



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Desenvolvimento de um Conversor CC-CA Monofásico para aplicação em Geração Distribuída

Igor Aurélio Natividade

João Monlevade, MG
2019

Igor Aurélio Natividade

**Desenvolvimento de um Conversor CC-CA
Monofásico para aplicação em Geração
Distribuída**

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.

Orientador: Prof. Renan Fernandes Bastos

**Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2019**

N278d

Natividade, Igor Aurélio.

Desenvolvimento de um conversor CC-CA monofásico para aplicação em geração distribuída [manuscrito] / Igor Aurélio Natividade. - 2019.

46f.: 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. Conversores de corrente elétrica. 2. Eletrônica de potência . 3. Geração distribuída de energia elétrica. I. Bastos, Renan Fernandes. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.311



ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 16 dias do mês de Julho de 2019, às 8 horas, no bloco C deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo (a) formando (a) Igor Aurélio Natividade, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Renan Fernandes Bastos, Marcelo Moreira Tiago, Welbert Alves Rodrigues.

O (a) candidato (a) apresentou a monografia intitulada: Desenvolvimento de um conversor CC-CA monofásico para aplicação em geração distribuída. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela Aprovação do (a) candidato(a), com a nota média 8,0, 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	8,0
Marcelo Moreira Tiago	8,0
Welbert Alves Rodrigues	8,0
Média	8,0

João Monlevade, 16 de Julho de 2019 .

Renan F. Bastos

Professor(a) Orientador(a)

Professor(a) Coorientador(a)

Igor Aurélio Natividade

Aluno(a)

Welbert Alves Rodrigues

Professor(a) Convidado(a)

Marcelo Moreira Tiago

Professor(a) Convidado(a)



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Desenvolvimento de um Conversor CC-CA Monofásico para aplicação em Geração Distribuída" 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, 15 de Agosto de 2019.

Leon Aurélio Natividade

Nome completo do(a) aluno(a)

Agradecimentos

Agradeço a meu orientador, professor Dr. Renan Fernandes Bastos por todo apoio, dedicação e paciência durante a realização deste projeto.

Aos meus pais, Juarez e Dalva, por proporcionarem a oportunidade e garantir a manutenção de meus estudos, espero um dia retribuir todo este apoio. Aos meus irmãos, Hugo e Amanda, pelas sempre valiosas críticas que foram fundamentais durante toda minha vida. A minha namorada Isabella por todo companheirismo, amizade e apoio nos momentos mais difíceis. E também a toda minha família, que torceram e me ajudaram nesta jornada.

Aos meus amigos de república e a todos amigos da UFOP, pela amizade e por todos momentos especiais.

Resumo

O objetivo do trabalho é o desenvolvimento e implementação de um dispositivo conversor CC-CA monofásico experimental de baixa complexidade, para conexão à rede de fontes alternativas de energia elétrica utilizadas na Geração Distribuída. Será utilizado no projeto o CI FNA41560 para a montagem do circuito do conversor monofásico de ponte completa com IGBT's, que contará com filtro L em sua saída, um sistema de controle de corrente e um filtro ressonante. Ao final do trabalho foi obtido um dispositivo capaz de conectar uma fonte de energia renovável de tensão contínua, como por exemplo painéis solares, na rede de distribuição, gerando assim energia limpa.

Palavras-chave: Conversor CC-CA, Geração Distribuída, Eletrônica de Potência.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução da demanda total de energia por fonte até 2050.	1
Figura 2 – Alternativas de atendimento à demanda de energia elétrica.	2
Figura 3 – Projeção do crescimento do número de residências com geração fotovoltaica.	4
Figura 4 – Diagrama de uma microrede de Geração Distribuída.	6
Figura 5 – Configurações de arranjos fotovoltaicos: (a) Módulo Integrado; (b) string; (c) multistring; (d) inversor central.	10
Figura 6 – Topologias (a) meia-ponte e (b) ponte completa.	11
Figura 7 – Topologias HERIC.	12
Figura 8 – Topologias (a) H5 e (b) H6.	12
Figura 9 – Esquemático do CI FNA41560.	13
Figura 10 – Modulação PWM bipolar.	15
Figura 11 – Tensão VAB para o caso do PWM bipolar.	15
Figura 12 – Tipos de filtros de saída mais comuns: (a) Filtro L (b) Filtro LCL.	16
Figura 13 – Circuito do conversor simplificado.	17
Figura 14 – Diagrama de blocos do conversor.	18
Figura 15 – Diagrama de blocos do conversor simplificado.	19
Figura 16 – Diagrama de blocos da unidade de controle.	20
Figura 17 – Diagrama de blocos da unidade de controle com filtro ressonante.	21
Figura 18 – Métodos de Discretização.	22
Figura 19 – Algoritmo de sincronização PLL.	23
Figura 20 – Conexão do sistema à rede.	25
Figura 21 – Curva de operação do sistema fotovoltaico em função da frequência da rede para desconexão por variação de frequência.	27
Figura 22 – Esquemático do conversor CC-CA montado.	28
Figura 23 – Esquemático do conversor CC-CA montado.	29
Figura 24 – Placa do conversor CC-CA montado.	30
Figura 25 – Arduino DUE com o microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3.	31
Figura 26 – Seleção da portadora, frequência da interrupção e da polaridade do sinal PWM.	31
Figura 27 – Esquemático do circuito medidor de tensão.	33
Figura 28 – Esquemático do circuito medidor de corrente composto pelo sensor LEM LA 55-P e um circuito de AMP-OP para <i>offset</i>	34
Figura 29 – Montagem em protoboard dos circuitos de leitura de corrente e tensão.	35
Figura 30 – Diagrama da simulação no Software PSIM.	36
Figura 31 – Saída do conversor sem o uso de filtro ressonante na simulação.	36

Figura 32 – Saída do conversor com o uso do filtro ressonante na simulação.	37
Figura 33 – Corrente de saída em variação do valor de referência de corrente de 1A para 2A.	37
Figura 34 – Bancada de testes do Conversor CC-CA.	38
Figura 35 – Bateria utilizado nos testes.	39
Figura 36 – Transformador utilizado para conectar o conversor à rede.	39
Figura 37 – Saída do conversor sem o uso do filtro ressonante na montagem prática, sendo: CH1 = I_{conv} (medidor de corrente) e CH2 = V_{rede} (medidor de tensão).	40
Figura 38 – Saída do conversor com o uso do filtro ressonante na montagem prática, sendo: CH1 = I_{conv} (medidor de corrente) e CH2 = V_{rede} (medidor de tensão).	40
Figura 39 – Corrente de saída do conversor conectado à rede.	41
Figura 40 – Corrente de saída do conversor conectado à rede e tensão da rede.	41
Figura 41 – Esquematico do FNA41560 montado pelo Software Proteus, correspondente ao circuito da Figura 21.	46

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos	4
1.4	Estruturação do trabalho	5
2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	6
2.1	Definição e aspectos gerais	6
2.2	Tecnologias empregadas	7
2.3	Leis e regulamentações no cenário brasileiro	8
3	CONVERSORES CC-CA	9
3.1	Topologia de conexão do conversor à rede	9
3.2	Topologias de conversores CC-CA monofásicos	10
3.3	CI FNA41560	12
3.4	Modulação PWM	14
3.5	Filtros de saída	16
3.6	Modelagem do conversor CC-CA	17
3.7	Unidade de Controle	19
3.8	Filtro ressonante	21
3.9	Técnicas de sincronismo	22
3.9.1	Detecção do cruzamento por zero da tensão	22
3.9.2	Técnica PLL	23
3.10	Requisitos para conexão do conversor à rede	24
3.10.1	Forma de conexão	24
3.10.2	Requisitos de Proteção	25
3.10.3	Requisitos de qualidade	26
4	IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
4.1	Implementação do projeto do Conversor CC-CA	28
4.1.1	Conversor CC-CA e filtro	29
4.1.2	Sistema de controle de corrente	30
4.1.3	Medidores de Corrente e Tensão	33
4.2	Simulação	35
4.3	Testes práticos	38

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
5.1	Conclusão	42
5.2	Possibilidades para trabalhos futuros	43
	REFERÊNCIAS	44
6	ANEXOS	46

1 Introdução

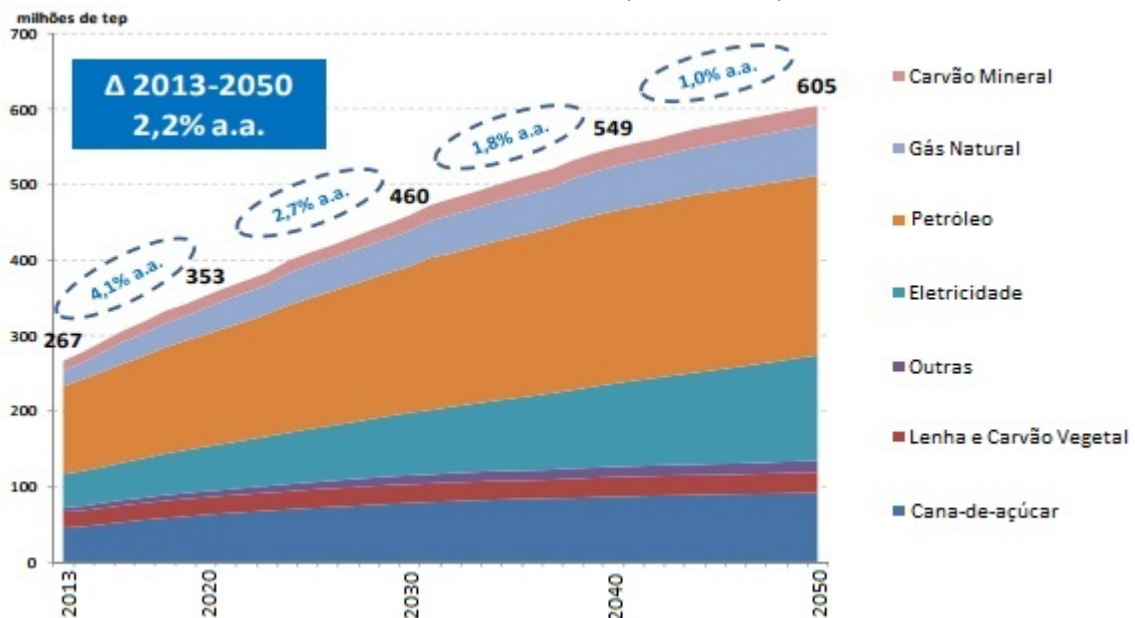
1.1 Contextualização

Pensar no futuro é de fato uma tarefa muito complicada quando o assunto é o planejamento energético. Com o aumento das demandas energéticas, que sempre tendem a crescer como pode ser visto na Figura 1, é de extrema importância que esse desenvolvimento seja feito de maneira correta e responsável, levando em conta os impactos ambientais que são diretamente causados com essa expansão (EPE, 2014).

Quando a sustentabilidade passou a ter maior importância, teve início a busca por uma alternativa que aliasse alguns fatores, como: expansão da oferta de fontes energéticas, consumo consciente, preservação do meio ambiente e melhoria da qualidade de vida. Além disso o desenvolvimento subsequente deve ser capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades do futuro (EPE, 2014) (GONÇALVES, 2015).

Figura 1 – Evolução da demanda total de energia por fonte até 2050.

Fonte: Adaptado de (EPE, 2014)

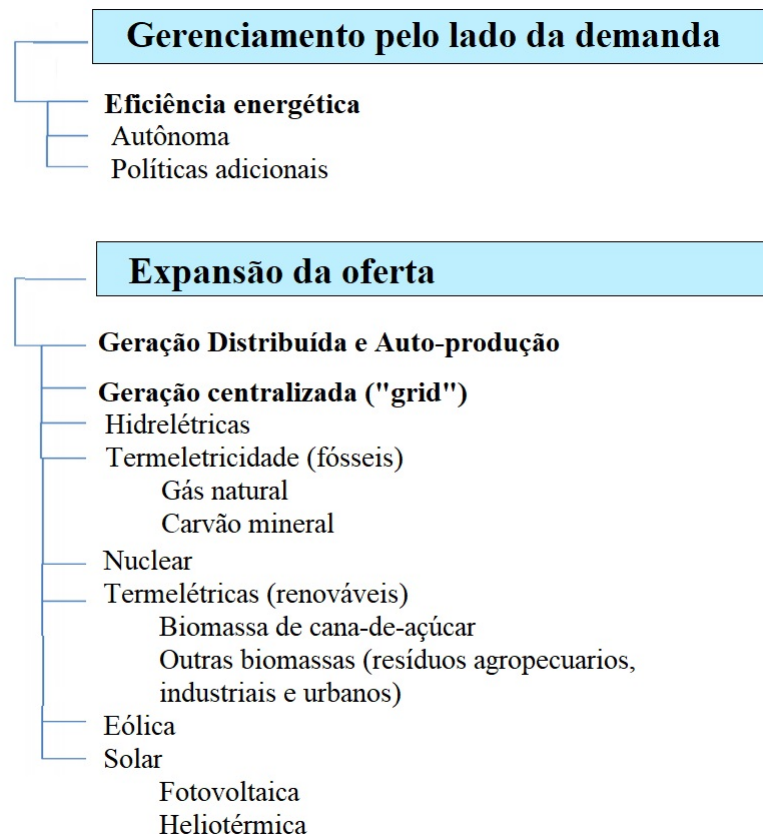


Dentre os aumentos de consumos energéticos, um dos que mais se notabiliza devido a sua extrema importância para a sociedade é o de energia elétrica, que é essencial e indispensável na vida contemporânea. Com isso torna-se necessário traçar os prováveis rumos da matriz energética como um todo, a Figura 2 mostra algumas opções para o

atendimento dessa crescente demanda por energia elétrica. Esse problema acaba levando a conclusão de que a geração centralizada, predominante até então no cenário mundial, não é mais tão eficaz com suas parcelas bem definidas de geração, transmissão, distribuição e consumo. Levando assim a busca por soluções para este problema (EPE, 2014).

Figura 2 – Alternativas de atendimento à demanda de energia elétrica.

Fonte: Retirado de EPE (2014)



Como pode ser visto na Figura 2, se tratando de aumento de oferta da energia elétrica uma das opções é a Geração Distribuída, principalmente devido ao ingresso e rápida expansão desta no mundo, que acabou gerando mudanças significativas na topologia bem definida da Geração Centralizada, fazendo com que a geração possa ocorrer também nas parcelas de transmissão e distribuição do sistema elétrico. Sendo assim a Geração Distribuída apresentou-se como solução para atender ao aumento da demanda energética mundial (CEMIG, 2014).

