgeração distribuída é caracterizada por uma central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utiliza fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, conectada a rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Por sua vez, a minigeração distribuída é uma central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a 75 kW e inferior a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis de energia elétrica ou cogeração qualificada, conectada a rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras [12].

Após a publicação da Resolução 482/12, iniciou-se no país um lento processo de difusão de micro e minigeradores distribuídos, o qual começou a acelerar a partir de 2016 [13].

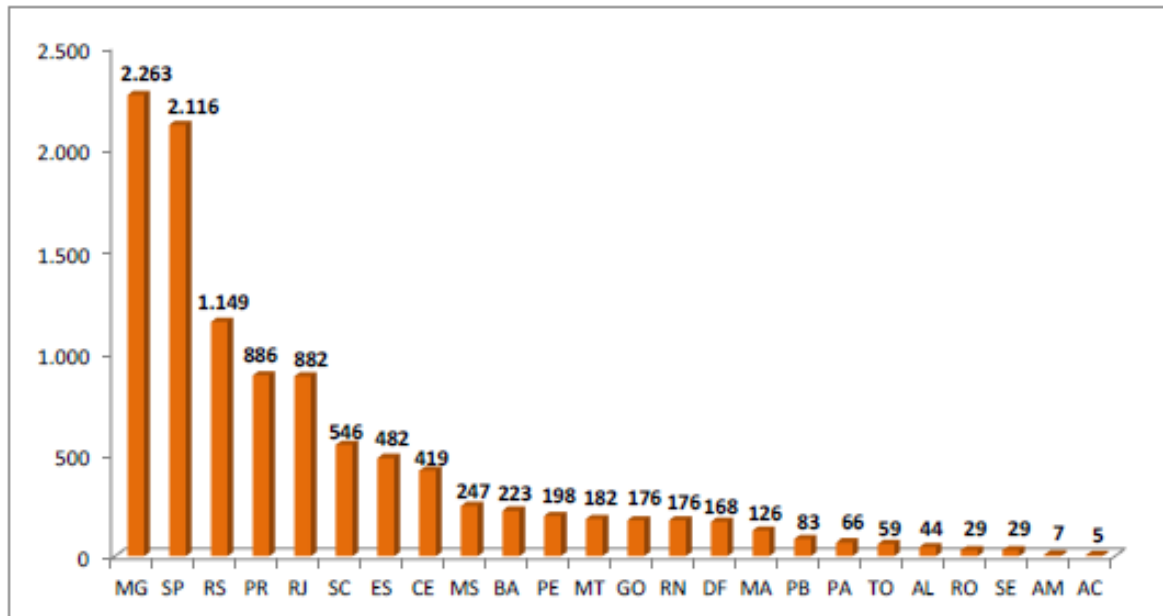
Na Figura 1 são apresentados os valores acumulados de conexões e consumidores que receberam os créditos de micro e minigeração distribuída no Brasil até o dia 23/05/2017.



**Figura 1** – Número de micro e minigeradores instalados e consumidores que receberam créditos de geração até 23/05/2017 no Brasil. Fonte: [adaptado de 13].

Conforme apresentado na Fig. 1, o número de consumidores com instalação de micro ou minigeração distribuída no final de 2016 é 4,4 vezes superior ao registrado no final de 2015, indicando, portanto, um crescimento acentuado no último ano, porém ainda abaixo do potencial de expansão no Brasil.

Na Figura 2 é apresentada a distribuição de micro e minigeradores por estado brasileiro.



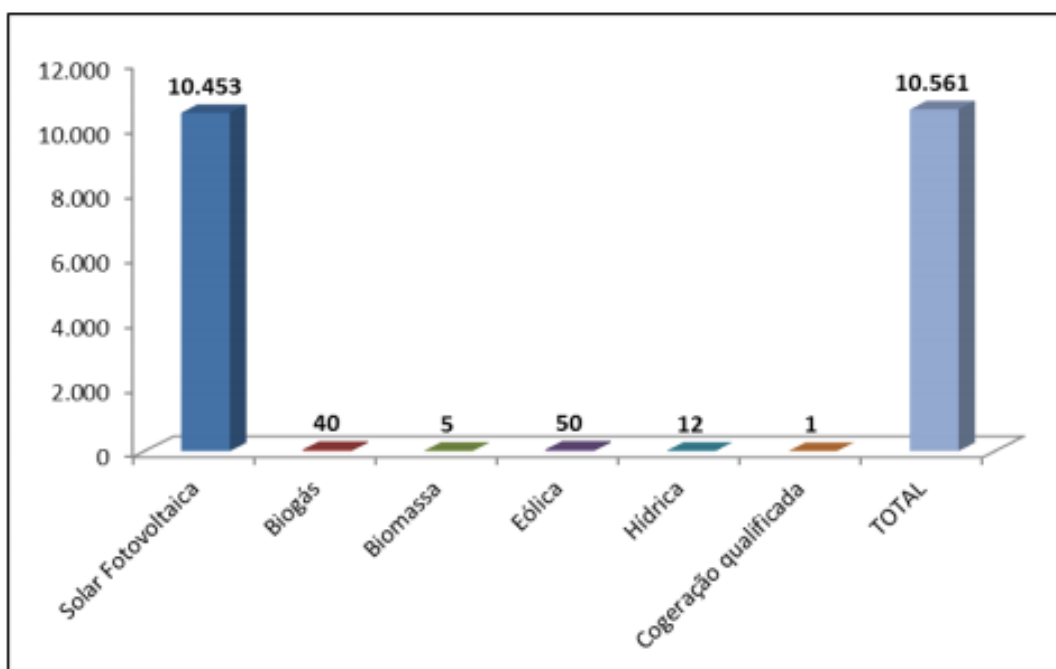
**Figura 2** – Número de conexões de micro e minigeração distribuída por estado brasileiro até 23/05/2017. Fonte: [8].

Na Figura 2 percebe-se que a maior concentração desses sistemas está no estado de Minas Gerais, seguido por São Paulo.

O uso de sistemas de GD em baixa tensão traz inúmeros benefícios para os usuários e para o sistema de abastecimento de eletricidade, descentralizando a produção de energia e permitindo aliviar as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. O uso em larga escala de sistemas distribuídos pode reduzir a demanda por investimentos em linhas de transmissão e frear a construção de usinas baseadas em fontes convencionais e não renováveis de energia [14].

A energia fotovoltaica em sistemas de GD adapta-se facilmente aos ambientes com incidência de luz, mesmo em fachadas, telhados de prédios e residências em grandes centros urbanos, contribuindo dessa forma para a produção de energia limpa e suprimento de energia elétrica.

Pode ser observado na Figura 3 a distribuição dos geradores instalados por fonte de energia, indicando que a fonte solar fotovoltaica representa 99% do número total de instalações, seguida pela fonte eólica para a micro e minigeração distribuída no Brasil [13].



**Figura 3** – Conexão por tipo de fonte no Brasil para micro e minigeração distribuída. Fonte: [adaptado de 13].

Com relação às classes de consumo para a micro e minigeração distribuída, 79,5% das instalações são residenciais e 15% são comerciais. Em termos de potência, 72% das instalações têm potência menor ou igual a 5 kW, o que está associado principalmente ao perfil dos consumidores residenciais [13].

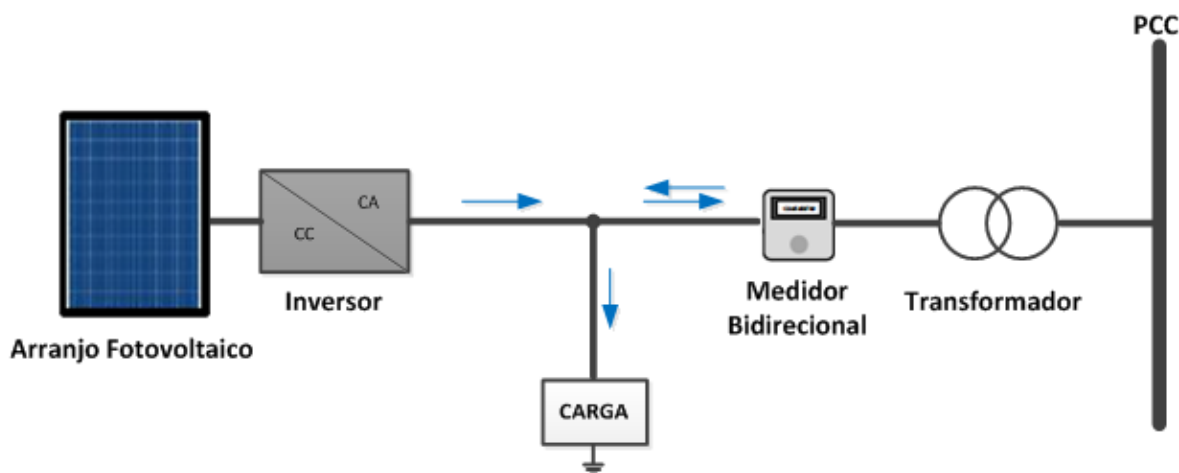
Um sistema interligado à rede pode não utilizar armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede. Todo o arranjo é conectado a conversores que servem de elemento de interface entre o painel e a rede, de modo a adequar as formas de onda das grandezas elétricas em corrente contínua (CC) do painel fotovoltaico às formas de onda em corrente alternada (CA) exigidas pela rede. Estes conversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada [15]. Além desses componentes essenciais, são necessários também equipamentos auxiliares como disjuntores, fusíveis, equipamentos de medição e interface com o usuário.

Um painel fotovoltaico conectado à rede deve gerar a maior quantidade de energia possível, operando em seu ponto de máxima potência. Essa energia gerada, após certas etapas, é injetada na rede CA por meio do ponto comum de conexão (PCC).

Devido aos valores baixos de tensão produzida no arranjo fotovoltaico, pode-se adicionar mais um estágio com um conversor CC-CC para elevar a tensão que irá passar pelo inversor, e pode-se utilizar também um transformador no sistema para elevar a tensão. Esse

transformador pode operar em alta frequência ou na frequência da rede elétrica, se colocado após o inversor.

Na Figura 4 é apresentada a estrutura básica de conexão de um sistema fotovoltaico à rede elétrica de baixa tensão.



**Figura 4** – Estrutura simplificada de representação de um sistema fotovoltaico na geração distribuída.  
Fonte: autora.

Em caso de falha no fornecimento ou desligamento para reparo na rede da concessionária, o inversor deve ser capaz de detectar a ausência do sinal de tensão da rede e desconectar-se, mesmo que o sistema fotovoltaico seja capaz de suprir a demanda de energia local, para garantir a segurança de funcionários durante uma eventual manutenção na rede, ou mesmo para evitar a energização de um circuito da rede isolado pelo sistema de proteção causado por uma condição indevida, como também para preservar a integridade física do próprio inversor [14].

### 1.3 Qualidade de Energia em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Em sistemas fotovoltaicos isolados, a energia gerada pelos painéis e acumulada nas baterias é transmitida para o inversor que produz em sua saída uma onda senoidal, independente de referência externa de tensão. Já em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, a tensão CA na saída do inversor é posta em paralelo com a rede convencional de energia. Assim, as duas formas de ondas de tensão devem estar em fase e ter características elétricas bastante similares, de modo a possibilitar este paralelismo [16].

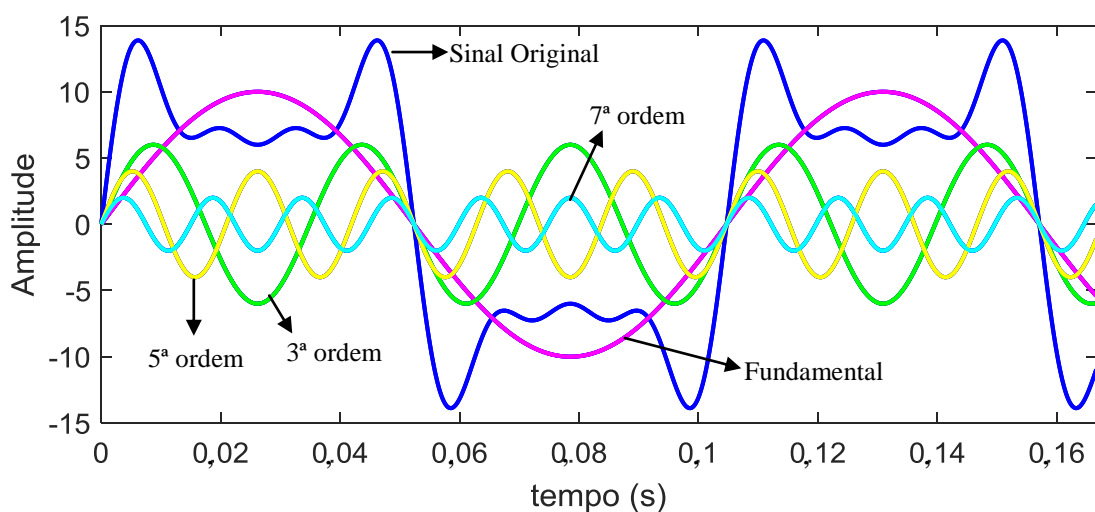
Além disto, para que haja a conexão de um sistema de geração à rede elétrica da distribuidora de energia, este sistema também deve satisfazer condições limitantes e atender à valores de referência para garantir a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Um dos pontos a que se refere a qualidade de energia é com relação à distorção harmônica na tensão e na corrente. A forma de onda da tensão e da corrente dos inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede, por exemplo, deveria ser senoidal. Entretanto, isso não ocorre de maneira ideal, pois existe o aparecimento de frequências harmônicas, principalmente na corrente [17].

A distorção harmônica é assim denominada devido ao surgimento de frequências harmônicas junto à onda fundamental de 60 Hz. O número de vezes que a frequência de uma componente harmônica é múltipla inteira da frequência da onda fundamental é chamado de ordem harmônica. Os harmônicos mais significativos são os de ordem ímpar. Estas frequências múltiplas ímpares da fundamental surgem a partir do acionamento de cargas não lineares e utilização de inversores. Cargas não lineares são aquelas em que a corrente não flui proporcionalmente a tensão aplicada, em um ciclo de frequência. Os harmônicos pares, por sua vez, devido a apresentarem amplitudes baixas, geralmente são desconsiderados.

Quanto maior a ordem da harmônica em um circuito, menor é a sua capacidade de deformação do sinal. A presença de harmônicos na forma de onda pode dar origem a alguns problemas associados à rede como sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução, danificação de capacitores, etc.

Na Figura 5 é apresentada a decomposição de um sinal em suas componentes harmônicas.



**Figura 5** - Decomposição em componentes harmônicas de um sinal periódico. Fonte: autora.

A taxa de distorção harmônica (TDH) é definida como a razão dos valores eficazes de tensão ou corrente de todas as frequências harmônicas (a partir da segunda) pelo valor eficaz da componente fundamental. Dessa forma, a TDH da corrente, por exemplo, é medida por meio da Eq. (1) [18].

$$TDH(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} I_{n_{ef}}^2}}{I_{1_{ef}}} \times 100\% \quad (1)$$

Onde  $I_{1_{ef}}$  é o valor eficaz da componente fundamental, enquanto que  $I_{n_{ef}}$  é a componente de frequência  $n$  vezes a frequência da fundamental.

A taxa de distorção harmônica total da corrente deve ser menor que 5% e cada harmônico individual deve ser limitado conforme disposto na norma IEC 61727 [19] e apresentado na Tab. 1.

**Tabela 1** - Limites de distorção na corrente. Fonte: [20].

<i>Ordem dos harmônicos</i>	<i>Limite de distorção</i>
3 <sup>a</sup> – 9 <sup>a</sup>	< 4%
11 <sup>a</sup> – 15 <sup>a</sup>	< 2%
17 <sup>a</sup> – 21 <sup>a</sup>	<1,5%
23 <sup>a</sup> – 33 <sup>a</sup>	<0,6%
Acima da 33 <sup>a</sup>	<0,3%

Com relação às harmônicas de tensão, o documento de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [18], Módulo 8, determina que para tensões no PCC inferiores a 1 kV, a taxa de distorção harmônica total da tensão deve ser inferior a 10%.

Em condições anormais de tensão, o sistema de geração distribuída deve perceber a condição anormal e cessar o fornecimento à rede. Na Tabela 2 são apresentadas as condições de desligamento que devem ser cumpridas, com tensões em RMS e medidas no Ponto Comum de Conexão.

**Tabela 2** - Resposta às condições anormais de tensão. Fonte: [20].

<i>Tensão no PCC (% em relação a tensão nominal)</i>	<i>Tempo máximo de desligamento (s)</i>
V < 80%	0,4
80% ≤ V ≤ 110%	Regime normal de operação
V > 110%	0,2

Com relação à frequência da rede, quando esta assumir valores abaixo de 57,5 Hz, o sistema de geração distribuída deve interromper o fornecimento de energia à rede elétrica em até 0,2 s. O sistema somente deve voltar a fornecer energia à rede quando a frequência retornar para 59,9 Hz, respeitando o tempo de reconexão definido pela concessionária. Quando a frequência da rede ultrapassar 60,5 Hz e permanecer abaixo de 62 Hz, o sistema de geração distribuída deve reduzir a potência ativa injetada na rede. Quando a frequência da rede ultrapassar 62 Hz, o sistema de geração distribuída deve interromper o fornecimento de energia à rede elétrica em até 0,2 s. O sistema somente deve voltar a fornecer energia à rede quando a frequência retornar para 60,1 Hz, respeitando o tempo de reconexão [14].

Com relação ao Fator de Potência (FP), o sistema de geração distribuída deve ser capaz de operar com valores de 0,92 capacitivo a 0,92 indutivo [18] [20]. A sua equação para um sistema com distorção harmônica é apresentada na Eq. (2) [21].

$$FP = \frac{[1 + (P_H/P_1)]FP_1}{\sqrt{1 + TDH_I^2 + TDH_V^2 + (TDH_I TDH_V)^2}} \quad (2)$$

Em que:

- $P_H$  é potência harmônica;
- $P_1$  é a potência ativa da componente fundamental;
- $FP_1$  é o fator de potência da componente fundamental;
- $TDH_I$  é a taxa de distorção harmônica da corrente;
- $TDH_V$  é a taxa de distorção harmônica da tensão.

Após uma mudança na potência ativa, o sistema de geração distribuída deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente para corresponder ao fator de potência predefinido.

## **1.4 Motivação**

As cargas não lineares no sistema elétrico são as responsáveis pelo surgimento dos harmônicos na rede elétrica. A presença dessas cargas têm-se elevado devido ao aumento de dispositivos ou equipamentos que possuem circuitos eletrônicos de potência em sua constituição. Dessa forma, ao conectar um sistema de geração à rede elétrica é necessário verificar a presença de distorções na tensão, uma vez que os harmônicos podem deteriorar o funcionamento do sistema de controle utilizado. Em vista desse cenário é interessante uma estrutura de controle para o sistema fotovoltaico capaz de realizar os propósitos de conexão com a rede e ao mesmo tempo robusto à presença dos harmônicos, mas sem utilizar filtros. O sistema em questão também não utiliza malha de captura de fase para a tensão da rede, resultando, portanto, em um tempo de processamento menor. Uma classe de controle denominado de repetitivo atende bem estes propósitos [22] [23] e é uma solução concisa para lidar com o problema.

## **1.5 Objetivos do Trabalho**

Este trabalho tem por objetivo propor a aplicação de um controle repetitivo com utilização em um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede. Além disso, será feito um comparativo de desempenho desse sistema de controle com aqueles convencionais apresentados na literatura para uma posterior validação da proposta.

### 1.5.1 Objetivos Específicos

Dentre os objetivos específicos estão:

- Estudar o comportamento de um controle repetitivo em um sistema fotovoltaico conectado à rede;
- Projetar um sistema de controle repetitivo como parte de um sistema de controle que regula a tensão do barramento CC do inversor de tensão e estabelece uma corrente desejada na saída do inversor, mesmo a rede elétrica apresentando distorções na tensão;
- Apresentar as respostas de estratégias de controle clássico utilizados no sistema PV, bem como as do controle projetado;
- Comparar o desempenho de ambas as estratégias.

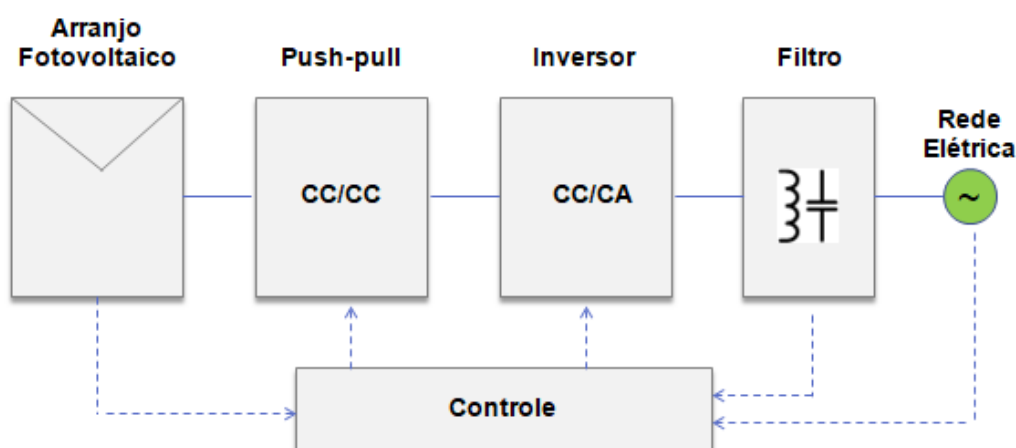
### 1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

- No Capítulo 2 é apresentado o sistema fotovoltaico conectado à rede, onde comenta-se sobre o conversor CC-CC push-pull, o inversor em ponte completa monofásico e o filtro LCL utilizado;
- O Capítulo 3 aborda as estruturas de controle utilizadas que são o controle proporcional ressonante e o controle repetitivo, este último de forma mais detalhada;
- O Capítulo 4 é dedicado à simulação e seus resultados;
- O Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos em laboratório;
- No Capítulo 6 encontram-se as conclusões deste trabalho;
- A seção em ANEXO apresenta o esquema utilizado na simulação em Matlab<sup>®</sup>.

