



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica



---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA EM SISTEMAS DE  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM FONTES ALTERNATIVAS**

GUILHERME AUGUSTO PEREIRA BAETA

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

JOÃO MONLEVADE

2017

Guilherme Augusto Pereira Baeta

## **Correção de Fator de Potência em Sistemas de Geração Distribuída com Fontes Alternativas**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP  
Departamento de Engenharia Elétrica – DEELT

Orientador: Renan Fernandes Bastos

João Monlevade

2017

B142c

Baeta, Guilherme Augusto Pereira

Correção de fator de potência em sistemas de geração distribuída com fontes alternativas [manuscrito] / Guilherme Augusto Pereira Baeta - 2017.

58 f.; il. color.; grafs.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Renan Fernandes Bastos.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia elétrica - Geração. 3. Eletrônica de potência. I. Bastos, Renan Fernandes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311

Catálogo: [ficha@sisbin.ufop.br](mailto:ficha@sisbin.ufop.br)



**ANEXO IV - ATA DE DEFESA**

Aos 22 dias do mês de setembro de 2017, às 10 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Guilherme Augusto Pereira Baeta, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Renan Fernandes Bastos, Felipe Eduardo Moreira Cota e Gabriel Azevedo Fogli. O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: Correção de Fator de Potência em Sistemas de Geração Distribuída com Fontes Alternativas. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO do(a) candidato(a), com a nota média 6,9, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Renan Fernandes Bastos	6,9
Felipe Eduardo Moreira Cota	6,9
Gabriel Azevedo Fogli	6,9
<b>Média</b>	<b>6,9</b>

João Monlevade, 22 de setembro de 2017.

Professor(a) Orientador(a)  
Renan Fernandes Bastos

Aluno (a)  
Guilherme Augusto Pereira Baeta

Professor(a) Convidado(a)  
Felipe Eduardo Moreira Cota

Professor(a) Convidado(a)  
Gabriel Azevedo Fogli



## ANEXO IX - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Correção de fator de potência em sistemas de geração distribuída com fontes alternativas" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 22 de setembro de 2017.

Guilherme Augusto Pereira Brito  
Nome completo do(a) aluno(a)

# Resumo

Este trabalho apresenta uma técnica de controle para sistemas de geração distribuída, em que seu foco principal é no controle de fator de potência da energia fornecida à rede elétrica. Para o controle da posição da corrente gerada, utilizou-se a transformação de coordenadas do sistema trifásico ABC para o sistema DQ, em que a parcela direta (do inglês, *direct*) do eixo representa a parte ativa da energia gerada e a porção em quadratura (do inglês, *quadrature*) representa a parcela reativa. O método utiliza modelos de detecção de fase, PLL (do inglês, *Phase Locked Loop*), para sincronismo e controle da corrente entregue à rede. Utiliza-se também, técnicas de modulação por largura de pulso senoidais (do inglês, *Pulse Width Modulation*), para a conversão do sistema CC para um sistema CA. O conversor PWM utiliza os sinais de referência trifásicos advindos de um sistema de controle onde é realizada técnicas de controle Proporcional Integral. Vários cenários teste foram desenvolvidos a fim de identificar qual a melhor opção de operação. Desse modo, as fontes alternativas de energia foram modeladas tanto como fonte de tensão quanto fonte de corrente e também foi utilizado um painel fotovoltaico como fonte alternativa, ligado direto ao barramento ou através de um conversor Buck (CC-CC) que foi projetado. Resultados de simulações obtidos com o programa PSIM (versão 9.0.3) são mostrados a fim de validar as estratégias de controle.

**Palavras-chaves:** Fator de potência, eletrônica de potência, geração distribuída, conversores.



# Abstract

This work presents a control technique for distributed generation systems, in which its main focus is in controlling the power factor of the electric power supplied. In order to control the position of the generated current, the coordinate transformation of the three-phase system ABC was used for the DQ system, where the direct portion of the axis represents the active part of the generated energy and the quadrature portion represents the reactive plot. The method uses Phase Locked Loop (PLL) models for timing and control of the current delivered to the power grid. Also, sinusoidal pulse width modulation techniques are used for the conversion of the DC system to an AC system. The PWM converter uses three-phase reference signals from a control system where Proportional Integral control techniques are performed. Several test scenarios have been developed to identify the best operating option. Thus, alternative energy sources were modeled as both a voltage source and current source, and a photovoltaic panel was also used as an alternative source, connected directly to the DC bus or through a Buck (DC-DC) converter that was designed. Results of simulations obtained with the PSIM program (version 9.0.3) are shown in order to validate the control strategies.

**Keywords:** Power factor, power electronics, distributed generation, converters.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Caracterização da geração distribuída (VILLALVA, 2010). . . . .	15
Figura 2 – Matriz energética brasileira FONTE:(AGUIAR,2013) . . . . .	16
Figura 3 – Projeção de instalações de Geração distribuída, segundo a EIA (do inglês, <i>Energy Information Administration</i> ) (Adaptado de : <a href="http://www.eia.gov">www.eia.gov</a> )	17
Figura 4 – Número de conexões por unidade federativa até 2015. (ADAPTADO DE: <a href="http://www2.aneel.gov.br">www2.aneel.gov.br</a> ) . . . . .	17
Figura 5 – Domicílios Rurais sem Acesso à rede elétrica. ADAPTADO DE: <a href="http://www.abradee.com.br">http://www.abradee.com.br</a> ABRADÉE . . . . .	22
Figura 6 – Projeção feita pela ANEEL para a conexão de microgeradores à rede elétrica. FONTE: Nota técnica ANEEL 56/2017 . . . . .	23
Figura 7 – Painéis fotovoltaicos instalados no telhado de uma residência. . . . .	24
Figura 8 – Representação da potência aparente através da potência ativa e reativa. . . . .	25
Figura 9 – Onda de corrente atrasada em relação a tensão, fator de potência indutivo. . . . .	26
Figura 10 – Onda de corrente adiantada em relação a tensão, fator de potência capacitivo. . . . .	26
Figura 11 – Exemplo de resposta ao degrau de um controlador Integrador. Em azul degrau unitário e em vermelho a resposta do integrador. $K_c = T_i = 2$ . . . . .	28
Figura 12 – Exemplo de resposta ao degrau de um controlador Proporcional. Em azul degrau unitário e em vermelho a resposta do controlador proporcional. $K_c = 2$ . . . . .	29
Figura 13 – Efeito da ação Proporcional Integral para diferentes valores de constantes. . . . .	29
Figura 14 – Saída alternada de tensão após modulação. . . . .	31
Figura 15 – Circuito representativo do Conversor CC-CA. FONTE: (VILLALVA, 2010) . . . . .	31
Figura 16 – Circuito equivalente do conversor conectado à rede. FONTE: (VILLALVA, 2010) . . . . .	32
Figura 17 – Diagrama de blocos do PLL . . . . .	34
Figura 18 – Fluxograma do MPPT FONTE: (MOÇAMBIQUE, 2012) . . . . .	35
Figura 19 – Estrutura de controle do sistema de geração distribuída. ADAPTADO DE: (VILLALVA, 2010) . . . . .	37
Figura 20 – Configuração do sistema de geração. ADAPTADO DE: (AGUIAR, 2013) . . . . .	38
Figura 21 – Malha de controle do sistema de geração distribuída. ADAPTADO DE: (AGUIAR, 2013) . . . . .	38
Figura 22 – Circuito desenvolvido para modulação PWM . . . . .	40
Figura 23 – Correntes de fases A, B e C. . . . .	40

Figura 24 – Diagrama de blocos para detecção de fase da rede para sincronização de dois sistemas inicialmente isolados . . . . .	41
Figura 25 – Representação da média móvel do sistema de detecção de fase e o tempo de resposta do sistema . . . . .	42
Figura 26 – Sincronização de duas ondas. . . . .	42
Figura 27 – Corrente e tensão de mesma fase entregues à rede elétrica. . . . .	43
Figura 28 – Representação das correntes $I_d$ e $I_q$ . . . . .	43
Figura 29 – Simulação realizada para barramento CC com fonte de tensão simples e controle de corrente . . . . .	44
Figura 30 – Corrente e tensão no barramento CA do sistema de geração . . . . .	45
Figura 31 – Esquemático desenvolvido para o sistema de geração modelado por uma fonte de corrente . . . . .	46
Figura 32 – Corrente entregue à rede em relação a tensão, levando em consideração o acionamento de uma carga no instante em que ela vai a zero . . . . .	47
Figura 33 – Corrente antes do filtro indutivo, considerando o acionamento de uma carga . . . . .	47
Figura 34 – Tempo de resposta do controle de tensão no barramento CC . . . . .	48
Figura 35 – Esquemático desenvolvido para o sistema de geração modelado por uma fonte de tensão em série com uma resistência - acoplamento por um conversor Buck . . . . .	49
Figura 36 – Resposta do sistema para a simulação desta seção - consideração da conexão de uma carga . . . . .	49
Figura 37 – Tensão controlada no barramento CC para o sistema dado . . . . .	50
Figura 38 – Circuito desenvolvido para a conexão de um painel solar fotovoltaico . . . . .	50
Figura 39 – Resposta do sistema. Corrente 10x . . . . .	51
Figura 40 – Busca de máxima potência do algoritmo MPPT . . . . .	51
Figura 41 – Circuito desenvolvido para a conexão direta da fonte de tensão em série com uma resistência . . . . .	52
Figura 42 – Tensão e corrente entregue à rede elétrica para a conexão direta da fonte geradora (Corrente 10x) . . . . .	53
Figura 43 – Resposta do controle de tensão no barramento CC . . . . .	53
Figura 44 – Correntes de eixo direto e em quadratura . . . . .	54
Figura 45 – Tensão e correntes antes do ponto de acoplamento da carga. Corrente 5x	54

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Taxa de distorção harmônica . . . . .	41
Tabela 2 – Constantes do controlador PI para o sistema PLL . . . . .	43
Tabela 3 – Taxa de distorção harmônica . . . . .	45



# Lista de abreviaturas e siglas

A - Ampère

GD - Geração Distribuída

INEE - Instituto Nacional de Eficiência Energética

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

FP - Fator de Potência

PI - Proporcional Integral

PWM - *Pulse Width Modulation* - Modulação por Largura de Pulso

PLL - *Phase Locked Loop*



# Sumário

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
1.1	Objetivos	18
1.2	Estrutura do Trabalho	18
2	<b>CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DA LITERATURA</b>	21
2.1	Geração distribuída	21
2.2	Fator de Potência	24
2.3	Transformação de Coordenadas - Transformada DQ0	26
2.4	Controlador Proporcional Integral - PI	27
2.5	Modulação por Largura de Pulso - PWM	30
2.6	Modelagem do conversor em variáveis trifásicas estacionárias <i>abc</i>	30
2.7	Algoritmo de Sincronização - PLL ( <i>Phase Locked Loop</i> )	33
2.8	MPPT - <i>Maximum Power Point Tracker</i>	34
3	<b>METODOLOGIA</b>	37
3.1	Malha de Controle do Sistema	37
3.2	Modulação PWM	39
3.3	Algoritmo de Sincronização - PLL ( <i>Phase Locked Loop</i> )	41
3.4	Transformação DQ0	42
3.5	Controle de Corrente - Barramento CC com fonte de tensão simples	44
3.6	Controle de Tensão - Barramento CC com fonte de corrente simples	45
3.7	Modelagem do Sistema de Geração por uma Fonte de Tensão em Série com um Resistência - Acoplamento com um Conversor Buck ao Barramento CC	48
3.8	Conexão de um Painel Solar Fotovoltáico na Rede Através de um Conversor Boost	49
3.9	Modelagem do Sistema de Geração por uma Fonte de Tensão em Série com um Resistência - Conexão Direta ao Barramento CC	52
4	<b>CONCLUSÃO E PROPOSTAS FUTURAS</b>	55
5	<b>REFERÊNCIAS</b>	57



# 1 Introdução

Segundo o INEE, Instituto Nacional de Eficiência Energética (2008), Geração Distribuída (GD) é geração de energia que se caracteriza por estar próxima do consumidor. Portanto, por esse sistema estar próximo a carga, não há perdas nas linhas de transmissão e distribuição.

Entram na lista de exemplos de geração distribuída os co-geradores, painéis fotovoltaicos, geradores de emergência e pequenas centrais elétricas (WRIGHT *et al*, 2009), além dos aerogeradores.

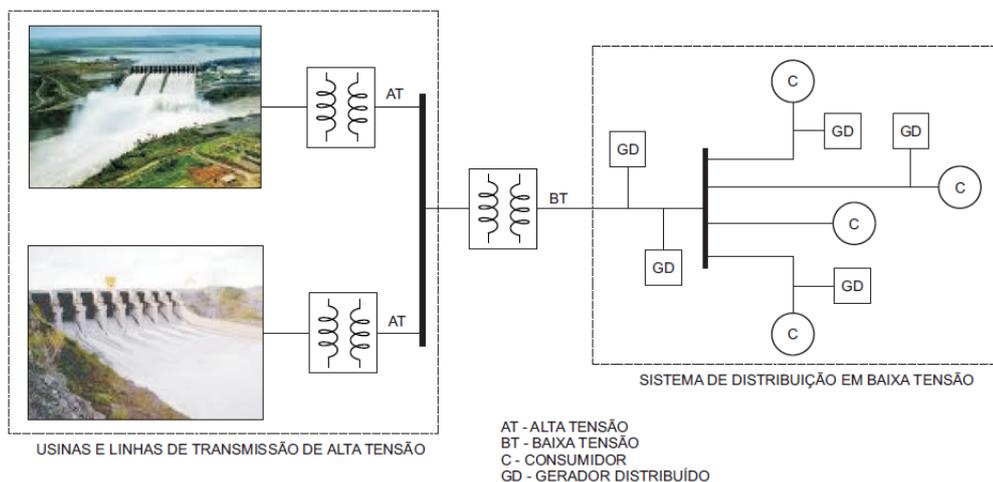


Figura 1 – Caracterização da geração distribuída (VILLALVA, 2010).

O crescimento da população e o desenvolvimento tecnológico contínuo exigem uma demanda de energia cada vez maior. Assim, quando o aumento na demanda ultrapassa os limites do sistema, é necessária a construção de novas unidades de geração de grande porte bem como o sistema que suporte a transmissão e distribuição desta nova parcela de energia gerada.

O modelo de grandes centrais geradores começou a ser questionado com o surgimento de novas tecnologias que reduzem o custo da energia gerada. Aliado à dificuldade crescente de financiamento de grandes centrais de geração estão os problemas relacionados ao impacto ambiental associado à implantação destas grandes centrais. Todos estes fatores contribuíram para a valorização da geração distribuída.

Desde a década passada, essa tecnologia vem crescendo cada vez mais, uma vez que nos países desenvolvidos esse tipo de geração já ocupa posições de destaque. É um modelo que tem um alto custo benefício devido a sua vida útil e o seu *payback*, por isso o

grande interesse pela inovação.



Figura 2 – Matriz energética brasileira FONTE:(AGUIAR,2013)

O interesse pelas fontes alternativas de energia elétrica tem contribuído para o aumento do uso de geradores distribuídos conectados à rede elétrica. A geração distribuída é uma modalidade de geração caracterizada pelo uso de geradores de pequena e média potências.

Dentro deste cenário, o conceito de geração distribuída tem ganhado muita atenção nos últimos anos. Além de preencher as lacunas deixadas pela geração convencional como dificuldade de instalação, perdas por transmissão, entre outras, o conceito de sistemas de geração distribuída quebra o paradigma tradicional da operação do Sistema Elétrico de Potência (SEP), quando o mesmo, com diversas fontes independentes conectadas, passa a operar como várias microrredes (do inglês, Micro Grids) independentes e/ou redes inteligentes (ALMEIDA, 2011).

A Figura 3 mostra que nos Estados Unidos da América, o crescimento do sistema de geração através da energia do sol está muito maior que comparada à outras fontes alternativas. Isso se dá porque este tipo de geração é de fácil instalação e a fonte de energia, a incidência solar, está presente em todo lugar do planeta.

A Figura 4 mostra que Minas Gerais é o estado que mais tem clientes geradores de energia conectados à rede. Este tipo de sistema gera lucros, mas não há retorno em dinheiro e sim em créditos para o cliente que aderiu o sistema (ND 5.1 - CEMIG D), sistema tal que a ANEEL obrigou as concessionárias a se adequarem Tudo que ele gerar a mais do que ele gastar, ficará armazenado para que em uma futura necessidade ele possa usufruir dos créditos.

Esse tipo de metodologia utilizada pelas concessionárias é bastante eficaz, uma vez que devido à horossazonalidade, existe uma diferença de incidência solar em um determinado local, e hora ele armazena créditos, hora ele gasta-os.