Estando a Geração Distribuída intimamente ligada as fontes alternativas de energia, ela se torna ainda mais atrativa, por aliar o crescimento a sustentabilidade. Os sistemas fotovoltaicos, por exemplo, têm experimentado um enorme crescimento ao redor do mundo nos últimos anos. Até pouco tempo atrás, essa tecnologia era utilizada em sua extrema maioria em sistemas isolados da rede elétrica convencional, enquanto o que se tem visto

atualmente cada vez mais, são esses sistemas atuando de forma conjunta com a rede, através da Geração Distribuída. Este grande crescimento foi fruto de programas de incentivos à fonte, promovidos por países como Alemanha, Austrália, China, Espanha, EUA, e mais recentemente o Brasil. E com os avanços das pesquisas os preços tem seguido o caminho inverso, caindo significativamente conforme a capacidade instalada aumenta (CEMIG, 2014).

Para que o desenvolvimento da Geração Distribuída em conjunto com as fontes de energia renováveis possa ocorrer, é necessário ter uma forte sintonia entre os avanços tecnológicos e as políticas governamentais, isso levará ao desenvolvimento do sistema como um todo de forma eficiente e segura. Logo o intuito maior das pesquisas, deve ser em atingir fatores essenciais como confiabilidade, estabilidade, eficiência e previsibilidade a fim de reduzir os impactos negativos e proliferar as oportunidades para a sociedade e para as gerações futuras que serão diretamente dependentes dessa evolução e do progresso energético vigente (BRAUN-GRABOLLE, 2010).

Desta forma a Geração Distribuída está intimamente ligada ao avanço tecnológico de diversos sistemas elétricos e eletrônicos. Este trabalho pretende contribuir desta forma, desenvolvendo de forma simplificada um conversor CC-CA capaz de ser aplicado na Geração Distribuída.

1.2 Motivação

No Brasil, o interesse da aplicação das fontes alternativas na Geração Distribuída fez com que a demanda de estruturas que possibilitem a utilização deste sistema aumentassem, o que levou a um aumento de incentivos à Geração Distribuída vindo de diversos órgãos reguladores, sendo o principal deles a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A ANEEL, com o intuito de minimizar os efeitos da demanda de energia no país, fez um estudo mostrando a projeção do crescimento do número de residências com geração fotovoltaica até 2024. Este estudo mostrou um crescimento exponencial deste tipo de sistema, como pode ser visto na Figura 3 (CEMIG, 2014).

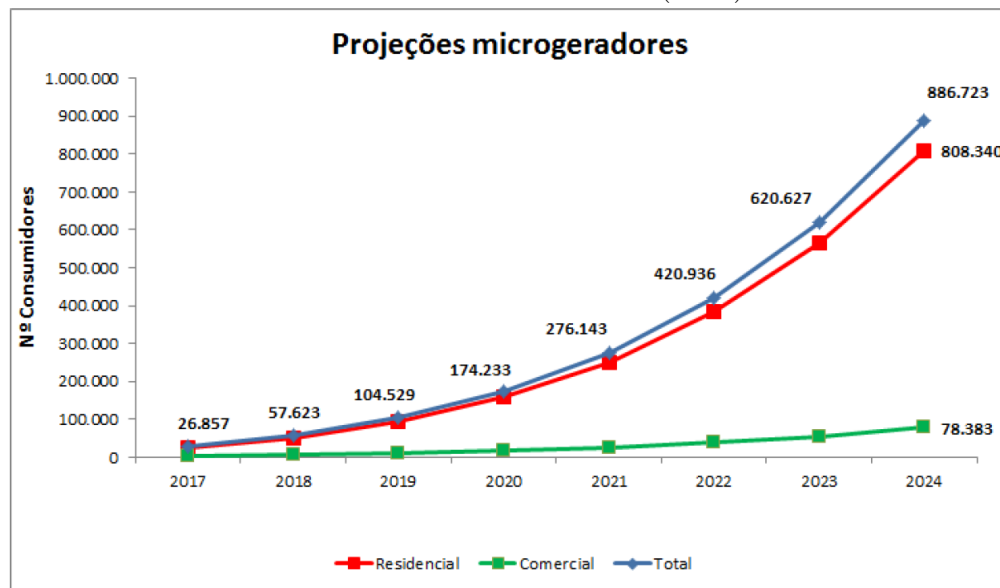
Isso se tornou possível graças a Resolução Normativa ANEEL n° 482/2012, que possibilitou o consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada (ANEEL, 2012).

É importante salientar que na Geração Distribuída de pequeno porte as recentes iniciativas para esse tipo de sistema estão se expandindo a taxas elevadas. Para a geração fotovoltaica há perspectivas que a paridade tarifária em relação as distribuidoras locais sejam atingidas ainda nesta década. Isto foi facilitado com a Resolução Normativa ANEEL n° 482/2012, com a possibilidade de fornecer o excedente de geração de um sistema residencial para a rede de distribuição de sua localidade. (NAKABAYASHI, 2015).

Desta forma, a conexão de sistemas de micro e minigeração distribuída que utilizam

Figura 3 – Projeção do crescimento do número de residências com geração fotovoltaica.

Fonte: Retirado de ANEEL (2016)



conversores CC-CA está sendo alvo de intensas pesquisas. O conversor que é tema do presente trabalho tem como objetivo realizar a conversão de corrente contínua para corrente alternada, de uma fonte de energia renovável qualquer, capaz de ser conectado à rede elétrica de forma experimental em laboratório.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar o desenvolvimento de um Conversor CC-CA monofásico experimental de baixa complexidade para ser aplicado na Geração Distribuída, capaz de fazer a conversão de uma fonte qualquer de corrente contínua para corrente alternada segundo os padrões da rede, executando uma malha de controle de corrente para sua saída.

Para se obter os objetivos deste trabalho, os seguintes passos serão seguidos na implementação do projeto:

- Estudar as topologias de conversores CC-CA monofásicos utilizados em acoplamentos para Geração Distribuída;
- Verificação dos requisitos de conexão de um conversor CC-CA à rede elétrica;
- Implementação de uma malha de controle de corrente;
- Simulação do conversor CC-CA controlado;

- Montagem prática do conversor projetado;
- Verificação do funcionamento esperado de acordo com a simulação do Conversor montado.

1.4 Estruturação do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, tratando cada um deles do seguinte assunto:

- Capítulo 1: Mostra a contextualização do assunto tratado no presente trabalho, apresentando também as motivações e objetivos deste;
- Capítulo 2: Faz um breve estudo da Geração Distribuída e das leis e regulamentações que a impulsionam no Brasil;
- Capítulo 3: Estudo dos conversores CC-CA, mostrando suas principais topologias monofásicas, filtros, modulações e os requisitos de conexão à rede;
- Capítulo 4: Implementação do projeto, mostrando suas etapas de simulação e de testes práticos realizados em laboratório;
- Capítulo 5: Conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros.

2 Geração Distribuída

2.1 Definição e aspectos gerais

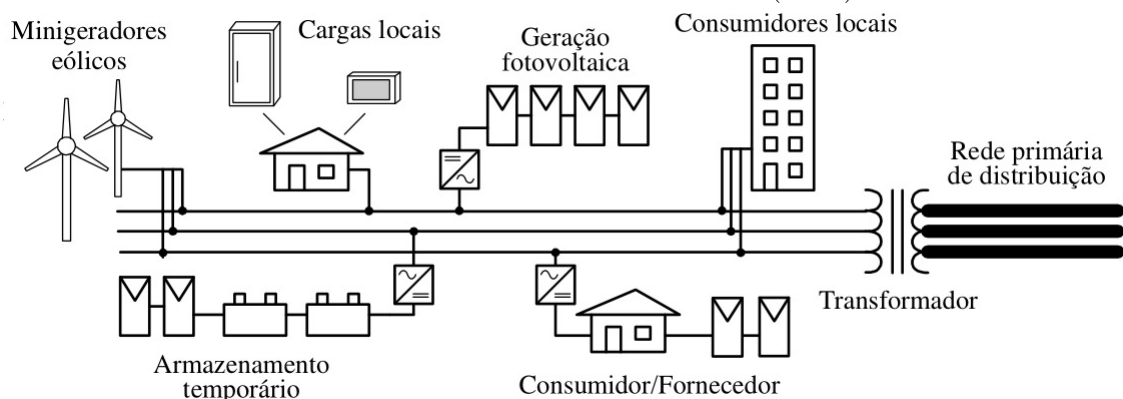
O conceito de geração distribuída é bastante abrangente e pode diferir de acordo com cada país ou empresa que aborda o assunto, com isso torna-se complicado achar uma única definição para este assunto.

Para o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), a geração distribuída pode ser colocada como unidades de geração com diversas instalações geradoras pequenas em relação às grandes centrais geradoras predominantes nos sistemas de geração centralizados, possibilitando com isso a conexão em pontos próximos à rede elétrica junto aos centros de carga. Para o caso brasileiro, o Programa de Distribuição (PRODIST) define geração distribuída como um sistema composto por centrais de qualquer potência conectadas diretamente à rede de distribuição, operando de forma isolada ou em paralelo e despachadas ou não de maneira centralizada (ANEEL, 2016; BRAUN-GRABOLLE, 2010).

Nota-se um importante diferencial da geração distribuída em relação a geração centralizada, por possibilitar que unidades de geração estejam conectadas diretamente a rede de distribuição ou onde esteja localizado o consumidor, sem a necessidade das grandes linhas de transmissão, como pode ser visualizado na Figura 4 (BRAUN-GRABOLLE, 2010).

Figura 4 – Diagrama de uma microrede de Geração Distribuída.

Fonte: Retirado de MARANGONI (2012)



Na geração distribuída predominam as fontes limpas e renováveis, como a solar fotovoltaica e a eólica, que contribuem, por exemplo para a redução da emissão dos gases de efeito estufa. A expansão da geração distribuída também permite que novos investimentos na geração centralizada (como a construção de usinas e parques eólicos, e

linhas de transmissão) possam ser redimensionados e realocados no tempo, sem requisitar um nível alto de prioridade. Além disso gerar esse tipo de energia limpa significa deixar de usar fontes mais poluentes, como térmicas a combustíveis fósseis, que além de causar danos ao meio ambiente são mais caras, elevando o valor médio da energia elétrica (ANEEL, 2016).

É importante comentar que todos esses aspectos positivos citados sobre a Geração Distribuída, sendo eles econômicos ou socioambientais, devem ser também comparados com os aspectos técnicos, uma vez que a energia elétrica deve ser entregue aos seus consumidores finais na forma mais confiável e estável possível, ou seja, os aspectos de qualidade de energia devem ser sempre respeitados. Também é extremamente necessário que sempre existam investimentos nos estudos da inserção da geração distribuída no sistema elétrico, a fim de acompanhar o desenvolvimento e a competitividade tecnológica mundial (BRAUN-GRABOLLE, 2010).

2.2 Tecnologias empregadas

A Geração Distribuída não está associada a apenas uma única fonte de energia primária ou a uma única tecnologia. Dentre as diferenças entre os vários tipos de fontes que podem ser utilizados, pode-se citar alguns fatores que indicam tais diferenças, como: tempo para instalação, eficiência, ou se estas fontes são renováveis (NARUTO, 2010).

A Tabela 1 mostra algumas das principais tecnologias que podem ser utilizadas em Geração Distribuída, incluindo suas potências típicas.

Tecnologia	Potência típica
Micro hidrelétrica	10 - 100MW
Pequena central Hidrelétrica	25kW - 1MW
Aerogerador	200W - 3MW
Sistema Fotovoltaicos	20W - 100kW
Térmica solar, receptor central	1 - 10MW
Térmica solar, sistema Lutz	10 - 80MW
Biomassa baseada na gaseificação	100kW - 20MW
Células combustíveis	200kW - 5MW
Geotérmica	5 - 100MW
Energia Oceânica	100kW - 1MW

Tabela 1 – Tecnologias utilizadas em Geração Distribuída e respectiva potência típica.

Fonte: Adaptado de BRAUN-GRABOLLE (2010)

Como pode ser visto, as variações das potências típicas dentre as tecnologias vistas na Tabela 1 exemplificam bem a grande flexibilidade que o conceito de Geração Distribuída fornece em relação a gama de potências diferentes que podem ser utilizadas, fazendo com

que qualquer tipo de fonte primária possa ser aproveitada, independentemente de sua capacidade de potência que pode ser fornecida (NAKABAYASHI, 2015).

2.3 Leis e regulamentações no cenário brasileiro

Até os anos 60, não era permitido a Geração Distribuída no Brasil, onde então obteve-se uma primeira abertura permitindo apenas a autoprodução sem conexão à rede que perdurou até os anos 90. Em 1996, o setor elétrico brasileiro passou por uma reestruturação, abrindo o horizonte para a Geração Distribuída através do decreto nº 2.003 de 10.09.1996, que regulamentou a produção de energia elétrica por Produtor Independente de Energia (PIE) e por Autoprodutor de Energia (APE), dando então livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição de concessionários ao PIE e ao APE (BRASIL, 1996; NARUTO, 2010).

Posteriormente, com a criação da ANEEL pela Lei 9.648/1998, muito se ganhou em relação a Geração Distribuída, sendo que em 2002, a Lei 10.438 foi promulgada e estabeleceu incentivos para a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia e de cogeração qualificada com a criação do Programa de Incentivos às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, o PROINFA (NARUTO, 2010).

Com intuito de reduzir as barreiras para a penetração da geração distribuída de pequeno porte, essencial para o crescimento do setor, a ANEEL através da resolução nº 687/2015 estabelece regras, que incluem a microgeração e a minigeração, e também cria o sistema de compensação de energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local. As condições do regulamento são válidas para geradores que utilizem as seguintes fontes de energia: hídrica, solar, biomassa, eólica e cogeração qualificada (ANEEL, 2012).

Na resolução nº 687/2015 é feita a distinção da unidade geradora de acordo com a potência instalada. Denomina-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (KW) e minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012).

3 Conversores CC-CA

Os conversores CC-CA também chamados de “inversores de frequência” tem como principal função converter uma fonte contínua de tensão aplicada à sua entrada em tensão alternada na saída do conversor. Estes dispositivos possuem como requisitos mínimos os seguintes padrões de valor de saída: valor médio nulo e simetria na amplitude da saída, sendo que, os níveis de tensão ou de corrente de saída podem ser fixos ou variáveis, assim como a sua frequência de operação (PACHECO, 2012).

As formas de onda na saída dos conversores CC-CA são normalmente retangulares apresentando alto conteúdo harmônico. Para determinadas aplicações esse tipo de forma de onda pode ser aceitável. Contudo, em muitos casos desejam-se formas de onda senoidais com baixo conteúdo harmônico. Felizmente, com o desenvolvimento atual dos dispositivos semicondutores de potência de alta velocidade, o conteúdo harmônico das formas de onda de saída dos conversores CC-CA pode ser minimizado, e em muitos casos reduzido significativamente, utilizando técnicas específicas de modulação e filtragem que serão ainda abordados neste trabalho (MARANGONI, 2012; PACHECO, 2012).