## 2 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

O sistema fotovoltaico conectado à rede possui como configuração básica a apresentada na Fig. 6.



**Figura 6** – Configuração básica do sistema. Fonte: autora.

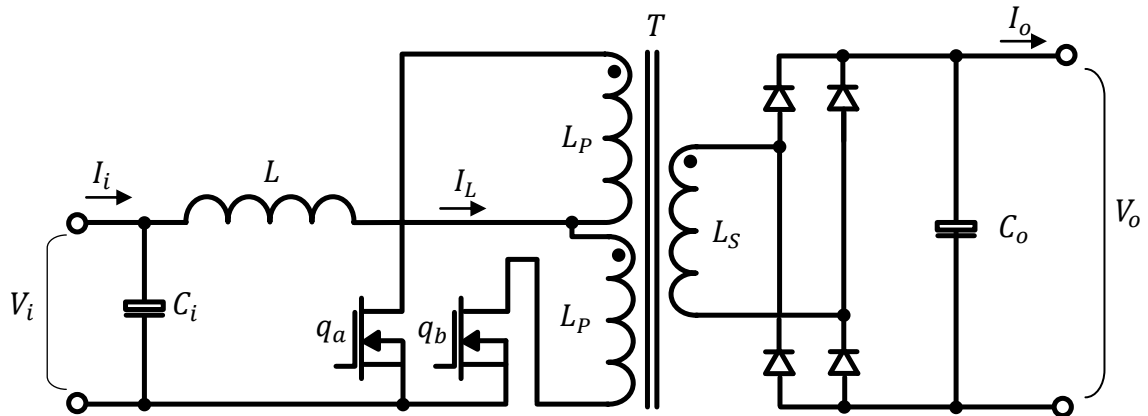
Esta seção apresenta os componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede a partir do conversor CC-CC até o filtro LCL.

### 2.1 Conversor CC-CC Push-Pull Alimentado em Corrente

Neste trabalho, não é feita a inclusão de baterias ou acumuladores. É utilizado um conversor CC-CC, que pode aumentar ou diminuir a tensão de saída. Em sistemas fotovoltaicos, o uso de conversores abaixadores de tensão é importante devido à presença de baterias. Os conversores elevadores de tensão são também aplicados quando o próximo estágio de alimentação é seguido por um inversor de tensão, que é o caso deste trabalho.

O conversor CC-CC utilizado é um conversor push-pull alimentado em corrente. Trata-se de um conversor isolado que tem operação semelhante aos conversores meia ponte e ponte completa e é derivado do conversor Boost. Esta topologia é uma das mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos.

Na Figura 7 é apresentada a estrutura do conversor push-pull utilizado.

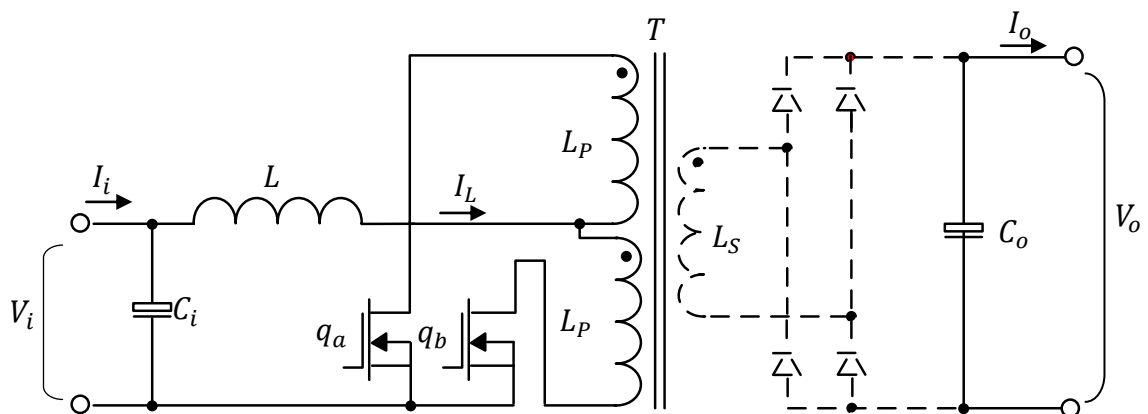


**Figura 7** – Conversor push-pull alimentado em corrente. Fonte: autora.

A utilização de um transformador na estrutura desse conversor possibilita um ganho mais elevado na sua saída, o que é essencial quando há a utilização de um inversor de tensão como próximo estágio, uma vez que a tensão em seu barramento CC é bastante superior a tensão fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

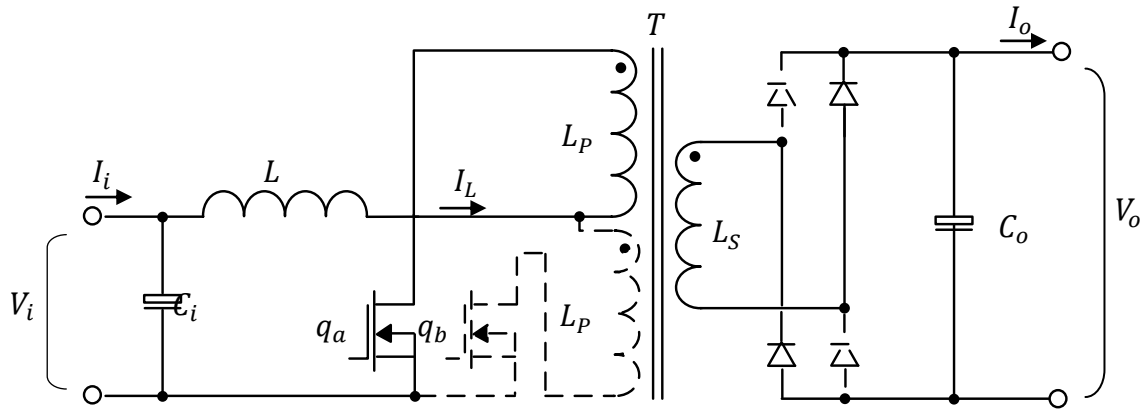
A tensão secundária tem o dobro da frequência de comutação. Os diodos de saída retificam a tensão no lado secundário e o capacitor de saída  $C_o$  faz a filtragem necessária.

Com relação aos modos de chaveamento, no primeiro modo, as chaves  $q_a$  e  $q_b$  estão fechadas e há o armazenamento de energia no indutor  $L$ . Cada chave conduz metade da corrente de entrada, logo, as bobinas do transformador geram fluxos que se contrapõem. Assim, o fluxo total é nulo e a tensão induzida no secundário também. Ou seja, para esse modo, não há transferência de energia para o secundário do transformador. Ao final desta etapa, a corrente no indutor atinge o máximo. Na Figura 8 é apresentado o primeiro modo de chaveamento.



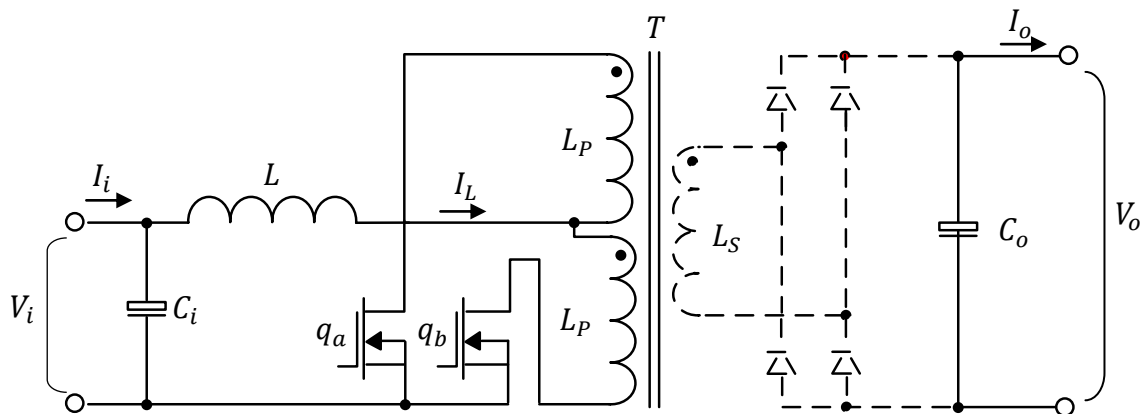
**Figura 8** – Primeiro modo de chaveamento do conversor push-pull. Fonte: autora.

No segundo modo de chaveamento, a chave  $q_a$  conduz enquanto  $q_b$  encontra-se aberta. A energia armazenada no indutor é então transferida para o capacitor e a carga. A corrente no indutor decresce até atingir o seu valor mínimo. Na Figura 9 é apresentado o segundo modo de chaveamento.



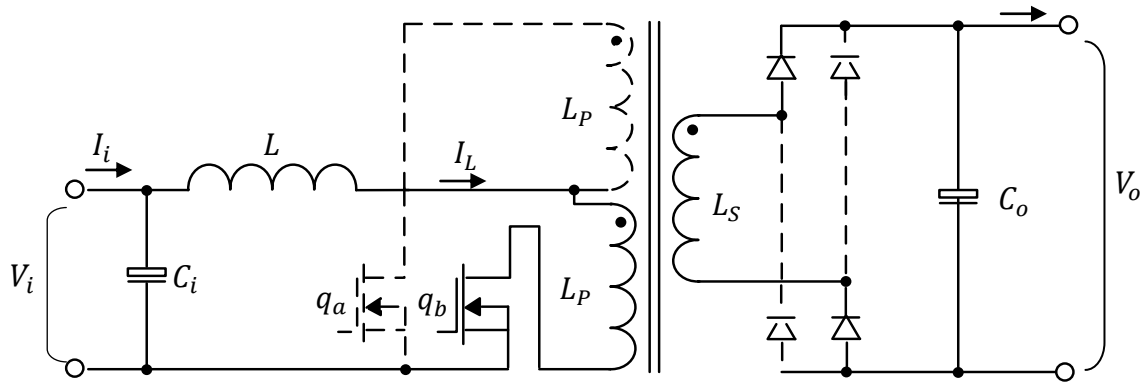
**Figura 9** – Segundo modo de chaveamento do conversor push-pull. Fonte: autora.

No terceiro modo de chaveamento, a chave  $q_b$  volta a conduzir e, portanto, a operação é semelhante ao primeiro modo de chaveamento. A corrente no indutor cresce até alcançar seu valor máximo. Na Figura 10 é apresentado o terceiro modo de chaveamento.



**Figura 10** – Terceiro modo de chaveamento do conversor push-pull. Fonte: autora.

No quarto modo de chaveamento, a chave  $q_a$  encontra-se aberta, enquanto que  $q_b$  conduz. Assim, há transferência de energia do primário para o secundário. Na Figura 11 é apresentado o quarto modo de chaveamento.



**Figura 11** – Quarto modo de chaveamento do conversor push-pull. Fonte: autora.

O conversor opera com as chaves acionadas simultaneamente ou independentemente. As chaves  $q_a$  e  $q_b$  não devem estar abertas ao mesmo tempo, pois assim não há caminho para que a corrente circule e o indutor  $L$  se desmagnetize. Dessa forma, com as chaves abertas simultaneamente, a energia acumulada no indutor  $L$  provocaria sobretensões inadequadas nas chaves.

O push-pull utilizado tem a relação saída/entrada dada pela Eq. (3).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{n}{(1 - D)} \quad (3)$$

Onde  $V_o$  é a tensão de saída,  $V_i$  é a tensão de entrada,  $n$  é a relação de transformação do transformador sendo  $n = \sqrt{L_S L_P}$  e  $D$  é a razão cíclica, que varia no intervalo  $0 < D < 1$ . O conversor utilizado foi projetado para  $n = 6$ .

A razão cíclica também pode ser relacionada como na Eq. (4).

$$D = 2d_q - 1 \quad (4)$$

Em que  $d_q$  é o tempo de condução da chave.

## 2.2 Inversor em Ponte Completa Monofásico

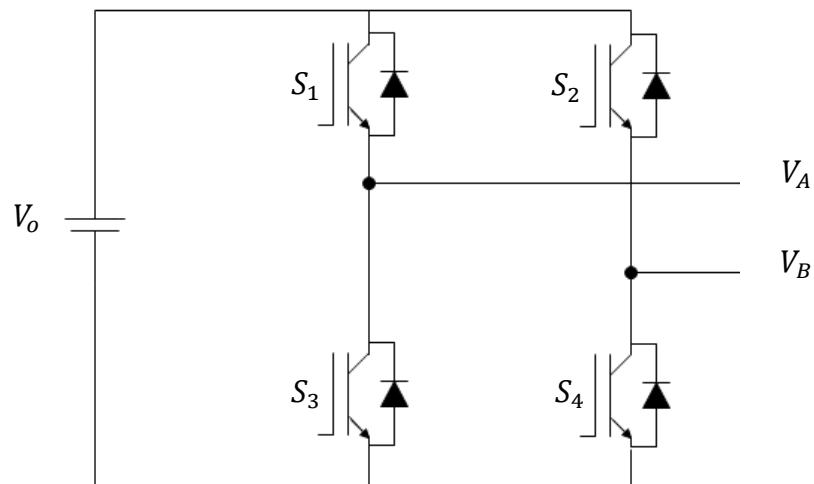
Os inversores podem ser classificados como inversor fonte de tensão ou inversor fonte de corrente. Com relação às estruturas de um inversor monofásico, estas podem ser

classificadas como meia ponte ou ponte completa. Para este trabalho, o interesse é no inversor fonte de tensão em ponte completa, que é bem simples e bastante utilizada em sistemas fotovoltaicos.

Para o controle das chaves em um inversor em ponte completa, pode ser utilizada a técnica PWM seno-triângulo. Esta técnica pode melhorar significativamente a tensão de saída e possibilita o uso em várias aplicações devido a sua fácil implementação, baixo custo de operação e confiabilidade [24].

Nesta técnica, dois tipos de sinais são comparados e para este caso, o sinal de referência é senoidal e a portadora é uma onda triangular. A largura dos pulsos para as chaves é variada de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora.

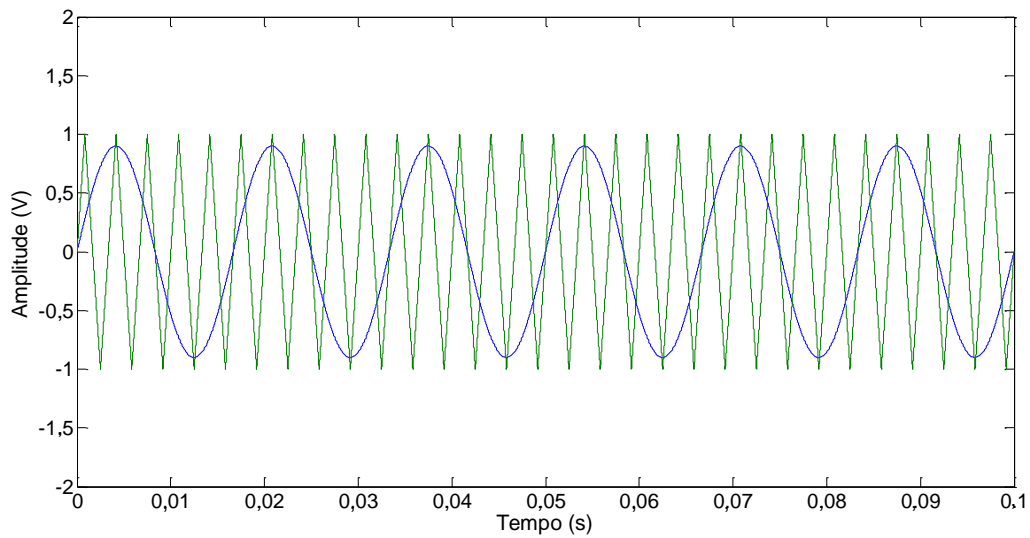
Na Figura 12 é apresentado o circuito do inversor utilizado.



**Figura 12** - Inversor em ponte completa monofásico. Fonte: autora.

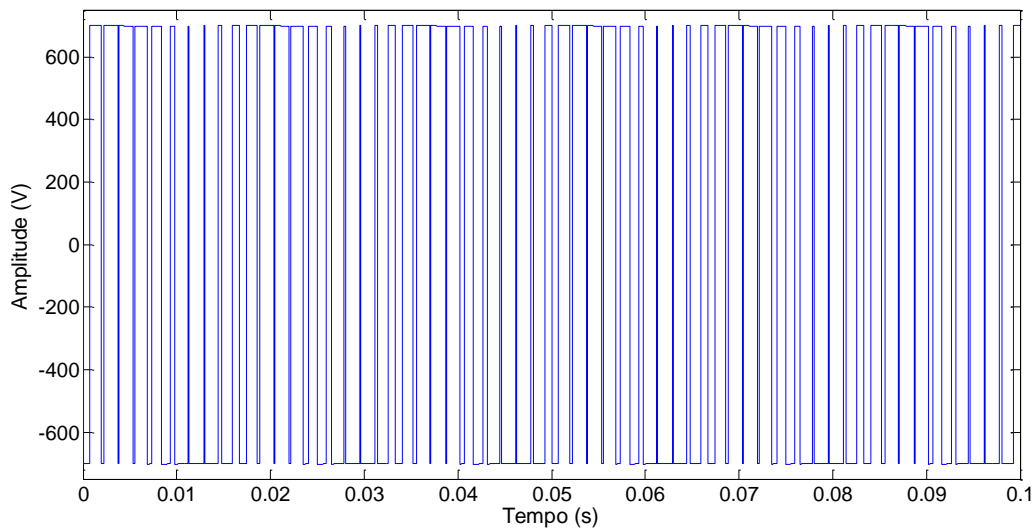
Sendo o chaveamento bipolar, são necessários dois sinais: a referência senoidal na frequência da rede e a portadora triangular em alta frequência. As chaves superior e inferior de um mesmo braço do inversor são chaveadas em alta frequência de modo complementar, ou seja, quando uma está conduzindo, a outra não conduz. Os pulsos resultantes da comparação são aplicados nas chaves superiores ( $S_1$  e  $S_2$ ), enquanto que as inferiores ( $S_3$  e  $S_4$ ) recebem o sinal complementar. Como a tensão de saída nos terminais do inversor é  $V_A - V_B$ , limitando-se entre  $+V_o$  e  $-V_o$ , sem estados de tensão nula na saída, este chaveamento é chamado bipolar.

Na Figura 13 é mostrada uma representação deste tipo de modulação bipolar, onde a frequência da portadora (sinal triangular) é muito maior que a da modulante (sinal senoidal).



**Figura 13** - Sinais para comparação na modulação PWM senoidal bipolar. Fonte: autora.

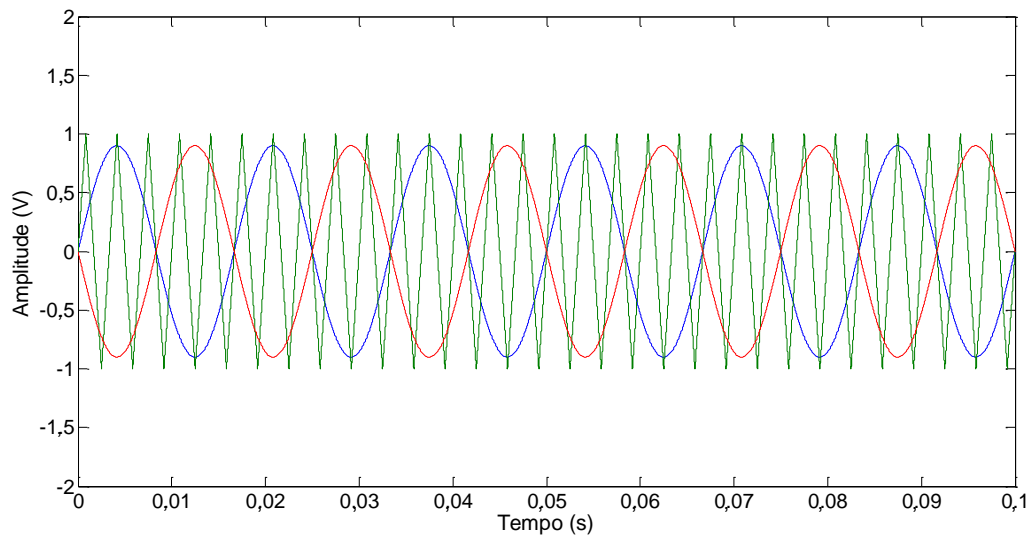
Na Figura 14 é apresentada a tensão na saída do inversor quando utilizada a modulação PWM senoidal bipolar.