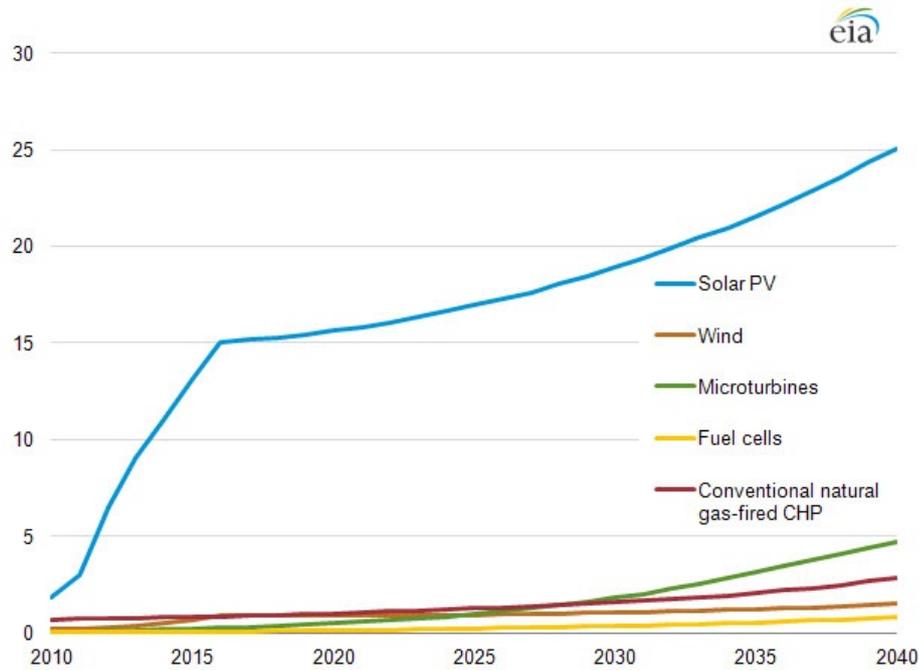


Figura 3 – Projeção de instalações de Geração distribuída, segundo a EIA (do inglês, *Energy Information Administration*) (Adaptado de :[www.eia.gov](http://www.eia.gov))

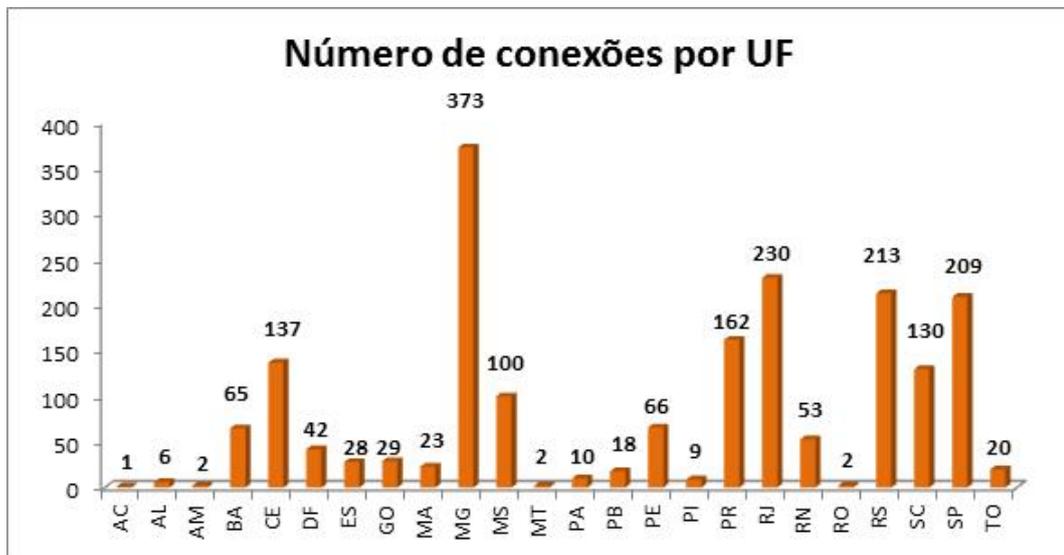


Figura 4 – Número de conexões por unidade federativa até 2015. (ADAPTADO DE: [www2.aneel.gov.br](http://www2.aneel.gov.br))

Com o crescimento da geração distribuída, aumenta também a necessidade de uma tecnologia que atenda os padrões de consumo e entregue ao consumidor uma energia de qualidade. Com isso, se faz necessário o estudo de técnicas que auxiliam na conversão de modelos de tensão. Portanto, o estudo de controle de corrente está diretamente ligado à eficiência do sistema.

Contudo, para realizar a conexão de um gerador distribuído na rede elétrica, deve-se atentar para alguns cuidados, entre eles, o fator de potência. A correção do fator de potência é um assunto bastante discutido devido a sua grande importância no consumo de energia elétrica. De acordo com (CREDER, 2007), um baixo fator de potência pode causar sobrecarga em cabos e transformadores, gerando um aumento nas perdas do sistema, nas quedas de tensão e no desgaste em dispositivos de proteção e manobra (RIOS et al, 2014).

## 1.1 Objetivos

Sabe-se que um inversor trifásico VSC com modulação PWM tem tanto a capacidade de gerar potência ativa quanto reativa. Assim pode-se gerar energia elétrica e ainda melhorar o FP da rede pela injeção controlada de potência reativa.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica sobre as técnicas utilizadas no desenvolvimento do projeto, bem como desenvolver um protótipo em ambiente simulado para realizar a conexão de um sistema de geração em corrente contínua na rede elétrica de corrente alternada em 60Hz, com ênfase em controle de fator de potência.

Os objetivos específicos do projeto, são:

- Correção do fator de potência da energia entregue a rede;
- Implementação de um conversor CC-CA trifásico para conexão com a rede elétrica;
- Implementação de um sistema de geração em corrente contínua;
- Desenvolvimento de um sistema de geração através de um painel solar fotovoltaico, em que este é conectado diretamente ao barramento CC ou conectado a um conversor Buck para fazer interface entre painel e o barramento;
- Desenvolvimento de um algoritmo de busca de máxima potência (MPPT) para conexão do painel solar ao barramento;
- Implementação de um sistema de sincronismo (PLL);
- Desenvolvimento de um controle de corrente do inversor no modo conectado;
- Implementação de um controle de tensão em cascata com o controle de corrente para controle do barramento CC;

## 1.2 Estrutura do Trabalho

Ao longo do texto, o trabalho é apresentado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Desenvolvimento da introdução do projeto, bem como os objetivos gerais e individuais.
- Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica das técnicas utilizadas.
- Capítulo 3: Apresenta a metodologia utilizada e também os resultados obtidos na simulação;
- Capítulo 4: Conclusão e consideração final do trabalho.



## 2 Conceitos Gerais e Revisão da Literatura

### 2.1 Geração distribuída

A constante procura por serviços e tecnologias mais eficientes, e com reduzidos impactos ambientais, seja no processo de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica, associadas aos necessários investimentos para o aumento da capacidade instalada no setor elétrico brasileiro, tem colocado a geração distribuída como alternativa às tradicionais soluções seja para instalação local ou para integração regional (DIAS, 2005).

Em estudos feitos por DIAS (2005), algumas oportunidades oferecidas pela utilização da geração distribuídas são:

- **Postergação de Investimentos:** Quando acontece um aumento da carga em um sistema de distribuição, eventualmente chega-se a um ponto onde esta carga ultrapassa a capacidade de um ou mais componentes do sistema, como por exemplo, um transformador ou alimentador. Uma forma tradicional de resolver este problema é instalando novos equipamentos para aliviar a sobrecarga. O não investimento em atualização ou adequação do sistema aumenta o risco de falhas em componentes devido ao stress da sobrecarga, comprometendo a confiabilidade do sistema e aumentando o custo de operação e manutenção.
- **Redução de Perdas:** Quando a energia é transmitida através dos sistemas de transmissão e distribuição, ocorrem perdas devido à impedância de alimentadores e transformadores. Essas perdas são, tipicamente, da ordem de 4 a 7% da potência total que é, a quantidade de energia perdida, pelo "trânsito" desta energia da geração até as cargas. Esta perda indica uma quantidade de energia que é gerada, mas não se transforma em receita para a concessionária.
- **Confiabilidade:** segundo (COWART, 2001), três pontos de vista devem ser considerados contribuições da Geração Distribuída:
  - Do ponto de vista de clientes individuais;
  - Do ponto de vista de um grupo de clientes e sua companhia local de distribuição;
  - O mercado como um todo e operadores do sistema.

De acordo com (DIAS, 2005), o sistema de geração distribuída pode contribuir para a melhoria na qualidade da energia em áreas congestionadas, ou seja, finais de linha de trechos muito longos, áreas industriais e em locais onde uma alta qualidade

de energia é exigida. E portanto, a GD pode proporcionar alívio para sistemas de distribuição e transmissão em condições de sobrecarga ou congestionamento.

- Atendimento às comunidades isoladas: Comunidades localizadas em áreas remotas ou isoladas, onde se torna difícil a construção e acesso de linhas de transmissão ou distribuição, podem ser beneficiadas pela Geração distribuída, já que esta se localiza próximo à carga, não dependendo destes sistemas. A Figura 5 mostra o número de domicílios rurais sem energia nos diversos estados brasileiros, que são possíveis beneficiários do crescimento da GD.

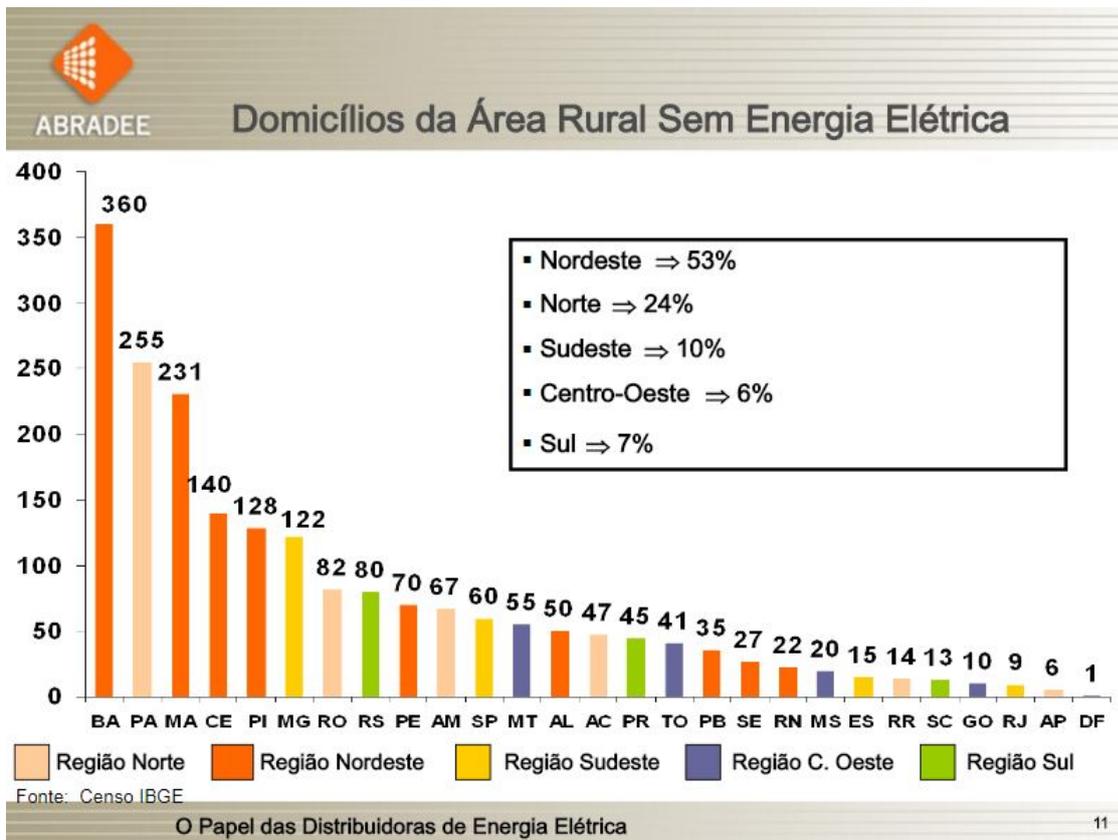


Figura 5 – Domicílios Rurais sem Acesso à rede elétrica. ADAPTADO DE: <http://www.abradee.com.br/> ABRADDEE

- Novas Opções de Negócios: O sistema de geração distribuída é um negócio bastante atrativo, como mostra uma projeção feita pela ANEEL em que mostra até 2024 o crescimento do número de microgeradores conectados a rede mostrado na figura 6, é uma tecnologia que cresce mais a cada ano.
- Redução das áreas alagadas: Com o aumento da geração distribuída, diminui a necessidade de geração convencional, e conseqüentemente diminui a necessidade de criação de novas usinas hidroelétricas.

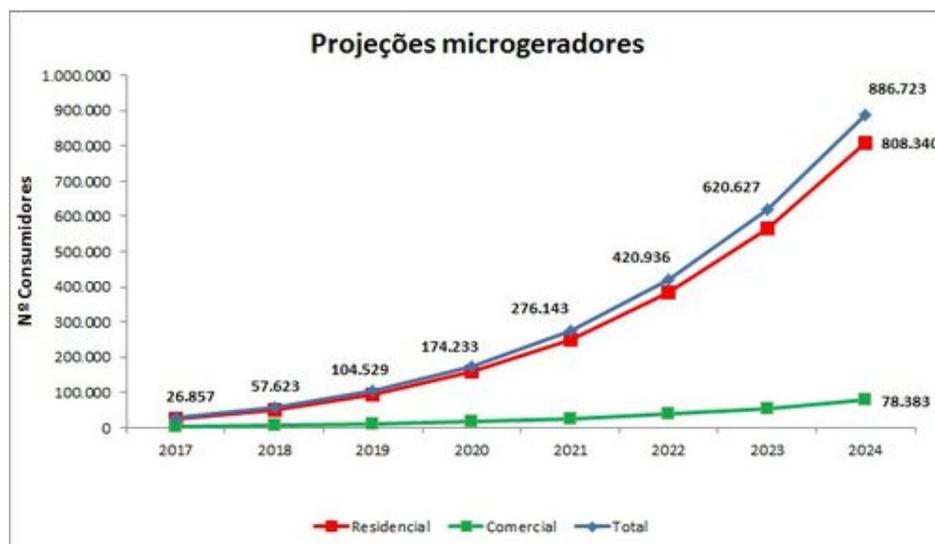


Figura 6 – Projeção feita pela ANEEL para a conexão de microgeradores à rede elétrica.  
FONTE: Nota técnica ANEEL 56/2017

- Nível de tensão: Com a instalação de geração distribuída próximo às residências, há uma diminuição da necessidade de transmissão de energia consumida e portanto a diminuição da queda de tensão é evidente. É claro que a maior parcela é de geração convencional, no entanto com o crescimento aguçado da GD, no futuro não será necessário tantos circuitos aumentadores de tensão.

No entanto, segundo (DIAS, 2005), existem algumas barreiras que podem impedir o rápido desenvolvimento da Geração Distribuída. Algumas delas são:

- Custo das Tecnologias;
- Procedimentos de Operação e Proteção;
- Pouco conhecimento da tecnologia por parte da população.

De acordo com ele, o custo da tecnologia da Geração Distribuída é um dos fatores que impossibilitam um maior crescimento no mercado. Já o procedimento de operação e proteção é um fator que apresenta maiores dificuldades operativas devido ao fluxo de energia bidirecional.

Um dos principais modelos desta tecnologia de geração é a geração de energia através de painéis fotovoltaicos. A energia provinda do sol, além de ser grátis, não polui o ambiente. No entanto, devido ao baixo rendimento do painel em média somente 14% desse montante é transformado em energia elétrica (MATOS, 2016). A figura 7 ilustra um painel solar instalado em uma residência.



Figura 7 – Painéis fotovoltaicos instalados no telhado de uma residência.

## 2.2 Fator de Potência

De acordo (RIOS *et al*, 2014), em um condutor elétrico energizado em Corrente Alternada (CA), passa uma determinada quantidade de energia, sendo um percentual Ativo e outro Reativo. Quanto maior for o percentual de Potência Ativa (kW) que passar, este será melhor e mais econômico.

O mesmo autor afirma que a Potência Reativa (kvar) é necessária para criar o fluxo magnético necessário para o funcionamento de equipamentos como motores, transformadores, dentre outros, mas esta potência não realiza trabalho. A Potência Ativa (kW) é a que efetivamente produz trabalho.

Como se pode verificar na FIGURA 8, a soma vetorial das Potências Ativa e Reativa é denominada de Potência Aparente(kVA). Como a rede tem um limite de capacidade de transmissão, a capacidade em kVA de um circuito elétrico (fiação, transformadores, dentre outros) é limitada também. Para aumentar a Potência Ativa em um circuito, é preciso reduzir a Potência Reativa Q. O Fator de Potência (FP) é definido como o cosseno do ângulo entre as retas potência aparente (S) e potência ativa (P) (RIOS *et al*, 2014)).

Na maioria dos circuitos elétricos e eletrônicos existem cargas indutivas e capacitivas que em sistemas de tensão alternadas, armazenam e injetam energia na rede, operando como equipamentos reativos que não se comportam de acordo com a tensão. Portanto, estes dispositivos têm a capacidade de fornecer e absorver potência elétrica.

Dessa forma, a operação desses dispositivos diminui o fator de potência, posto que a potência reativa não realiza trabalho útil, levando ao aumento de amplitude de corrente,

para a realização de um trabalho útil que poderia ser realizado com uma corrente de menor intensidade, porém com um fator de potência elevado.

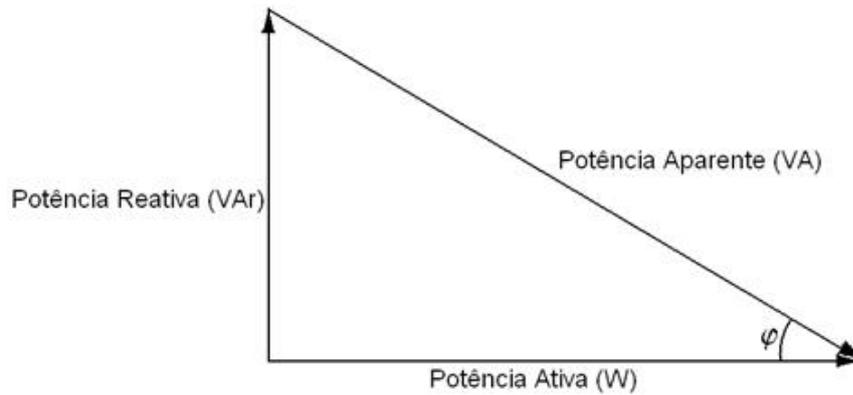


Figura 8 – Representação da potência aparente através da potência ativa e reativa.