3.1 Topologia de conexão do conversor à rede

A conexão do conversor CC-CA à rede depende muito de qual será a fonte que será conectada a Geração Distribuída, com isso aqui será descrito os tipos de ligações feitas para a utilização de painéis solares, que representam a maior utilização para sistemas de baixas potencias, como é o caso do conversor implementado neste projeto.

Sistemas de geração fotovoltaica para conexão com a rede elétrica costumam apresentar quatro arranjos variados (PAUKNER, 2016): Módulo Integrado, em linha(String), Multilinhas (Multistring) e Inversor central, os quais estão representados na Figura 5.

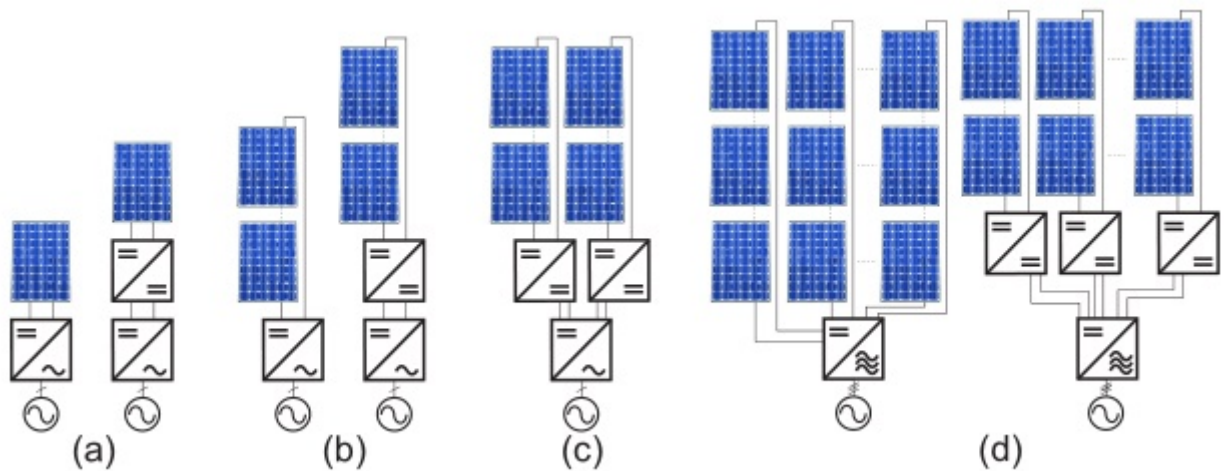
Em PACHECO (2012) é descrito o uso típico de cada tipo de arranjo fotovoltaico:

- Módulo integrado: Potência típica entre 50 - 400W, utilizado em pequenas plantas fotovoltaicas (um único painel);
- Inversor em linha: Potência típica entre 0,4 - 2kW para pequenas plantas fotovoltaicas com painéis conectados numa única linha;
- Inversores Multilinha: Potência típica entre 1,5 - 6kW para plantas fotovoltaicas conectadas costumeiramente em duas linhas;
- Mini Inversor Central: Potência típica superior a 6kW para plantas fotovoltaicas com topologia trifásica utilizadas em grandes coberturas ou em pequenas Usinas Solares;

- Inversor Central: Potência típica entre 100 - 1000kW para plantas fotovoltaicas com topologia trifásica utilizadas em grandes Usinas Solares.

Figura 5 – Configurações de arranjos fotovoltaicos: (a) Módulo Integrado; (b) string; (c) multistring; (d) inversor central.

Fonte: Retirado de PAUKNER (2016)



3.2 Topologias de conversores CC-CA monofásicos

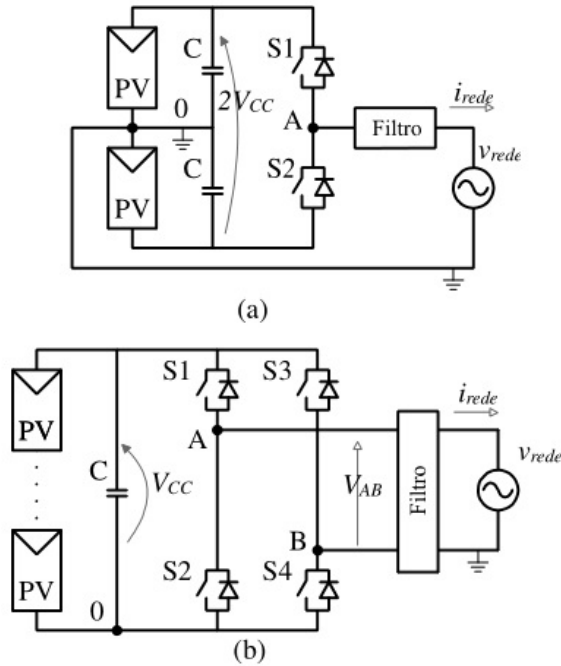
Aqui serão abordadas apenas as topologias com um único estágio de conversão de energia, que empreguem elementos armazenadores de energia no filtro de saída e capacitores para o efeito de tensão flutuante, pois devido a ideia de redução de custos, torna-se importante a redução da quantidade de componentes, tendo apenas o necessário para um conversor CC-CA funcionar.

O desenvolvimento das topologias monofásicas mais simples baseia-se em duas famílias bem conhecidas de inversores: os inversores em meia-ponte e em ponte completa MARANGONI (2012), mostrados na Figura 6.

Os conversores em meia-ponte tem vantagens como utilizar menos chaves de potência, ou também por serem capazes de eliminar as correntes de fuga e por possibilitarem o aterramento do arranjo fotovoltaico, como pode ser visto na Figura 6(a). Porém, este arranjo deve ter o dobro de painéis de um inversor em ponte completa, sendo que cada metade será requisitada durante apenas um dos semiciclos, o que pode gerar problemas em técnicas comumente utilizadas como a de seguidor do ponto de máxima potência (MPPT) que busca maior eficiência em sistemas fotovoltaicos.

Já os conversores em ponte completa, cujo esquemático pode ser visto na Figura 6(b), apresentam um melhor aproveitamento do arranjo fotovoltaico e dos semicondutores

Figura 6 – Topologias (a) meia-ponte e (b) ponte completa.



da topologia. Dependendo da modulação empregada pode-se reduzir as perdas magnéticas do filtro e reduzir o seu volume (MARANGONI, 2012). Por ser simples e de fácil implementação, a topologia em onda completa será a utilizada neste trabalho, contando ainda com um transformador de acoplamento para a ligação do conversor à rede, isso se faz necessário devido a baixa tensão V_{cc} que foi utilizada nos testes práticos.

Existem ainda diversas outras topologias que utilizam como base a ponte completa, acrescentando chaves de potência visando um funcionamento mais seguro do conversor, tornando-o mais complexo. É o caso da topologia HERIC, patenteada pela empresa alemã Sunways. Nela são utilizadas duas chaves a mais, que oferecem proteção na etapa de roda livre do filtro indutivo do conversor, provendo proteção aos painéis fotovoltaicos. Seu circuito pode ser visto na figura 7 (BOLZON, 2014).

Outras duas topologias amplamente difundidas são H5 e H6, mostradas na Figura 8. Desenvolvida também pela alemã SMA, a topologia H5 conta com uma chave de potência a mais, em série com a fonte de energia CC, que é capaz de desacoplar eletricamente a fonte do conversor, evitando a circulação de correntes de fuga (BOLZON, 2014). A topologia H6 é um incremento da H5 utilizando uma chave a mais, possibilitando o desacoplamento na etapa roda livre.

Figura 7 – Topologias HERIC.

Fonte: Adaptado de MARANGONI (2012)

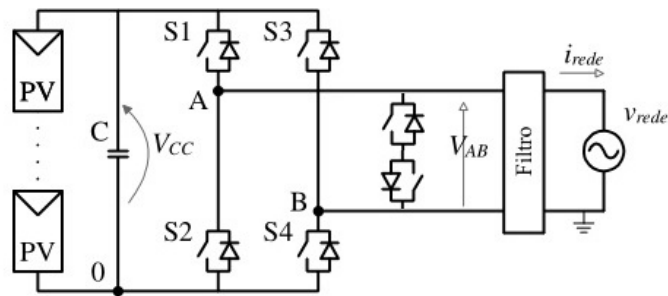
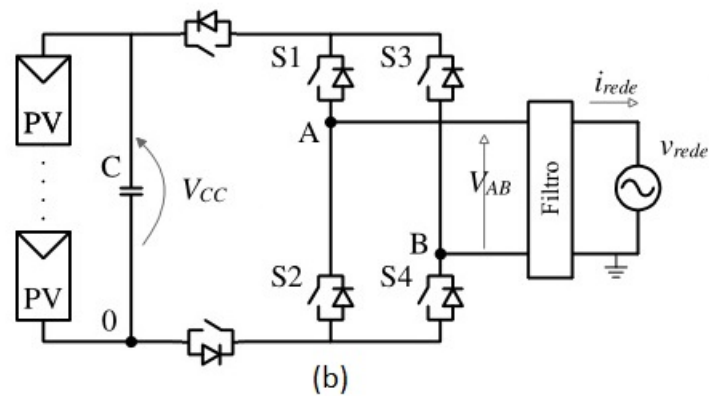
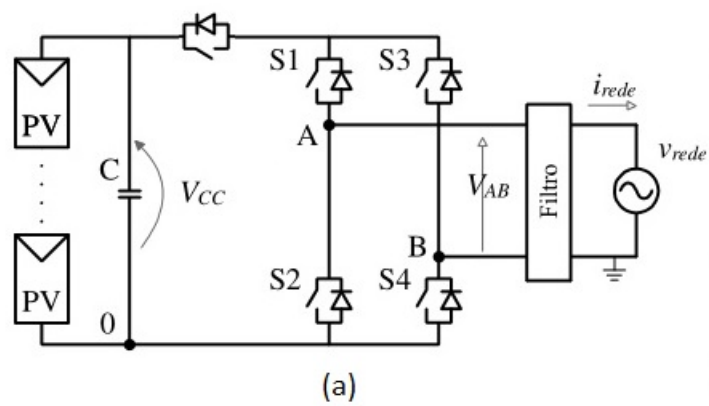


Figura 8 – Topologias (a) H5 e (b) H6.

Fonte: Adaptado de MARANGONI (2012)

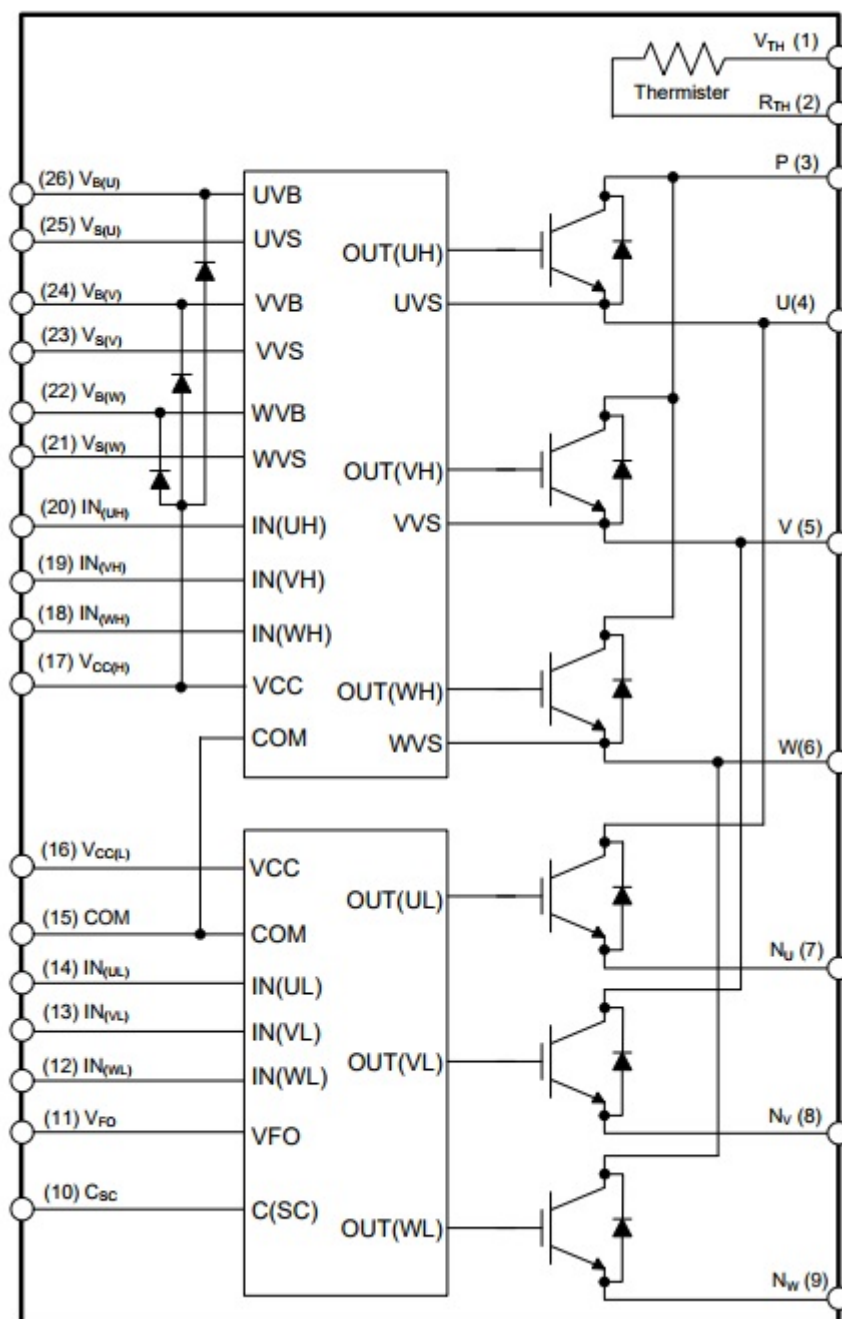


3.3 CI FNA41560

O CI FNA41560, que será utilizado no projeto, possui várias possibilidades de conexões, contando com uma ponte trifásica de IGBT's, possibilita a rápida comutação aliada a uma boa capacidade de potência em sua saída.

Para o seu funcionamento correto é necessário a ligação de diversos componentes externos ao CI, que serão mostradas nos anexos deste trabalho, tendo esses as funções de possibilitarem o acionamento dos IGBT's e conexão dos circuitos de proteção e alimentação. A visão geral do esquemático completo do CI pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Esquemático do CI FNA41560.



Abaixo são listadas algumas características e benefícios do CI FNA41560 (FAIRCHILD, 2010).