**Figura 14** – Tensão na saída do inversor para o PWM senoidal bipolar. Fonte: autora.

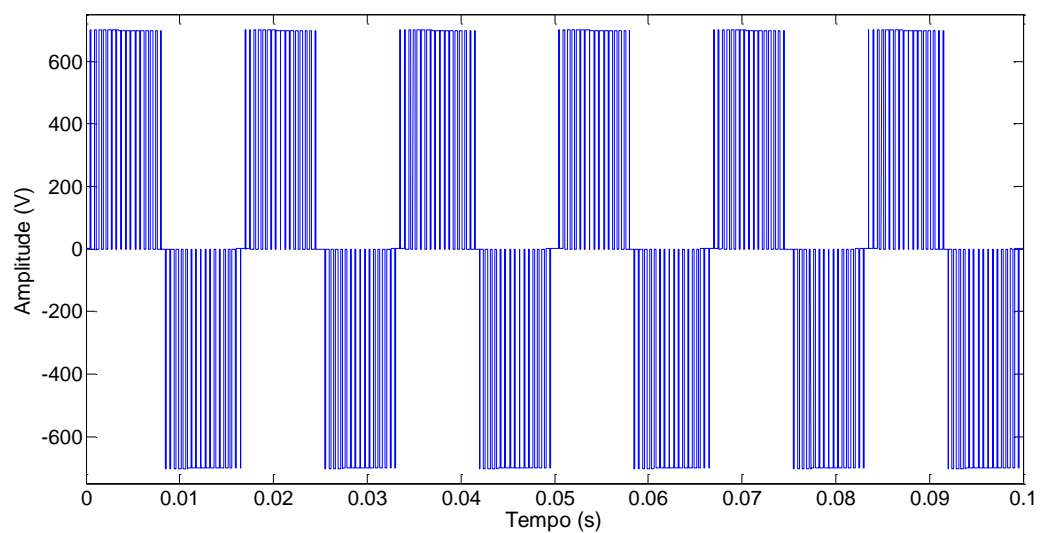
Para o chaveamento unipolar, utiliza-se uma onda triangular de alta frequência em comparação com duas ondas senoidais deslocadas de  $180^\circ$  na frequência da rede ou a comparação de uma senoide na frequência da rede com duas triangulares em alta frequência defasadas. Na modulação PWM seno-triângulo unipolar são gerados dois pulsos para as chaves superiores do inversor, que não iniciam o chaveamento ao mesmo tempo, diferente do caso bipolar.

Para o chaveamento do inversor, foi utilizado o modo unipolar de chaveamento devido a sua fácil implementação. A Figura 15 apresenta um exemplo de chaveamento unipolar utilizando duas senóides e uma portadora triangular.



**Figura 15** – Sinais para comparação na modulação PWM senoidal unipolar. Fonte: autora.

Na Figura 16 é apresentada a tensão na saída do inversor quando utilizada a modulação PWM senoidal unipolar.

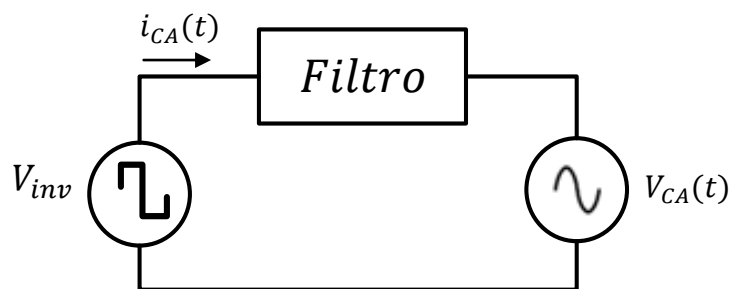


**Figura 16** - Tensão na saída do inversor para o PWM senoidal unipolar. Fonte: autora.

## 2.3 Filtro LCL

Os inversores aplicados em sistemas de geração distribuída são conectados à rede elétrica por meio de filtros do tipo L (indutivo) ou LCL (indutivo, capacitivo e indutivo). Tais filtros são utilizados para atenuar as harmônicas múltiplas da frequência de chaveamento do inversor e estão diretamente relacionados ao seu comportamento dinâmico [25].

Analisando o inversor como uma fonte de tensão controlada, tem-se o modelo do inversor, filtro e rede como apresentado na Fig. 17.



**Figura 17** – Circuito equivalente do inversor, filtro e rede. Fonte: autora.

A tensão produzida pelo inversor pode ser decomposta em duas parcelas: a componente fundamental da tensão que é utilizada para controlar a componente fundamental da corrente injetada na rede e as componentes harmônicas de tensão de ordem elevada, que devem ser filtradas para não produzirem harmônicas de corrente [26].

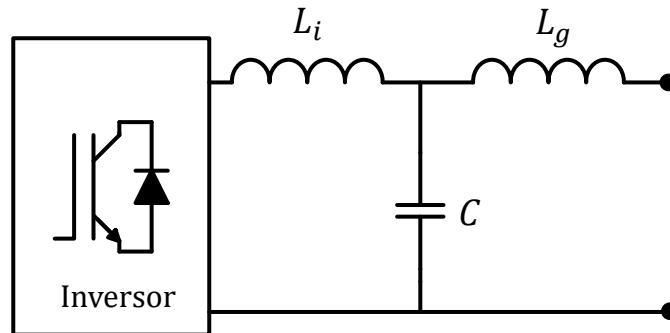
O filtro tem por função garantir que a corrente seja senoidal. As harmônicas de tensão geradas pelo PWM na saída do inversor dependem do índice de modulação, da tensão do barramento CC e da técnica de PWM utilizada, não podendo ser eliminadas nem minimizadas sem que quaisquer dessas características sejam alteradas [26].

Dentre as várias topologias apresentadas na literatura, os filtros passivos mais conhecidos são: o filtro indutivo (L), o filtro indutivo-capacitivo (LC) e o filtro indutivo-capacitivo-indutivo (LCL).

Os filtros L são de primeira ordem e geralmente utilizados para aplicações de baixa potência, pois possuem atenuação de apenas 20 dB/década e resultam em um indutor muito volumoso. Os filtros LC são de segunda ordem e possuem atenuação de 40 dB/década. Porém, para este tipo de filtro, em sistemas conectados à rede elétrica, o capacitor conectado em paralelo com a rede gera transitórios significativos além da frequência de ressonância do

filtro, o que provoca instabilidade no controle da corrente.

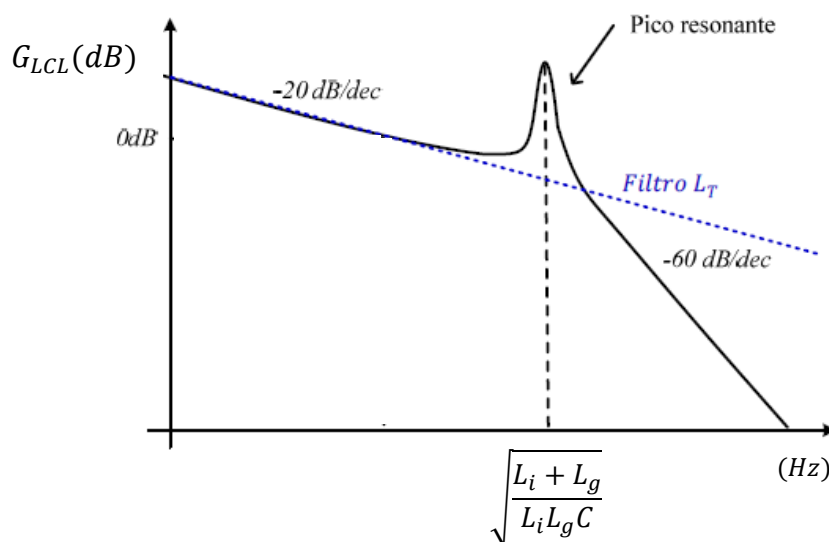
Portanto, escolheu-se para este trabalho o filtro passivo do tipo LCL. O filtro LCL possui dimensões reduzidas em comparação ao filtro L e ao LC. Na Figura 18 é apresentada a topologia de um filtro LCL.



**Figura 18** – Topologia de um filtro LCL. Fonte: autora.

O capacitor  $C$  tem por função fornecer um caminho alternativo para as componentes de alta frequência existentes no indutor  $L_i$ , que não é desejável passar através de  $L_g$  e da rede CA.

Na Figura 19 é apresentada a resposta em frequência para um filtro LCL.



**Figura 19** – Diagrama de Bode para um filtro LCL. Fonte: adaptado de [26].

A impedância do filtro LCL vista pelo inversor é similar a existente para o filtro L quando se considera uma região de baixas frequências. Até próximo a frequência de ressonância, o filtro LCL proporciona uma atenuação de -20 dB/década. Para frequências

superiores à frequência de ressonância, o filtro LCL proporciona uma atenuação de 60 dB/década [27].

Baseado no diagrama de Bode apresentado, observa-se que o filtro LCL possui uma ressonância localizada em:

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C}} \quad (5)$$

Essa ressonância pode levar o sistema a instabilidade. O seu efeito pode ser reduzido através de um amortecimento ativo, utilizando malhas de compensação nos controladores, ou de forma passiva, através do uso de resistores, indutores ou capacitores adicionais [26].

Para este trabalho, foram utilizados indutores de 6 mH e 2 mH, sendo, respectivamente, os valores de  $L_i$  e de  $L_g$ . O capacitor utilizado é de 1,5  $\mu$ F. Portanto, a frequência de ressonância  $\omega_{res}$  é de 21,08 kHz. Estes valores de indutor e capacitor foram utilizados por serem os componentes disponíveis em laboratório mais próximos dos valores calculados para os indutores e o capacitor.

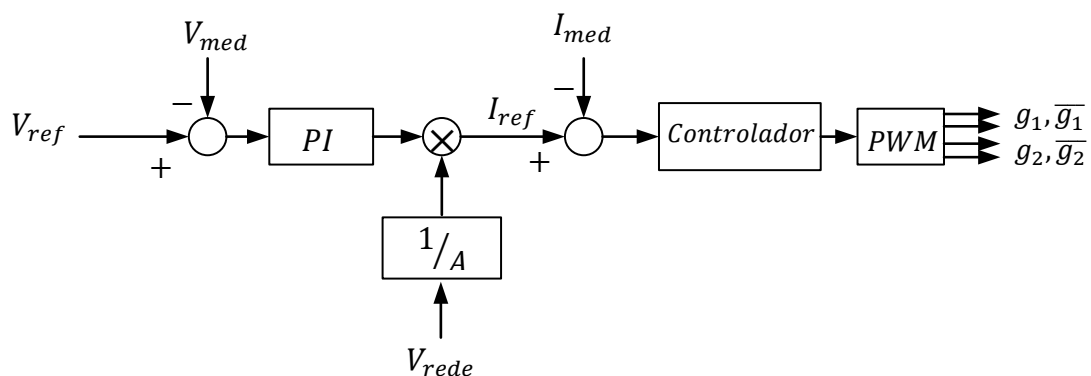
### 3 SISTEMA DE CONTROLE

Esta seção apresenta a estrutura do sistema de controle utilizado, bem como todas as etapas pertinentes ao dimensionamento dos controles proporcional ressonante e controle repetitivo.

As funções de controle de um sistema fotovoltaico são compostas por controle do barramento CC do inversor, controle da corrente injetada na rede, MPPT e sincronização com a rede elétrica.

O sistema de controle empregado neste trabalho trata-se uma adaptação do utilizado em um inversor monofásico conectado à rede apresentado por [28], no qual o barramento CC do inversor e o controle da corrente injetada na rede são realizados por meio de controladores tipo proporcional integral (PI).

Na Figura 20 é apresentado o diagrama representativo da malha de controle da tensão no barramento CC do inversor e da corrente CA utilizado neste trabalho, duas etapas que juntas controlam a potência gerada pelo sistema. O primeiro deles, o controlador PI, é utilizado para manter a tensão do barramento CC constante, enquanto que o outro controlador é utilizado para a corrente a ser injetada na rede elétrica. Este controle necessita ser adequado a referência senoidal ou com distorção, como por exemplo um controlador ressonante ou repetitivo.



**Figura 20** - Controle da tensão no barramento CC e controle da corrente CA. Fonte: autora.

Sendo  $A$  a amplitude da tensão da rede elétrica. A tensão da rede multiplicada por  $1/A$  passa a ser um sinal de amplitude unitária, mas possuindo as mesmas características, sendo, portanto, uma alternativa a utilização de PLL no sistema.

Para o controle da tensão no barramento CC do inversor e controle da corrente CA, a diferença entre a tensão de referência ( $V_{ref}$ ) do barramento, fixada em 400 V, e a tensão medida no barramento ( $V_{med}$ ) é a entrada do controlador PI. O sinal de saída do controlador PI é multiplicado pela senóide de amplitude unitária e este sinal é agora a referência para a corrente ( $I_{ref}$ ). A diferença entre a corrente de referência e a corrente medida ( $I_{med}$ ) é a entrada do controlador. A saída deste controlador é, portanto, o sinal modulante para o PWM do inversor.

O projeto do controlador tem por finalidade garantir a estabilidade do sistema e robustez com relação à presença de harmônicos na tensão da rede. Em [25] são apresentados os principais grupos de técnicas aplicadas ao controle da corrente em inversores em paralelo com fontes de tensão.

Dentre os controladores lineares utilizados juntamente com a modulação PWM para acionamento das chaves do inversor, será utilizado neste trabalho um controle repetitivo. Posteriormente, será comparado o desempenho com o controle ressonante e estruturas clássicas apresentadas na literatura.

### 3.1 Controle Proporcional Ressonante

O controlador proporcional ressonante foi proposto para o controle de corrente em aplicações de eletrônica de potência. Um erro de regime permanente nulo pode ser obtido na frequência de ressonância [25].

O controlador ressonante apresenta um modelo com um par de polos puramente imaginários e, portanto, capaz de inserir na malha de controle uma dinâmica senoidal de determinada frequência. A função de transferência do controlador ressonante é definida como:

$$G_r(s) = K_r \frac{s}{s^2 + \omega_r^2} \quad (6)$$

Sendo  $\omega_r$  a frequência de ressonância e  $K_r > 0$  o ganho de entrada do controlador.

O objetivo do controlador é seguir uma referência senoidal com frequência  $\omega_r$ , portanto, deve apresentar o denominador  $s^2 + \omega_r^2$ , porém o numerador pode possuir até dois zeros finitos, ou seja, o numerador pode ser um polinômio de ordem 2, cujos ganhos são parâmetros que são ajustados.

A função de transferência de um controlador proporcional ressonante é dada por:

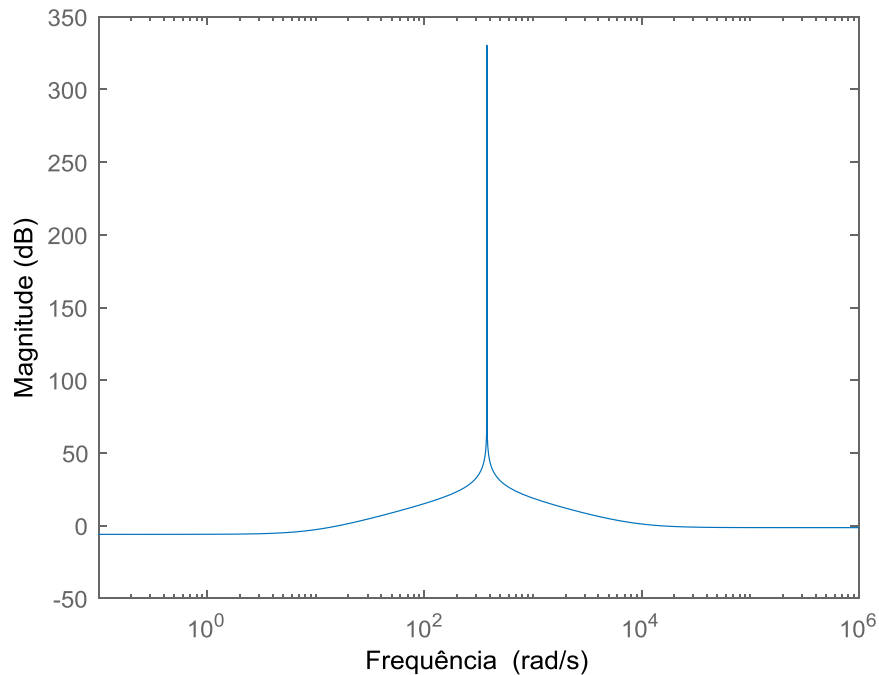
$$G(s) = K_p + K_r \frac{s}{s^2 + \omega_r^2} \quad (7)$$

Onde  $K_p$  é o ganho proporcional que, por sua vez, auxilia no ajuste da dinâmica do sistema. Assim, sendo  $k_a = k_p$ ,  $k_b = k_r$  e  $k_c = k_p \omega_r^2$ , tem-se:

$$G(s) = \frac{k_a s^2 + k_b s + k_c}{s^2 + \omega_r^2} \quad (8)$$

Os valores teóricos obtidos para este controlador são apenas uma primeira estimativa, isto é, um ponto de partida para verificar se o controlador cumpre com o propósito para o qual foi projetado. Após ajustes realizados, os ganhos para o controlador proporcional ressonante são:  $k_a = 0,85$ ,  $k_b = 7500$ ,  $k_c = 71061,2$  e  $\omega_r = 377$  rad/s.

O diagrama de Bode apresentado na Fig. 21 ilustra o comportamento do controle em questão.



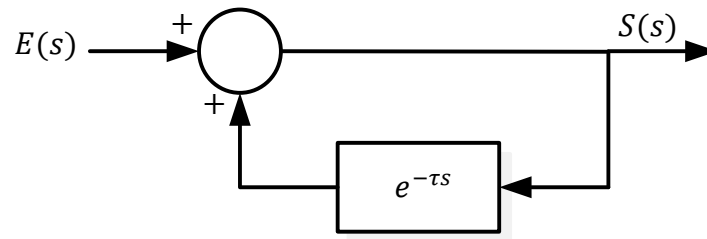
**Figura 21** – Diagrama de Bode para o controlador proporcional ressonante. Fonte: autora.

Para a frequência de interesse, há um ganho elevado representado pelo pico de ressonância na curva de magnitude do diagrama.

### 3.2 Controle Repetitivo

O termo controle repetitivo é normalmente utilizado para descrever algoritmos de controle especialmente projetados para cancelar erros que são periódicos com o tempo. Este tipo de erro ocorre, por exemplo, quando o sistema é submetido a uma perturbação periódica [29].

A grande vantagem desse controlador é o fato de que o seguimento/rejeição é garantido para qualquer sinal com período fundamental  $\tau$  independente de seu conteúdo harmônico. A ideia fundamental desse controlador é o armazenamento do erro de seguimento durante um período completo e a conseqüente realimentação deste sinal de erro no sistema [30]. Normalmente este comportamento é resultado da introdução de um elemento de atraso na malha de controle com o mesmo valor do período fundamental  $\tau$  em um laço de realimentação positiva, conforme apresentado na Fig. 22.



**Figura 22** – Configuração básica do controle repetitivo. Fonte: autora.

A função de transferência do controlador repetitivo é

$$G_c(s) = \frac{1}{1 - e^{-\tau s}} \quad (9)$$

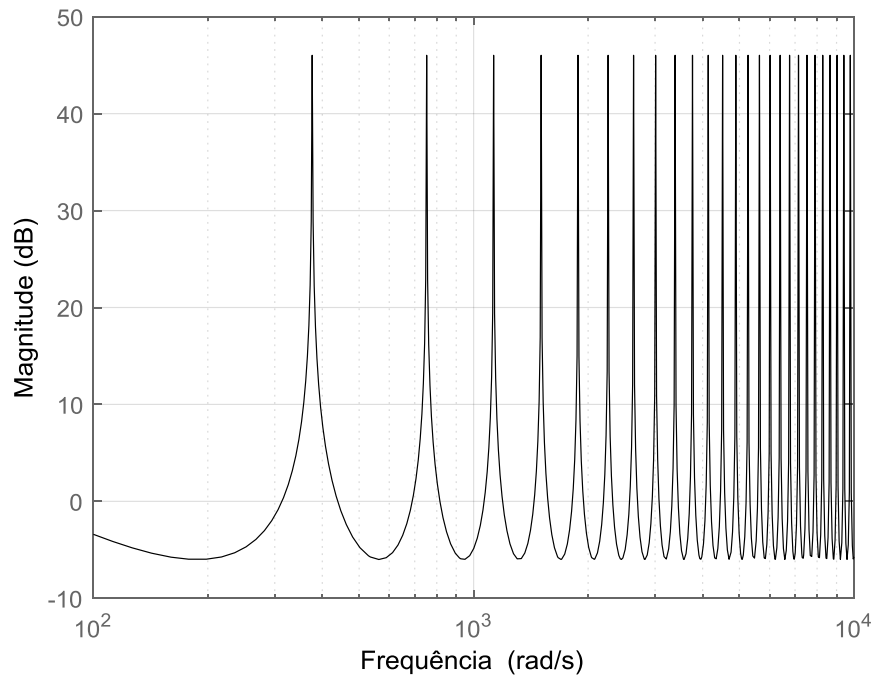
Sendo  $s = j\omega$  e, segundo a fórmula de Euler  $e^{-j\omega\tau} = \cos(\omega\tau) - j\text{sen}(\omega\tau)$ , então:

$$G_c(s) = \frac{1}{1 - \cos(\omega\tau) + j\text{sen}(\omega\tau)} \quad (10)$$

Assim, conclui-se que o controlador apresentará ganho infinito para sinais com frequência fundamental  $\omega_0 = 2\pi/\tau$  rad/s e também para todos os sinais que apresentam frequências múltiplas inteiras da fundamental, ou seja,  $\omega = k\omega_0$  rad/s, para  $k = 1, 2, \dots$  [31].

Deste modo, o controle implementa infinitos polos no eixo imaginário em frequências múltiplas da fundamental, apresentando picos de ganho para essas frequências e garantindo o seguimento da referência com erro nulo e rejeição de perturbações em uma dada frequência.

Na Figura 23 é apresentada a resposta em frequência do controlador repetitivo e os respectivos picos de ganho.