Através do triângulo de potência, a potência aparente é demonstrada em (2.1).

$$S = \frac{P}{\cos(\phi)} \quad (2.1)$$

$$S = \frac{Q}{\sin(\phi)} \quad (2.2)$$

Portanto, o fator de potência é definido pela equação [2.3].

$$FP = \cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (2.3)$$

Logo, Fator de Potência é um índice que mede a quantidade de energia aproveitada pela carga, oriunda do fornecimento. Essa grandeza assume qualquer valor entre 0 e 1. Sendo 0, toda energia que chega a carga será devolvida à fonte. Sendo 1, toda energia enviada pela fonte será consumida pela carga. Diz-se que o fator de potência será adiantado ou atrasado conforme a relação entre as ondas de tensão e correntes geradas. A carga indutiva produz potência reativa com um atraso da corrente em relação a tensão. Nesse caso, o fator de potência será atrasado. Já as cargas capacitivas, produz uma potência reativa com um adiantamento da corrente em relação a tensão, nesse caso o fator de potência estará adiantado.

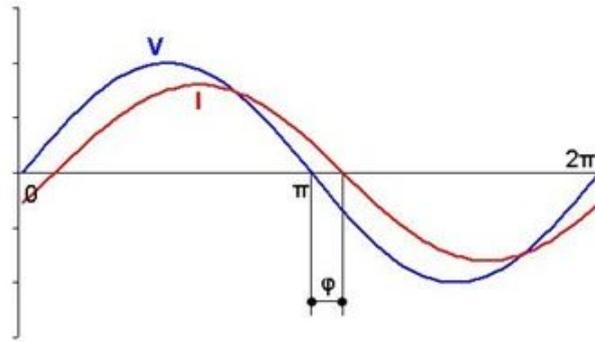


Figura 9 – Onda de corrente atrasada em relação a tensão, fator de potência indutivo.

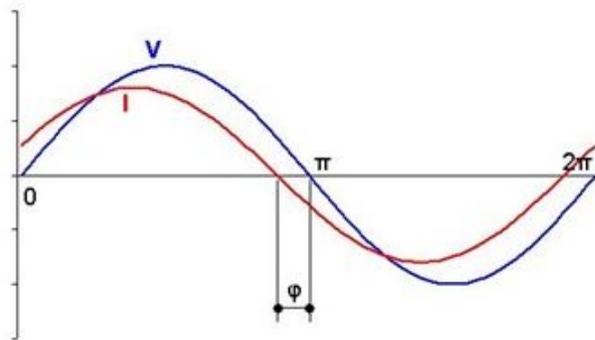


Figura 10 – Onda de corrente adiantada em relação a tensão, fator de potência capacitivo.

## 2.3 Transformação de Coordenadas - Transformada DQ0

A mudança do referencial estacionário para a referência síncrona, permite expressar as equações do circuito trifásico equilibrado em um sistema de coordenadas girante, que pode ser sincronizado com a frequência  $\omega$  da rede elétrica. O uso do referencial síncrono teve origem no controle de máquinas elétricas rotativas de corrente alternada. A vantagem da mudança para referencial síncrono é que as tensões e correntes na frequência de sincronismo, que são senoidais no sistema ABC, aparecem como valores constantes quando o sistema está no referencial DQ. Isso traz algumas facilidades no controle das correntes do conversor CC-CA, pois os controladores conseguem proporcionar erro de regime nulo em sistemas com valor de regime final constante (VILLALVA, 2010).

Para este trabalho, as coordenadas DQ0 terão o papel de representar potência ativa (eixo D) e potência reativa (eixo Q). Esta transformação será usada para simplificar o modelo de regulação de fator de potência no conversor.

Portanto, após algumas modificações, a transformada de coordenadas  $abc$  para  $dq$ , em termos de corrente, se dá pela equação:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\text{sen}\theta & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

## 2.4 Controlador Proporcional Integral - PI

O controlador PI é o tipo de controle mais utilizado na indústria, devido a sua robustez e simplicidade no ajuste dos parâmetros para obter um bom desempenho.

Os controladores proporcional e integral apresentam, em suas ações de controle, diferentes proporcionalidades em relação ao sinal, de modo que, no primeiro, o sinal que sai do controlador e vai para o sistema é proporcional ao erro, de maneira instantânea. Enquanto que no segundo este mesmo sinal é proporcional à integral do erro. É importante ressaltar que ambos os controladores possuem vantagens e desvantagens. Como por exemplo, o fato de o controlador proporcional poder fazer com que o sistema atinja o regime permanente de maneira mais rápida, porém, sem eliminar o erro estacionário para uma entrada em degrau, em contrapartida, o controlador integral pode proporcionar a eliminação deste erro, pagando o preço de não produzir uma ação de controle tão rápida quanto a anterior. As Figuras 11 e 12 demonstram como os dois tipos de controladores funcionam.

A equação (2.5) mostra o controlador PI, cujo ganho proporcional também multiplica o termo integral.

$$u(t) = K_c(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (2.5)$$

A equação (2.5) é um modelo matemático de controlador PI, no formato de padrão ISA (do inglês, *Instrument Society of America*). Sendo:

- $u(t)$ : Sinal de saída do controlador;
- $e(t)$ : Sinal de entrada do controlador, chamado erro atuante;
- $K_c$  e  $T_i$ : Parâmetros de ajuste do controlador;

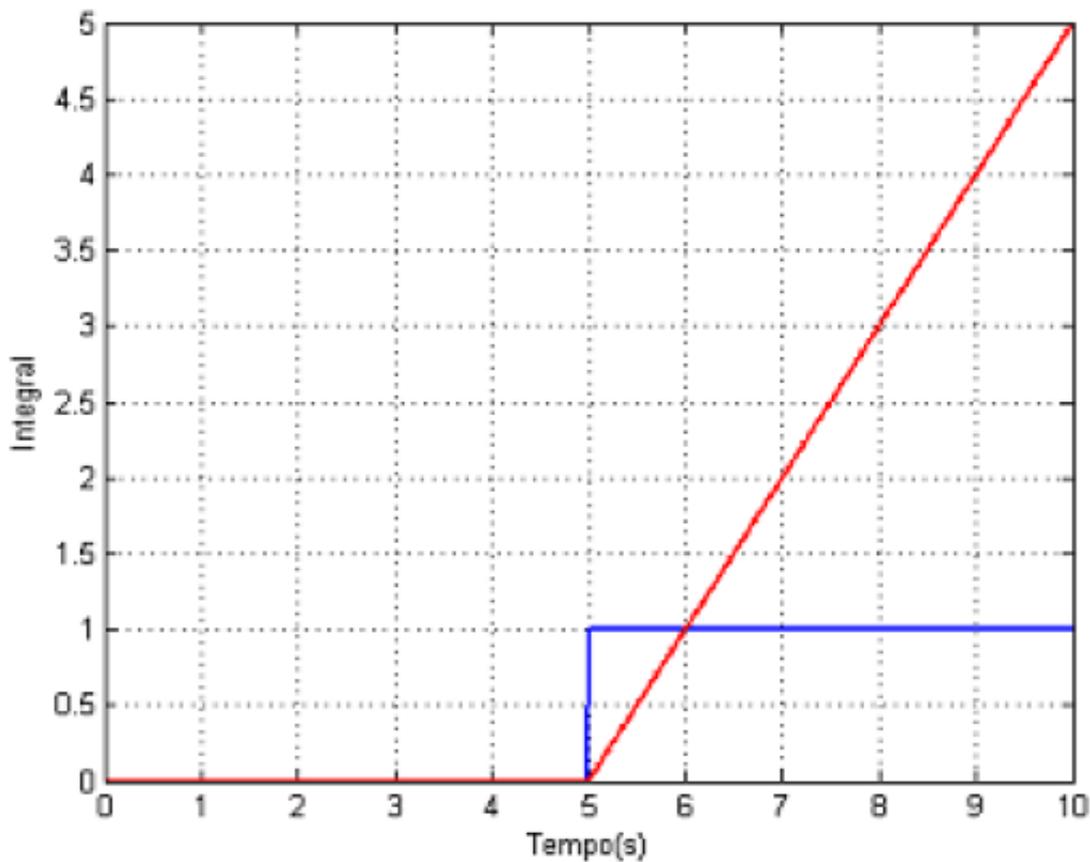


Figura 11 – Exemplo de resposta ao degrau de um controlador Integrador. Em azul degrau unitário e em vermelho a resposta do integrador.  $K_c = T_i = 2$

- $\frac{K_c}{T_i}$ : Ganho Integral;
- $K_c$ : Ganho Proporcional.

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação (2.5), considerando condições iniciais nulas, obtém-se a função de transferência  $G_c(s)$  do controlador PI.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_c T_i s + K_c}{s T_i} \quad (2.6)$$

O termo  $T_i$  é o tempo integral. Em alguns controladores o ajuste do termo integral será o tempo integral em segundos ou minutos por repetição, outros escolhem o ganho integrativo que é dado por  $K_i = \frac{K_p}{T_i}$  (Pinto, 2014).

O gráfico da figura 13 ilustra a aplicação da ação integral conjuntamente com a ação proporcional.

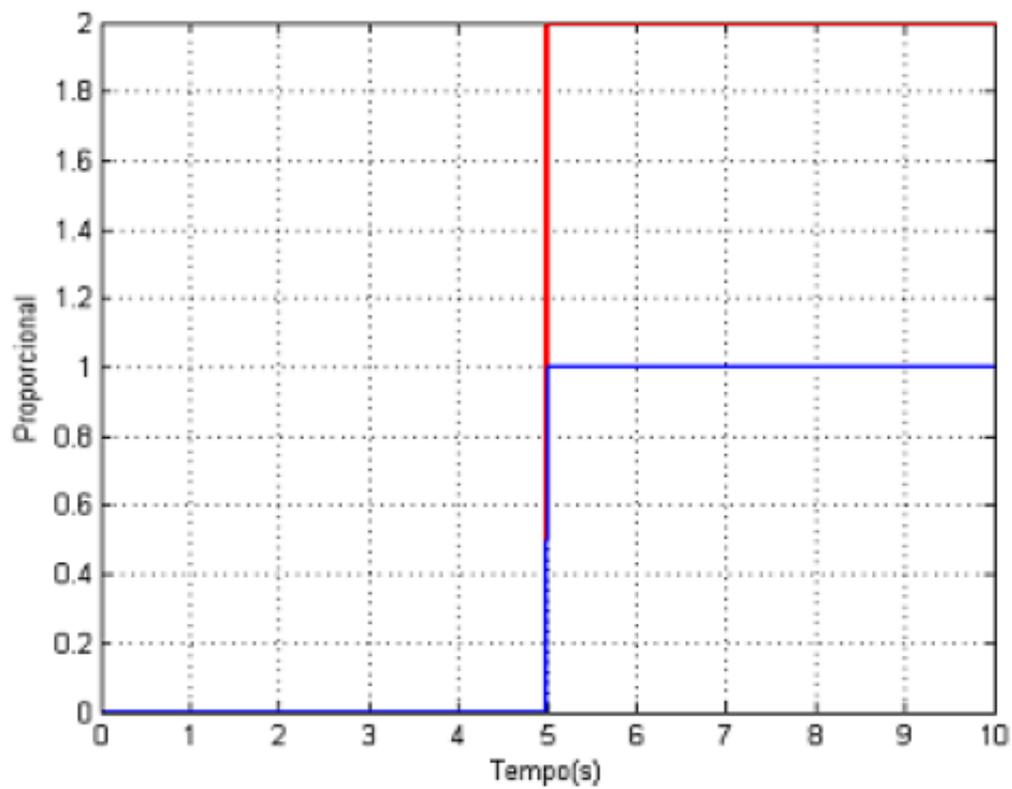


Figura 12 – Exemplo de resposta ao degrau de um controlador Proporcional. Em azul degrau unitário e em vermelho a resposta do controlador proporcional.  $K_c = 2$

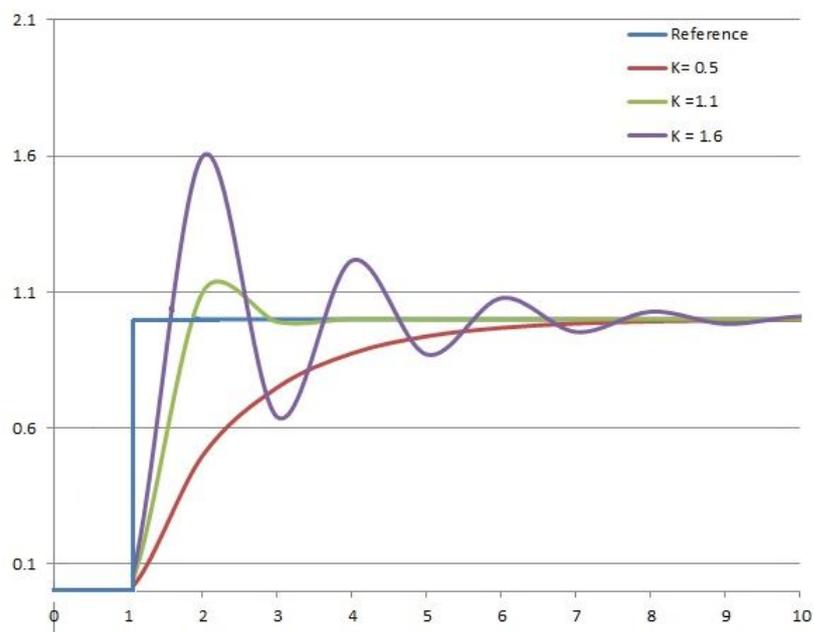


Figura 13 – Efeito da ação Proporcional Integral para diferentes valores de constantes.

O controlador proporcional é apenas um amplificador de ganho constante, já no controlador integral, a saída em qualquer instante de tempo é proporcional ao acúmulo de efeitos do erro em instantes anteriores. A ação integral irá acrescentar ou diminuir a saída

do controlador indefinidamente enquanto houver erro.

## 2.5 Modulação por Largura de Pulso - PWM

A técnica de PWM é empregada em diversas áreas da eletrônica, talvez a mais comum seja a utilização em fontes chaveadas mas também pode ser utilizada para controle de velocidade de motores, controle de luminosidade, controle de servo motores e diversas outras aplicações. PWM significa "*Pulse Width Modulation*" ou Modulação de Largura de Pulso, ou seja, através da largura do pulso de uma onda quadrada é possível o controle de potência ou velocidade.

Esta técnica funciona a partir da comparação de dois sinais. Uma chamada portadora e outra chamada referência. O sinal da portadora é um onda triangular e a referência, no caso deste projeto é um onda senoidal. Ao comparar as duas ondas, a saída será binária, ou seja, zero ou um. No entanto, uma vez que a onda de referência vai aumentando sua amplitude, o sinal lógico vai ficar mais tempo acionado. Com isso, modula-se uma onda de corrente senoidal a partir de um sistema de corrente contínua. Para o caso trifásico existe três ondas de referência que estão defasadas 120 graus uma da outra.

A frequência da onda triangular deve ser, no mínimo 10 vezes superior à máxima frequência da onda de referência, para que se obtenha uma reprodução aceitável do sinal de referência, agora modulado, na forma de onda sobre a carga, após efetuada a adequada filtragem. A largura do pulso de saída do modulador varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora.

A tensão de saída, que é aplicada à carga, é formada por uma sucessão de ondas retangulares de amplitude igual à tensão de alimentação CC e duração variável. A Figura 14 mostra a modulação de uma onda senoidal, produzindo na saída uma tensão com 2 níveis, na frequência da onda triangular.

## 2.6 Modelagem do conversor em variáveis trifásicas estacionárias *abc*

A Figura 15 apresenta o formato trifásico do inversor CC-CA conectados à rede. Esse conversor pode ser representado pelo circuito trifásico da figura 16.

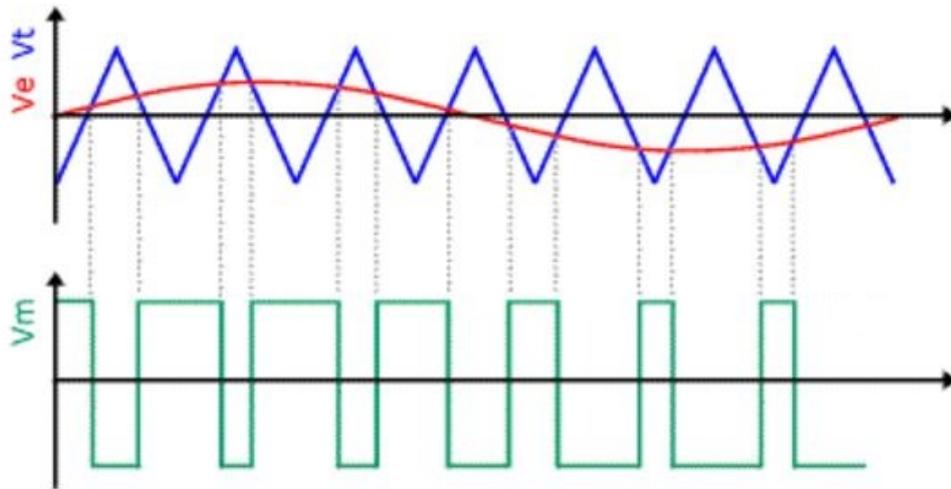


Figura 14 – Saída alternada de tensão após modulação.