- IGBT's suportam 600V - 15A;

- Avançada tecnologia NPT incorporados no CI proporciona baixas perdas de condução e comutação;
- Baixo *dead time*;
- O pacote é otimizado para desempenho térmico em aplicações de acionamentos de baixa potência;
- Alta faixa de temperatura de junção;
- Maior robustez devido ao avançado IGBT NPT adotado;
- Tensão de isolamento de 2000Vrms;
- Três terminais de link CC negativos divididos para corrente do inversor em aplicações de sensoriamento;
- Layout de PCB fácil;
- Diodo de bootstrap integrado;
- Fonte de alimentação única aterrada devido ao HVIC embutido.

3.4 Modulação PWM

A modulação PWM (Modulação de Largura de Pulso) é pelo acionamento das chaves de potência que entregam o conversor CC-CA. Atuando em conjunto com o filtro da saída conversor, tem como responsabilidade manter o fator de distorção e as componentes harmônicas de mais baixa ordem da tensão gerada o mais baixo possível.(MARANGONI, 2012; PACHECO, 2012).

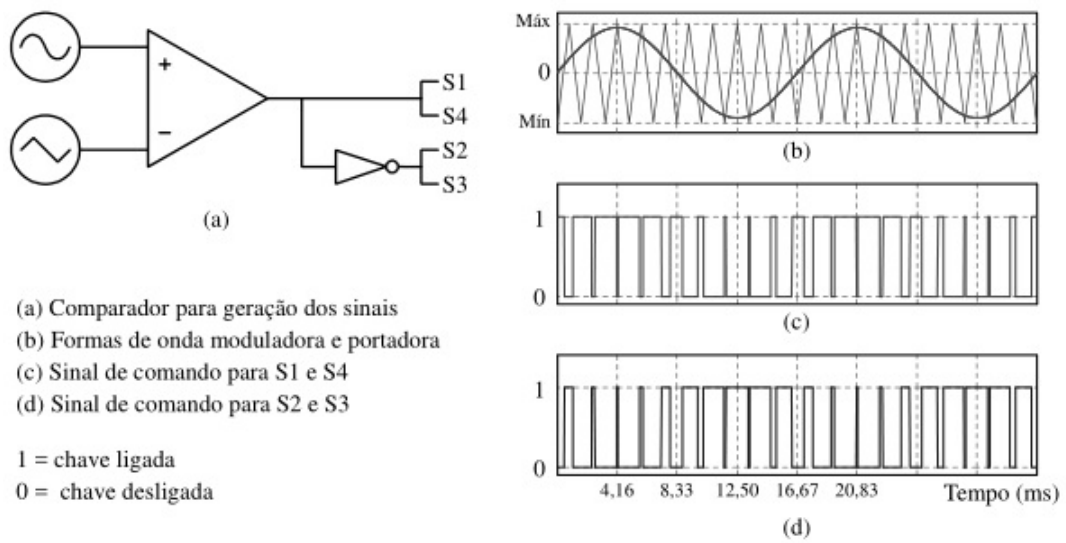
O princípio desse tipo de modulação está em comparar uma onda moduladora de referência, que neste caso é senoidal e de frequência igual à da rede (60Hz), com uma onda portadora triangular de alta frequência. A intersecção dessas formas de onda estabelece os sinais de comando das chaves estáticas controladas. Sendo que, a variação da amplitude da onda senoidal propicia a variação dos pulsos do PWM, Figura 10(c) e 10(d) (PACHECO, 2012).

Em relação as frequências dessas ondas, a moduladora senoidal define a frequência da componente fundamental da tensão de saída, enquanto que a onda portadora triangular define a frequência de comutação das chaves estáticas. 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 de entrada (PACHECO, 2012).

O circuito mais simples que é comumente usado para a modulação PWM senoidal que possui todas as características citadas acima, é o PWM bipolar (MARANGONI, 2012) que é visto na Figura 10.

Figura 10 – Modulação PWM bipolar.

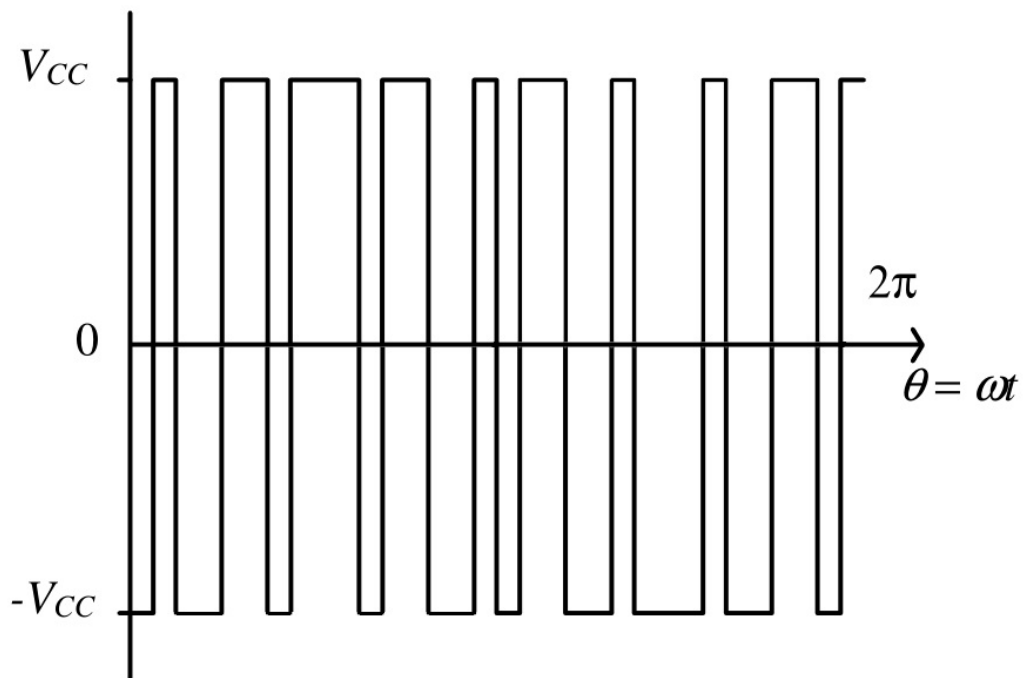
Fonte: Retirado de MARANGONI (2012)



Na saída do conversor CC-CA a tensão V_{AB} para o PWM bipolar será a forma de onda vista na Figura 11.

Figura 11 – Tensão V_{AB} para o caso do PWM bipolar.

Fonte: Retirado de MARANGONI (2012)



Com o que foi visto aqui, pode-se concluir que a modulação PWM senoidal tem

como função principal gerar através do acionamento das chaves de potência um sinal que torne possível a obtenção de uma senoide após a etapa de filtragem. Além de poder regular a frequência e a tensão (ou corrente) de carga.

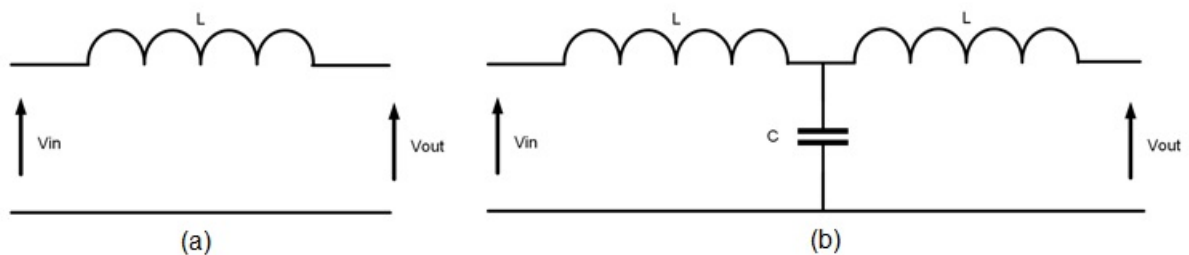
3.5 Filtros de saída

Para minimizar as correntes harmônicas, geradas em torno da frequência de comutação do PWM senoidal, é necessário a utilização de filtros na saída do conversor. Com isso é comum a utilização de um filtro passa baixas, capaz de atenuar essas componentes harmônicas superiores e passar apenas a frequência fundamental da rede de 60Hz (MARANGONI, 2012).

Segundo PAUKNER (2016) diversas topologias de filtros podem ser utilizados para reduzir os problemas relacionados às Harmônicas de corrente na saída dos Conversores. Utiliza-se principalmente as seguintes topologias de filtros:

- Indutivo (L);
- Indutivo-Capacitivo-Indutivo (LCL);

Figura 12 – Tipos de filtros de saída mais comuns: (a) Filtro L (b) Filtro LCL.



O filtro LCL, Figura 12(b) sendo de terceira ordem, apresenta uma atenuação maior das harmônicas para comutação em frequências baixas (alguns kHz). Por outro lado, o filtro L Figura 12(a) necessita de alta frequência de comutação para garantir a atenuação das harmônicas de tensão e, portanto, é normalmente empregado em sistemas de potência mais baixa, como as aplicações monofásicas (PAUKNER, 2016). Por isso este foi o filtro escolhido para ser utilizado neste trabalho.

A utilização de filtros LCL resulta em um melhor desempenho, mas há um aumento na quantidade e custo de componentes necessários, restringindo a utilização deste filtro para sistemas de potência mais elevada (MARANGONI, 2012).

3.6 Modelagem do conversor CC-CA

O modelo matemático do conversor CC-CA é essencial para o desenvolvimento da malha de controle. Será desenvolvido nesta seção o modelo relativo a um conversor de ponte completa, visto anteriormente na Figura 6(b), onde V_{cc} é a tensão de entrada do conversor e V_{AB} a tensão de saída.

A tensão V_{AB} , que incide no filtro L , varia de acordo com a comutação das chaves de potência do conversor (MARANGONI, 2012). V_{AB} pode ser representada da seguinte maneira:

$$V_{AB} = V_A - V_B \quad (3.1)$$

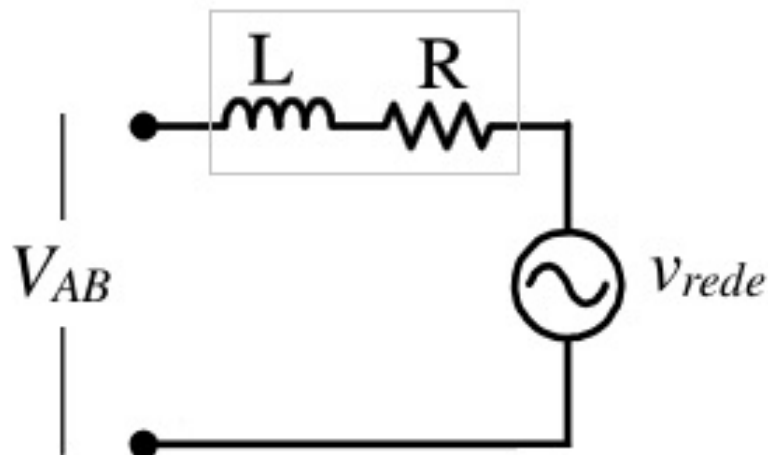
onde,

$$V_A = V_{cc} * d_1 \quad (3.2)$$

$$V_B = V_{cc} * d_2 \quad (3.3)$$

As variáveis d_1 e d_2 são definidas de acordo com a modulação empregada, neste caso o PWM bipolar, cujas formas de onda são mostradas nas Figuras 10(c) e 10(d) respectivamente.

Figura 13 – Circuito do conversor simplificado.



A figura 13 mostra a simplificação do conversor de ponte completa, representando apenas sua saída de tensão e o filtro L juntamente com sua resistência interna. Aplicando-se a Lei das Tensões de Kirchhoff neste circuito é obtido:

$$v_{AB} = L \frac{d}{dt} i_{conv} + R i_{conv} + v_{rede} \quad (3.4)$$

Onde i_{conv} é a corrente de saída do conversor. Substituindo então a equação (3.3) em (3.4), e considerando $d = d_1 - d_2$, tem-se:

$$dV_{cc} = L \frac{d}{dt} i_{conv} + R i_{conv} + V_{rede} \quad (3.5)$$

Então a modelagem do sistema da equação (3.5) em coordenadas dq é:

$$\frac{d}{dt} i_d - w i_q = \frac{1}{L} (-R i_d - V_{rede} + d_d V_{cc}) \quad (3.6)$$

$$\frac{d}{dt} i_q + w i_d = \frac{1}{L} (-R i_q - V_{rede} + d_q V_{cc}) \quad (3.7)$$

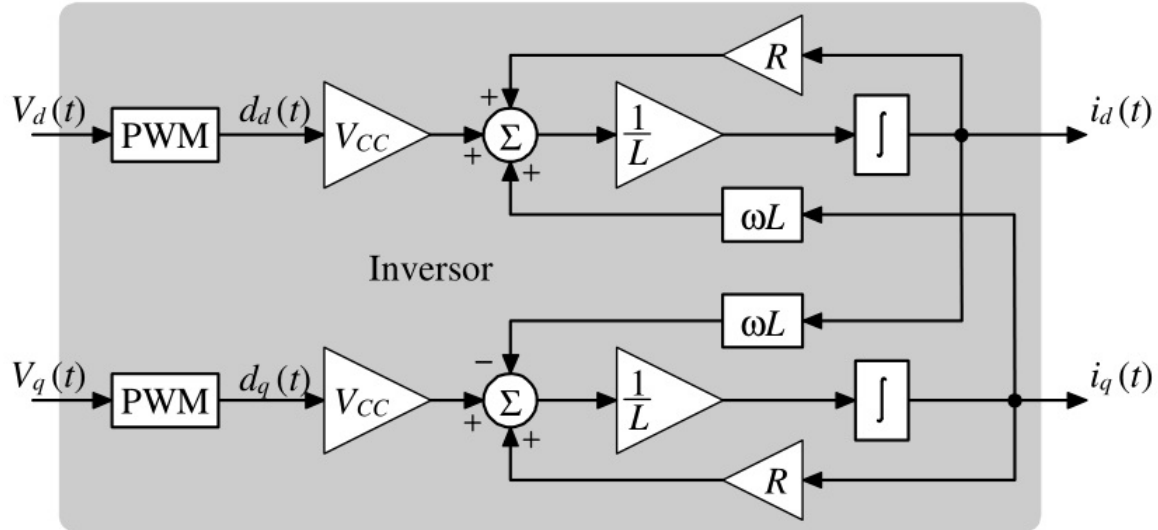
Passando para espaço de estados o sistema formado por (3.6) e (3.7):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & w \\ -w & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rede} \\ V_{rede} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{cc}}{L} & 0 \\ 0 & \frac{V_{cc}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_d \\ d_q \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Em diagrama de blocos o sistema dado por (3.8) é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Diagrama de blocos do conversor.