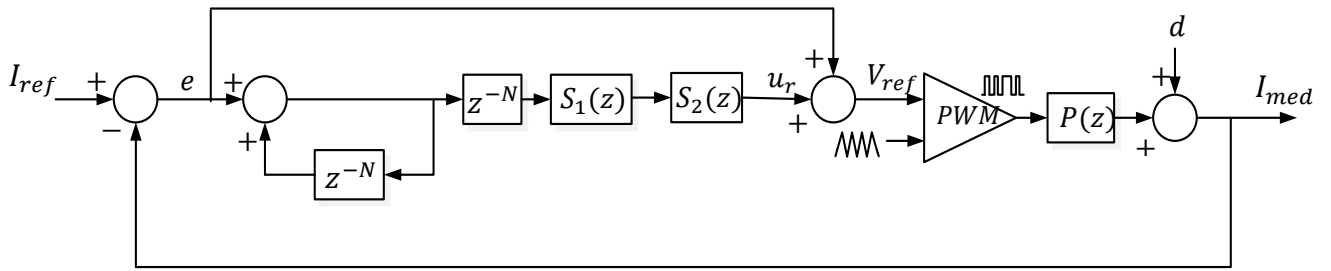
**Figura 23** – Resposta em frequência do controlador repetitivo. Fonte: autora.

O controle repetitivo utiliza a natureza repetitiva dos distúrbios enquanto outros métodos não o fazem. O mecanismo de controle é realmente um controle integral baseado em período fundamental [24]. Este controle modifica o sinal de referência adicionando um sinal de compensação periódica. Trata-se de um controle aplicado para gerar tensão de saída senoidal de alta qualidade nos inversores.

Controladores repetitivos podem ser baseados no princípio do modelo interno ou do modelo externo. O controlador utilizado neste trabalho baseia-se no princípio do modelo interno, que é linear e, portanto, sua análise é mais simples.

As aplicações do controle repetitivo são diversas, abrangendo qualquer sistema que contenha distúrbios de carga periódicos. Alguns exemplos são em aplicações com filtros ativos, retificadores PWM e regulação da tensão de saída para fontes de alimentação ininterrupta. Se um controlador repetitivo for combinado diretamente com um inversor SPWM, a tensão de saída de alta qualidade pode ser alcançada em custos muito baixos [24].

Na Figura 24 é exibida a estrutura do controle repetitivo utilizada, que foi adaptada da apresentada por [24].



**Figura 24** - Estrutura do controle repetitivo utilizado. Fonte: autora.

O sinal  $e$  é a comparação de  $I_{ref}$  e  $I_{med}$  e entrada do controle repetitivo, enquanto que  $u_r$  é a tensão resultante do controlador repetitivo, que é adicionada ao sinal  $e$  para compensar a distorção.  $V_{ref}$  é a tensão resultante do controlador repetitivo, que é a referência para a modulação PWM do inversor.

Nesta figura,  $d$  representa toda perturbação cíclica que causa distorção na tensão de saída, como cargas não lineares e efeito do tempo morto no comando das chaves do inversor.

O núcleo principal do controlador repetitivo é a função de transferência  $1/(1 - z^{-N})$ , que representa a malha interna de realimentação positiva, onde  $N$  é o número de amostras de um período de frequência fundamental e dado por  $N = f_a/f_{rede}$  sendo  $f_a$  a frequência de amostragem e  $f_{rede}$  a frequência da rede. Essa função de transferência integra o erro dado por  $I_{ref} - I_{med}$  no período fundamental.

Neste diagrama,  $z^{-N}$  retarda a ação de controle por um período da fundamental e  $P(z)$  representa a função de transferência do filtro na saída do inversor.

$S(z)$  é formado  $S_1(z)$  e  $S_2(z)$  em cascata, que são filtros tipo *notch*, responsáveis, respectivamente, por cancelar o pico de ressonância do inversor e a componente de 5ª harmônica a ser inserida no sistema em uma situação de tensão da rede elétrica sob condições de distorção.

Dessa forma, o controle repetitivo irá cancelar os harmônicos de frequência inferior à frequência de ressonância do filtro colocado na saída do inversor. Os harmônicos além da frequência de ressonância serão cancelados naturalmente pela ação do filtro LCL.

### 3.2.1 Dimensionamento da Estrutura do Controle Repetitivo

Para formar  $S_1(z)$  foi utilizado um filtro *notch*, que é um tipo de filtro projetado para atenuar as frequências que estão em um valor determinado. A Eq. (11) expressa a relação entrada-saída do filtro *notch* utilizado.

$$S_1(s) = \frac{s^2 + \omega_n^2}{s^2 + s\left(\frac{\omega_n}{Q}\right) + \omega_n^2} \quad (11)$$

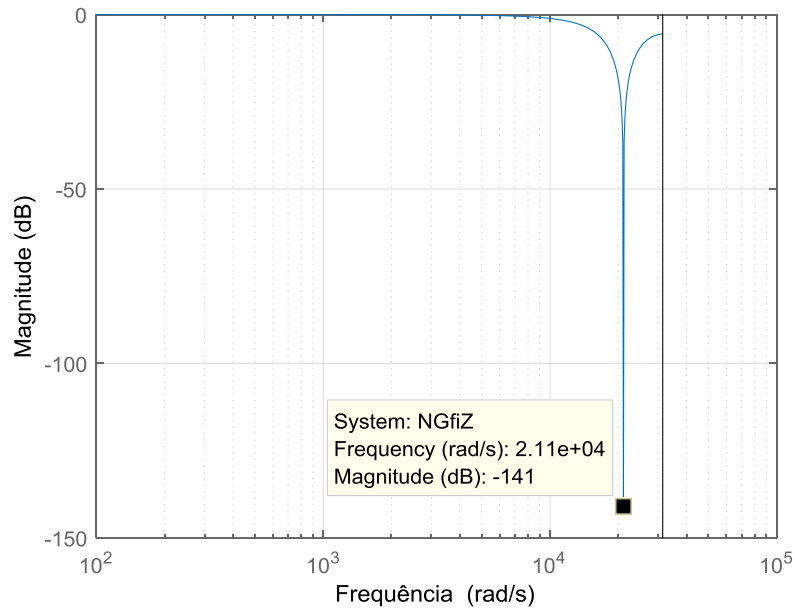
Foi selecionada a frequência *notch* igual à de ressonância da planta, apresentada anteriormente por meio da Eq. (5), para que possa haver a atenuação do pico de ressonância do inversor. Assim, a partir do valor de frequência igual a 21,1 kHz, encontra-se a função de transferência apresentada na Eq. (12) para o filtro *notch*  $S_1(s)$ .

$$S_1(s) = \frac{s^2 + 4,444 \times 10^8}{s^2 + 1,757 \times 10^4 s + 4,444 \times 10^8} \quad (12)$$

Por meio de  $S_1(s)$ , no próprio Matlab<sup>®</sup>, o comando “c2d” foi utilizado para converter sistemas de tempo contínuo em tempo discreto, por meio do modo ‘zoh’ - *zero order hold*, com um tempo de amostragem de 100  $\mu$ s, Dessa forma, tem-se:

$$S_1(z) = \frac{0,4809z^2 + 0,4923z + 0,4809}{z^2 - 0,2815z + 0,1726} \quad (13)$$

Na Figura 25 é apresentado o diagrama de Bode de  $S_1(z)$ .



**Figura 25** – Diagrama de Bode do filtro  $S_1(z)$ .

Nota-se por meio da Fig. 25 que  $S_1(z)$  atenua o pico de ressonância indesejável, que ocorre na frequência de ressonância do inversor.

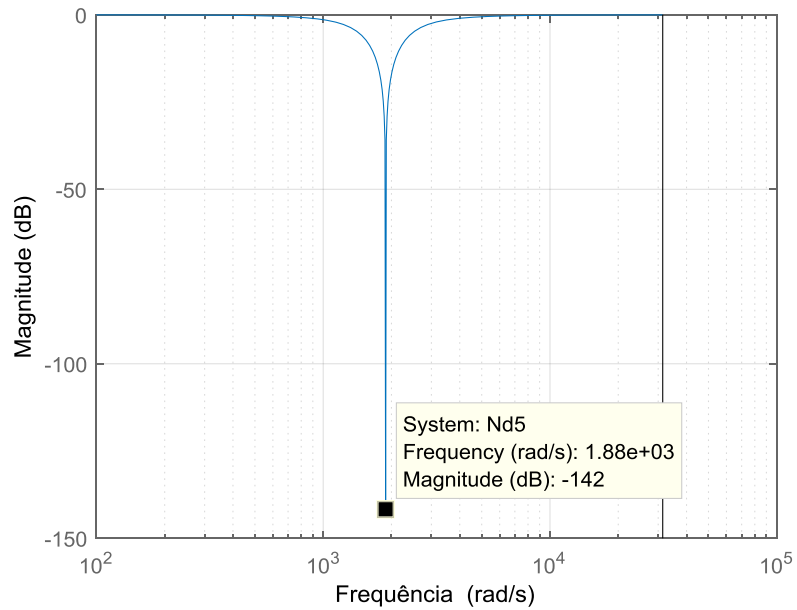
De mesma forma, para atenuar a componente harmônica inserida no sistema em condições de distorção, é selecionado para  $S_2(z)$  um valor para a frequência *notch* igual a  $\omega_n = 2 \times \pi \times 60 \times 5 = 1880 \text{ rad/s}$ . Assim sendo, a função de transferência para  $S_2(z)$  é apresentada na Eq. (14).

$$S_2(s) = \frac{s^2 + 3,553 \times 10^6}{s^2 + 1571s + 3,553 \times 10^6} \quad (14)$$

Discretizando  $S_2(s)$ , tem-se:

$$S_2(z) = \frac{0,9254z^2 - 1,818z + 0,9254}{z^2 - 1,822z + 0,8546} \quad (15)$$

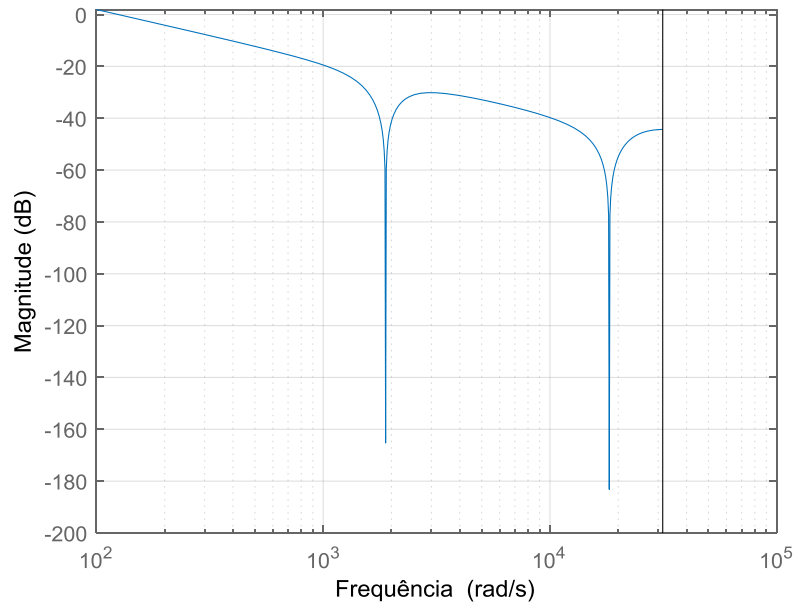
Na Figura 26 é apresentado o diagrama de bode de  $S_2(z)$ .



**Figura 26** – Diagrama de Bode de  $S_2(z)$ .

Pode-se observar que  $S_2(z)$  apresenta ganho unitário entre a frequência zero e a frequência de ressonância, com atenuação na frequência de interesse, componente de 5ª harmônica, 300 Hz.

Dimensionados os filtros que formam  $S(z)$ , na Fig. 27 é apresentado o diagrama de Bode de  $S(z)P(z)$ .



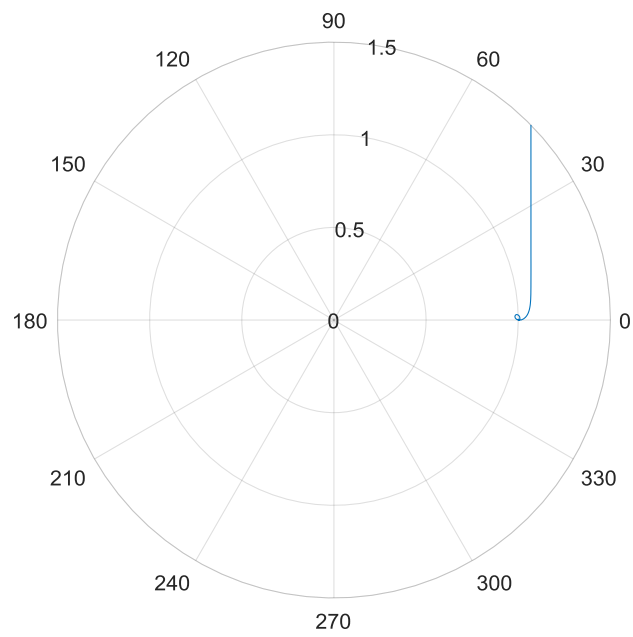
**Figura 27** – Diagrama de Bode de  $S(z)P(z)$ .

Nota-se que o ganho de  $S(z)P(z)$  é próximo à unidade para as frequências inferiores a 300 Hz e apresenta uma maior queda para as altas frequências. Assim, o controle repetitivo irá cancelar as harmônicas de frequência inferior à frequência de ressonância do filtro colocado na saída do inversor. Os harmônicos além dessa frequência serão canceladas naturalmente pela ação do filtro LCL.

Escolhidos os parâmetros e determinadas as funções de transferência dos filtros que formam  $S(z)$ , a estabilidade do sistema pode ser verificada por meio do diagrama polar da Eq. (16).

$$H(z) = 1 - S(z)P(z) \quad (16)$$

Na Figura 28 é apresentado o diagrama polar de  $H(z)$ .



**Figura 28** – Diagrama polar de  $H(z)$ .

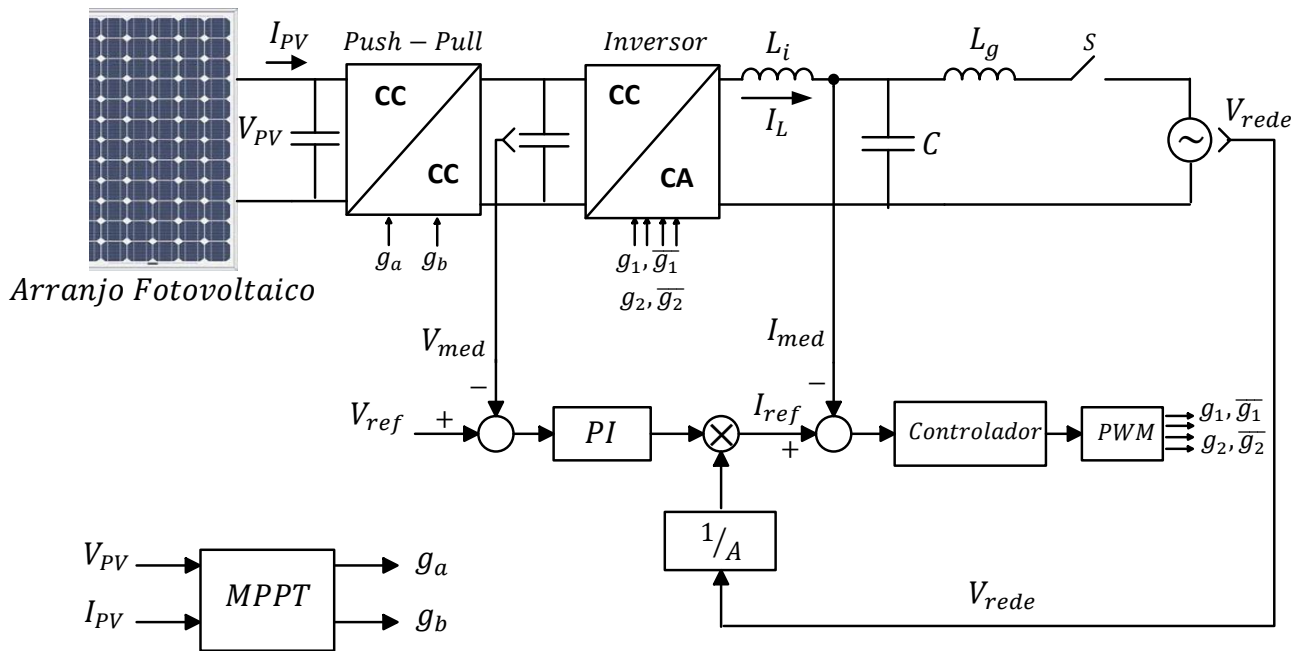
Para o diagrama de Nyquist desenhado no diagrama polar, a curva não envolve o ponto -1 (1 e fase 180), o que indica que o sistema é estável.

## 4 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados de simulação obtidos para o sistema fotovoltaico conectado à rede utilizando dois tipos de controladores para a corrente (proporcional ressonante e repetitivo) e em dois cenários: rede elétrica senoidal e rede elétrica com distorção harmônica. A simulação foi realizada em ambiente *Simulink/Matlab*<sup>®</sup> versão 2018 com tempo de simulação igual a 2 segundos e tempo de amostragem igual a 1 $\mu$ s.

### 4.1 Cenário de Simulação

A plataforma utilizada para realizar as simulações é apresentada na Fig. 29. O cenário consiste de uma geração fotovoltaica conectada à rede, passando por dois estágios de conversão, o primeiro deles um conversor push-pull alimentado em corrente e elevador de tensão, e em seguida um conversor CC-CA (inversor de tensão). O próximo estágio é o filtro LCL para então haver a conexão com a rede elétrica. O sistema de controle da tensão no barramento CC e da corrente que é injetada na rede devem ser ajustadas conjuntamente para garantir o bom funcionamento do inversor.



**Figura 29** - Estrutura de simulação. Fonte: autora.

O chaveamento do Push-Pull é realizado a partir do MPPT do painel fotovoltaico. Para o MPPT foi utilizado o método Perturba e Observa (P&O).

A chave S representa um disjuntor que é fechado apenas quando a tensão no PCC e a tensão após o filtro estão sincronizadas, situação fundamental para realizar o paralelo das duas tensões.

O diagrama de blocos criado em Simulink/Matlab<sup>®</sup> para a simulação do sistema completo é apresentado no ANEXO.

Os resultados obtidos decorrem de simulação computacional realizada com os seguintes parâmetros:

- Tensão no barramento CC: 400 V;
- Tensão da rede: 220 V<sub>eficaz</sub>;
- Frequência da rede: 60 Hz;
- Conteúdo harmônico da rede: 5º harmônico.

## 4.2 Desempenho do Arranjo Fotovoltaico

Para este trabalho, o modelo do painel fotovoltaico utilizado é o Kyocera Solar KD325GX-LPB. Sabe-se que a potência entregue pelos painéis fotovoltaicos está relacionada com a irradiação solar. Dessa forma, e com o intuito de observar como o controle se comporta com a variação da irradiância, que é uma situação comum, para a simulação, a irradiação solar foi representada por um sinal tipo degrau com valor inicial de  $1000 \text{ W/m}^2$  com alteração para  $600 \text{ W/m}^2$  após a metade do tempo de simulação (1s). A temperatura foi fixada em  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e o painel atua na sua máxima potência.

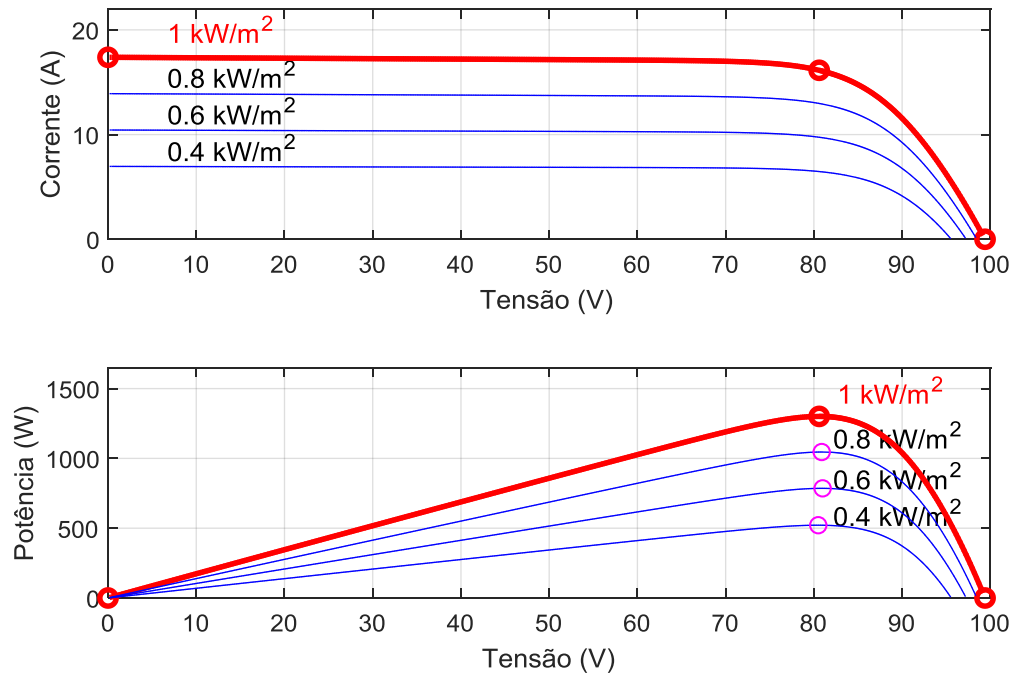
A célula solar apresenta resistência shunt de  $230,34 \text{ } \Omega$  e resistência série de  $0,401 \text{ } \Omega$ . A corrente gerada pela incidência da radiação na célula é de  $8,705 \text{ A}$ . As demais características do painel fotovoltaico utilizado para uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  são apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3** – Características do painel fotovoltaico para um irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e também  $600 \text{ W/m}^2$ , considerando a temperatura igual a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

<i>Irradiância</i>	<i>1000 W/m<sup>2</sup></i>	<i>600 W/m<sup>2</sup></i>
Potência	325 Wp	196,3 Wp
Tensão no ponto de máxima potência	40,3 V	40,3 V
Corrente no ponto de máxima potência	8,07 A	4,85 A
Tensão de circuito aberto	49,7 V	48,59 A
Corrente de curto-circuito	8,69 A	5,21 A

Com a alteração da irradiância pode-se observar que a tensão na saída do painel não sofre grande variação, pois há pouca dependência da tensão com este fator, o que é também demonstrado pela curva IxV do painel fotovoltaico.