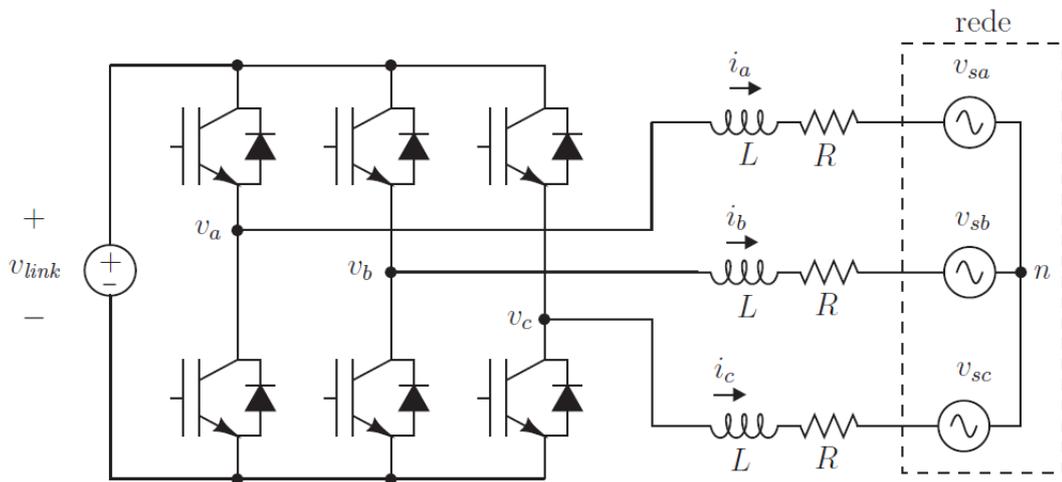


Figura 15 – Circuito representativo do Conversor CC-CA. FONTE: (VILLALVA, 2010)

Note que o inversor e a rede foram substituídos por fontes de tensão. Devido a ausência de conexão dos neutros do conversor e da fonte, as tensões fase-neutro do inversor não são independentes. Isso faz com que o circuito fique inevitavelmente sujeito a interações entre as fases (VILLALVA, 2010). A título de simplificação, sendo senoidais e equilibradas as tensões e correntes do sistema, pode-se considerar a existência de dois neutros virtuais equipotenciais, visto tanto do lado da fonte, quanto do lado da rede. Com essa simplificação, pode-se obter as equações por fase do circuito, que são dadas pelas equações 2.7 a 2.9.

$$-v_a + Ri_a + L \frac{d}{dt} i_a + v_{sa} = 0 \quad (2.7)$$

$$-v_b + Ri_b + L \frac{d}{dt} i_b + v_{sb} = 0 \quad (2.8)$$

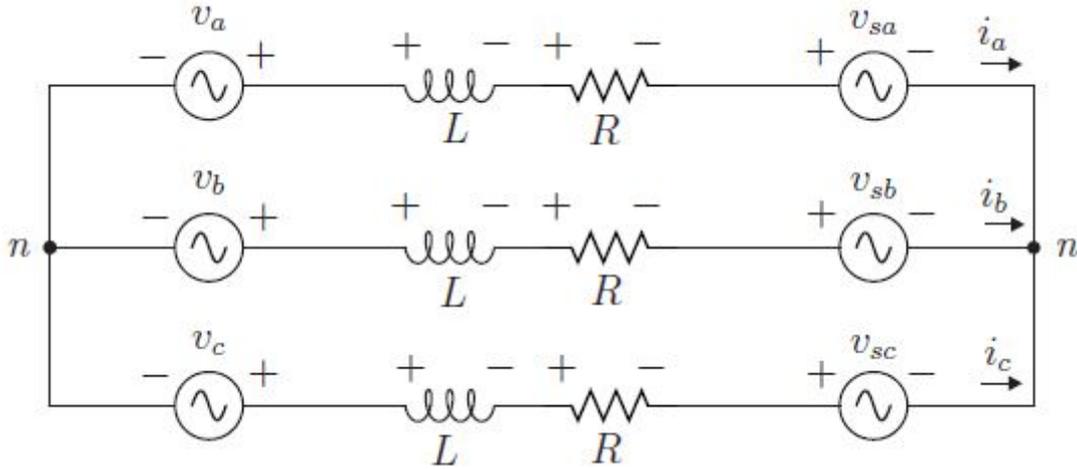


Figura 16 – Circuito equivalente do conversor conectado à rede. FONTE: (VILLALVA, 2010)

$$-v_c + Ri_c + L\frac{d}{dt}i_c + v_{sc} = 0 \quad (2.9)$$

Essas equações descrevem as relações instantâneas entre corrente e tensão do circuito. Aplicando a transformada de Laplace nas equações acima, tem-se a Equação 2.10 no domínio da frequência ( $s$ ), que valem analogamente as fases  $b$  e  $c$ :

$$-v_a(s) + Ri_a(s) + sLi_a(s) + v_{sa}(s) = 0 \quad (2.10)$$

A equação 2.10 pode ser reescrita como 2.11, onde  $G_{iv}(s)$  é a função de transferência da tensão de fase do conversor para corrente de fase e  $G_{ivs}(s)$  é a função de transferência da tensão de fase da rede para a corrente (VILLALVA, 2010):

$$i_a(s) = G_{iv}(s)v_a(s) + G_{ivs}(s)v_{sa}(s) \quad (2.11)$$

Portanto, como o propósito é o controle de corrente na saída do conversor,  $v_{sa}$ , que é a tensão da rede, pode ser desprezada, sendo considerada um distúrbio por (VILLALVA, 2010), Por essa razão e pelas equações deduzidas, tem-se:

$$G_{iv}(s) = \frac{i_a(s)}{v_a(s)} = \frac{i_b(s)}{v_b(s)} = \frac{i_b(s)}{v_b(s)} = \frac{1}{R + sL} \quad (2.12)$$

Na modelagem do conversor para as coordenadas ortogonais síncronas  $dq$ , mesmo existindo um termo de acoplamento entre as coordenadas direta e em quadratura, segundo (VILLALVA, 2010) este termo pode ser negligenciado e portanto a mesma função de transferência é encontrada.

## 2.7 Algoritmo de Sincronização - PLL (*Phase Locked Loop*)

O PLL é um sistema de realimentação em que o sinal de realimentação é usado para sincronizar a frequência instantânea do sinal de saída com a frequência instantânea do sinal de entrada. Os sinais de interesse podem ser qualquer forma de onda periódica, mas são normalmente senoidais.

Segundo (MARAFÃO, 2004), a idéia central é sintetizar, a partir das variáveis internas do PLL ( $\omega$ ,  $\theta$ ), uma senoide de amplitude unitária, a qual em condições de regime permanente, deve ser ortogonal à fundamental da tensão medida. Desta forma, o valor médio do produto escalar entre a tensão medida e a senoide gerada, deve convergir para zero. Como pode ser observado na Figura 17, a função temporal instantânea teta, a qual define o argumento utilizado para sintetizar a senoide unitária é obtida integrando a variável de saída do regulador PI, ou seja, a frequência da rede  $\omega$  dada em rad/s.

É importante destacar que, mesmo em aplicações trifásicas o modelo monofásico é perfeitamente capaz de fornecer a frequência de interesse, uma vez que ela é a mesma para as outras fases do sistema. No que se refere ao ângulo de sincronismo, se o algoritmo for aplicado a fase A, por exemplo, os ângulos das fases B e C podem ser obtidos somando -120 graus e 120 graus, respectivamente.

Na figura 17, a parcela que subtrai a referência (média móvel) deve garantir a condição de ortogonalidade e a precisão do PLL. Para isso, o filtro deve ser auto ajustável em relação a variações de frequência da tensão de entrada.

De acordo com (MARAFÃO, 2004), os ganhos do controlador PI podem ser ajustados de acordo com as equações a seguir:

$$K_p = 2\zeta\omega_n \quad (2.13)$$

$$K_i = \omega_n^2 \quad (2.14)$$

onde  $\zeta$  é o fator de amortecimento do regulador normalmente definido entre 0,5 e 1 e  $\omega_n$  define a frequência de interesse de malha fechada, ou seja, quanto menor a frequência de malha fechada ( $\omega_n$ ), menos sensível será o PLL a ruídos ou distorções harmônicas do sinal de entrada. Entretanto, reduzir a frequência de corte significa deixar a resposta do transitório do PLL cada vez mais lenta (MARAFÃO, 2004).

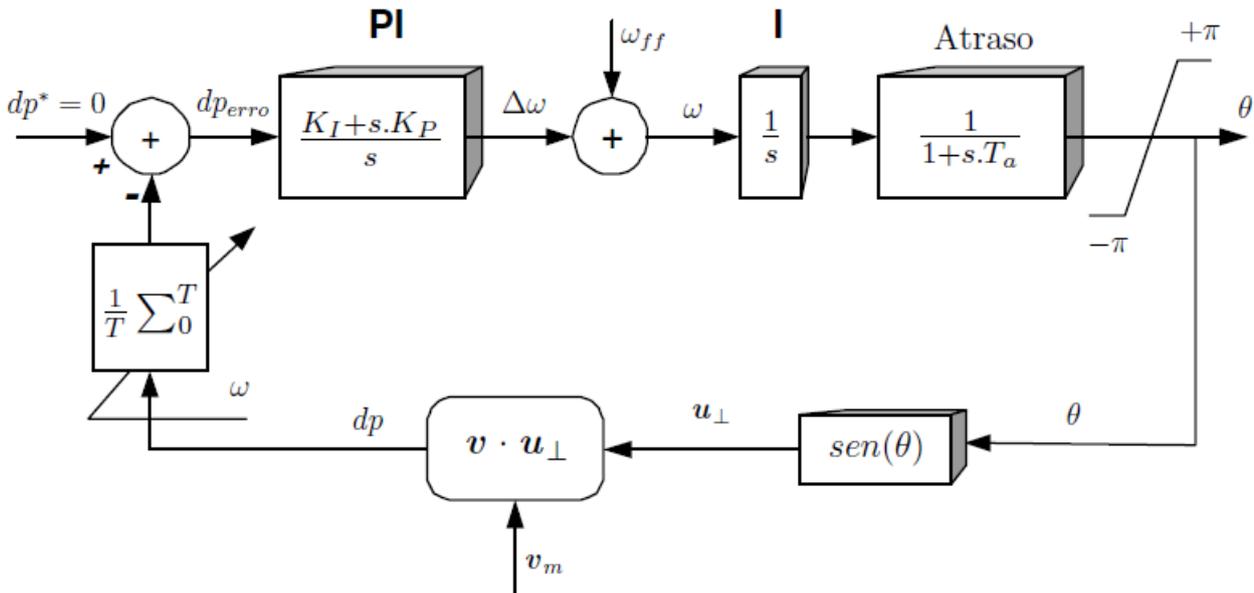


Figura 17 – Diagrama de blocos do PLL

A operação básica do PLL pode ser dividida em três fases. a primeira, detecta a diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal de referência do algoritmo, e gera um sinal de erro em que o valor é diretamente proporcional à diferença de fase. A segunda fase consiste em um filtro passa-baixa que suprime as altas frequências permitindo que o sinal de erro controle a frequência. Enfim, na terceira fase o oscilador gera um sinal de saída em que a frequência é uma função linear do sinal de controle fora do filtro. O sinal então é realimentado para a entrada do detector de fase e outra comparação é iniciada até que a diferença de fase atinja uma relação fixa (PRASAD *et al*, 2012).

## 2.8 MPPT - Maximum Power Point Tracker

De acordo com (VILLALVA, 2010), o MPPT (do inglês, maximum power point tracker) é um recurso extremamente importante para os sistemas conectados à rede. Ele é responsável por garantir que o painel o sistema gerador opere em seu ponto de máximo rendimento.

Usado principalmente em sistemas de geração fotovoltaicas, o algoritmo do MPPT P&O consiste em procurar sempre o ponto de máxima potência. Para fazer isto, ele sempre varia a tensão de referência em um sentido definido. Se ocorrer um aumento na potência o sentido de variação é mantido, caso contrário o sentido de variação é invertido (MOÇAMBIQUE, 2012). Esse procedimento ocorre até encontrar o ponto de máxima potência, nesse caso o sentido de busca é alterado e começa o novo ciclo de busca de máxima potência. A figura 18 resume a busca do MPPT.

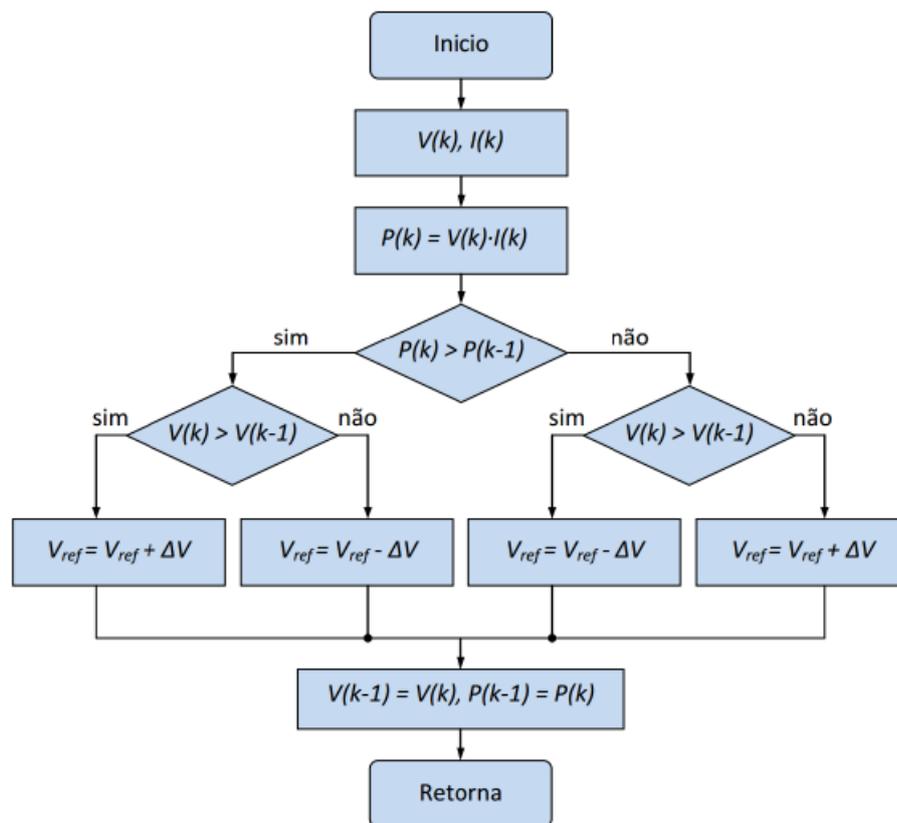


Figura 18 – Fluxograma do MPPT FONTE: (MOÇAMBIQUE, 2012)



## 3 Metodologia

### 3.1 Malha de Controle do Sistema

Segundo (VILLALVA, 2010), o controle de correntes em variáveis ortogonais síncronas dq é uma solução para a eliminação do erro de regime permanente obtido no controle de corrente em variáveis trifásicas. A eliminação desses erros é devido a tensões e correntes senoidais de frequência  $\omega$  transformadas em grandezas contínuas no sistema de coordenadas dq sincronizado com o ângulo  $\theta$ . Esse ângulo é encontrado a partir do sistema de detecção de fase PLL na fase A do sistema trifásico. Por isso como o sistema é equilibrado, não se faz necessário a obtenção da posição das ondas de tensão das outras fases. A Figura 19 mostra a estrutura de controle de correntes usando as transformações de coordenadas  $T_{dq}$  e  $T_{dq}^{-1}$  inversa.

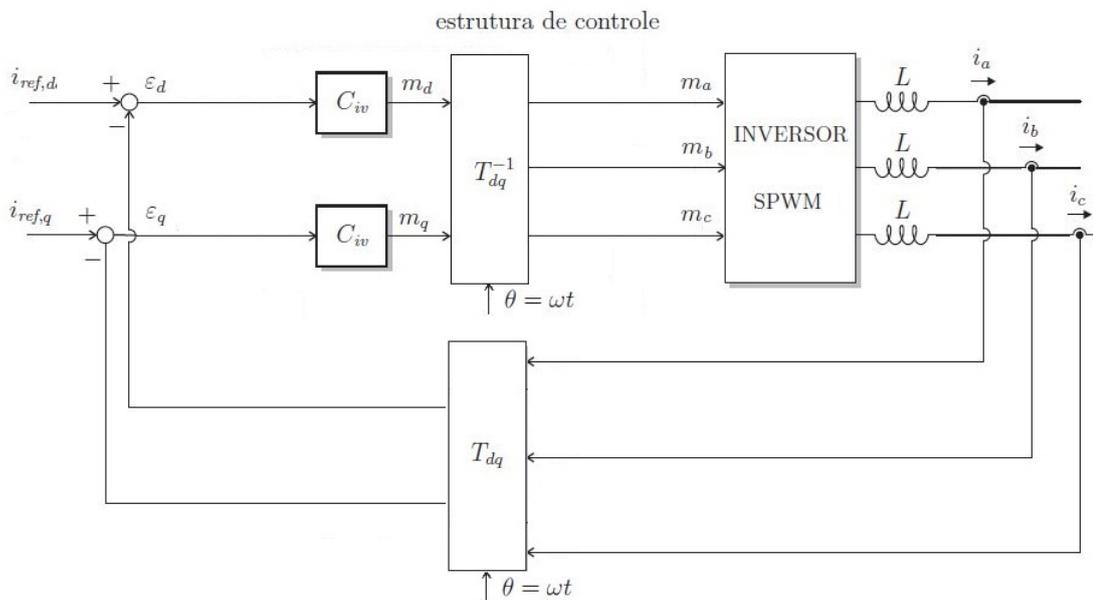


Figura 19 – Estrutura de controle do sistema de geração distribuída. ADAPTADO DE: (VILLALVA, 2010)

As correntes ABC são lidas no ramo da rede. Isso faz com que o controle seja direto e não necessite manipulações, uma vez que o erro de controle o dq é devido a subtração da referência pela corrente lida. Se a leitura da corrente fosse realizada no lado do conversor, num cenário de geração distribuída onde existe carga antes da conexão no PAC, a corrente de referência não estaria sendo comparada com a corrente real entregue à rede, ou seja, não estaria entregando a corrente com um fator de potência real com a tensão da rede. A Figura 20 ilustra o sistema criado para o controle do fator de potência.