Fonte: Retirado de MARANGONI (2012)



Como pode ser visto existe acoplamento entre as correntes i_d e i_q . Isso faz com que a variação de qualquer uma destas correntes leve a variação em ambas, o que acaba dificultando o controle do sistema (MARANGONI, 2012).

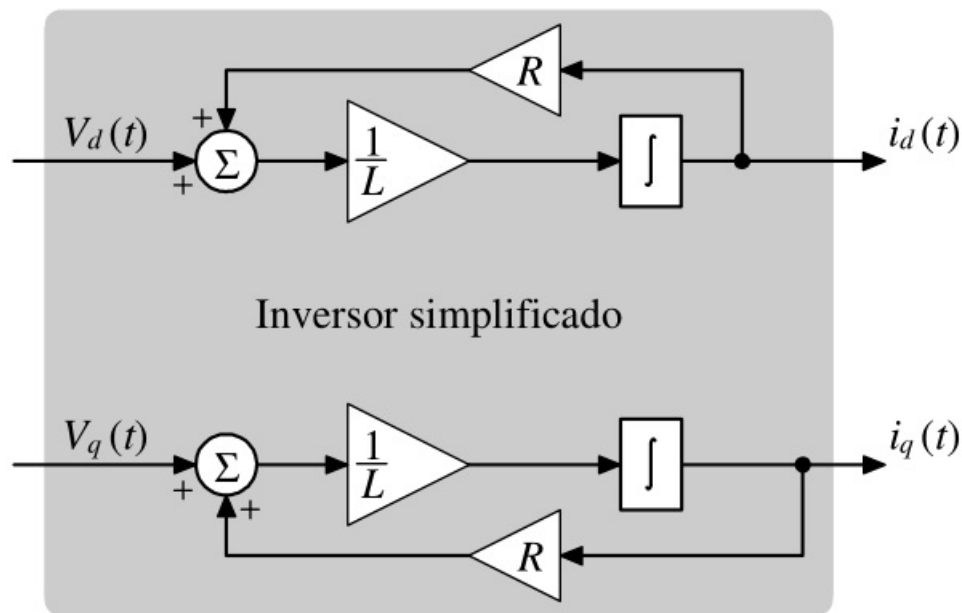
Para evitar o que foi descrito acima, é proposto em MARANGONI (2012) uma adaptação através da transformação dos parâmetros de entrada. É obtido então um sistema sem o acoplamento das correntes i_d e i_q , sua representação em espaço de estados se torna:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L} & 0 \\ 0 & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Cujo novo diagrama de blocos é mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de blocos do conversor simplificado.

Fonte: Retirado de MARANGONI (2012)



3.7 Unidade de Controle

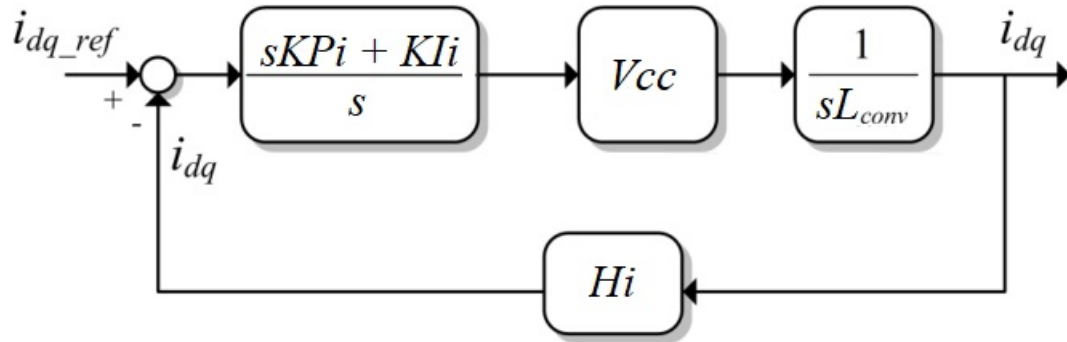
Para o funcionamento de um conversor CC-CA em sistemas conectados à rede de Geração Distribuída torna-se necessário a aplicação de alguma malha de controle, podendo esta ser uma malha de controle de corrente e/ou de tensão. O controle de corrente se tornou o mais utilizado por possuir melhor segurança, estabilidade e resposta mais rápida (MARANGONI,2012).

A estratégia de controle mais simples que pode ser implementada utiliza compensadores do tipo Proporcional-Integral (PI), que são amplamente difundidos em diversas aplicações. Com isso, a saída do controlador de corrente passa a ser o sinal de referência para a geração do sinal de PWM (MARANGONI,2012).

Neste trabalho deseja-se ter fator de potência unitário, desta forma o valor de i_q deve ser definido como zero, já o valor de i_d representa o valor máximo de corrente fornecida pelo pelo conversor (MARANGONI,2012). A comparação entre os valores medidos e os valores de referência gera um erro que será tratado pelo compensador Proporcional Integral (PI).

Para o controle sendo efetuado no modo conectado, o diagrama de blocos é mostrado na Figura 16. O bloco $\frac{1}{sL_{conv}}$ é representado como a função de transferência tensão-corrente do filtro de saída que está conectado aos terminais do inversor. Isso se faz válido desde que a impedância da carga seja muito menor do que a impedância do filtro de saída e que a frequência de amostragem seja elevada em comparação a frequência fundamental do sinal que deseja-se sintetizar (MACHADO, 2005).

Figura 16 – Diagrama de blocos da unidade de controle.



Para a obtenção dos ganhos do controlador PI são necessárias as definições da margem de fase (mfi), a frequência de corte em malha fechada (F_{CL}) e o ganho em malha aberta da malha em corrente (G_{OL}) (MACHADO, 2005), cuja equação é:

$$G_{OL} = V_{cc} * H_i \frac{1}{L_{conv}} \quad (3.10)$$

Os ganhos proporcional (KP_i) e integral (KI_i) do controlador são definidos conforme as equações (MACHADO, 2005):

$$KP_i \frac{G_{OL}}{2\pi F_{CL}} = 1 \quad \text{logo} \quad KP_i = \frac{2\pi F_{CL}}{G_{OL}} \quad (3.11)$$

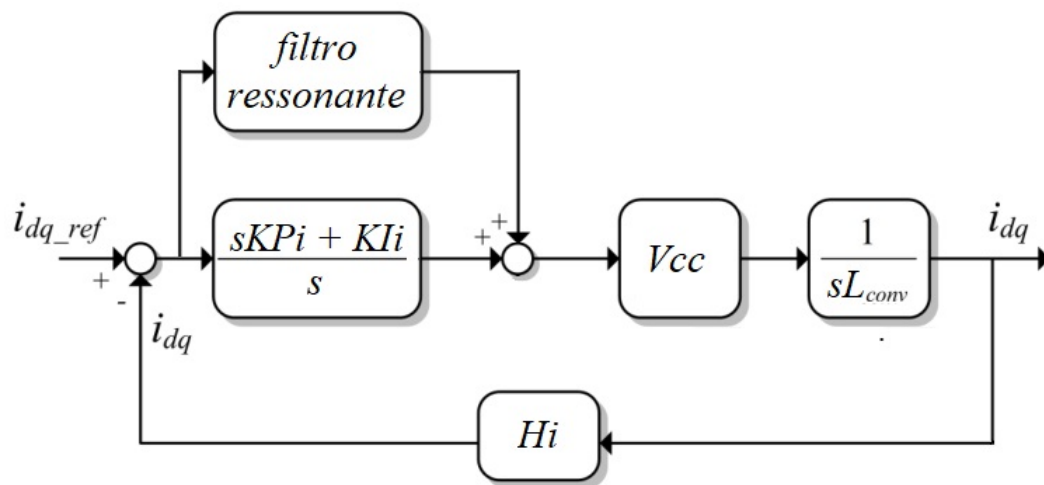
$$KI_i = KP_i \frac{w_{CL}}{\tan(mfi)} \quad \text{logo} \quad KI_i = KP_i \frac{2\pi F_{CL}}{\tan(mfi)} \quad (3.12)$$

3.8 Filtro ressonante

Os controles PI apresentam boa resposta para sinais contínuos, principalmente em relação ao erro de regime permanente, que pode ser inferior a 5% (GONÇALVES, 2015). Porém, no caso de sinais oscilatórios como o deste trabalho, os erros de regime permanente podem não ser ideais. Somando isto ao fato da resposta em frequência de um controlador PI se assemelhar a de um filtro passa-baixas, pode ocorrer de o PI não ter a capacidade adequada de compensação na frequência fundamental da rede (GONÇALVES, 2015; CASSIUS, 2013).

Uma possível solução para este problema, é a implementação de um filtro ressonante, que deve ser posicionado em paralelo ao controlador PI. Utilizando como base o controlador da figura 16, o novo diagrama é mostrado na Figura 17. A ideia básica do filtro ressonante neste projeto é introduzir um ganho alto na frequência fundamental de trabalho do conversor (60Hz), eliminando o erro causado devido a característica do controlador PI (GONÇALVES, 2015).

Figura 17 – Diagrama de blocos da unidade de controle com filtro ressonante.



No domínio da frequência a equação do filtro ressonante é dada por (3.13), nela é possível visualizar a influência da largura de banda do filtro ωc , que deve ser escolhida de forma cuidadosa. k_1 representa o ganho da função que afetará a magnitude do sinal e ω_0 é a frequência fundamental (GONÇALVES, 2015).

$$RESk(s) = k_1 \frac{(2\omega c)s}{s^2 + (2\omega c)s + (\omega_0)^2} \quad (3.13)$$

Para aplicação do filtro ressonante em um sistema de controle real, que utiliza microprocessadores digitais, é necessário sua discretização. Deve-se tomar um cuidado especial nesta etapa, pois devido a sensibilidade do filtro ressonante, por sua banda estreita

e seu elevado ganho, qualquer desvio dos polos da equação discretizada pode levar a uma grande perda de desempenho (GONZATTI, 2012).

Em GONZATTI (2012) é mostrado a Figura 18, nela podem ser visualizados os principais métodos de discretização.

Figura 18 – Métodos de Discretização.

Fonte: Retirado de GONZATTI (2012)

Método	Relação
Forward Euler	$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_s z^{-1}}$
Backward Euler	$s = \frac{1 - z^{-1}}{T_s}$
Tustin	$s = \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$
ZOH	$H(z) = (1 - z^{-1})Z\left\{\frac{H(s)}{s}\right\}$
Pólos e Zeros Casados	$z = e^{T_s s}$
Impulse Invariant	$H(z) = Z\{H(s)\}$

Desta forma para realização da discretização basta a aplicação de um dos métodos propostos. Uma vez realizado a discretização, deve-se representar o sistema discretizado em equações de diferenças, que pode então ser aplicada no sistema de controle microprocessado.

3.9 Técnicas de sincronismo

Um dos pontos a ser considerados para a conexão de um inversor com a rede é o sincronismo entre a tensão produzida pelo inversor e a tensão da rede. As técnicas de sincronismo possuem um papel importante, fornecendo o sinal de referência em fase com a tensão da rede para o conversor (BLAABJERG et al., 2006).

Diferentes métodos para se ter o sincronismo com a rede têm sido desenvolvidos ao longo do tempo, apresentados em muitas obras até agora. Uma análise detalhada de alguns desses métodos podem ser vistos em TEODORESCU et al. (2005), neste de trabalho serão abordados dois métodos, um devido a sua simplicidade, e outro por ser o mais utilizado.

3.9.1 Detecção do cruzamento por zero da tensão

Um dos métodos mais simples que podem ser implementados para extrair a informação da fase da rede é pela detecção da passagem da tensão por zero, este método é realmente bem fácil de ser implementado. No entanto, os pontos de cruzamento por

zero ocorrem somente a cada meio ciclo da tensão da rede, o que acaba por restringir a eficácia deste método, devido à pouca informação que ele pode recolher por unidade de tempo (BLAABJERG et al., 2006; TEODORESCU et al., 2005). Outro ponto fraco deste método ocorre quando distúrbios na tensão da rede, tais como afundamentos de tensão ou harmônicas de baixa ordem provocam o cruzamento por zero em múltiplos pontos em um ciclo. Isto reduz significativamente a precisão do sincronismo (MARANGONI, 2012).

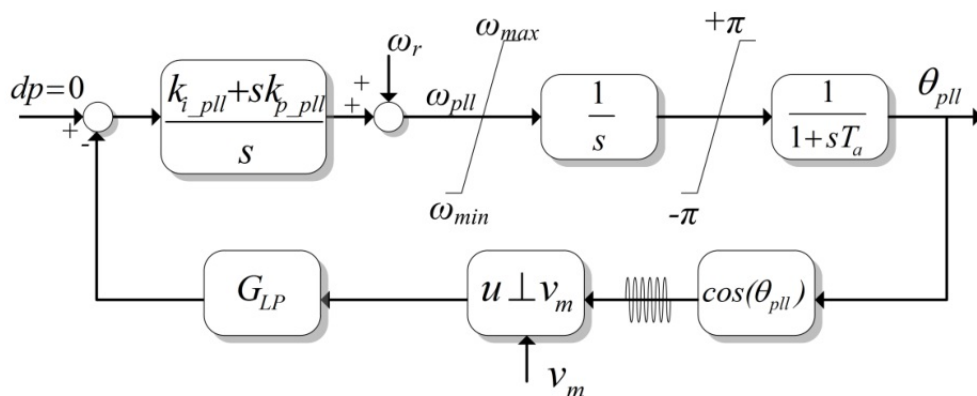
3.9.2 Técnica PLL

A ideia principal do PLL (Phase-Locked Loop) é gerar um sinal cujo ângulo de fase encontra-se continuamente rastreando variações de fase de um dado sinal. A estratégia normalmente utilizada nestes sistemas é estimar a diferença entre o ângulo de fase do sinal de entrada e do sinal gerado e levar este valor a zero por meio de uma malha de controle (MARANGONI, 2012).

A sincronização através da técnica PLL (Phase Locked Loop) digital proposta em MAFARÃO (2004) sintetiza a partir de variáveis internas do PLL uma senoide de amplitude unitária, que em condições de regime permanente deve ser ortogonal em relação à fundamental da tensão medida na saída. Desta forma, o valor médio do produto escalar entre a tensão medida e a senoide gerada no PLL deve aproximar de zero. O sinal que define a sintetização da senoide do PLL é obtido integrando a variável de saída do controlador PI, ou seja, após a integração da frequência da rede, o ângulo de tensão da rede elétrica é obtido (CASSIUS, 2012). A descrição apresentada acima pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 19 – Algoritmo de sincronização PLL.

Fonte: Retirado de CASSIUS (2012).