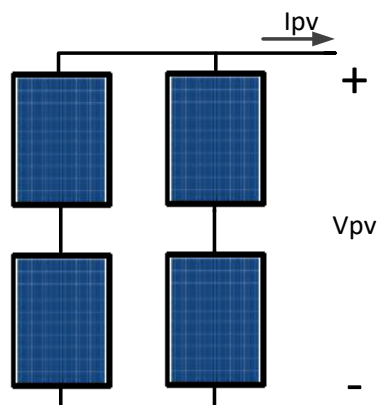
Pode-se observar na Figura 30 a curva corrente-tensão e potência-tensão do painel fotovoltaico utilizado.



**Figura 30** - Curva da corrente-tensão e potência-tensão do painel fotovoltaico utilizado.

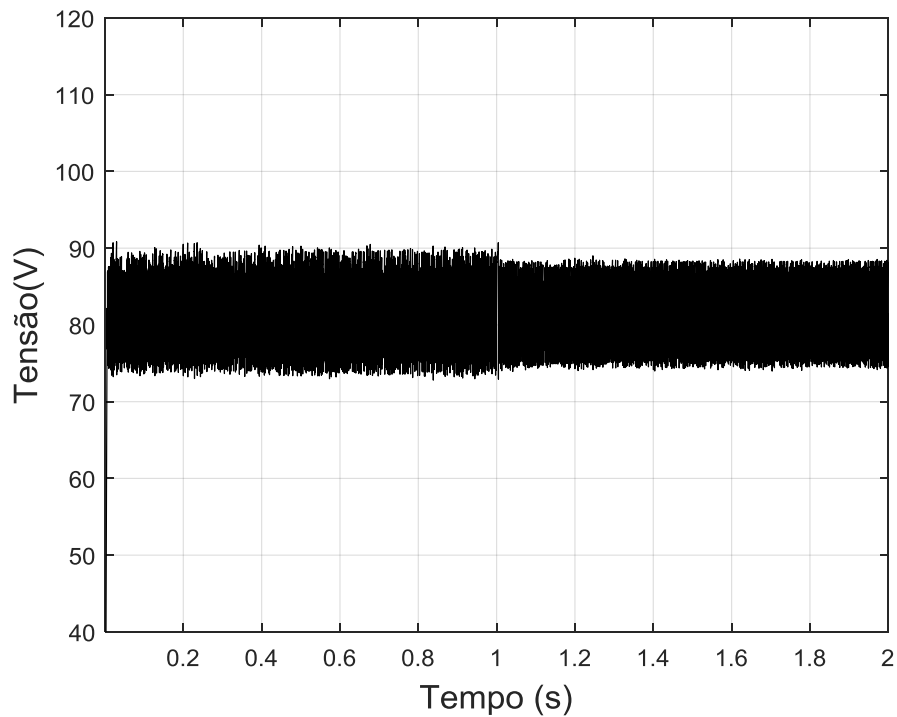
Nesta figura, observa-se que no ponto de máxima potência, para diferentes valores de irradiância, o valor da tensão não se altera significativamente, enquanto que a corrente possui uma alteração mais significativa.

O arranjo fotovoltaico utilizado contém quatro módulos e é formado por duas *strings* de painéis conectadas em paralelo, sendo que cada *string* consiste de dois módulos conectados em série, tal como apresentado na Fig. 31. Este arranjo foi assim configurado para atender uma potência que se pretende injetar na rede.



**Figura 31** - Conexão dos painéis no arranjo fotovoltaico. Fonte: autora.

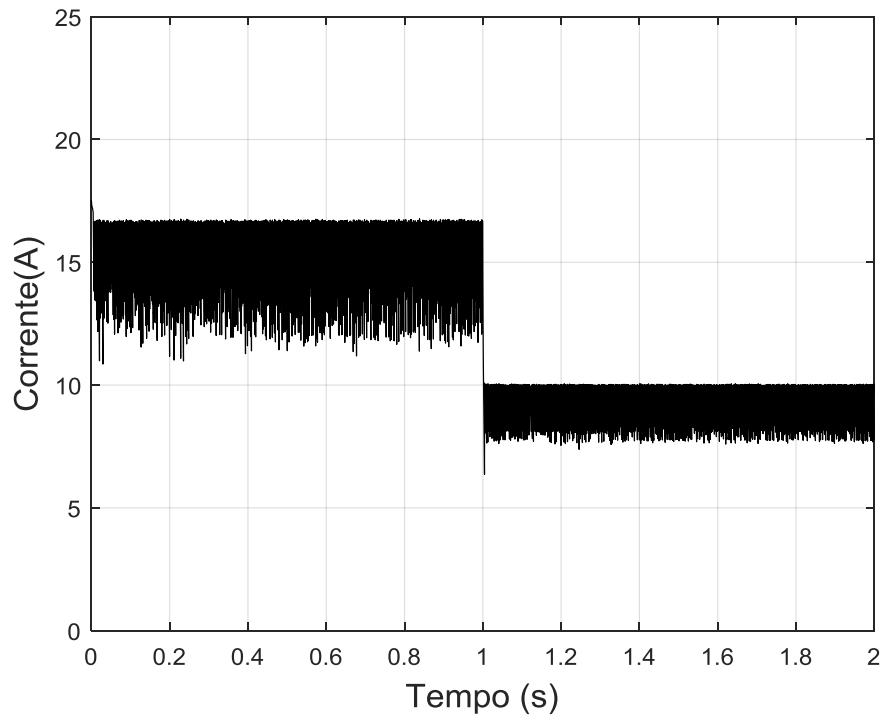
A tensão de saída do painel fotovoltaico é apresentada na Fig. 32.



**Figura 32** - Tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico.

O valor médio da amplitude da tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico é de 80,6 V, como esperado, uma vez que a tensão no ponto de máxima potência de cada painel é de 40,3 V e cada ramo paralelo do arranjo fotovoltaico é formado por dois painéis em série.

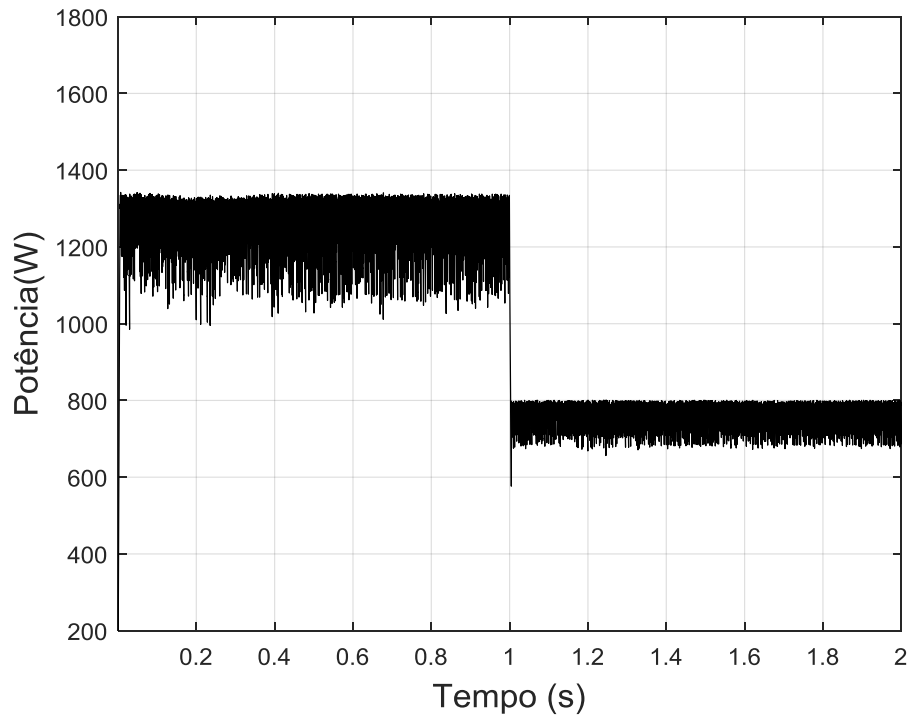
A corrente de saída do painel fotovoltaico é apresentada na Fig. 33.



**Figura 33** - Corrente que sai do arranjo fotovoltaico.

Para este trabalho, a corrente possui amplitude de 16,14 A para uma irradiação de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Com a diminuição da irradiação para  $600 \text{ W/m}^2$ , a amplitude da corrente passa a ser 9,7 A. A alteração da irradiação incidente no painel modifica consideravelmente o valor da corrente produzida, havendo a diminuição da corrente com a diminuição da luminosidade, pois a corrente gerada por um painel é proporcional ao fluxo incidente sobre este.

A potência entregue ao sistema pelo arranjo fotovoltaico é apresentada na Fig. 34.

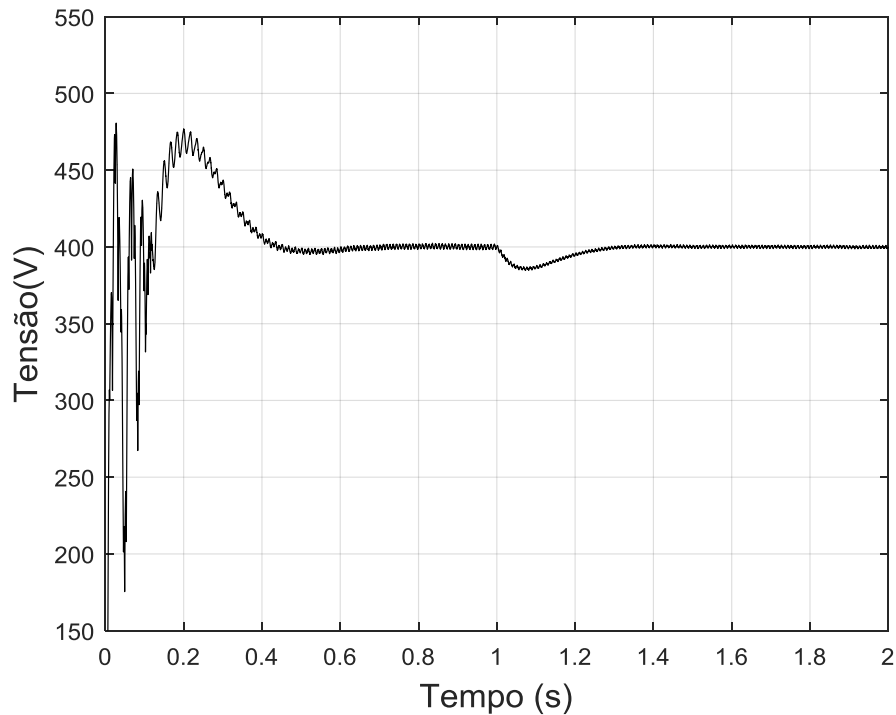


**Figura 34** - Potência entregue ao sistema pelo arranjo fotovoltaico.

A potência entregue pelo painel fotovoltaico em sua máxima potência para uma irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  é de 1300 W. Para uma irradiância de  $600 \text{ W/m}^2$ , a potência passa a ser de 785,2 W. Pode-se observar, portanto, que a variação de corrente e da potência é significativa, ao contrário do que acontece com a tensão que praticamente se manteve constante.

### 4.3 Comportamento da Tensão de Saída do Conversor *Push-Pull*

Na Figura 35 é apresentada a forma de onda da tensão de saída do conversor *Push-Pull* ou tensão do barramento CC do inversor, que tem valor de referência definido para 400 V.



**Figura 35** - Tensão no barramento CC do inversor.

Por meio da Fig. 34 é possível perceber a atuação do controle sobre a tensão do barramento, característica fundamental para o devido funcionamento do sistema. Com a variação de irradiação, há uma transição no início de cada intervalo, porém a tensão se estabiliza em 400 V, que é o valor definido.

O tempo de transição inicial para se alcançar o valor de referência não constitui um problema no que diz respeito ao funcionamento do sistema de controle utilizado, pois em regime permanente a resposta é estável e mantém-se igual a referência.

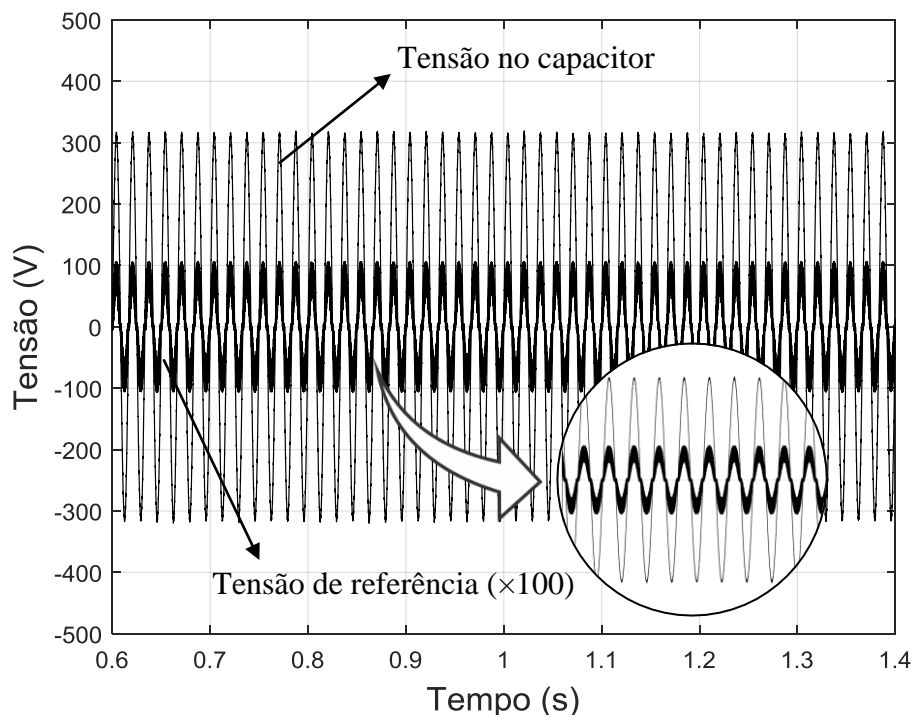
#### **4.4 Desempenho da Conexão do Inversor com a Rede Elétrica Senoidal**

Os resultados de simulação que foram apresentados até então, não se alteram com a presença de distorção na rede elétrica e nem com mudança do controle da malha de corrente, uma vez que o controlador a ser alterado corresponde a malha de corrente, interferindo na resposta do sistema após o inversor. Ou seja, utilizando o controle proporcional ressonante ou repetitivo para os mesmos parâmetros, as respostas anteriores serão equivalentes. Dessa forma, seguindo a sequência, esta seção apresenta o comportamento das formas de onda a partir do inversor.

#### 4.4.1 Controle Proporcional Ressonante

Nesta secção é analisado o comportamento do controle proporcional ressonante em um sistema fotovoltaico conectado à rede senoidal.

A entrada do controle proporcional ressonante é o sinal de erro que advém da comparação da corrente de referência e a corrente medida. O controlador proporcional ressonante atua a fim de tornar mínimo o erro em regime permanente entre o valor de referência e o valor medido da corrente. A saída do controle, por sua vez, é o sinal de referência, ou modulante, para a geração dos sinais PWM, a partir do qual resultam os sinais de comando para as chaves do inversor. Como na saída do inversor há um filtro LCL, a tensão no capacitor do filtro deve seguir a modulante que a gerou. Na Figura 36 é apresentada a tensão no capacitor do filtro e a tensão de referência para o PWM.

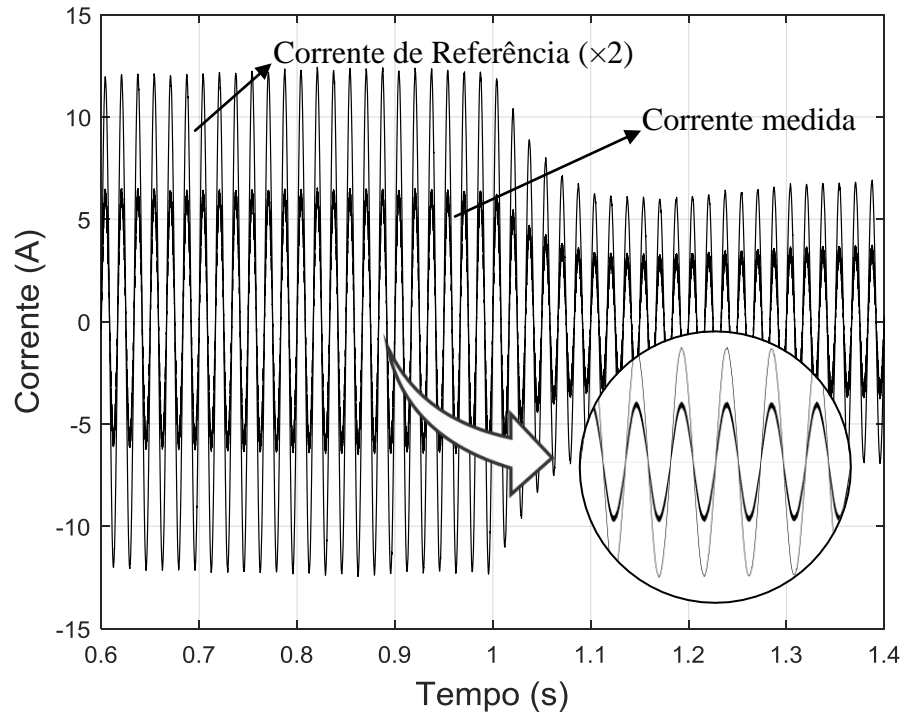


**Figura 36** – Tensão de referência ( $\times 100$ ) para o PWM e tensão no capacitor do filtro LCL utilizando controle proporcional ressonante e rede senoidal.

Observa-se que a tensão no capacitor do filtro segue a forma de onda da modulante.

A corrente de referência, no entanto, ocorre da malha de controle do barramento CC, que em sua saída vai produzir um valor fixo de amplitude a ser multiplicado por uma senóide unitária com as mesmas características da tensão da rede. Como já foi comentado anteriormente, neste trabalho não foi utilizado PLL para obter a senóide unitária. O valor de

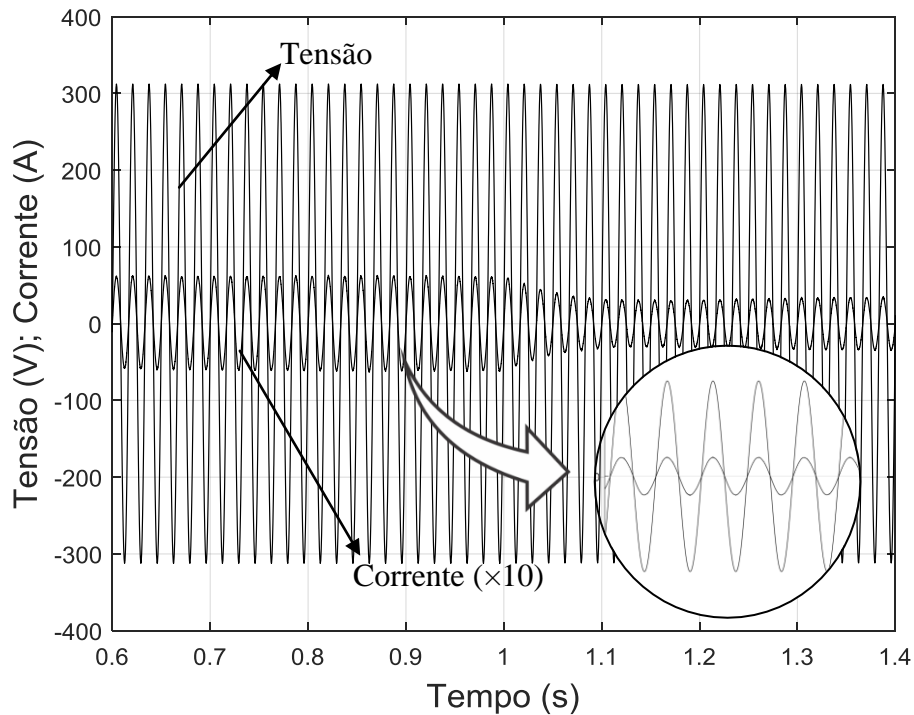
amplitude da corrente de referência é de 6,2 A para a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e de 3,5 A para a irradiância de  $600 \text{ W/m}^2$ , que foram os dois valores utilizados neste trabalho. Dessa forma, na Fig. 37 é apresentada a corrente de referência e a corrente medida na saída do inversor.



**Figura 37** – Corrente de referência ( $\times 2$ ) e corrente medida na saída do inversor utilizando controle proporcional ressonante e rede senoidal.

É perceptível a atuação do controle sobre a corrente na saída do inversor que segue a corrente de referência, garantindo também a amplitude de 6,2 A para a corrente medida considerando irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e amplitude de 3,5 A para a irradiância de  $600 \text{ W/m}^2$ , como projetado.

Na Figura 38 é apresentada a tensão e corrente no ponto comum de conexão com a rede elétrica.