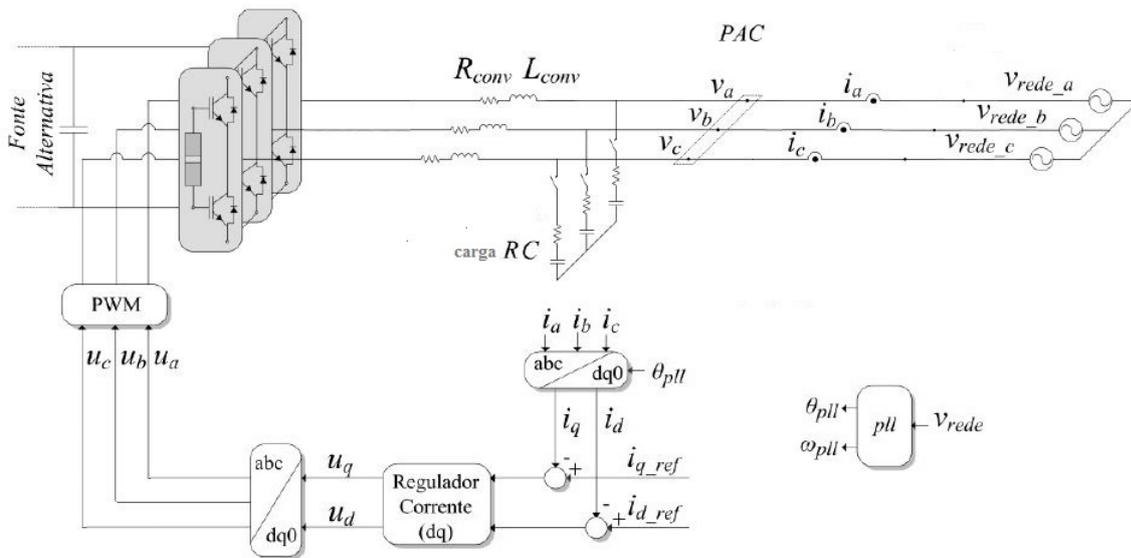


Figura 20 – Configuração do sistema de geração. ADAPTADO DE: (AGUIAR, 2013)

O inversor SPWM (do inglês, Sinusoidal Pulse Width Modulation) é uma técnica parecida com o PWM, uma vez que o conversor clássico realiza a modulação somente em faixa positiva do eixo. Já o SPWM realiza a modulação tanto na parte positiva quanto na porção negativa do eixo.

A malha de controle é representado pelo diagrama de blocos da Figura 21. Sendo a indutância do filtro com conversor a função de transferência que relaciona a tensão dos seus terminais com a corrente do próprio conversor. O ganho do conversor, para modulação senoidal é representado pela metade da tensão do barramento CC (AGUIAR, 2013):

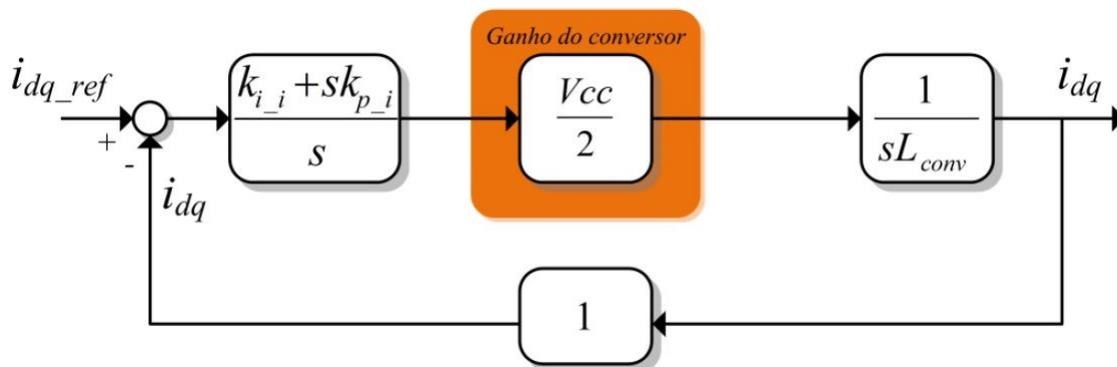


Figura 21 – Malha de controle do sistema de geração distribuída. ADAPTADO DE: (AGUIAR, 2013)

Para definir as constantes do controlador,  $K_p$  e  $K_i$ , é necessário definir a margem de fase ( $mf$ ), a frequência de corte em malha fechada ( $F_{CL}$ ) e o ganho em malha aberta, definido pela equação 3.1.  $K_p$  e  $K_i$  são definidos conforme as equações 3.2 e 3.3, respectivamente (AGUIAR, 2013).

$$G_{OL} = \frac{V_{cc}}{2} \frac{1}{L_{conv}} \quad (3.1)$$

$$K_p = \frac{2\pi F_{CL}}{G_{OL}} \quad (3.2)$$

$$K_i = \frac{K_p 2\pi F_{CL}}{\tan(mf)} \quad (3.3)$$

## 3.2 Modulação PWM

O sistema de geração distribuída trifásico desenvolvido em ambiente simulado, é composto por um conversor trifásico PWM operando em 10 kHz (frequência da onda portadora) em que as saídas dos módulos PWM são resultados dessa onda portadora e um sinal de referência operando em baixa frequência, que neste trabalho é 60 Hz. Segundo (Hart, 2010), a técnica de modulação PWM é uma maneira de diminuir a distorção harmônica total (THD), em comparação com outras estruturas de modulação. Uma maneira simples utilizada para diminuir essa taxa é a utilização de um indutor em série com a carga, funcionando como um filtro passa-baixas.

O modelo apresentado na figura 22 não está conectado à rede pois foi elaborado como passo inicial do projeto, para demonstrar a eficácia da técnica de modulação PWM, e então provar a aplicabilidade do conversor CC-CA.

A tensão de pico de carga é  $\frac{V_{cc}}{2}$ , e portanto para fins de demonstração as correntes das três fases é demonstrada na figura 23.

Apesar da característica do sinal de tensão na saída do conversor não ser senoidal, a corrente se mostra bastante parecida, com uma taxa de distorção harmônica bastante baixa. A THD destas ondas de corrente foram calculadas em ambiente simulado e pode ser observado na tabela 1.

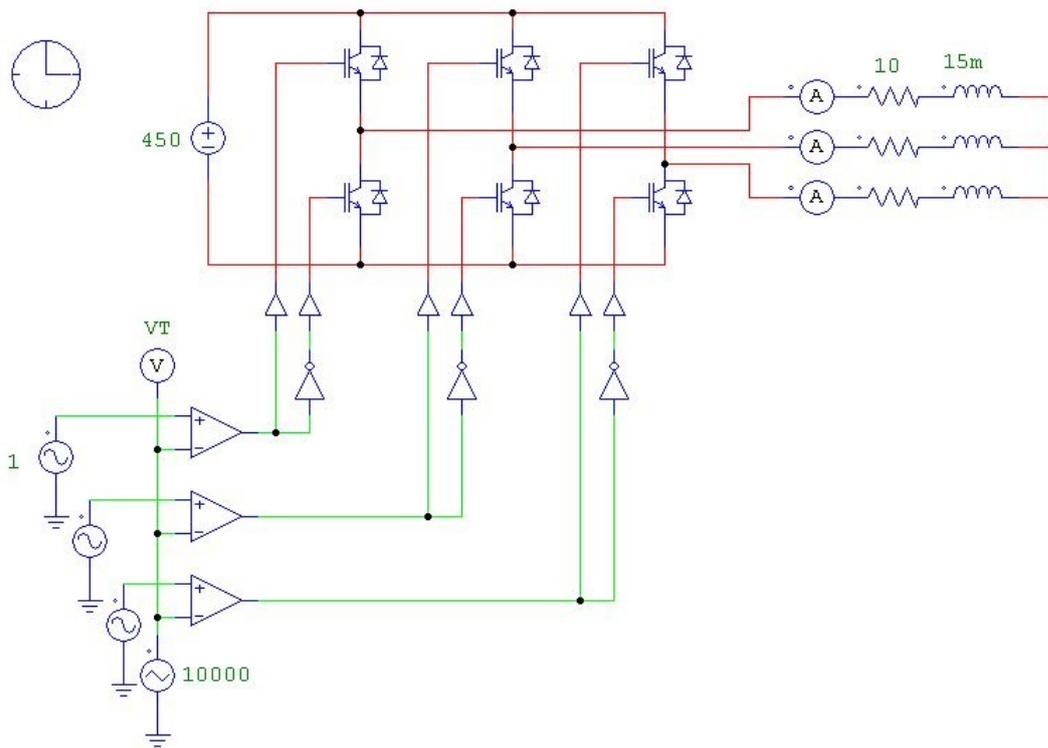


Figura 22 – Circuito desenvolvido para modulação PWM

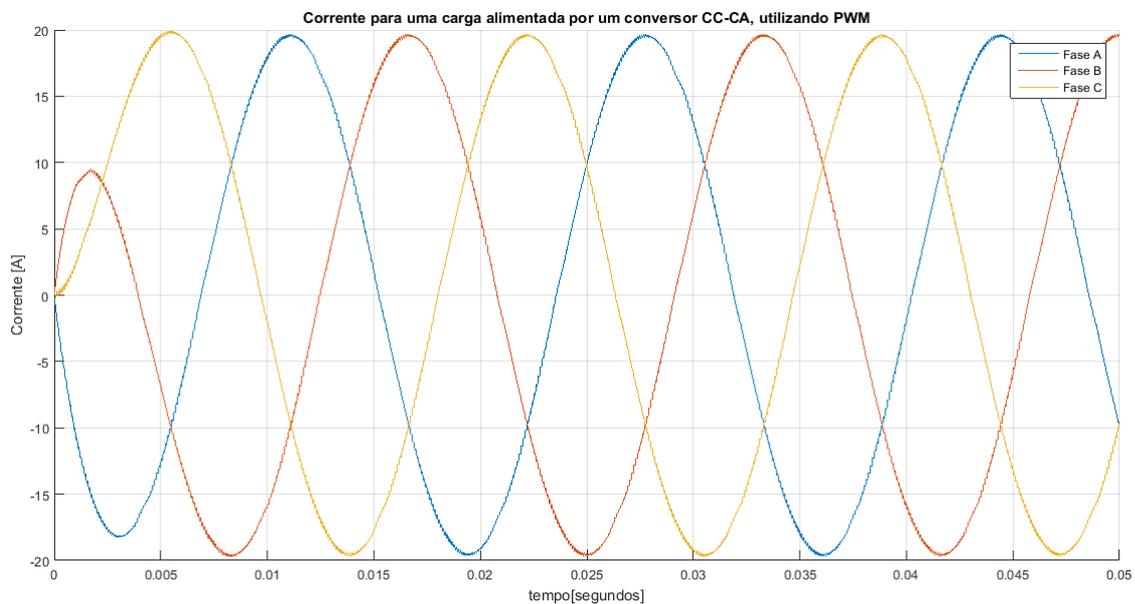


Figura 23 – Correntes de fases A, B e C.

O método PWM se mostrou eficiente, uma vez que a corrente entregue a carga é alternada e com uma baixa taxa de distorção harmônica. O circuito demonstrado nessa seção é um sistema apenas para comprovar a eficiência do método de modulação por largura de pulso e não possui nenhum tipo de controle. Os resultados do sistema conectado à rede serão demonstrados nas seções posteriores.

Tabela 1 – Taxa de distorção harmônica

Corrente	THD [%]
$I_A$	0,753
$I_B$	0,727
$I_C$	0,743

### 3.3 Algoritmo de Sincronização - PLL (*Phase Locked Loop*)

Para conectar uma sistema de geração distribuída na rede, é necessário um controle que sincronize a frequência e a fase dos dois sistemas isolados. Com isso, este trabalho utilizou o sistema de detecção de fase (PLL) para fazer a sincronização. Então o diagrama criado para isto é ilustrado na figura 24.

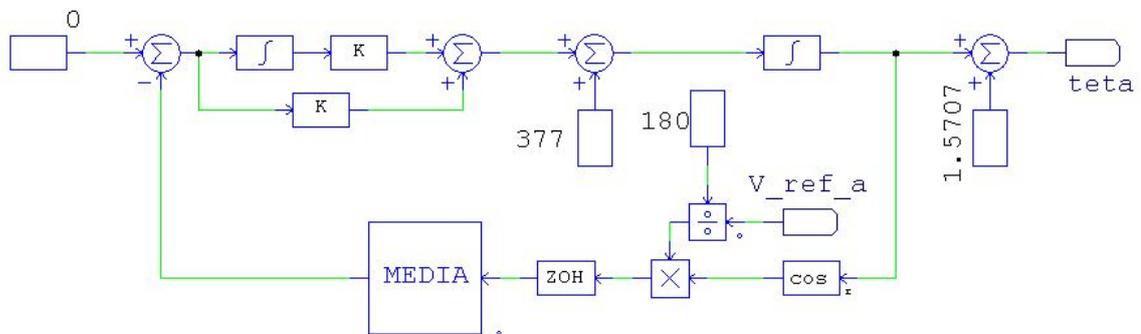


Figura 24 – Diagrama de blocos para detecção de fase da rede para sincronização de dois sistemas inicialmente isolados

O bloco que calcula a média móvel entre dois sinais foi implementado de forma discreta. Uma vez que para o cálculo analógico se faria necessário filtros de ordens elevadas. A partir das equações 2.13 e 2.14 demonstradas na seção 2.7, temos que as constantes do controlador PI são demonstrados na tabela 2.

O tempo de resposta do PLL criado pode ser observado na saída do bloco de média. Pois é ele que calcula a defasagem entre as duas ondas. E a sincronização das duas ondas do projeto pode ser verificada na Figura 26.

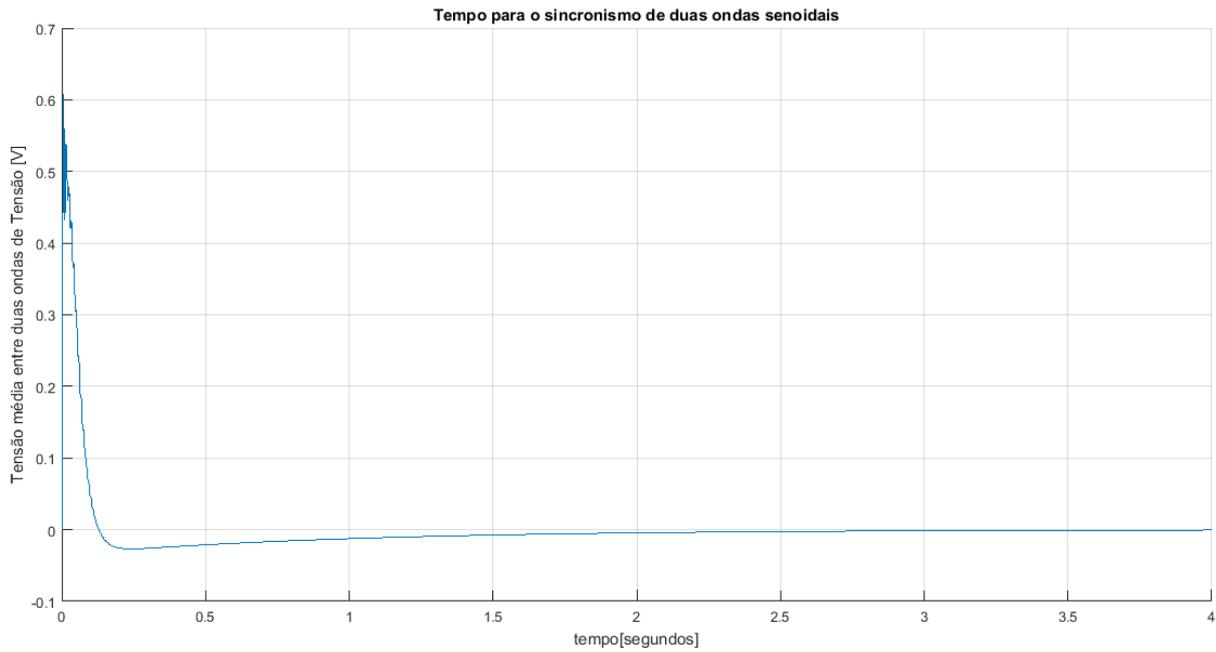


Figura 25 – Representação da média móvel do sistema de detecção de fase e o tempo de resposta do sistema

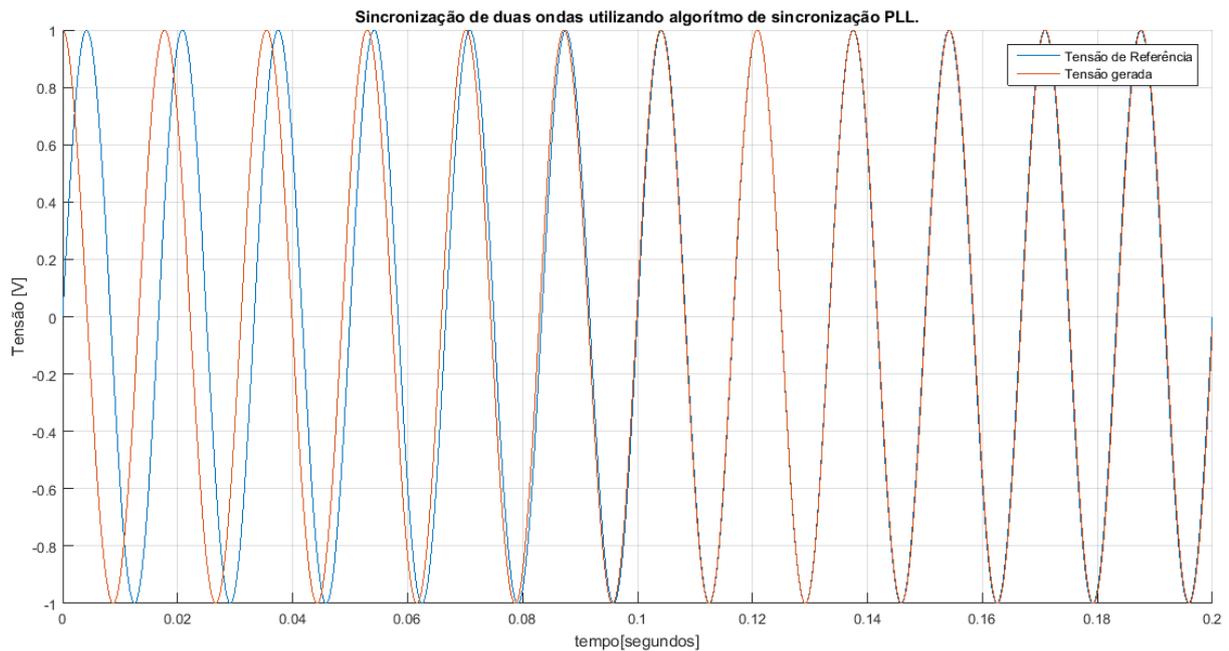


Figura 26 – Sincronização de duas ondas.