No modelo citado, o controlador PI produz em sua saída um sinal de correção de frequência, enquanto o algoritmo PLL busca sintetizar a senoide unitária para satisfazer

a condição de ortogonalidade com a tensão medida, possibilitando assim a identificação correta da frequência do sinal de entrada (MAFARÃO, 2004). Pode-se notar ainda a entrada ω_r , que é utilizada como um valor inicial de frequência, visando melhorar a resposta dinâmica do sistema.

Na condição de erro nulo, o controlador PI irá fornecer um valor constante em sua saída, que será igual a frequência da rede ω . Na sequência, o PLL é sintonizado através de θ , que é atrasado em 90° em relação ao ângulo de fase da tensão medida (MAFARÃO, 2004). Desta forma, o ângulo de sincronismo da tensão medida é obtido por:

$$\phi_m = \theta + \frac{\pi}{2} \quad (3.14)$$

O bloco $\frac{1}{1+sT_a}$ representa a função de atraso que ocorre na conversão analógico-digital de uma amostra e a saída do PLL, tipicamente este é definido pelo período de amostragem utilizado (T_a).

3.10 Requisitos para conexão do conversor à rede

A ANEEL com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, visa normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, incluindo a Geração Distribuída. O Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição, trata especificamente em relação aos requisitos de acesso à rede, aos quais a Geração Distribuída também deve obedecer (ANEEL, 2016).

Segundo o módulo 3 do PRODIST o objetivo é estabelecer as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso, ao sistema de distribuição e definir os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão, aplicando-se aos novos acessantes bem como aos existentes.

Para que sejam citados alguns requisitos básicos para esta conexão, será aqui usado como referência a ND 5.30 da Cemig, que em conformidade com a resolução n° 482/2012 da ANEEL e com o PRODIST, faz a regulamentação para as conexões para a Geração Distribuída.

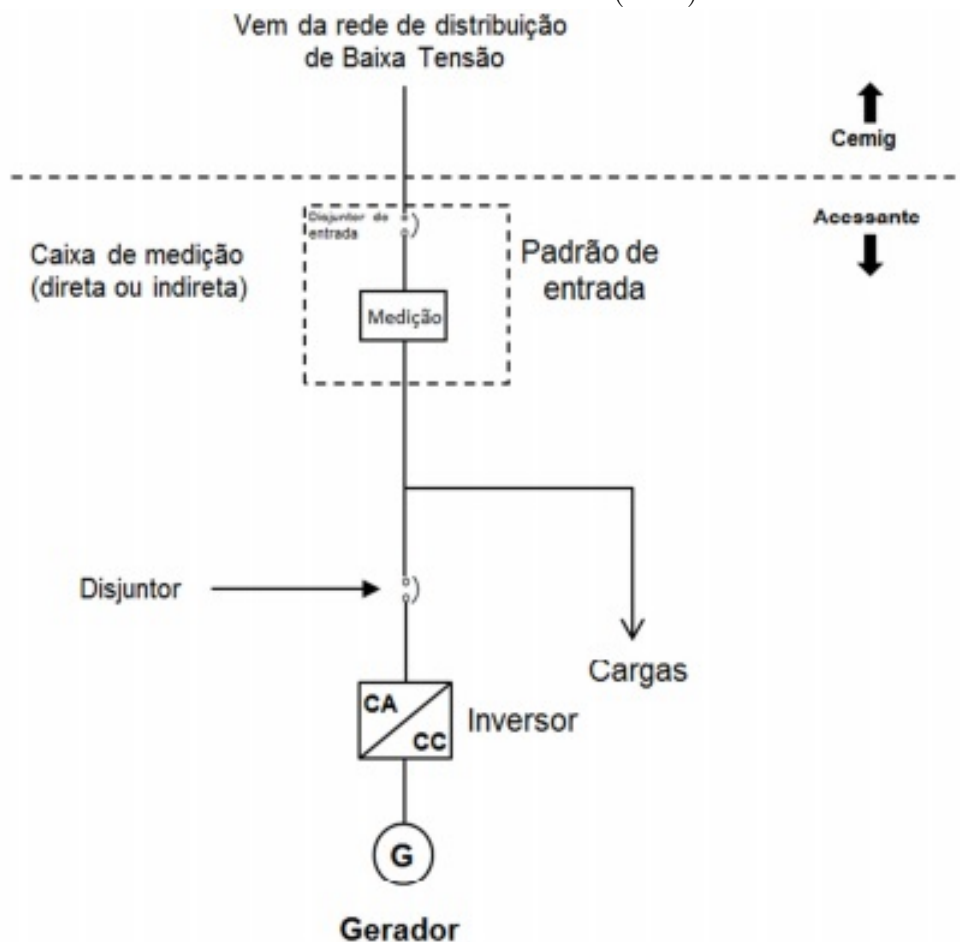
3.10.1 Forma de conexão

A ND 5.30 especifica que para a conexão de geradores que necessitam de conversores CC-CA como interface de conexão, tais como geradores eólicos, solares ou microturbinas, deverá ser utilizado como referência o esquema simplificado da Figura 20.

Os inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos deverão atender aos requisitos estabelecidos na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) na norma técnica NBR 16149: Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a

Figura 20 – Conexão do sistema à rede.

Fonte: Retirado de EPE (2016)



rede elétrica de distribuição. Além disso, deverão atender aos requisitos estabelecidos pelo Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia), quando aplicável.

Em relação a caixa de medição é necessário que esta seja capaz de realizar a medição nos dois sentidos de potência (bidirecional), ou seja, medir a energia ativa injetada na rede e a energia ativa consumida da rede. Deverá ser instalado um medidor bidirecional com registradores independentes para apuração da energia ativa consumida e da energia ativa injetada (EPE, 2016).

3.10.2 Requisitos de Proteção

Os requisitos de proteção exigidos para as unidades consumidoras que façam a adesão ao sistema de compensação e se conectem à rede de baixa tensão estão descritos na Tabela 2 e seguem as determinações contidas na Seção 3.7 do PRODIST. As proteções relacionadas na Tabela 2 devem estar inseridas nos conversores, sendo a redundância de proteções desnecessária.

REQUISITOS DE PROTEÇÃO
Elemento de interrupção
Proteção de sub e sobretensão
Proteção de sub e sobrefrequência
Relé de sincronismo
Anti-ilhamento

Tabela 2 – Requisitos de proteção para potência instalada até 75 kW.

Fonte: (EPE, 2016)

3.10.3 Requisitos de qualidade

A qualidade da energia fornecida pelos sistemas de Geração Distribuída às cargas locais e à rede elétrica da Cemig é regida por práticas e requisitos referentes à tensão em regime permanente, fator de potência, distorção harmônica, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência (EPE, 2016).

Em relação ao fator de potência observa-se que este sempre deverá vir de fábrica com fator de potência unitário, tendo tolerância variável de acordo com a faixa de potência nominal de trabalho do conversor.

Em relação as taxas de distorção harmônicas, estabelece-se que os limites apresentados na Tabela 3 devem ser atendidos. A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5% em relação a corrente fundamental na potência nominal do inversor (ABNT, 2014).

Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4.0%
11° a 15°	< 2.0%
17° a 21°	< 1.5%
23° a 16°	< 0.6%
Harmônicas pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1.0%
10° a 32°	< 0.5%

Tabela 3 – Limite de distorção harmônica de corrente.

Fonte: ABNT NBR 16149.

Possíveis variações de tensão, frequência e a desconexão completa do sistema conectado à rede elétrica, representam potencial formação de ilhamento de Geração Distribuída. Para evitar isso a Tabela 4 define as faixas de operação de tensão limites e os tempos para desligamento caso estes sejam ultrapassados (ABNT, 2014).

Já para a variação da frequência a Figura 21 mostra a curva de operação do sistema

Tensão no ponto comum de conexão	Tempo máximo de desligamento
$V < 80\%$	$< 0,4$ s
$80\% < V < 110\%$	regime normal de operação
$110\% < V$	$< 0,2$ s

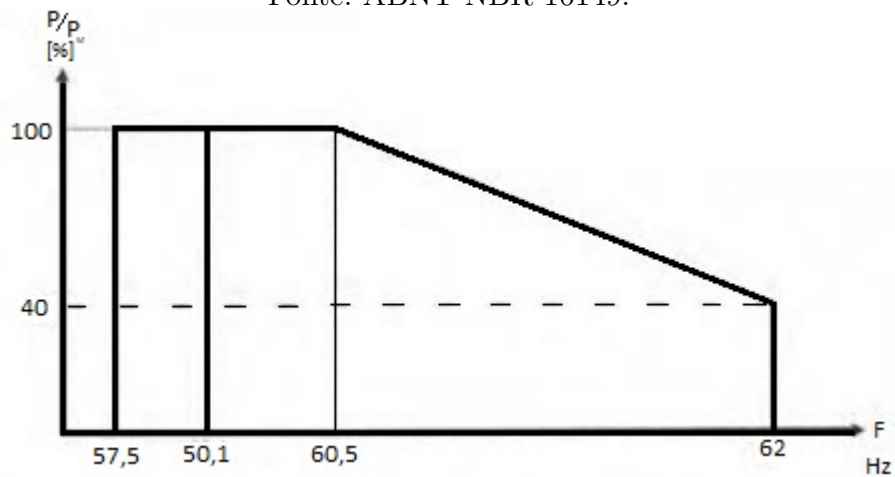
Tabela 4 – Resposta as condições anormais de tensão.

Fonte: ABNT NBR 16149.

em função da frequência da rede para desconexão por sobre/subfrequência. Neste caso o sistema deve ser capaz de atuar em 0,2s para cada um dos extremos do gráfico mostrado.

Figura 21 – Curva de operação do sistema fotovoltaico em função da frequência da rede para desconexão por variação de frequência.

Fonte: ABNT NBR 16149.

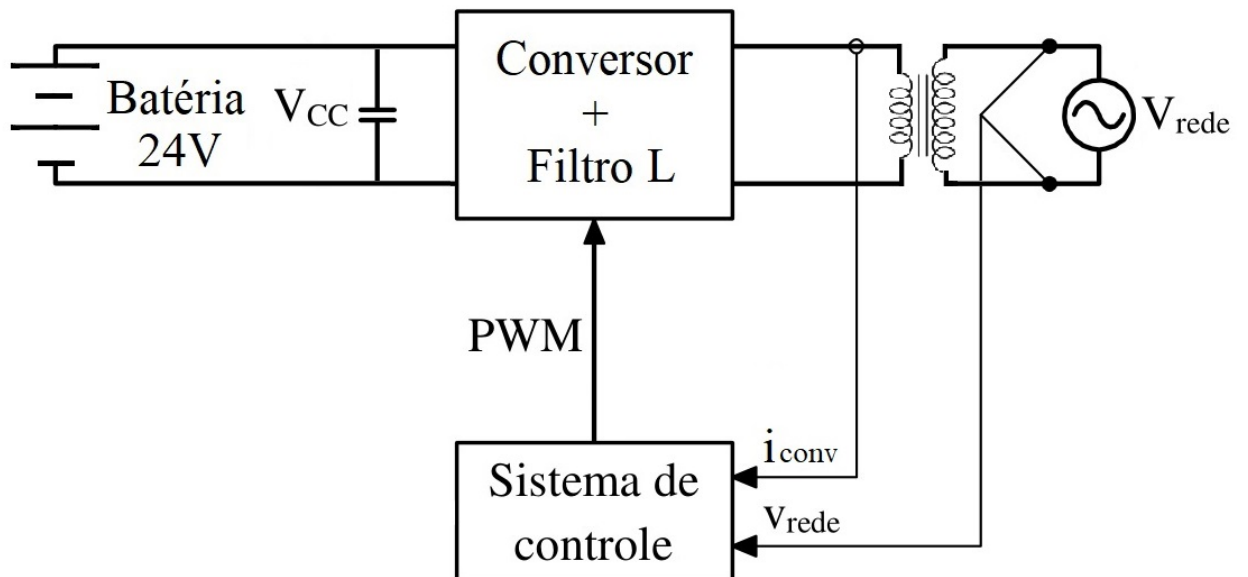


4 Implementação e análise dos resultados

4.1 Implementação do projeto do Conversor CC-CA

O diagrama geral do conversor CC-CA com controle de corrente desenvolvido neste projeto é mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Esquemático do conversor CC-CA montado.



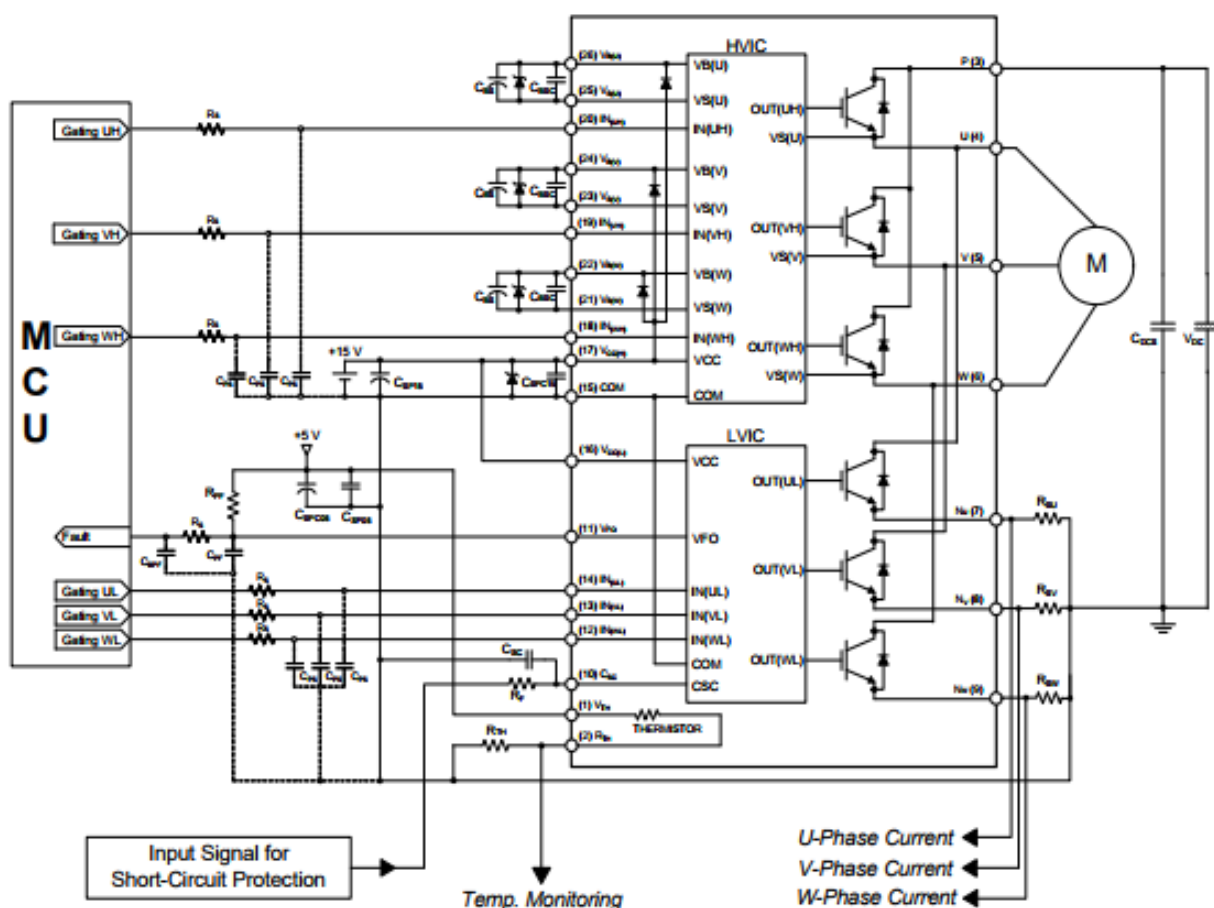
Nesta seção serão explicados os blocos que compõem este diagrama, sendo eles:

- Conversor CC-CA e filtro;
- Sistema de controle de corrente;
- Medidores de corrente e tensão.