**Figura 38** – Corrente ( $\times 10$ ) e tensão no PCC utilizando controle proporcional ressonante e rede senoidal.

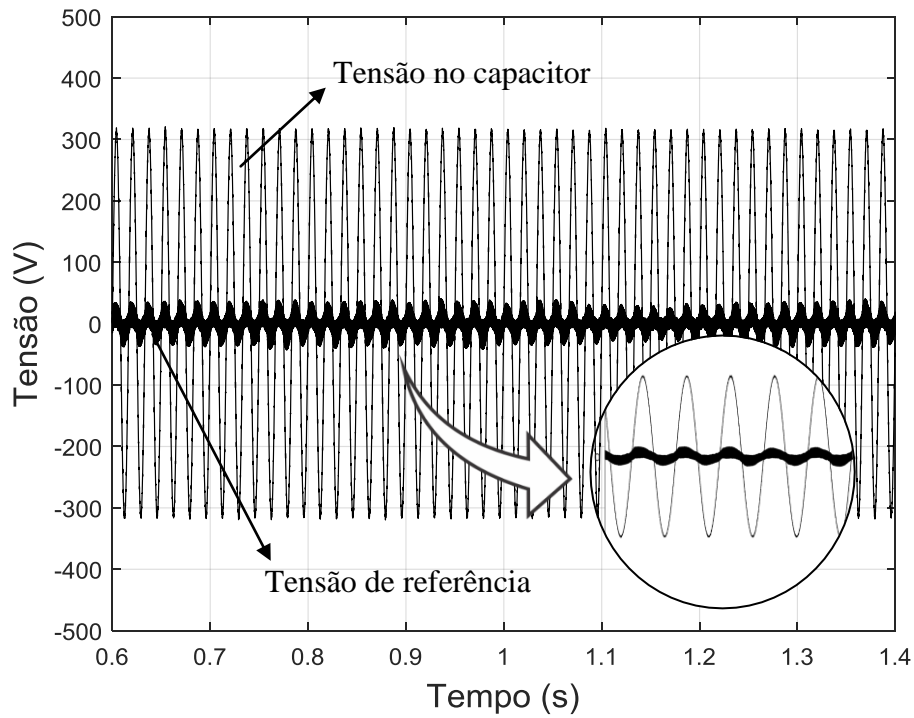
Pode-se observar que o valor da tensão é  $311 V_{\text{pico}}$  e valor eficaz é  $220 V$  como foi projetado para o PCC. A corrente possui amplitude de  $6,1 A$  e, após a diminuição da irradiância, seu valor passa a ser  $3,4 A$ .

Empregando o controlador proporcional ressonante e sistema conectado à rede senoidal, a Taxa de Distorção Harmônica da Corrente (TDH<sub>i</sub>) é de  $1,19\%$  e o fator de potência é igual a  $0,999$ . Dessa forma, a TDH da corrente atende ao que recomenda a norma internacional IEC 61727 e o fator de potência possui valor bastante satisfatório, também atendendo ao recomendado pelo Módulo 8 do PRODIST [18] e concessionária local de energia [20].

#### 4.4.2 Controle Repetitivo

Nesta secção é analisado o comportamento do controle repetitivo em um sistema fotovoltaico conectado à rede senoidal.

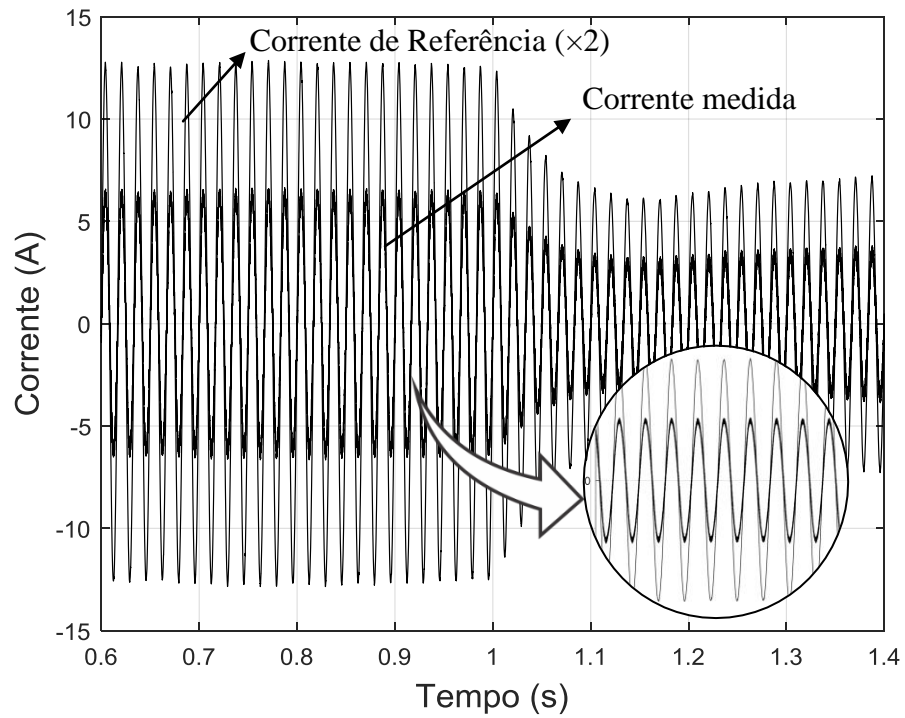
Na Figura 39 é apresentada a tensão de referência para o PWM e a tensão no capacitor do filtro LCL para a rede senoidal.



**Figura 39** – Tensão de referência para o PWM e tensão no capacitor do filtro utilizando controle repetitivo e rede senoidal.

Como discutido anteriormente, a tensão no capacitor do filtro deve seguir a modulante que a gerou. É possível observar na Fig. 35 que este comportamento está ocorrendo, ainda que a modulante apresente deformidades em sua composição.

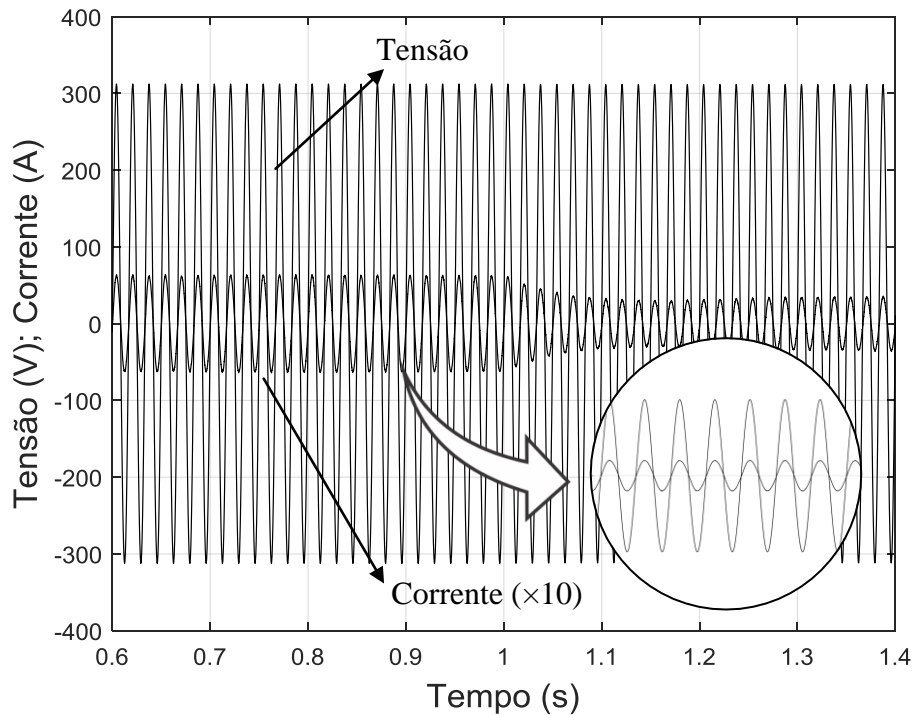
Na Figura 40 é apresentada a corrente de referência e a corrente medida na saída do inversor.



**Figura 40** – Corrente de referência ( $\times 2$ ) e corrente medida na saída do inversor utilizando controle repetitivo e rede senoidal.

Nota-se que, assim como ocorre para o controle proporcional ressonante, não existe oscilação na passagem de um valor de corrente para outro quando acontece a variação da irradiância.

Na Figura 41 são apresentadas as formas de onda da tensão e da corrente no PCC para a rede elétrica senoidal.



**Figura 41** – Tensão e corrente ( $\times 10$ ) no PCC utilizando controle repetitivo e rede senoidal.

O valor da tensão se estabiliza em  $311 V_{\text{pico}}$  e valor eficaz de  $220 V$  como foi projetado. O valor da amplitude da corrente injetada na rede para a irradiância de  $1000 W/m^2$  é de  $6,1 A$ . A partir do tempo de  $1s$ , a irradiância diminui para  $600 W/m^2$ . Nesta situação, o valor da amplitude da corrente injetada na rede passa a ser de  $3,4 A$ .

Utilizando o controle repetitivo e rede elétrica senoidal a  $TDH_i$  é  $0,819\%$  e o fator de potência é  $0,999$ . Dessa forma, a  $TDH_i$  atende ao que recomenda a norma internacional IEC 61727 e o fator de potência possui valor bastante satisfatório, atendendo ao recomendado pelo Módulo 8 do PRODIST [18] e concessionária local de energia [20].

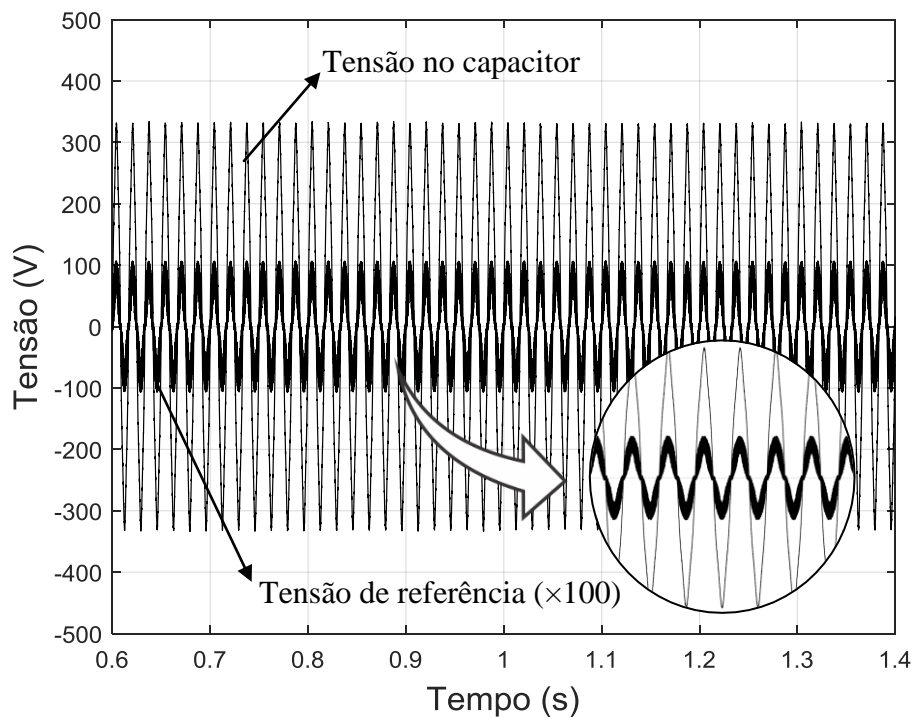
#### 4.5 Desempenho da Conexão do Inversor com a Rede Elétrica com Distorção

Para simular a rede elétrica com distorção harmônica foi inserida uma harmônica de  $5^a$  ordem na tensão da rede com amplitude de  $1/20$  da amplitude da fundamental, ou seja, com  $5\%$  de harmônicos de  $5^a$  ordem. A componente de  $5^a$  ordem é bastante comum em sistemas como o deste trabalho.

### 4.5.1 Controle Proporcional Ressonante

Nesta secção é analisado o comportamento do controle proporcional ressonante em um sistema fotovoltaico conectado à rede sob condições de distorção.

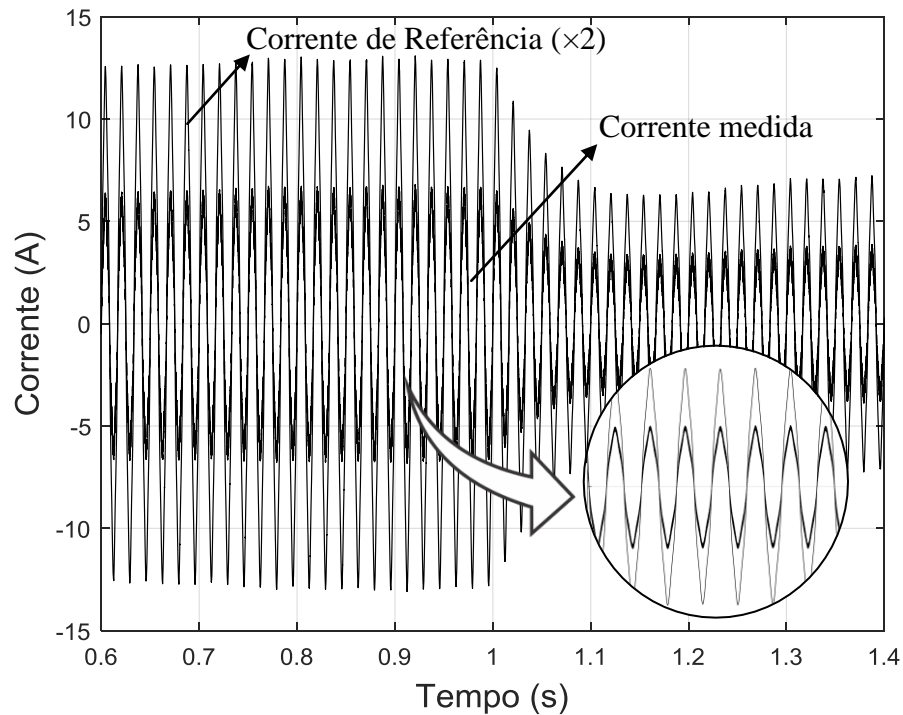
A tensão no capacitor do filtro e a tensão de referência para o PWM para o caso da rede distorcida são apresentadas na Fig. 42.



**Figura 42** – Tensão no capacitor do filtro e tensão de referência ( $\times 100$ ) para o PWM utilizando controle proporcional ressonante e rede distorcida.

Observa-se que a tensão no capacitor do filtro segue a forma de onda de referência para o PWM.

A corrente de referência e a corrente medida na saída do inversor para a rede distorcida são apresentadas na Fig. 43.

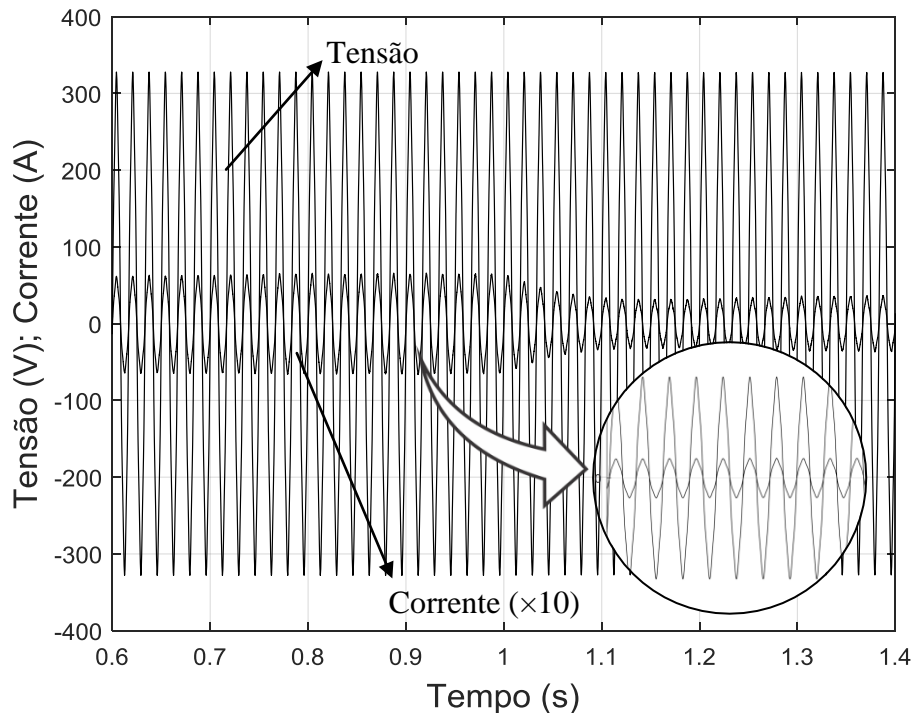


**Figura 43** – Corrente de referência ( $\times 2$ ) e corrente na saída do inversor utilizando controle proporcional ressonante e rede distorcida.

Dado que não há utilização de PLL no sistema, a corrente de referência é um espelho da tensão da rede, não sendo, portanto, senoidal. De mesma forma, como a corrente a ser injetada na rede segue sua referência, esta corrente também não é senoidal.

Com a adição da 5ª componente harmônica ao sinal da rede, a tensão no PCC passa a ter amplitude de 326,68 V. O valor de pico da corrente de referência é de 6,5 A para a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e 3,6 A para a irradiância de  $600 \text{ W/m}^2$ . A corrente medida, por sua vez, tem por amplitude os mesmos valores da corrente de referência, comprovando que o controle de corrente está funcionando de acordo com o projetado.

A tensão da rede elétrica e corrente no PCC são apresentadas na Fig. 44.



**Figura 44** – Tensão e corrente ( $\times 10$ ) no PCC utilizando controle proporcional ressonante e rede distorcida.

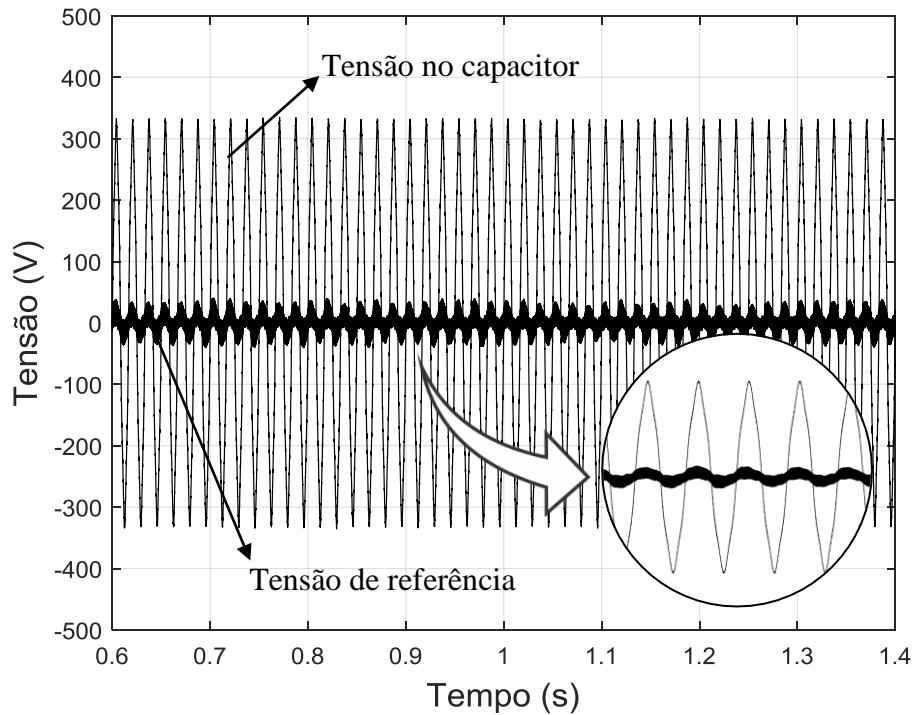
O valor da tensão da rede se estabiliza em  $373,5 V_{\text{pico}}$ . O valor da amplitude da corrente injetada na rede para a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  é de  $6,4 \text{ A}$ . A partir do tempo de  $1 \text{ s}$ , a irradiância diminui para  $600 \text{ W/m}^2$ . Nesta situação, o valor da amplitude da corrente injetada na rede é de  $3,5 \text{ A}$ .

As duas formas de onda estão praticamente em fase, alcançando um fator de potência bastante elevado. Para a simulação com componentes harmônicas de 5ª ordem na tensão da rede, a  $\text{TDH}_i$  é de  $5,19\%$ , a  $\text{TDH}_v$  é  $5\%$  e o fator de potência é  $0,999$ . Dessa forma, o fator de potência possui valor bastante satisfatório, atendendo ao mínimo recomendado pelo Módulo 8 do PRODIST [18] e concessionária local de energia [20].

#### 4.5.2 Controle Repetitivo

Nesta secção é analisado o comportamento do controle repetitivo em um sistema fotovoltaico conectado à rede sob condições de distorção harmônica de 5ª ordem.