### 3.4 Transformação DQ0

A metodologia utilizada para o controle da amplitude e posição da corrente utilizou a transformação DQ0. Como está descrito na revisão, esta transformação leva o sistema trifásico girante para um sistema com duas variáveis estacionária em que a variável  $I_d$  representa a parte ativa da energia enquanto a variável  $I_q$  representa a parte reativa da

Tabela 2 – Constantes do controlador PI para o sistema PLL

$\zeta$	$\omega_n$	$K_p$	$K_i$
0,8	45	72	2025

energia, ou seja, o quanto a corrente gerada está defasada da onda de referência.

A equação de transformação utilizada é descrita na revisão. Os sinais de entrada e saída são demonstrados nas figuras 27 e 28.

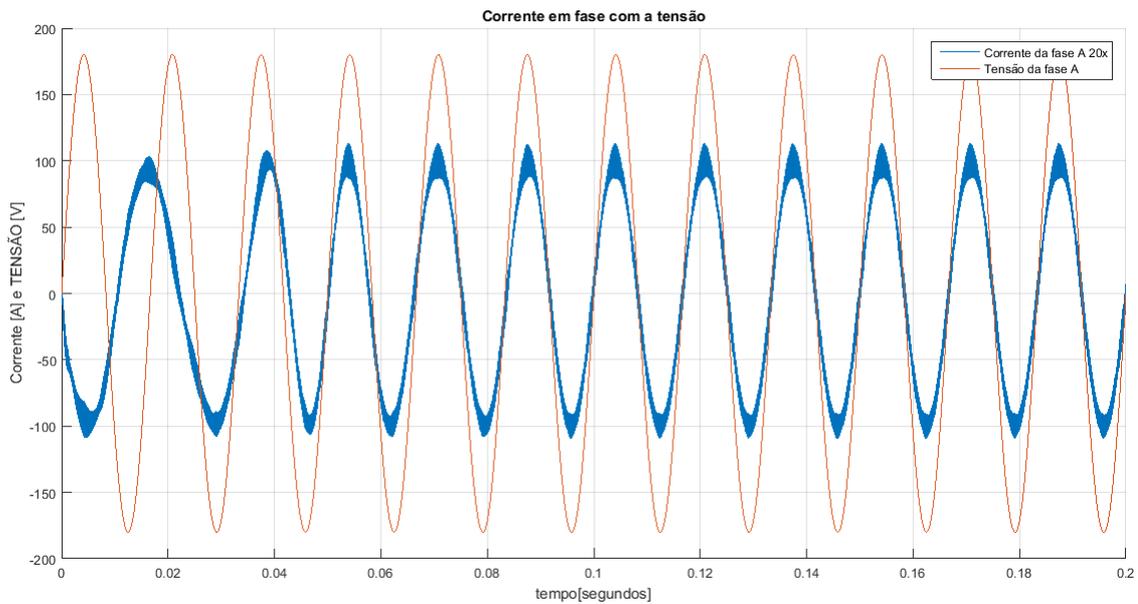
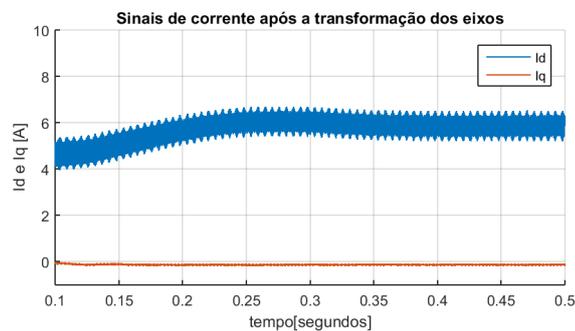


Figura 27 – Corrente e tensão de mesma fase entregues à rede elétrica.

Figura 28 – Representação das correntes  $I_d$  e  $I_q$ 

Pode-se notar na Figura 28 que o termo Q realmente vai à zero, forçando a produção apenas de potência ativa.

### 3.5 Controle de Corrente - Barramento CC com fonte de tensão simples

O caso mais simples deste projeto é uma fonte de tensão contínua conectada à ponte inversora. Neste caso, assume-se que a fonte geradora é uma fonte de tensão contínua não variável. Para este caso, as constantes para o controle de corrente injetada na rede realizados são  $K_{pI} = 0.1$  e  $K_{iI} = 200$ , projetadas de acordo com as equações 3.1 a 3.3. As constantes de controle são as mesmas tanto para o controle para o eixo direto quanto para o eixo em quadratura.

Neste modelo, as correntes do sistema trifásico são lidas a partir de sensores de corrente, que após serem transformadas para  $I_d$  e  $I_q$  são subtraídas das respectivas referências, e então o controlador PI trata esse erro e dispõe no bloco inverso da transformada DQ0. Esse bloco gera os sinais trifásicos de referência que são comparados com a portadora no PWM.

O circuito simulado desta seção, bem como as malhas de controle são observadas na figura 29

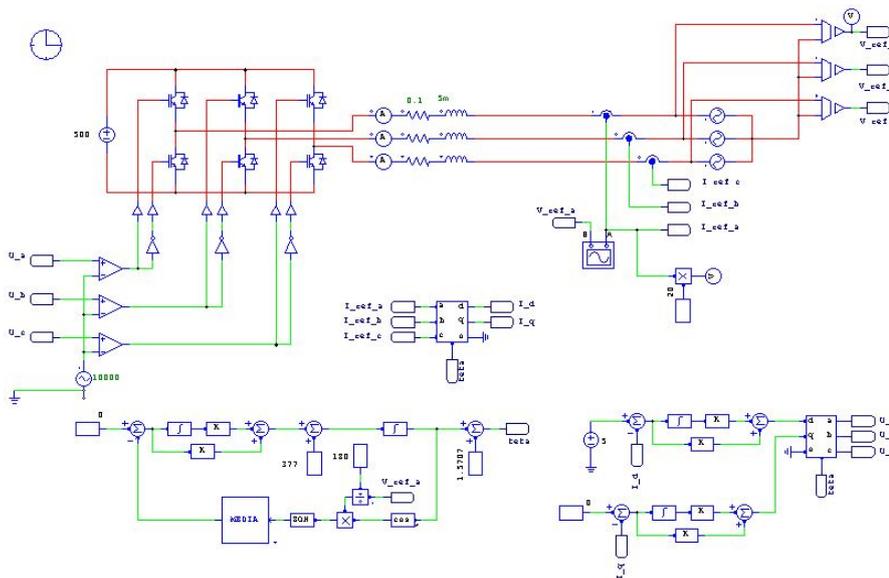


Figura 29 – Simulação realizada para barramento CC com fonte de tensão simples e controle de corrente

Dessa forma, as formas de onda de corrente e tensão visto pela rede podem ser observadas na figura 30. Note que a corrente inicia completamente fora de fase com a tensão e após alguns milissegundos o sistema entra em sincronia. Na figura 30 é possível ver com detalhes a amplitude e a qualidade da forma de onda de corrente. Como a referência de corrente de eixo direto é configurada em 5 ampères, a corrente de pico na saída também

Tabela 3 – Taxa de distorção harmônica

Corrente	THD [%]
$I_A$	6,319
$I_B$	6,324
$I_C$	6,318

será 5 ampères. Como a referência de corrente de eixo em quadratura é configurada em zero, a fase entre a corrente e a tensão também será zero, ou seja o fator de potência da corrente gerada e a tensão da rede correspondente é unitário.

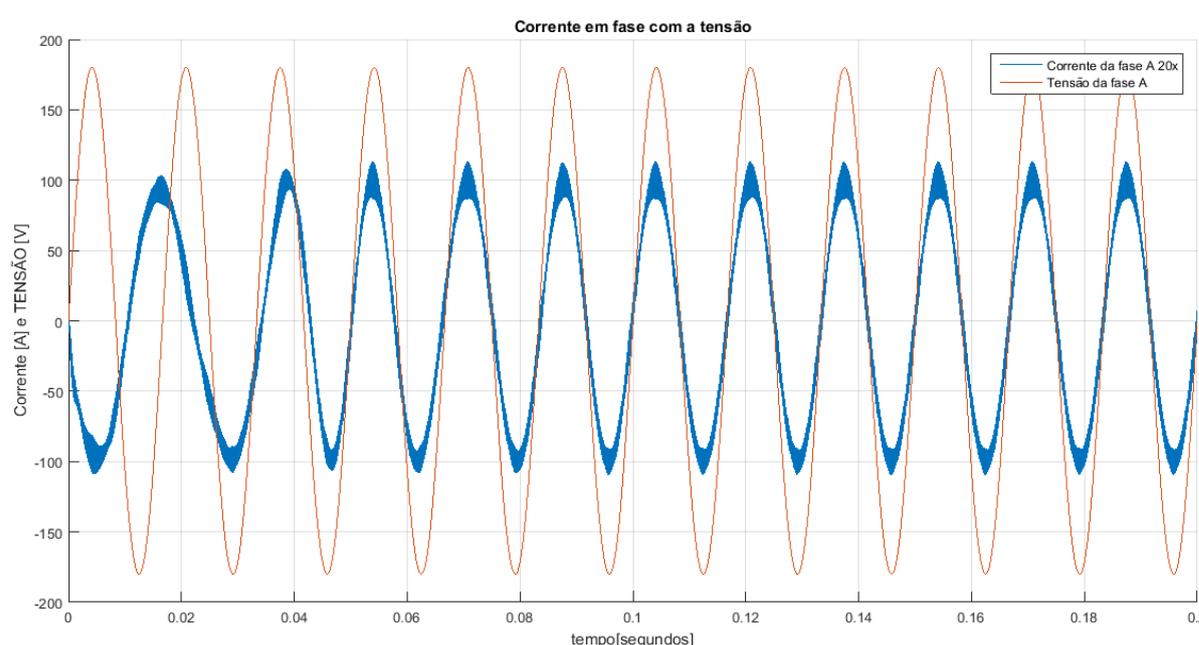


Figura 30 – Corrente e tensão no barramento CA do sistema de geração

A taxa de distorção harmônica apresentada na tabela 3 devido ao chaveamento é significativamente maior que a apresentada na tabela 1. Isso é percebido pois os circuitos possuem características diferentes. No caso da tabela 1, o circuito é apenas demonstrativo, já a THD apresentado na tabela 3 é para um sistema de geração modelado por uma fonte de tensão.

### 3.6 Controle de Tensão - Barramento CC com fonte de corrente simples

Para este caso, foi conectado uma fonte de corrente no barramento CC emulando uma fonte alternativa com característica de fonte de corrente, como um painel fotovoltaico por exemplo. Para o controle de tensão do barramento, conectou-se um capacitor em

paralelo com a fonte geradora. O controle desenvolvido neste caso é um controle de tensão em cascata com o controle de corrente, ou seja, a saída do controle PI de tensão é a referência da malha fechada de corrente. Este controle foi realizado na variável  $I_d$ . O esquemático está representado na figura 31.

No caso desta seção, foi realizado o acionamento de uma carga localizada entre a fonte geradora e a rede elétrica. A figura 32 demonstra o resultado desta operação. Note que há um transitório de corrente quando esta carga é acionada. Isso ocorre porque no controle em cascata, a referência de corrente não é fixa, ocasionando neste transitório. No caso do fator de potência da corrente entregue a rede não varia. Isto ocorre porque a referência do controle de corrente do eixo em quadratura sempre é zero, ou seja, a diferença de posição das ondas de tensão e corrente sempre é zero. Perceba na figura 33 que o fator de potência da corrente lida antes da conexão da carga varia quando esta é conectada. Isto ocorre porque para a corrente entregue a rede estar sempre em fase com a tensão, ela precisa compensar o fator de potência da carga conectada e por isso ela varia seu fator de potência.

A THD deste sistema é de 1,77%. Esta taxa é considerada baixa, uma vez que a norma IEC 1000-3-2 da IEEE diz que a THD de corrente tem que ser menor que 5%. A figura 34 mostra a tensão no barramento CC. Esta figura informa também ao leitor o tempo de acomodação do sistema de controle de tensão, que é próximo de 1 segundo.

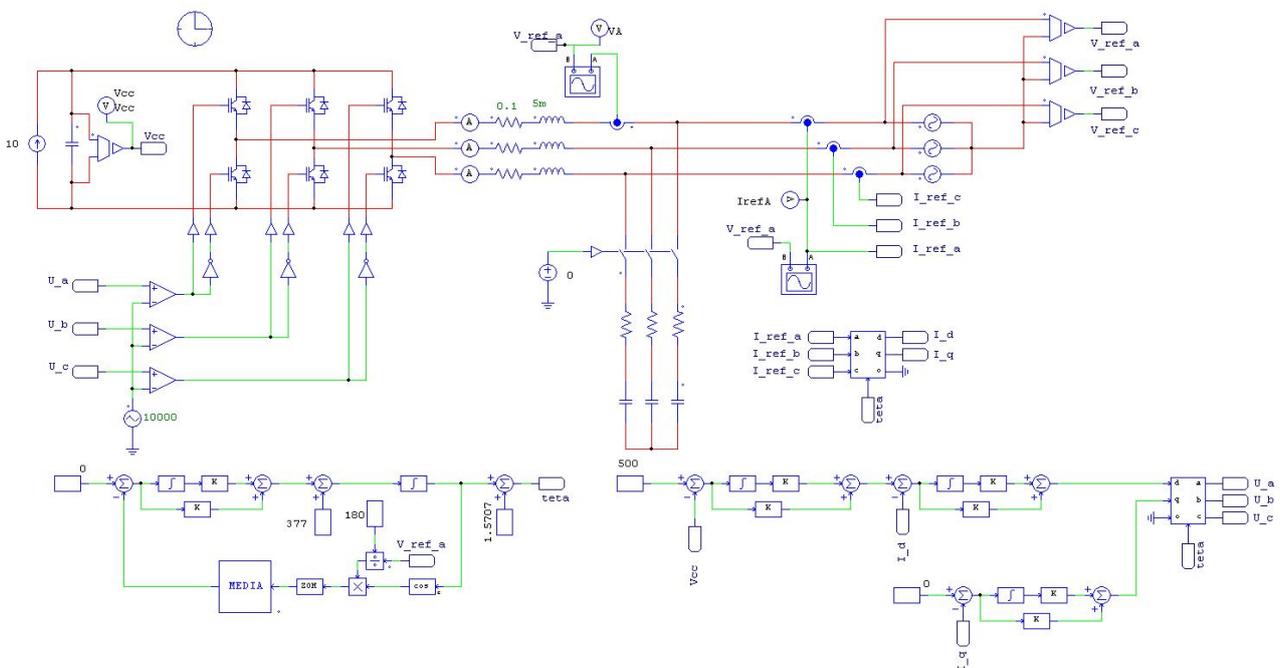


Figura 31 – Esquemático desenvolvido para o sistema de geração modelado por uma fonte de corrente

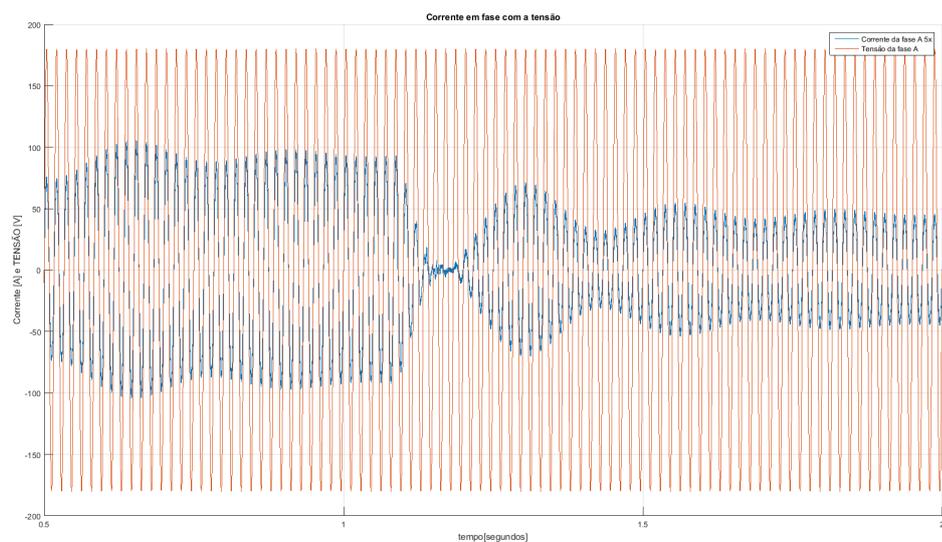


Figura 32 – Corrente entregue à rede em relação a tensão, levando em consideração o acionamento de uma carga no instante em que ela vai a zero