4.1.1 Conversor CC-CA e filtro

O circuito da ponte completa de IGBT foi obtido no datasheet do fabricante do CI FNA41560, cujo esquemático pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Esquemático do conversor CC-CA montado.

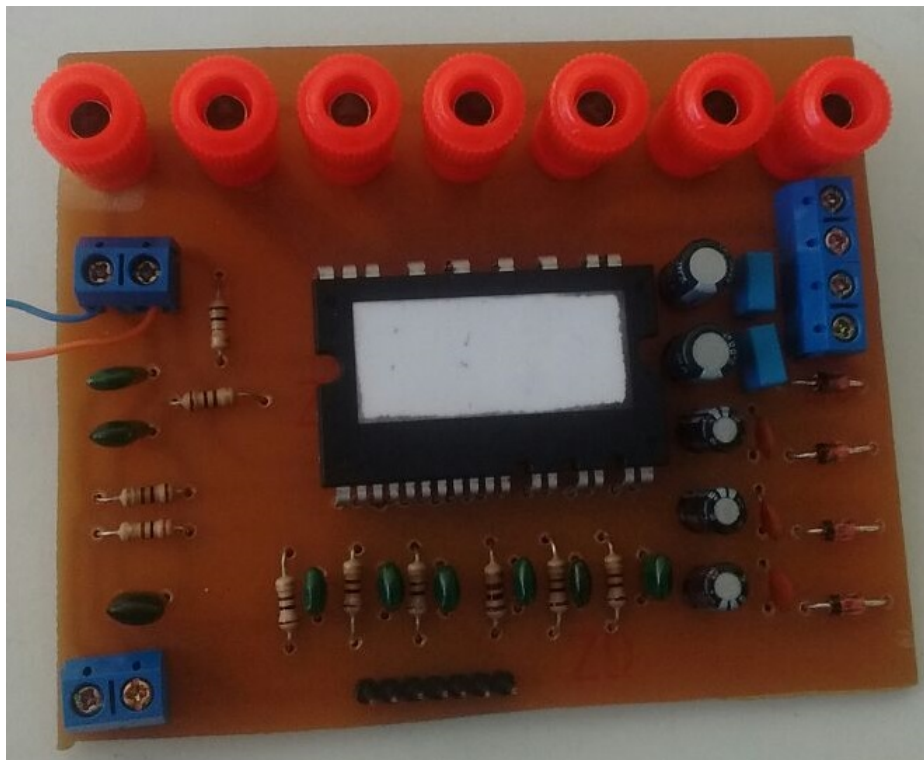


Em posse do esquemático do circuito foi realizada a montagem da placa utilizada nos testes práticos, vista na Figura 24, cujos valores dos componentes são mostrados nos anexos deste trabalho. O *layout* do circuito foi desenvolvido no *software* Proteus, e foi montada em placa de fenolite.

Como o circuito possui uma ponte trifásica de IGBT's, e o objetivo será a implementação de um conversor monofásico, serão necessários apenas quatro IGBT's, sendo que a topologia que será utilizada será a ponte completa, como visto anteriormente na Figura 6(b).

O tipo de filtro escolhido para ser utilizado neste projeto foi o filtro L, devido principalmente a sua maior simplicidade proporcionando mais economia. Será utilizado um indutor com valor de 3mH, que foi determinado de acordo com MARANGONI (2012),

Figura 24 – Placa do conversor CC-CA montado.



onde levou-se em conta a topologia em ponte completa, o PWM bipolar e a frequência de 5kHz de chaveamento.

4.1.2 Sistema de controle de corrente

A malha de controle de corrente foi desenvolvida no Arduino Due, Figura 25, que possui 32 Bits e conta com o microcontrolador da Atmel SAM3X8E ARM. Devido a sua alta capacidade de processamento possibilita a implementação do controlador PI projetado em código. Além disso, possibilita configurações de PWM que serão essenciais para este projeto.

A configuração do PWM é feita através de registradores de configuração, onde é possível a realização de diversos ajustes no PWM, como: frequência da portadora, tipo de onda portadora, polaridade do sinal PWM, canais utilizados, configuração de interrupções, etc. A Figura 26 mostra o gráfico que exemplifica algumas opções de configuração disponibilizadas no arduino DUE.

Um ponto importantíssimo do projeto será a configuração da interrupção do PWM, possibilitando menos incerteza ao sistema de controle. Isso se faz necessário devido ao ripple decorrente da natureza de chaveamento do conversor. Desta forma a interrupção ocorre sempre em um mesmo ponto da portadora, fazendo com que o controle seja feito sempre em um ponto médio do ripple.

Figura 25 – Arduino DUE com o microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3.

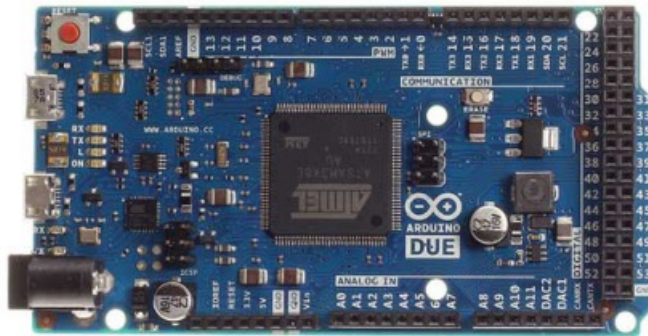
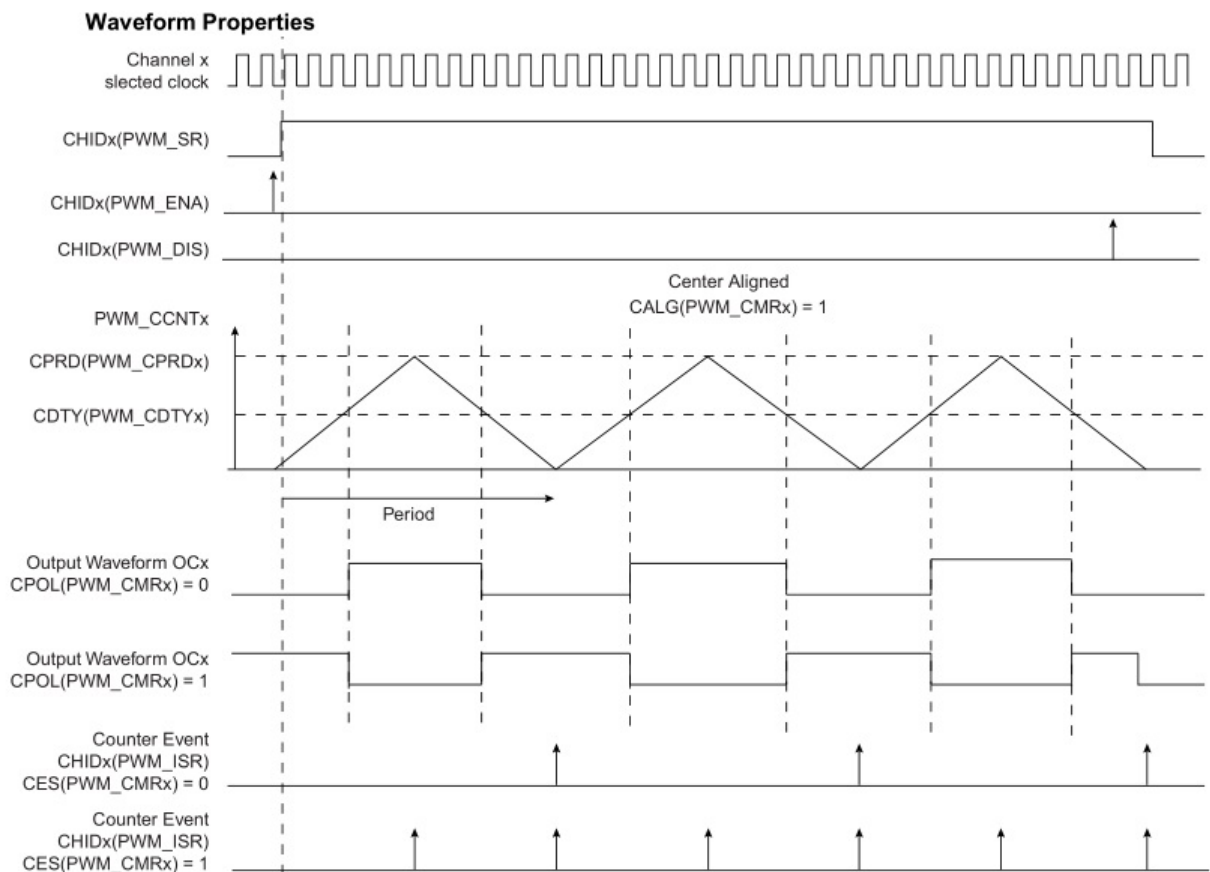


Figura 26 – Seleção da portadora, frequência da interrupção e da polaridade do sinal PWM.



Seguindo a lógica do PWM bipolar vista anteriormente na Figura 10, primeiramente foi configurada a portadora, sendo escolhida a onda triangular. Em seguida foi configurado a frequência da onda portadora, ajustada para 5kHz, que será usada como padrão tanto nas simulações como no teste prático. A interrupção escolhida foi a que ocorre apenas em

um dos semiciclos do PWM, fazendo $CES(PWM\ CMR_x)=0$ na Figura 26, mantendo desta forma a frequência de 5kHz para a portadora.

Foram necessários dois canais distintos de PWM para a realização do acionamento dos IGBT's, sendo um o inverso do outro, para isso bastou a configuração do registrador CPOL(PWM CMR_x).

O controlador desenvolvido foi mostrado anteriormente na Figura 17, onde é visto seu esquemático. Como falado anteriormente, devido a característica não desejadas do controlador PI operando em um conversor CC-CA, neste projeto o controlador consistirá em um controlador PI em paralelo com o filtro ressonante.

Para encontrar os valores para os ganhos do controlador PI foram utilizadas as equações (3.11) e (3.12). A Tabela 5 mostra os parâmetros estabelecidos e os valores dos ganhos.

$F_{CL}(Hz)$	mfi ()	Vcc (V)	$L_{conv}(mH)$	Hi	KP _i	KI _i
600	70	24	3	1	0,5	1500

Tabela 5 – Parâmetros do sistema simulado.

Já para o filtro ressonante, será utilizado a equação (3.13), sendo que as constantes adotadas foram as seguintes:

- $k_1 = 10$;
- $\omega_c = \pi$;
- $\omega_o = 120\pi$;

Logo, (3.13) torna-se:

$$H(s) = 10 \frac{(2\pi)s}{s^2 + (2\pi)s + (120\pi)^2} \quad (4.1)$$

Com as constantes definidas é preciso efetuar a discretização da equação (4.1), para que está possa ser escrita na forma de equações de diferenças. Neste trabalho a discretização foi realizada através do método ZOH (Zero-Order Holder), conforme discutido na seção 3.8, Figura 18.

Desta forma a equação do filtro ressonante $H(s)$ deve ser aplicada na equação abaixo, para assim ser obtido a equação discretizada $H(z)$, que neste caso foi discretizado através do comando ***** no MatLab.

$$H(z) = (1 - z^{-1})Z\left[\frac{H(s)}{s}\right] \quad (4.2)$$

Neste trabalho foi utilizado o software MatLab para execução desta discretização, o período de amostragem utilizado foi de 0,0002s, desta forma foi obtido a seguinte equação de diferenças:

$$y[k] = (x_1 * e[k - 1]) + (x_2 * e[k - 2]) + (x_3 * y[k - 1]) + (x_4 * y[k - 2]) \quad (4.3)$$

Sendo:

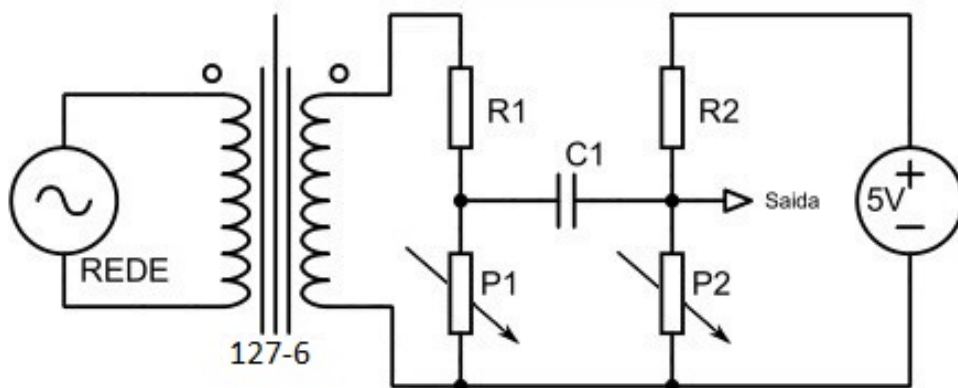
- $x_1 = 0,01255$;
- $x_2 = -0,01255$;
- $x_3 = 1,993$;
- $x_4 = -0,9987$.

4.1.3 Medidores de Corrente e Tensão

Estes dois circuitos são responsáveis pela leitura de tensão da rede e corrente de saída do conversor. Como o Arduino Due tem conversores A/D capazes de trabalhar apenas com tensão contínua (0V a 3.3V) e tanto a tensão da rede quanto a corrente de saída do conversor são senoidais (e, portanto, possuem valores negativos em dados momentos) foi necessário a implementação de circuitos de condicionamento de sinais capazes de realizar ganhos de *offset* para os dois casos, fazendo com que suas senoides ficassem compreendidas no *range* do Arduino e que sua referência fosse deslocada para 1.65V.