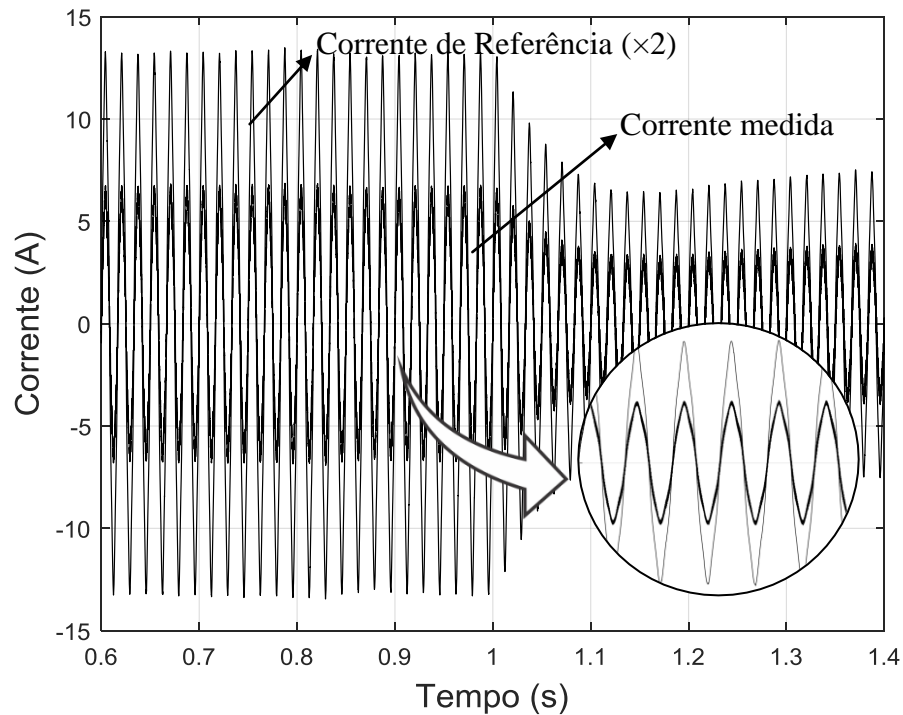
A tensão no capacitor do filtro e a tensão de referência para o PWM para o caso da rede distorcida são apresentadas na Fig. 45.



**Figura 45** – Tensão de referência para o PWM e tensão no capacitor do filtro LCL utilizando controle repetitivo e rede distorcida.

Como discutido anteriormente, a tensão no capacitor do filtro deve seguir a referência que a gerou. É possível observar na Fig. 41 que este comportamento está ocorrendo, ainda que a tensão de referência apresente deformidades em sua composição.

Na Fig. 46 é apresentada a corrente de referência e a corrente medida na saída do inversor.



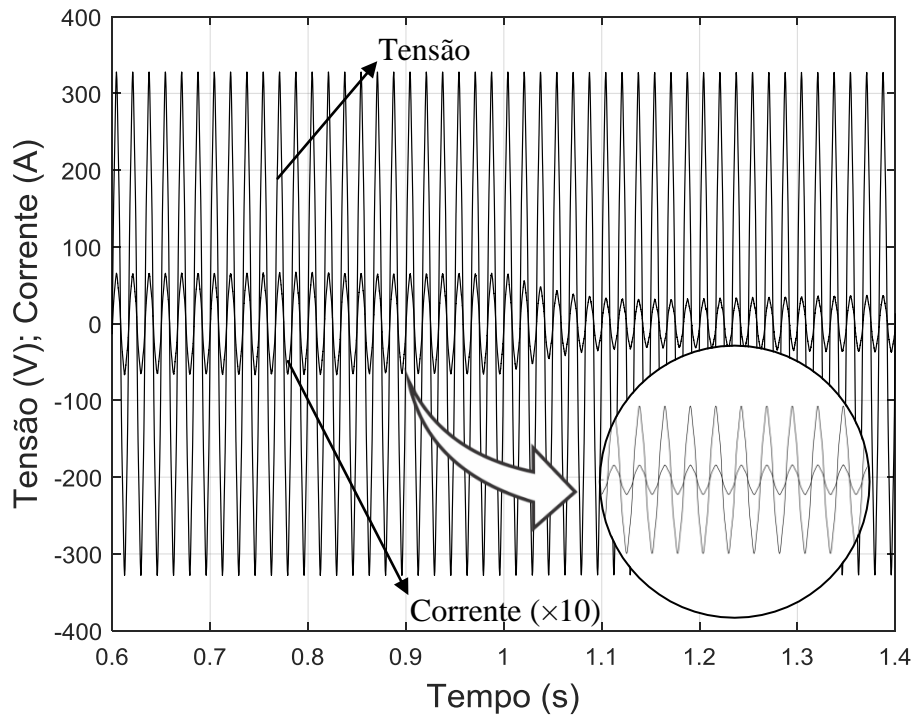
**Figura 46** – Corrente de referência ( $\times 2$ ) e corrente medida na saída do inversor utilizando controle repetitivo e rede distorcida.

Uma vez que não há a utilização de PLL no sistema, a corrente de referência transparece a tensão da rede e, portanto, também não é uma senoide. De mesma forma, uma vez que a corrente a ser injetada na rede segue sua referência, esta corrente também não é senoidal.

Observa-se também que não há oscilação na passagem de um valor de corrente para outro quando há a variação da irradiância. Essa variação ocorre no tempo de 1s da simulação.

O valor de pico da corrente de referência é de 6,5 A para a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  e 3,6 A para a irradiância de  $600 \text{ W/m}^2$ . A corrente medida tem por amplitude os mesmos valores da corrente de referência.

Na Fig. 47 é apresentada a forma de onda da tensão e corrente no PCC.



**Figura 47** – Tensão e corrente ( $\times 10$ ) no PCC utilizando controle repetitivo e rede distorcida.

O valor da amplitude da corrente injetada na rede para a irradiância de  $1000 \text{ W/m}^2$  é de 6,4 A. A partir do tempo de 1s, a irradiância diminui para  $600 \text{ W/m}^2$ . Nesta situação, o valor da amplitude da corrente injetada na rede é de 3,5 A.

Para a simulação com componentes harmônicas de 5ª ordem na tensão da rede, a  $\text{TDH}_i$  é de 4,75%, a  $\text{TDH}_v$  é 5% e o fator de potência é 0,999. Dessa forma, tanto a  $\text{TDH}_i$  quanto o fator de potência possuem valores satisfatórios, atendendo ao mínimo recomendado pelo Módulo 8 do PRODIST [18], a IEC 61727 [19] e concessionária local de energia [20].

A Tabela 4 apresenta os valores encontrados de  $\text{TDH}_i$  e fator de potência para as quatro situações apresentadas anteriormente.

**Tabela 4** - Desempenho obtido por cada controlador em simulação utilizando o Matlab®/Simulink.

	<i>PROPORCIONAL</i>		<i>REPETITIVO</i>	
	<i>RESSONANTE</i>			
	<b>REDE</b>	<b>REDE</b>	<b>REDE</b>	<b>REDE</b>
	<b>SENOIDAL</b>	<b>DISTORCIDA</b>	<b>SENOIDAL</b>	<b>DISTORCIDA</b>
<b><math>\text{TDH}_i</math></b>	1,19%	5,19%	0,81%	4,75%
<b>FP</b>	0,999	0,999	0,999	0,999

Decorre do que foi apresentado que o controle repetitivo apresentou melhores resultados relacionados à  $TDH_i$  do que o controle proporcional ressonante. Isto pode ser explicado justamente pela característica do controle repetitivo de apresentar ganhos infinitos em frequências múltiplas da fundamental, enquanto que o controle proporcional ressonante apresenta apenas um ganho infinito na sua frequência fundamental. Ou seja, o controle repetitivo é composto de vários controles ressonantes, sendo cada um deles em uma harmônica diferente. Dessa forma, o controle repetitivo proporciona uma melhor capacidade de rejeição às perturbações externas.

No que diz respeito aos resultados com rede elétrica senoidal, ambas as  $TDH_i$ s estão de acordo com a norma internacional IEC 61727, que limita o seu valor a 5%.

Com a presença de distorção harmônica de 5ª ordem na tensão da rede, o controle repetitivo apresentou uma  $TDH_i$  com valor satisfatório, estando abaixo do determinado pela norma, enquanto que para o controle proporcional ressonante a  $TDH_i$  ultrapassa o máximo estabelecido.

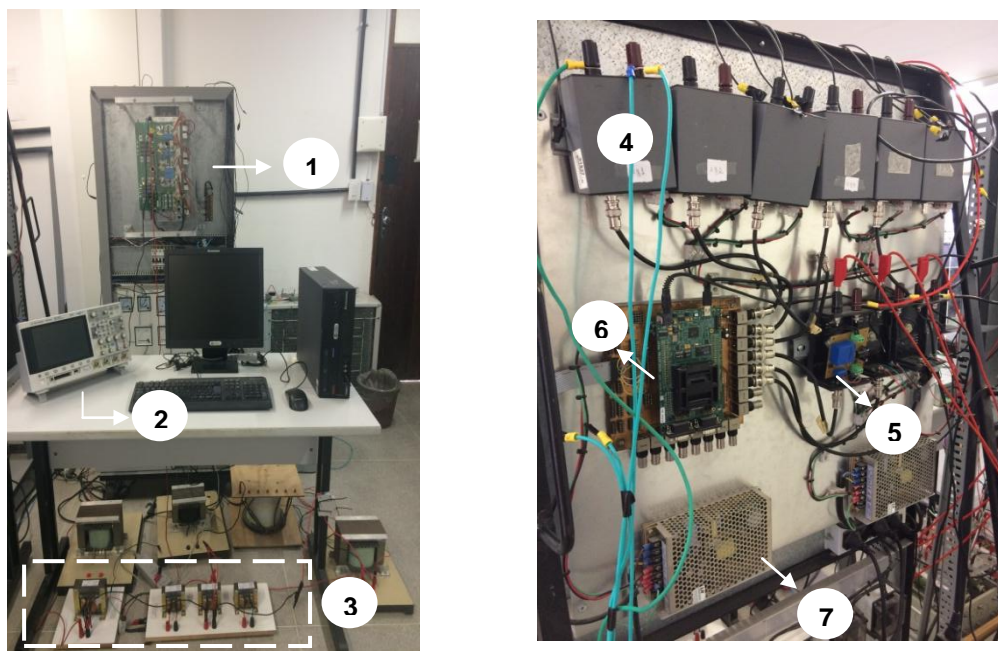
Com relação ao fator de potência, ambos os controles resultaram em valores de FP igual a 0,999, sendo valores bastante satisfatórios, tanto para a rede senoidal como para a rede distorcida.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta os resultados extraídos de uma bancada montada em escala laboratorial para corroboração das análises que estão sendo apresentados neste trabalho. Esta estrutura experimental foi montada no Laboratório de Otimização de Sistemas Elétricos - LOSE da UFPB.

### 5.1 Bancada Experimental

Na Figura 48 é apresentada a bancada experimental utilizada.



**Figura 48** – Bancada experimental utilizada.

Sendo:

1. Inversor de tensão;
2. Osciloscópio;
3. Filtro LCL.

4. Sensor de tensão;
5. Sensor de corrente;
6. Módulo eZdsp F28335;
7. Fonte de tensão.

O Simulador de Arranjo Solar Modular *Keysight* E4360 de 1220 W que é uma fonte de alimentação CC programável, com duas saídas, que emula as características de saída de um arranjo solar. Através do modo operacional SAS, ou seja, um algoritmo interno produz a curva I-V de um arranjo fotovoltaico, necessitando apenas de quatro parâmetros como: tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, corrente e tensão na máxima potência. Na Figura 49 é apresentado o simulador de arranjo solar.



**Figura 49** - Simulador de arranjo solar. Fonte: [32].

Como já descrito anteriormente, o conversor CC-CC é um push-pull alimentado em corrente, com frequência de chaveamento de 80 kHz, suportando, portanto, operações em alta frequência sem entrar em saturação. Na Figura 50 é apresentado o conversor push-pull fonte de corrente.



**Figura 50** – Conversor push-pull utilizado. Fonte: autora.

O inversor utilizado possui quatro braços com dois IGBTs em cada. No entanto, apenas dois braços foram utilizados, uma vez que o arranjo neste trabalho é monofásico. O gatilho dos IGBTs advém do controlador digital de sinais. Na Figura 51 é apresentado o inversor utilizado.



**Figura 51** - Inversor de tensão. Fonte: autora.

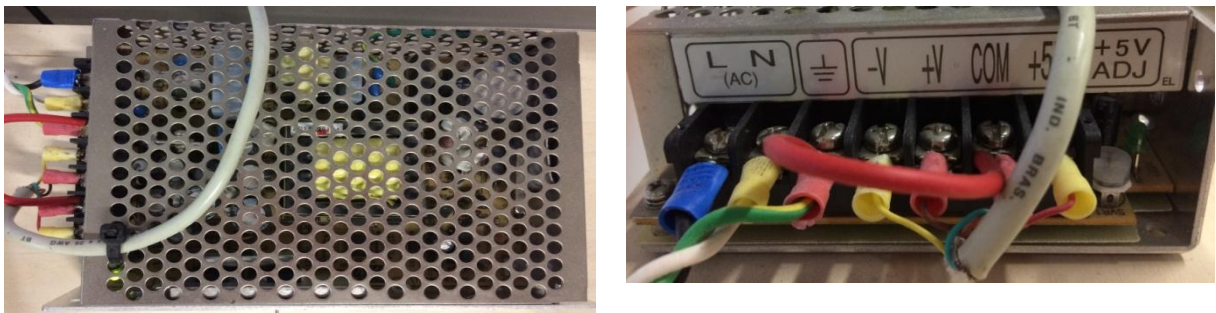
O *driver* utilizado para acionamento das chaves do inversor é o SKHI 23/12 da Semikron. Os IGBTs, também da Semikron, suportam tensão de 1200 V e corrente de 75 A a 25°C, cada.

Na saída do inversor há um filtro LCL formado por um indutor de 6 mH e um indutor de 2 mH e capacitor de 1,5  $\mu$ F. Na Figura 52 é apresentado o filtro LCL utilizado.



**Figura 52** – Componentes do filtro LCL utilizado. Fonte: autora.

Para a alimentação dos circuitos passivos, foi utilizada uma fonte de tensão *Mean Well* NET-75C alimentada em 220 V e com possibilidade de tensões de saída de -15 V, 5 V, 15 V. Na Figura 53 é apresentada a fonte utilizada.



**Figura 53** - Fonte de tensão para a alimentação dos circuitos passivos. Fonte: autora.

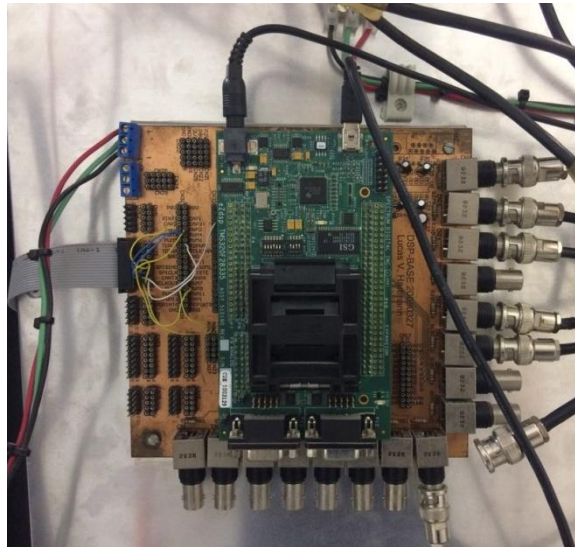
Neste trabalho foi utilizado o módulo eZdsp F28335 e escolhido o controlador digital de sinais (DSC) TMS320F28335 da *Texas Instruments*. O DSC comunica-se com o computador por meio da interface USB. A programação do controlador é realizada por meio do *software Code Composer Studio (CCS)* que é disponibilizado pelo fabricante.

Dentre as características do controlador, destacam-se:

- *Clock* de entrada de 30 MHz;
- Frequência de operação de 150 MHz;
- 68 kB de memória RAM, 512 kB de memória *flash*;
- Conversor analógico-digital com 16 canais de entrada e 12 bits para cada canal;

- Conector RS-232 *onboard*;
- Interface CAN 2.0 *onboard*;

Na Figura 54 é apresentado o módulo eZdsp F28335. Este DSC está afixado na bancada em uma placa de circuito impressa projetada e montada para receber os sinais analógicos e disponibilizar os sinais de PWM utilizados no gatilho dos IGBTs.

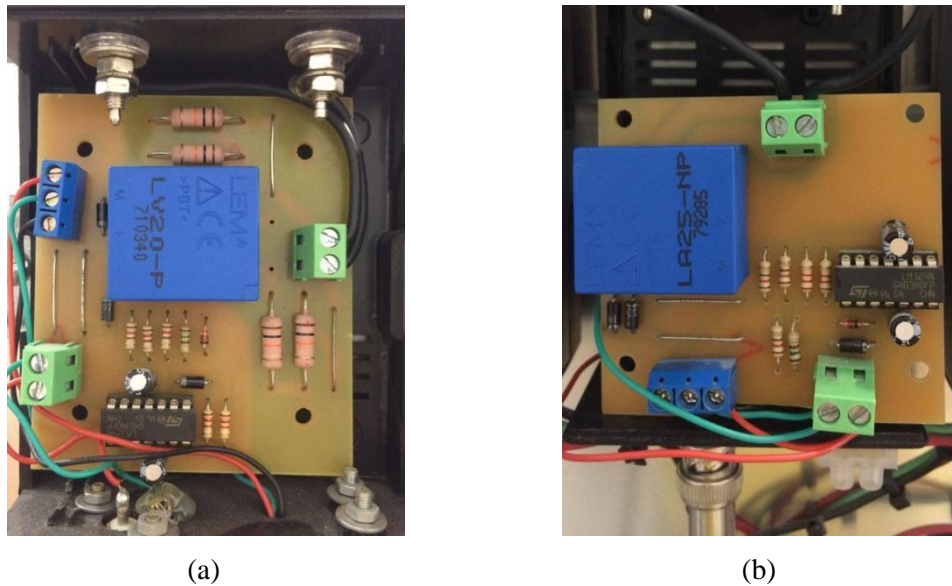


**Figura 54** - Módulo eZdsp F28335. Fonte: autora.

O circuito de condicionamento de tensão inclui um sensor de efeito *Hall* LV20-P da LEM<sup>®</sup> que trabalha com uma corrente nominal de 10 mA no primário.

O circuito de condicionamento de corrente inclui o sensor LA25-NP, que apresenta isolamento galvânica entre o circuito de potência e o de medição. O sensor utilizado é da marca LEM<sup>®</sup> e seu princípio de funcionamento é pelo efeito *Hall*. Possui circuito eletrônico interno que fornece um sinal de corrente proporcional à corrente medida.

Os circuitos de condicionamento de tensão e corrente utilizados são apresentados na Figura 55.



**Figura 55** - Circuito de condicionamento: (a) Tensão. (b) Corrente. Fonte: autora.

O variador de tensão é um equipamento eletromecânico baseado em um autotransformador que recebe em sua entrada uma tensão CA fixa e fornece em sua saída um valor de tensão CA ajustável. Este ajuste é feito girando-se manualmente o eixo que movimenta o cursor do variador de tensão. Para a conexão do sistema com a rede elétrica senoidal, usou-se um variador de tensão TDGC2 da marca JNG, monofásico, com potência nominal de 2 kVA e corrente nominal de saída de 8 A. O variador de tensão monofásico senoidal é apresentado na Fig. 56.



**Figura 56** – Variador de tensão utilizado. Fonte: autora.

Para representar a rede distorcida foi utilizada uma das fases do variador de tensão trifásico da marca JNG, de 6 kVA, 8 A de corrente nominal de saída e saída de tensão de até 430 V. Na Fig. 57 é apresentado o variador de tensão utilizado como fonte distorcida.



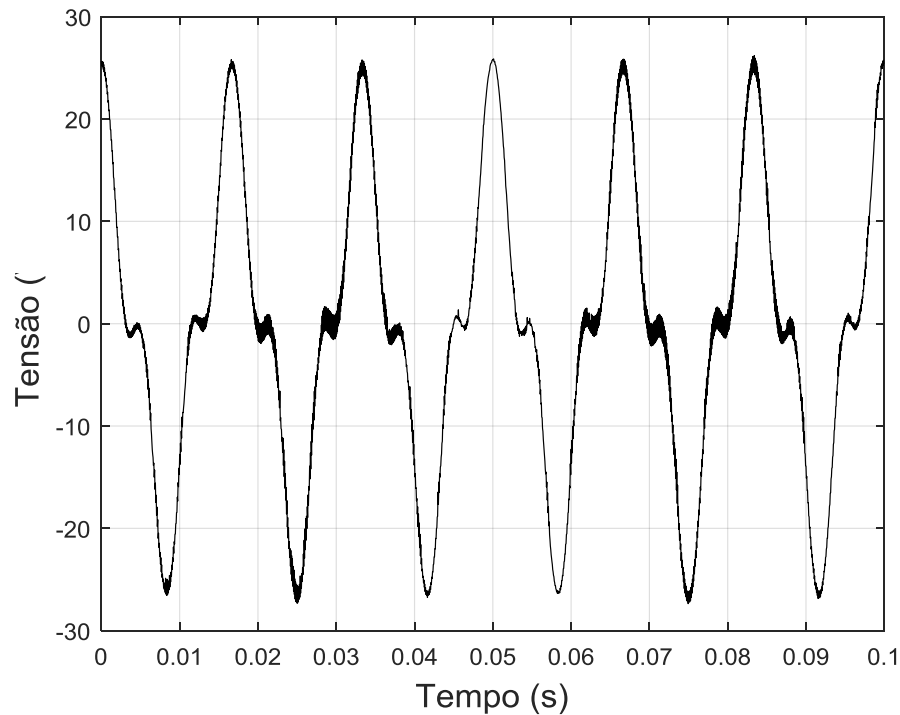
**Figura 57** – Variador de tensão trifásico. Fonte: autora

A partir desse componente, é possível extrair uma forma de onda que será utilizada como a tensão da rede para a situação distorcida. Entretanto, não há o domínio do conteúdo de distorção que essa forma de onda contém. Dessa forma, sem alternativas disponíveis em laboratório no momento do experimento, para a tensão da rede foi utilizado um sinal com um valor considerável de distorção e composto de 3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> e 7<sup>o</sup> harmônicos.