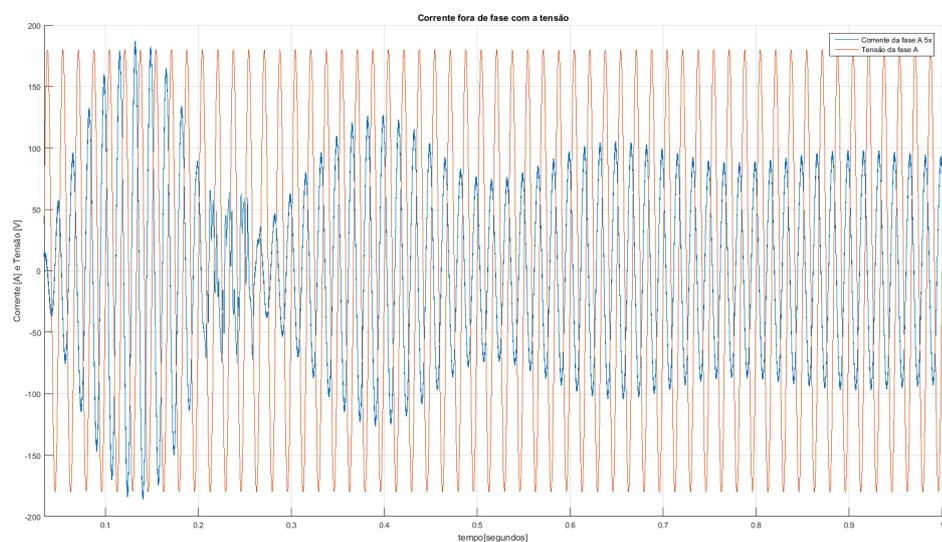


Figura 33 – Corrente antes do filtro indutivo, considerando o acionamento de uma carga

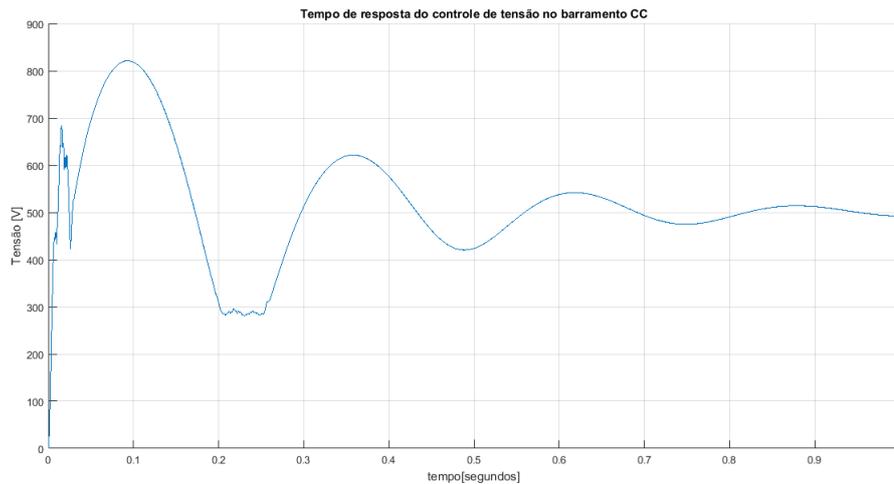


Figura 34 – Tempo de resposta do controle de tensão no barramento CC

### 3.7 Modelagem do Sistema de Geração por uma Fonte de Tensão em Série com um Resistência - Acoplamento com um Conversor Buck ao Barramento CC

O painel fotovoltaico está sendo modelado como uma fonte de tensão em série com uma resistência (VILLALVA, 2010). Neste caso este modelo representa um modelo linearizado no ponto de máximo.

Para este sistema, modela-se a fonte geradora de energia como uma fonte de tensão em série com uma resistência. Este modelo é utilizado para modelagem de painéis fotovoltaicos, e para dar mais eficiência ao sistema, é necessário incluir um algoritmo de busca de máxima potência, MPPT.

Neste caso, o controle da tensão do barramento não é mais feito em cascata com a corrente. O controle da tensão é realizado pelo bloco MPPT, em que a saída deste bloco é o duty cycle da chave do conversor Buck. A figura 35 demonstra o circuito desenvolvido e a figura 36 mostra a resposta do sistema. Neste caso também, foi conectado uma carga entre a fonte geradora e a rede. Neste caso, houve um aumento na amplitude da corrente antes da conexão da carga, bem como uma variação no fator de potência. Percebe-se nesta situação que a corrente entregue a rede não varia o fator de potência.

A THD deste cenário é de 6,66%. O ideal é abaixo de 5%. Mas na prática a frequência de chaveamento pode ser aumentada para reduzir a THD. Isto se dá devido ao chaveamento do conversor CC-CA mais o adicional do chaveamento do conversor CC-CC.

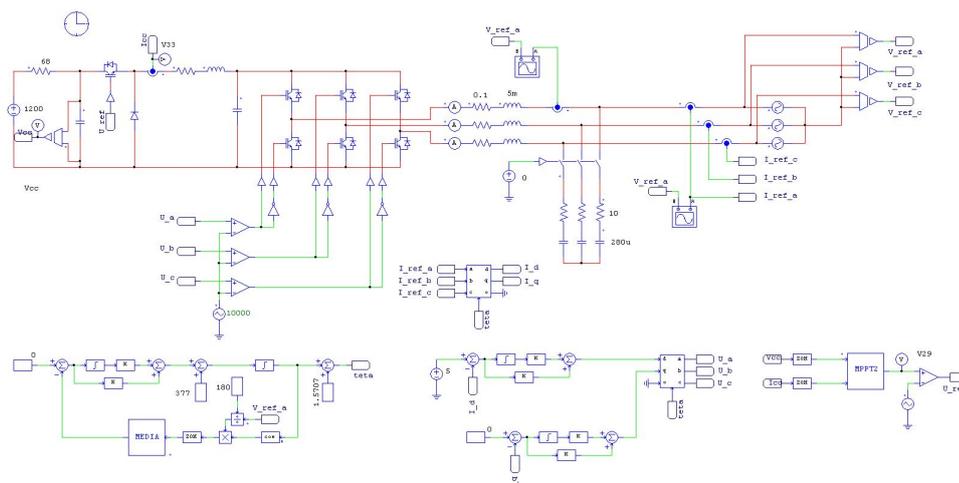


Figura 35 – Esquemático desenvolvido para o sistema de geração modelado por uma fonte de tensão em série com uma resistência - acoplamento por um conversor Buck

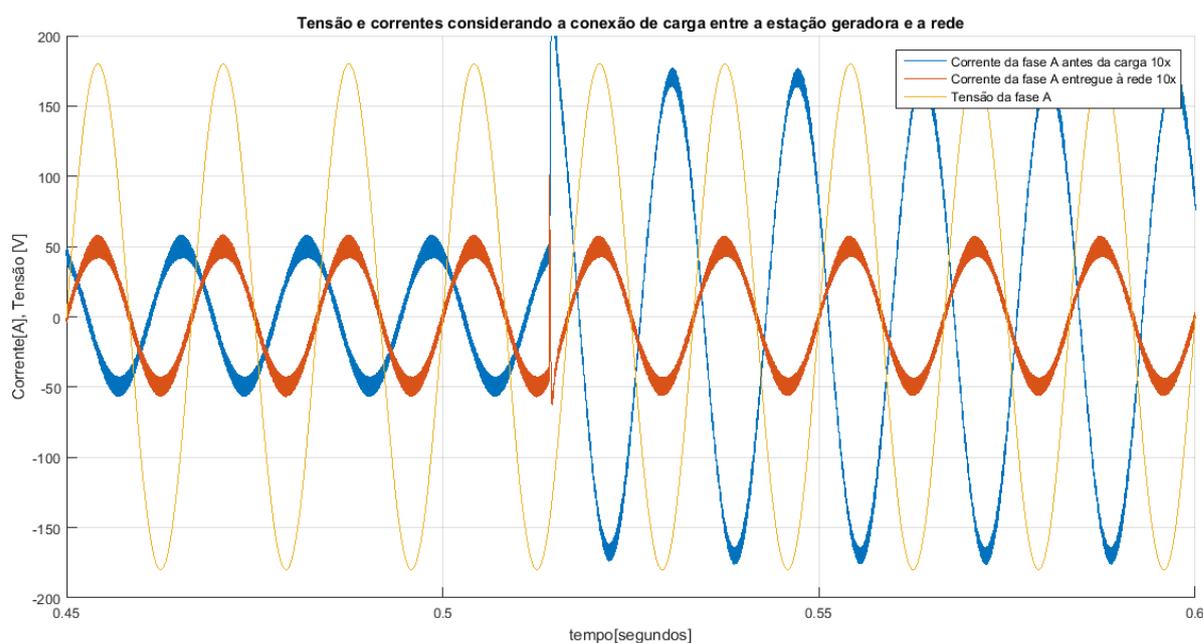


Figura 36 – Resposta do sistema para a simulação desta seção - consideração da conexão de uma carga

### 3.8 Conexão de um Pannel Solar Fotovoltáico na Rede Através de um Conversor Boost

Neste cenário, conectou-se um pannel solar fotovoltaico em um conversor Boost. O controle de corrente do inversor foi realizado em cascata com o controle de tensão do barramento. Entre o pannel e o conversor CC-CA, foi colocado um conversor Boost para fazer o controle de máxima potência do pannel, que é demonstrado na figura 40. Perceba

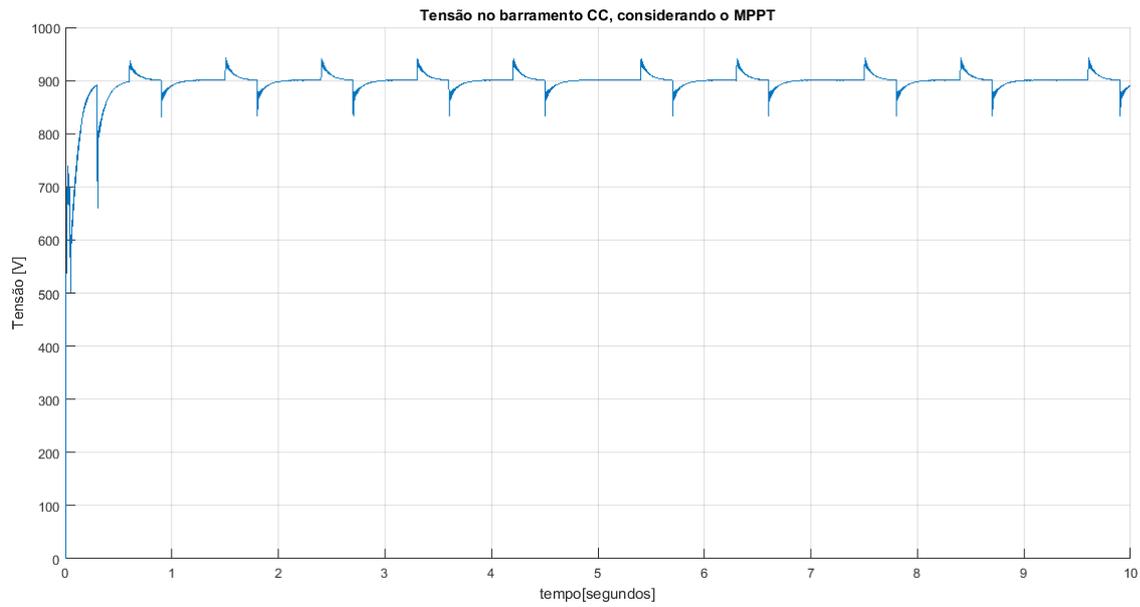


Figura 37 – Tensão controlada no barramento CC para o sistema dado

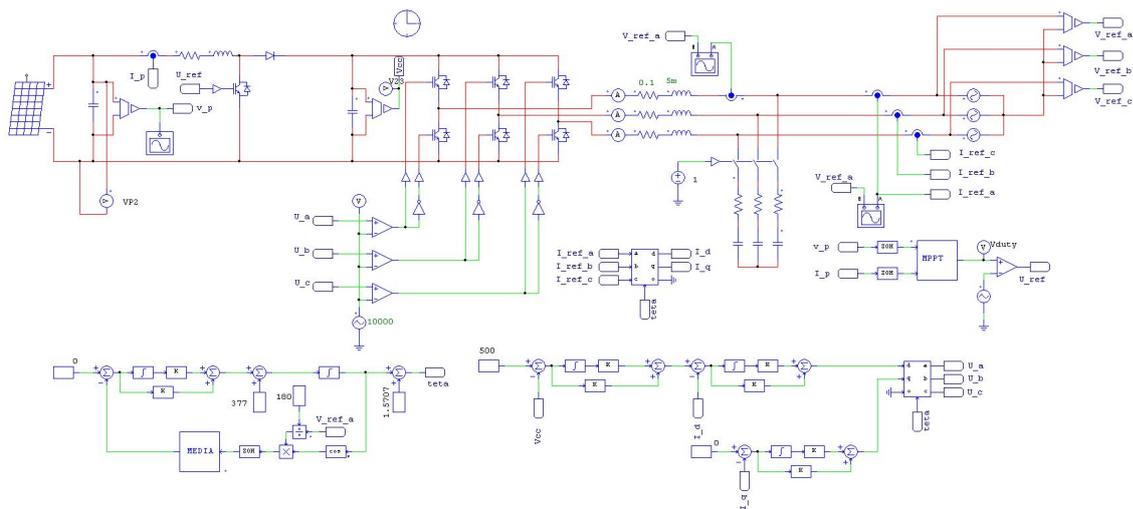


Figura 38 – Circuito desenvolvido para a conexão de um painel solar fotovoltaico

nesta figura que ele varia de acordo com a busca do algoritmo. A corrente entregue a rede está em fase com a tensão.

A THD deste cenário é próximo ao limiar de 5%, mas pode ser melhorada com o aumento da frequência de chaveamento.

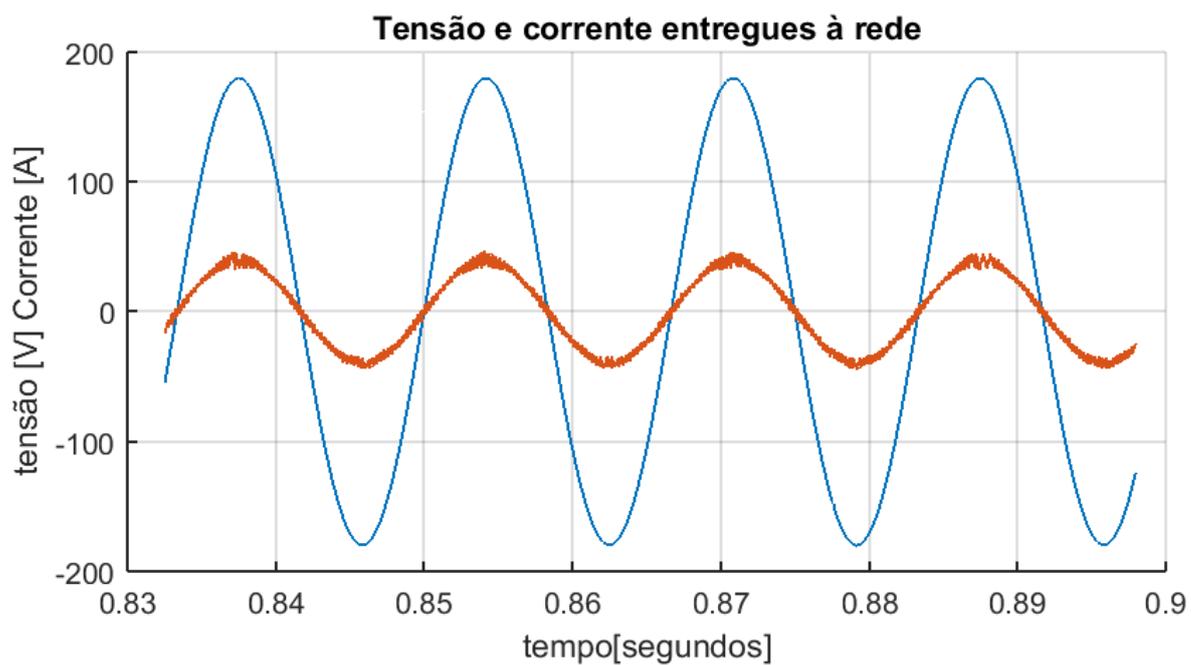


Figura 39 – Resposta do sistema. Corrente 10x

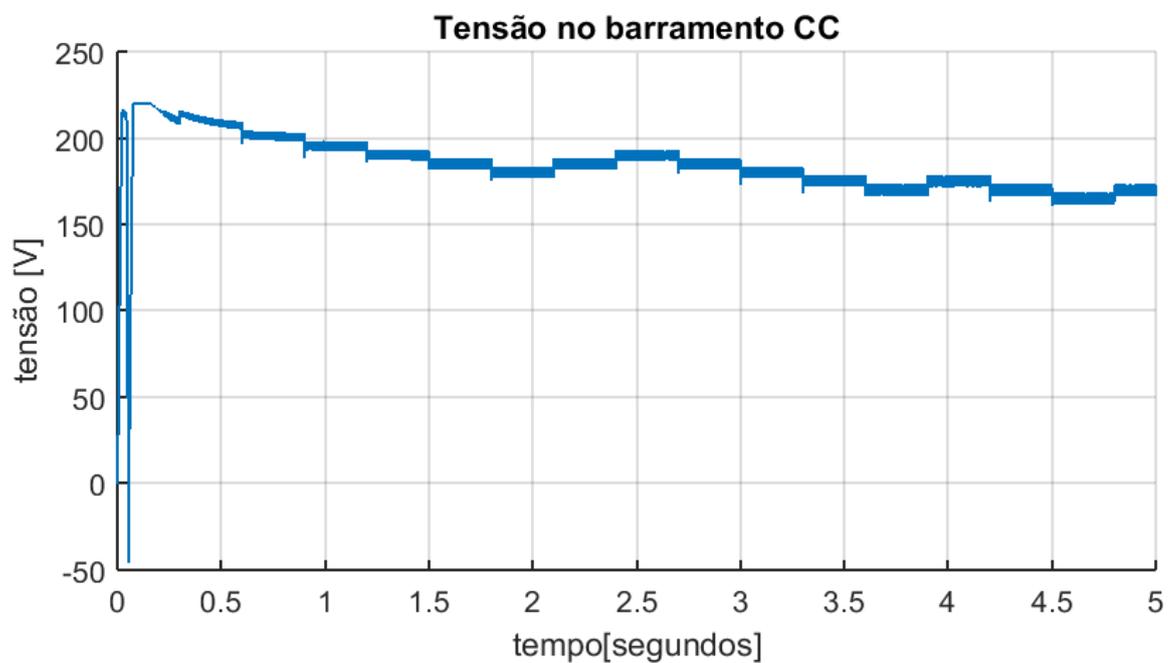


Figura 40 – Busca de máxima potência do algoritmo MPPT

### 3.9 Modelagem do Sistema de Geração por uma Fonte de Tensão em Série com um Resistência - Conexão Direta ao Barramento CC

Neste cenário, o sistema de geração é conectado diretamente ao barramento CC. Os valores de corrente e tensão entregues a este barramento são lidos por sensores e enviados para o bloco do MPPT. Este bloco gera uma referência de tensão que é a referência do controle de tensão do barramento. O controle da corrente do inversor deste cenário é realizado em cascata, e a referência de corrente é gerada pelo controle de tensão do barramento. Pode-se dizer que esta situação possui um controle em 3 níveis. O primeiro nível é a leitura da tensão e corrente pelo bloco MPPT, em que esse bloco gera uma referência de tensão, que é enviado para o controle de tensão, que por sua vez gera a referência do controle de corrente.