De mesmo modo, também devido às limitações, foi necessário diminuir os níveis de tensão da rede elétrica e do barramento do inversor. Assim, os experimentos foram realizados sob as seguintes condições:

- Tensão no barramento CC: 30 V;
- Tensão da rede: 25 V<sub>pico</sub>;
- Frequência da rede: 60 Hz;
- Frequência de comutação: 10 kHz;

Na Figura 58 é apresentada a forma de onda da tensão da rede com distorção.

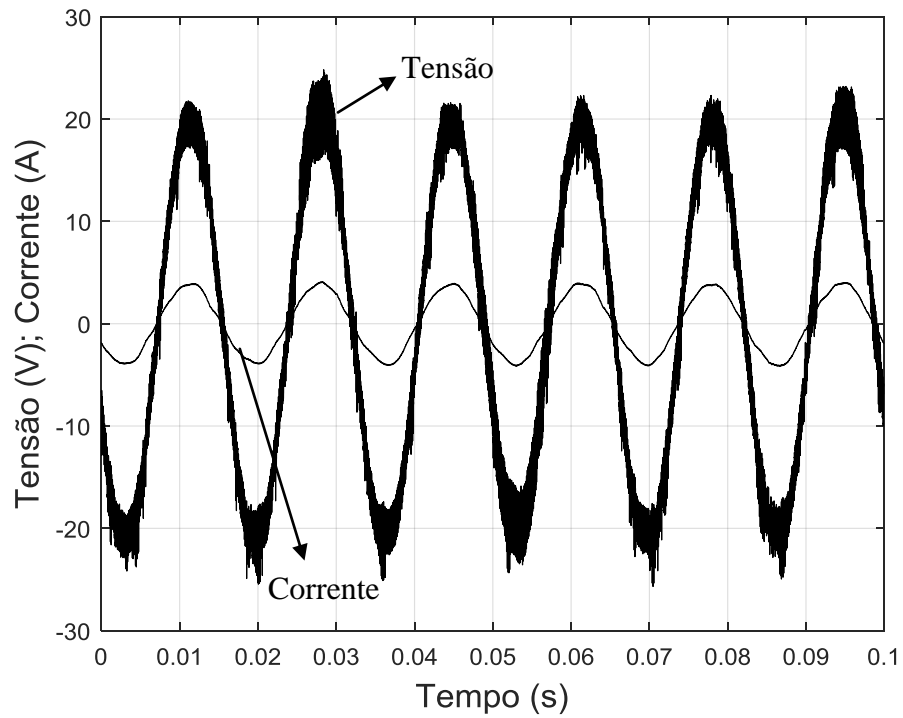


**Figura 58** – Tensão da rede com distorção harmônica.

A fonte com distorção utilizada apresenta composição de 37,16% de 3ª harmônica, 1,32% de 5ª harmônica, 0,475% de 7ª harmônica, resultando em uma TDH<sub>V</sub> de 37,2%, valor muito acima do permitido pelas normas de qualidade de energia, mas, como citado anteriormente, foi a alternativa encontrada para obter experimentalmente a tensão da rede elétrica em uma situação de distorção.

## 5.2 Resultados Experimentais com o Controle Proporcional Ressonante

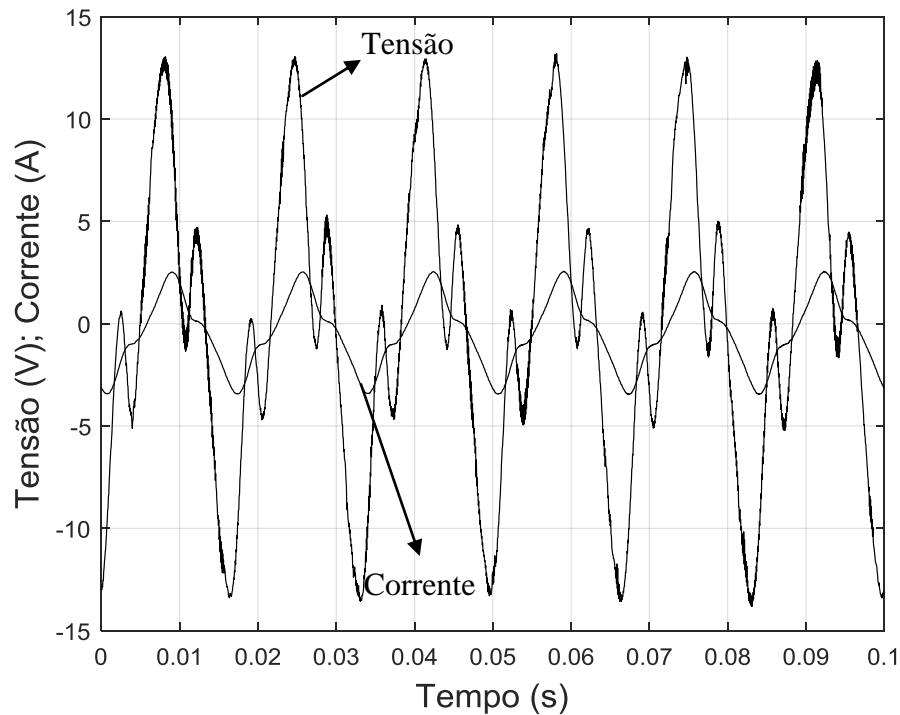
Para validar os resultados de simulação, primeiramente foi utilizado o controle proporcional ressonante no sistema. Na Figura 59 é apresentada a forma de onda da tensão da rede e corrente no PCC para o sistema conectado à uma rede senoidal.



**Figura 59** – Tensão da rede senoidal e corrente no PCC utilizando controle ressonante.

Para essas condições, o fator de potência resulta em um valor de 0,999. Já a TDH da corrente é de 3,92%. Sendo assim, tanto o fator de potência como a TDH estão de acordo com as normas utilizadas pra esse tipo de aplicação, já apresentadas anteriormente.

Na Figura 60 é apresentada a forma de onda da tensão no PCC e da corrente na saída do filtro LCL para o sistema conectado à rede distorcida utilizando o controle proporcional ressonante.



**Figura 60** – Tensão da rede distorcida e corrente no PCC utilizando controle proporcional ressonante.

Nota-se que para a corrente há uma grande atenuação da TDH, pois o controle ressonante tenta deixá-la o mais próxima da forma senoidal. A anulação completa das componentes não acontece devido a frequência de corte do filtro ter uma largura de banda pequena, o que impede de o inversor reproduzir adequadamente a tensão de referência (modulante) produzida pelo sistema de controle com malha de corrente.

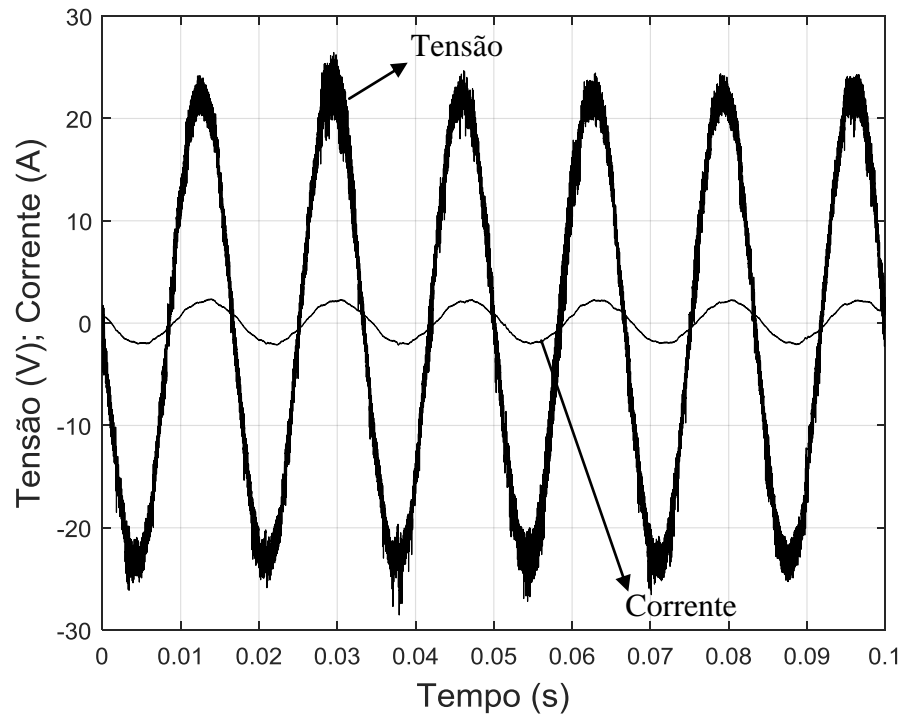
Com relação ao fator de potência, o cálculo utilizando a Eq. (2) resulta em 0,970, o qual está dentro da faixa aceitável segundo as normas para a geração distribuída. A TDH da corrente é de 23,17%.

Considerando que a  $TDH_V$  da tensão da rede é 37,2%, muito além do que é de fato encontrado na rede elétrica e aceitável pelas normas, o valor de TDH da corrente injetada na rede igual a 23,17% torna-se aceitável, uma vez que o controle reduziu consideravelmente os harmônicos de corrente injetados na rede.

### 5.3 Resultados Experimentais com o Controle Repetitivo

A partir do uso do controle repetitivo apresentado neste trabalho, o mesmo foi devidamente configurado no DSC para que o sistema de inserção de potência na rede

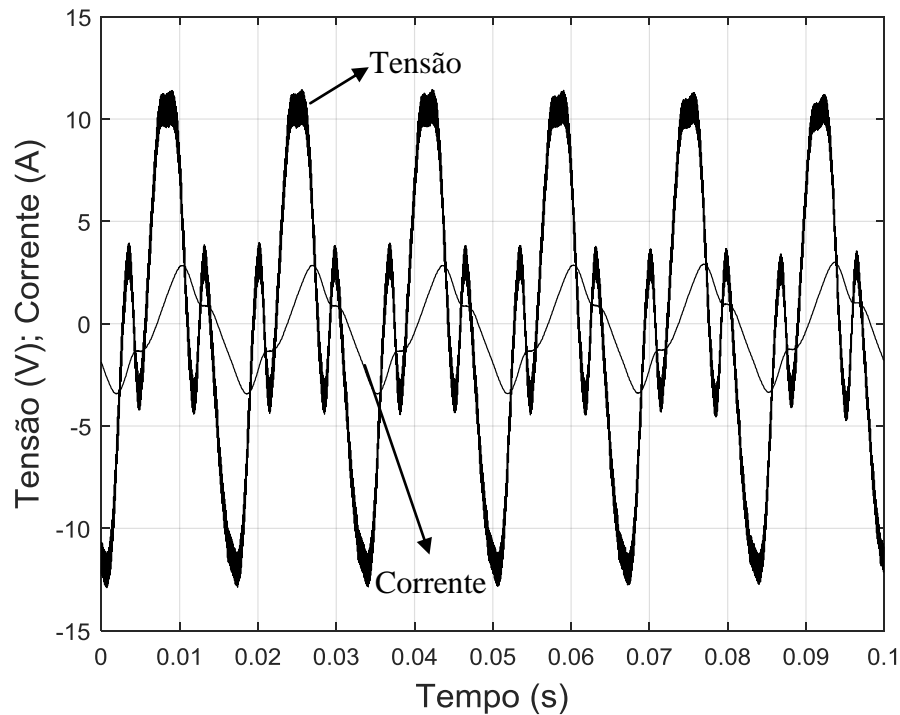
montado atue conforme seus propósitos. A Figura 61 apresenta a tensão e corrente no PCC para uma rede senoidal.



**Figura 61** - Tensão e corrente no PCC utilizando o controle repetitivo e fonte senoidal.

Para essas condições, o fator de potência é de 0,999 e a TDH da corrente é de 4,13%.

Na Figura 62 são apresentados os resultados medidos da tensão no PCC e da corrente na saída do filtro LCL para o sistema conectado à rede distorcida utilizando o controle repetitivo.



**Figura 62** – Tensão e corrente no PCC utilizando o controle repetitivo e fonte distorcida.

Da mesma forma que para o controle ressonante, nota-se que para a corrente há uma grande atenuação da TDH. A anulação completa das componentes não acontece devido a frequência de corte do filtro ter uma largura de banda pequena, o que impede de o inversor reproduzir adequadamente a tensão de referência (modulante) produzida pelo sistema de controle com malha de corrente.

Com relação ao fator de potência, este é igual a 0,955, o qual está dentro da faixa aceitável segundo as normas para a geração distribuída. A TDH da corrente é de 21,14%. A TDH da corrente possui valor superior aos limites da norma, porém deve-se considerar que a distorção presente na tensão da rede elétrica, que é 37,2%, vai muito além dos valores que são efetivamente encontrados. Portanto, o controle repetitivo utilizado proporcionou um valor de  $TDH_i$  satisfatório para essa situação.

A Tabela 5 apresenta um resumo do desempenho obtido pelos controladores.

**Tabela 5** – Desempenho experimental obtido por cada controlador.

	<i>PROPORCIONAL RESSONANTE</i>		<i>REPETITIVO</i>	
	<b>REDE SENOIDAL</b>	<b>REDE DISTRORCIDA</b>	<b>REDE SENOIDAL</b>	<b>REDE DISTRORCIDA</b>
<b>TDH<sub>i</sub></b>	3,92%	23,17%	4,13%	21,14%
<b>FP</b>	0,999	0,970	0,999	0,955

Por meio dos resultados experimentais apresentados para os controles proporcional ressonante e repetitivo, nota-se que vantagens e desvantagens estão associadas a estas configurações de controle.

Para a rede senoidal, o controlador repetitivo, assim como o controle proporcional ressonante, apresenta uma TDH da corrente de acordo com a norma IEC 61727, que diz que esta deve ser menor que 5%, e fator de potência praticamente unitário.

De acordo com os resultados experimentais apresentados para a rede elétrica com distorção harmônica, o controle repetitivo apresenta uma TDH da corrente com valor mais satisfatório quando comparada ao resultado obtido pelo controle proporcional ressonante.

Com relação ao fator de potência, os dois controles apresentam valores satisfatórios, bem próximos um do outro e que atendem a norma relacionada.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia de utilização de um controle repetitivo em um sistema fotovoltaico conectado à rede com a presença de distorções harmônicas de tensão. O sistema em questão é composto por painel fotovoltaico, conversor CC-CC push-pull, inversor de tensão, filtro LCL e sistema de controle.

Os resultados de simulação realizados em ambiente *Simulink/Matlab*<sup>®</sup> para a rede senoidal e também para a rede elétrica distorcida, utilizando tanto do controle proporcional ressonante como o repetitivo, apresentaram valores de TDH<sub>i</sub> e fator de potência satisfatórios e de acordo com as normas utilizadas para avaliar a qualidade de energia. Mais especificamente, o controle repetitivo, como esperado, se mostrou mais eficiente com relação à rejeição dos harmônicos do que o controle proporcional ressonante.

Dos resultados experimentais, obtidos no Laboratório de Otimização de Sistemas de Energia – LOSE da UFPB, para todos os resultados experimentais o fator de potência foi satisfatório. Com relação às taxas de distorção harmônica da corrente injetada na rede senoidal, ambos os controles resultaram em valores abaixo de 5%.

Para obter a tensão da rede distorcida, com a falta de outras opções, foi utilizada uma das fases de um variador de tensão trifásico. A partir desse componente, foi possível extrair uma forma de onda que foi utilizada como a tensão da rede para a situação distorcida, porém não há o domínio do conteúdo de distorção que essa forma de onda contém. Dessa forma, sem alternativas disponíveis em laboratório no momento do experimento, para a tensão da rede foi utilizado um sinal com um valor considerável de distorção e composto de 3<sup>o</sup>, 5<sup>o</sup> e 7<sup>o</sup> harmônicos e taxa de distorção harmônica total de 37,2%.

De mesmo modo, também devido às limitações, foi necessário diminuir os níveis de tensão da rede elétrica e do barramento do inversor.

Considerando que a TDH<sub>v</sub> da tensão experimental da rede distorcida é 37,2%, muito além do que é de fato encontrado na rede elétrica e aceitável pelas normas, o valor de TDH da corrente injetada na rede acima dos limites da norma torna-se aceitável, uma vez que o controle reduziu consideravelmente os harmônicos de corrente injetados na rede. Para a rede

distorcida, o controle repetitivo, como esperado, apresentou um valor de  $TDH_i$  menor que o controle proporcional ressonante.

Como trabalho posterior, pode ser realizada a inclusão da fonte fotovoltaica na estrutura experimental para verificação do sistema completo, assim como a realização de testes experimentais com fonte de tensão controlada, onde seja possível especificar as componentes harmônicas e sua intensidade.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Demanda de energia 2050**. Rio de Janeiro, 2014.
- [2] MANCISIDOR, A. I. M., et al. **European Union's renewable energy sources and energy efficiency policy review: the Spanish perspective**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009.
- [3] ELTAWIL, M. A., ZHAO, Z. **Grid-connected photovoltaic power systems: technical and potential problems—a review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.
- [4] ZHAO, Z. **High efficiency single-stage grid-tied PV inverter for renewable energy system**. Tese de doutorado, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2012.
- [5] KOUTROULIS, E., BLAABJERG, F. **Methodology for the optimal design of transformerless grid-connected PV inverters**. IET Power Electronics, 2012.
- [6] Ministério de Minas e Energia. **Energia Solar no Brasil e no Mundo. Ano de Referência – 2016**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154> . Acesso em: 04.jan.2018.
- [7] PINHO, J. T., GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de trabalho de energia solar, Rio de Janeiro, 2014.
- [8] ESPOSITO, A. S., FUCHS, P. G. **Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil**. Disponível em: < [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev4003.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/revista/rev4003.pdf)>. Acesso em: 16. nov.2017.

- [9] JANNUZZI, G. M., MELO, C. A. **Grid-connected photovoltaic in Brazil: Policies and potential impacts for 2030.** Energy for sustainable development, 2013.
- [10] WARTH, A. **Tarifa de energia no Brasil é a 14ª mais alta entre 28 países.** O Estadão. Disponível em: <http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,tarifa-de-energia-no-brasil-e-a-14-mais-alta-entre-28-paises,10000091261> Acesso em: 09.fev.2018.
- [11] **Proinfa - Programa de incentive as fontes alternativas de energia elétrica.** Ministério de Minas e Energia. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>. Acesso em: 10.out.2017.
- [12] **Resolução Normativa nº 482/2012.** Agência Nacional de Energia Elétrica, 2012.
- [13] Nota técnica nº 0056/2017 da ANEEL. **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração fotovoltaicos no horizonte 2017-2024.**
- [14] FORTES, Rárisson R. A. **Distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica em condição de ressonância paralela.** Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2016.
- [15] OLIVEIRA, K. C. **Avaliação da conversão da energia fotovoltaica em sistemas isolados.** Dissertação de mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.
- [16] URBANETZ, Jair. **Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a continuidade.** Tese de doutorado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [17] RAMPINELLI, G. A.; DIAS, J. B.; KRENZINGER, A. **Ensaio de inversores para conexão à rede: Fator de potência e distorção harmônica.** II Congresso Brasileiro de Energia Solar - II CBENS2008, Florianópolis, 2008.
- [18] **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico**

**Nacional – PRODIST, Módulo 8.** Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo\\_8-Revis%C3%A3o\\_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9](http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9) Acesso em: 06.out.2018.

- [19] IEC 61727. **Standard photovoltaic (pv) systems - characteristics of the utility interface**, 2009.
- [20] ENERGISA DISTRIBUIDORA DE ENERGIA. **NTD-013 - Critérios para a conexão de acessantes de micro e mini geração distribuída ao sistema de distribuição da Energisa**, 2016.
- [21] IEEE 1459. **Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balance or Unbalanced Conditions**, 2010.
- [22] INOUE, T., NAKANO, M., IWAI, S. **High accuracy control of servomechanism for repeated contouring**. 10th Annual Symposium on Incremental Motion, 1981.
- [23] MATTAVELLI, P., MARAFÃO, F. P. **Repetitive-based control for selective harmonic compensation in active power filters**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, pp. 1018-1024, 2004.
- [24] ZHANG, K *et al.* **Direct Repetitive Control of Spwm Inverter For Ups Purpose**. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003.
- [25] YAZDANI, A., DASH, P. P. **A Control Methodology and Characterization of Dynamics for a Photovoltaic (PV) System Interfaced With a Distribution Network**. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 24, pp. 1538-1551, 2009.
- [26] CARACAS, J. V. M. **Avaliação das estratégias de controle e projeto de inversores para conexão de fontes fotovoltaicas à rede CA**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Eletricidade, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2013.
- [27] PAUKNER, Fillipe L. **Comparação do Controle do Inversor Trifásico Conectado à rede com Filtro LCL Considerando o Amortecimento Passivo e Ativo**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

- [28] FREITAS, Duarte, N. S. **Controlo de um Inversor Monofásico para Ligação à Rede de um Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes**. Dissertação de mestrado – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2013.
- [29] ARAÚJO, Vinicius C.D. **Compensação da forma de onda de um inversor PWM utilizando uma técnica de controle repetitivo**. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- [30] YAMAMOTO, Y., HARA, S. **Relationships between internal and external stability for infinite-dimensional systems with applications to a servo problem**. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 33, pp. 1044-1052, 1998.
- [31] FLORES, J. V. *et al.* **Síntese de controladores repetitivos chaveados: uma aplicação à fontes ininterruptas de energia (UPS)**. Sba Controle & Automação, 2011.
- [32] **E4360A Modular Solar Array Simulator Mainframe**. Disponível em: <https://www.keysight.com/en/pd-1370006-pn-E4360A/modular-solar-array-simulator-mainframe-1200w?cc=BR&lc=por> Acesso em: 28.jan.2018.

# ANEXO