A figura 43 demonstra a busca do algoritmo MPPT variando a referência de tensão. Para painéis fotovoltaicos, esta busca é extremamente importante uma vez que a potência disponível e conseqüentemente a tensão de máxima potência variam durante o dia devido a mudança da incidência solar.

A THD deste cenário vale 3,21%, que é bem inferior aos outros cenários. Este fato é devido a esta situação não possuir o conversor CC-CC entre a fonte geradora e o barramento CC do conversor CC-CA. Esta modificação melhorou significativamente a qualidade da corrente entregue.

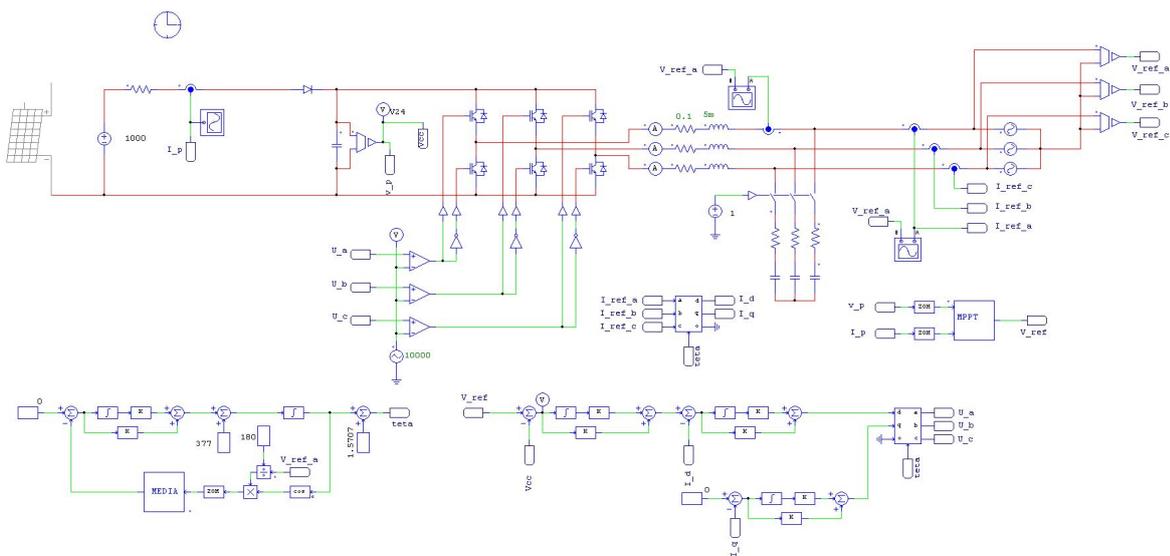


Figura 41 – Circuito desenvolvido para a conexão direta da fonte de tensão em série com uma resistência

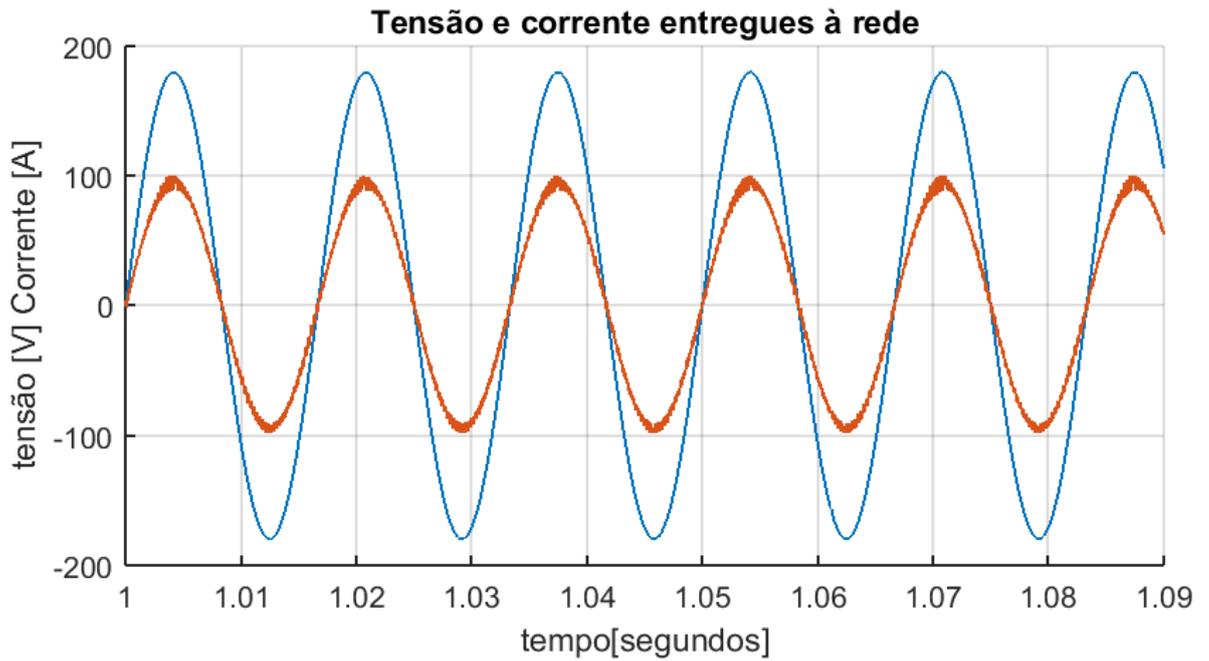


Figura 42 – Tensão e corrente entregue à rede elétrica para a conexão direta da fonte geradora (Corrente 10x)

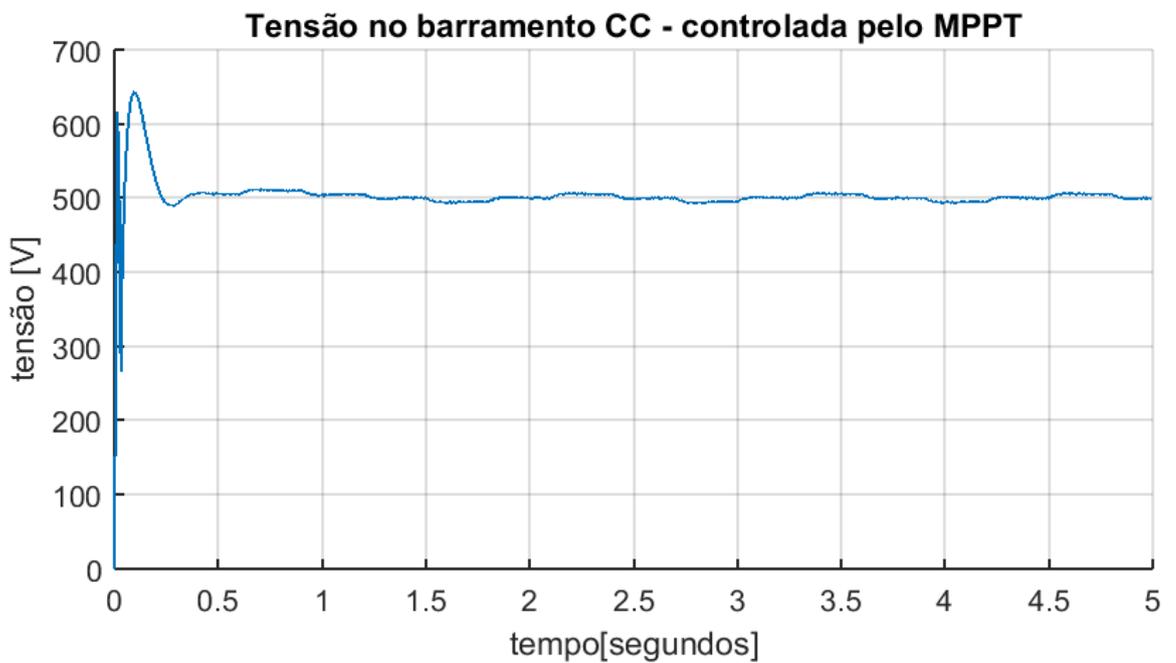


Figura 43 – Resposta do controle de tensão no barramento CC

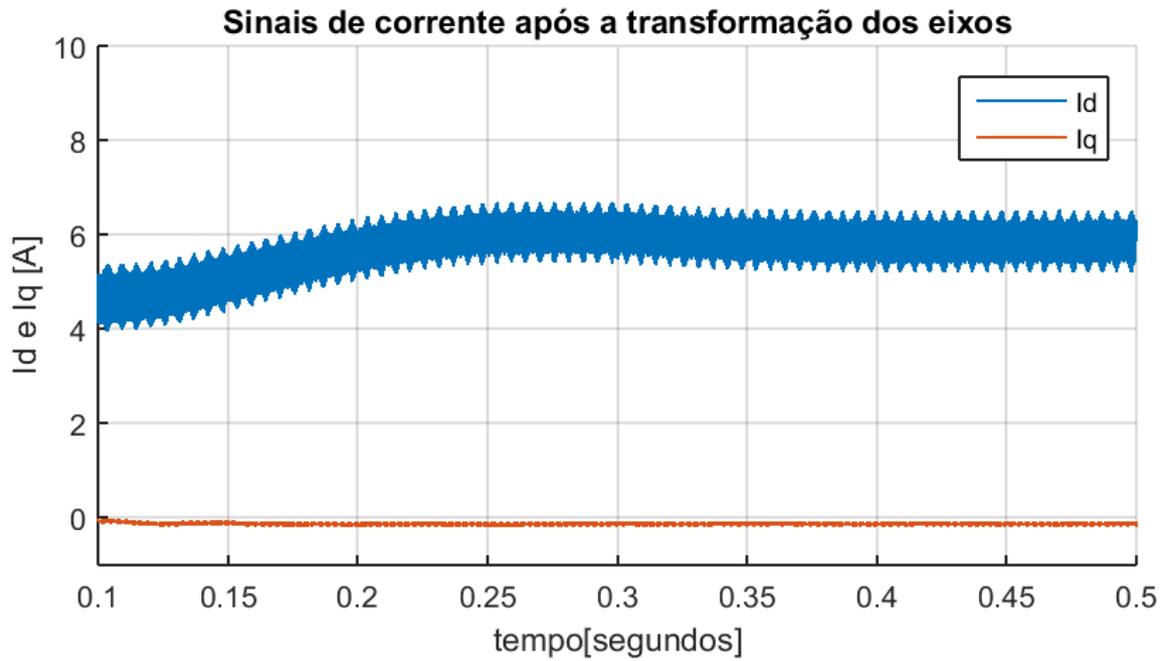


Figura 44 – Correntes de eixo direto e em quadratura

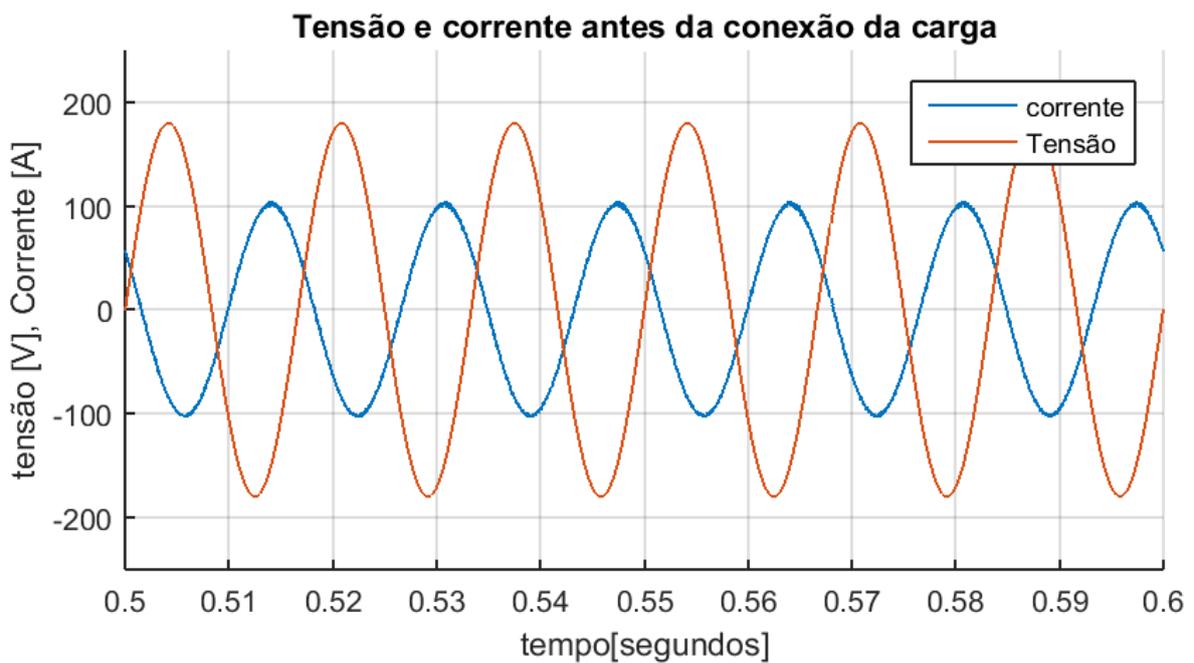


Figura 45 – Tensão e correntes antes do ponto de acoplamento da carga. Corrente 5x

## 4 Conclusão e Propostas Futuras

Os seguintes projetos foram executados:

- Correção do fator de potência da energia entregue a rede;
- Implementação de um conversor CC-CA trifásico para conexão com a rede elétrica;
- Implementação de um sistema de geração em corrente contínua;
- Desenvolvimento de um sistema de geração através de um painel solar fotovoltaico, em que este é conectado diretamente ao barramento CC ou conectado a um conversor Buck para fazer interface entre painel e o barramento;
- Desenvolvimento de um algoritmo de busca de máxima potência (MPPT) para conexão do painel solar ao barramento;
- Implementação de um sistema de sincronismo (PLL);
- Desenvolvimento de um controle de corrente do inversor no modo conectado;
- Implementação de um controle de tensão em cascata com o controle de corrente para controle do barramento CC;

A proposta do projeto foi desenvolver um sistema de controle de fator de potência para um sistema de geração de fontes alternativas em corrente contínua. A revisão bibliográfica embasada principalmente em Aguiar, Marafão e Villalva deixou a proposta do trabalho mais clara e objetiva.

O sistema de controle e correção do fator de potência funcionou perfeitamente, uma vez que todos resultados obtidos foram esperados, ou seja, em todas exemplificações, o controle da corrente no inversor saiu como esperado.

As taxas de distorção harmônicas foram demasiadamente altas em casos que possuíam dois conversores. Contudo, essas taxas podem ser diminuídas na prática, aumentando a frequência de chaveamento do inversor.

A situação em que os resultados obtidos foram mais satisfatórios são os resultados da seção 3.9, uma vez que o sistema possui um algoritmo de busca de máxima potência, a taxa de distorção harmônica foi pequena e o controle é realizado em três níveis, MPPT, controle de tensão e controle de corrente.

Para desenvolvimentos futuros como continuação deste projeto, propõe-se:

- Discretização de todo o sistema;
- Desenvolvimento prático do sistema trifásico conectado na rede elétrica;
- Criação de dispositivos de armazenagem;
- Detecção de ilhamento;

## 5 Referências

- WRIGHT, James T. C.; CARVALHO, Daniel E. de; SPERS, Renata G.; Tecnologias Disruptivas de Geração Distribuída e Seus Impactos Futuros Sobre Empresas de Energia, 2009.
- RIOS, Frederico S. R.; CURI, Gustavo S.; CHAVES, Fabricio S.; SILVA, Arlete V. da; O fator de potência em unidades consumidores residenciais, 2014.
- CREDER, Hélio; Instalações Elétricas; 15<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro/RJ: LTC, 2007. 428 p.
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais - Manual de Instalações Elétricas Residenciais. Belo Horizonte – MG: CEMIG, 2003. 218 p.
- AGUIAR, Cassius R. de; Estudo e Análise de Algoritmos de Detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída Conectados à Rede de Distribuição, 2013.
- VILLALVA, Marcelo G.; Conversor Eletrônico de Potência Trifásico para Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica, 2010.
- PINTO, Jan E. M. G.; Aplicação Prática do Método de Sintonia de Controladores PID Utilizando o Método do Relé com Histerese, 2014.
- PRASAD, Varsha; SHARMA, Chirag; *A Review of Phase Locked Loop*, 2012.
- MARAFÃO, Fernando P.; Análise e Controle da Energia Elétrica através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais, 2004.
- MOÇAMBIQUE, N. E. M; Aplicação de Algoritmos de Busca do Ponto de Máxima Potência e controladores lineares e/ou Fuzzy para a regulação da tensão terminal de Painéis Fotovoltaicos, 2012.
- MATTOS, Gustavo M; Estudo de Rendimento e Temperatura de Paineis Fotovoltaicos com uso de Técnica de Concentração Solar, 2016.
- ALMEIDA, Pedro M.; Modelagem e Controle de Conversores Estáticos Fonte de Tensão Utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Distribuição, 2011.