Para a montagem do circuito de leitura da tensão da rede, responsável por sincronizar o conversor à rede, foi utilizado o circuito mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Esquemático do circuito medidor de tensão.

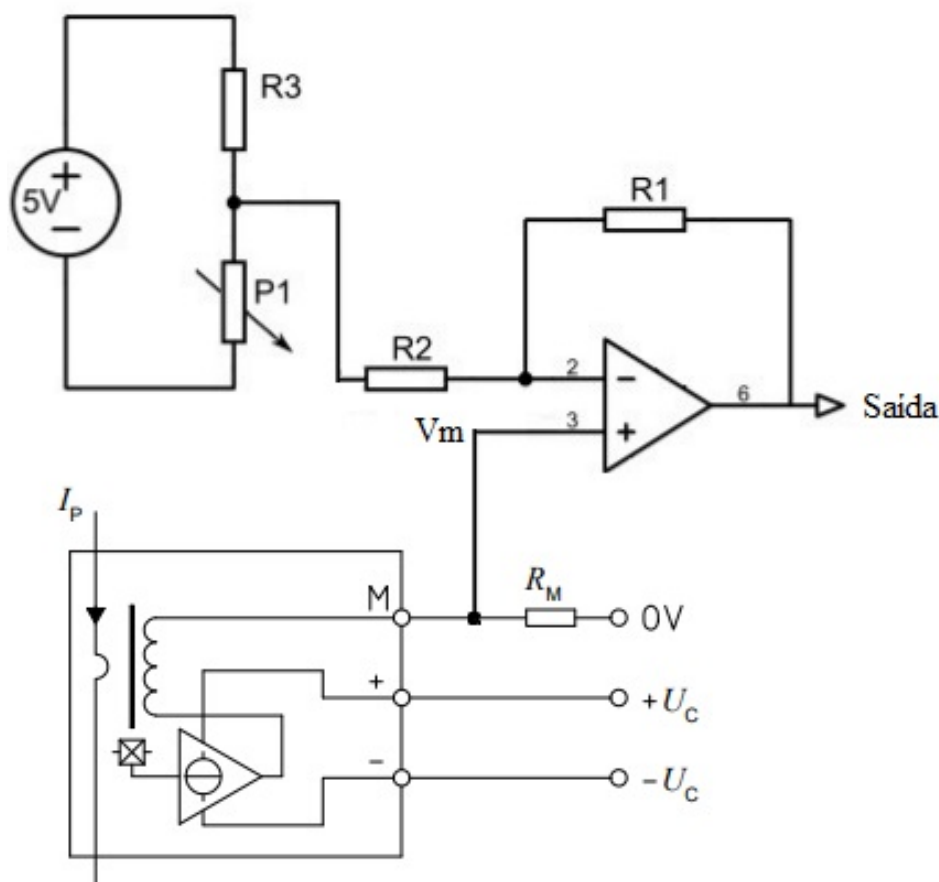


Este circuito utiliza primeiramente um transformador abaixador (127:6) e depois faz uso do divisor de tensão, composto por R1 e P1 para atenuar a amplitude de pico a pico da senoide para 3.3V. O offset é obtido através do divisor de tensão composto por R3 e P2, que faz com que a tensão em P2 seja exatamente 1,65V, o sinal alternado é colocado através do capacitor de acoplamento C1, fazendo com que a senoide seja somada ao valor de offset, elevando sua referência para 1,65V.

Já o circuito de leitura da corrente de saída do conversor foi implementado com o sensor de corrente modelo LEM LA 55-P, de corrente máxima de 50A. Para obter uma leitura mais fiel, foram realizadas dez espiras, aumentando sua sensibilidade e fazendo com que a corrente máxima medida fosse de 5A. A corrente então podia ser medida em forma de tensão sobre a resistência R_m , em relação de 1:1 (após correto ajuste de R_m).

Para realizar o *offset* no circuito de leitura de corrente, foi utilizado um amplificador operacional na configuração não inversora com terra deslocado, levando a referência da saída para 1,65V. O esquemático do circuito pode ser visto na Figura 28.

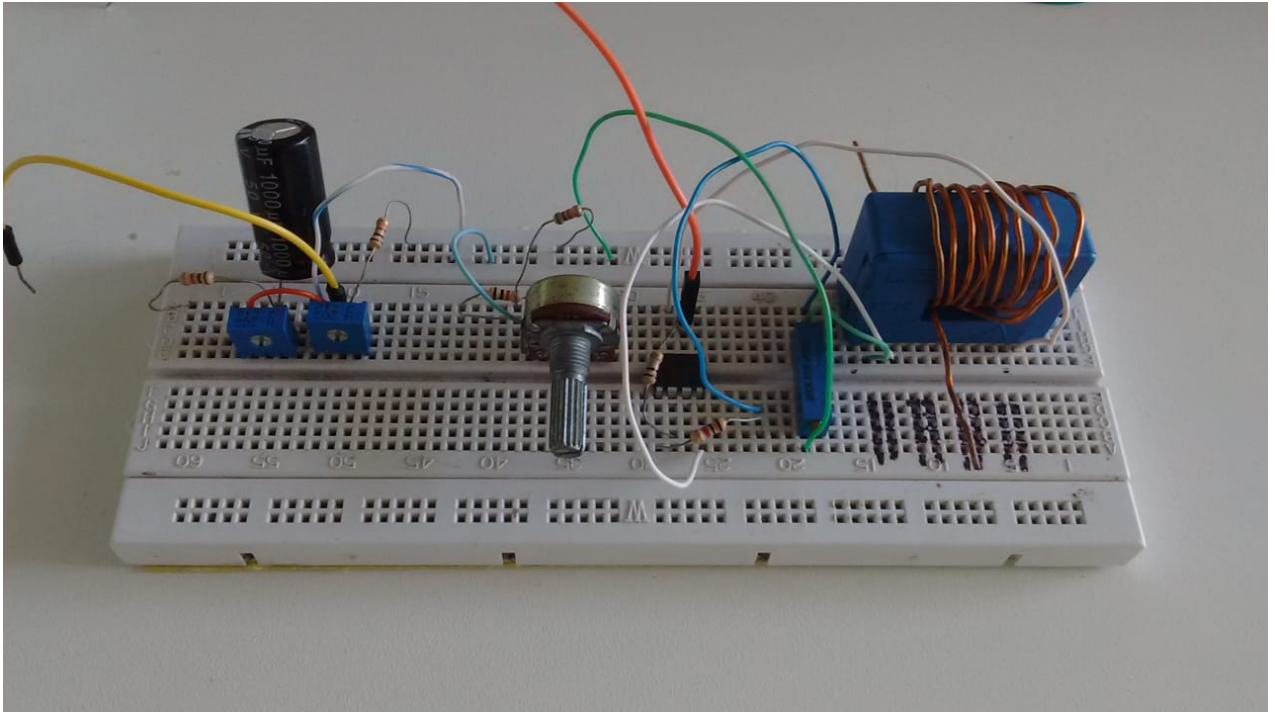
Figura 28 – Esquemático do circuito medidor de corrente composto pelo sensor LEM LA 55-P e um circuito de AMP-OP para *offset*.



Estes dois circuitos foram montados em protoboard e podem ser vistos na Figura

29.

Figura 29 – Montagem em protoboard dos circuitos de leitura de corrente e tensão.



Em ambos os circuitos foram utilizados resistores variáveis com o intuito de facilitar os acertos do *offset* e do ganho aplicado. Isso facilitou a adequação dos sinais lidos aos 3.3V do conversor A/D do arduíno Due.

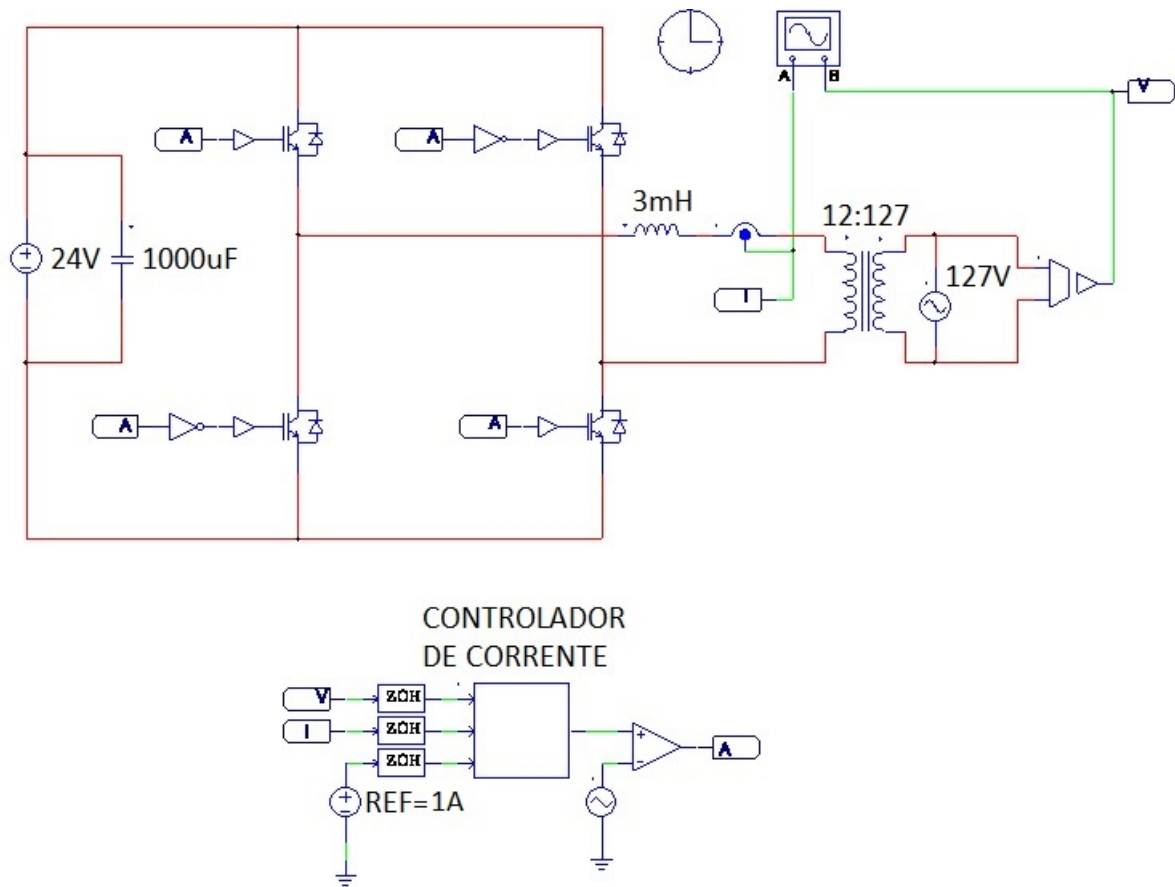
4.2 Simulação

As simulações serão realizadas no software PSIM, e tem como objetivo principal verificar o correto funcionamento da unidade de controle projetada, validando todos os cálculos feitos na seção anterior. O diagrama do circuito simulado é mostrado na Figura 30.

No PSIM o controlador de corrente foi desenvolvido em bloco de programação via código C, mesma linguagem que será utilizada no arduíno DUE. A tensão da rede e a corrente de saída do conversor são váriaveis de entrada, além de um sinal de tensão que indica o valor de referência desejado da corrente de saída do conversor.

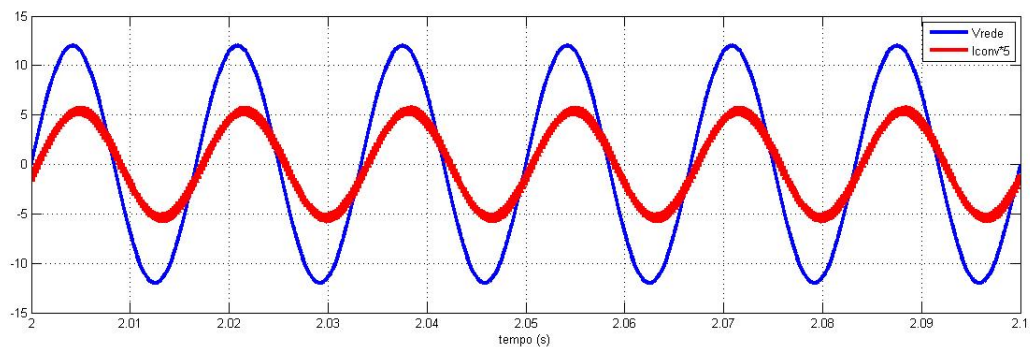
O PWM está implementado na saída do bloco de programação através de um amplificador operacional, a portadora utilizada é uma onda triangular de 5kHz. Para gerar os sinais complementares que vão para dois dos IGBT's foi utilizado portas NOT, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Diagrama da simulação no Software PSIM.



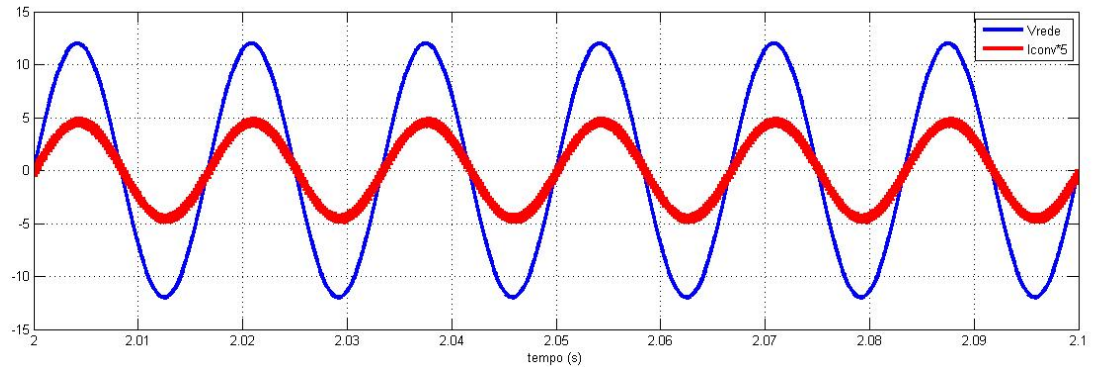
Para verificação da influência que o filtro ressonante causa no funcionamento do conversor controlado em regime permanente, primeiramente será realizada a simulação do controlador do diagrama de blocos da Figura 16, que não possui o filtro ressonante. A Figura 31 mostra o resultado obtido.

Figura 31 – Saída do conversor sem o uso de filtro ressonante na simulação.



Então, seguindo o diagrama de blocos da Figura 17, foi implementado o controlador utilizando o filtro ressonante em paralelo com o controlador PI. Na figura 32 é mostrado a saída do conversor para este caso.

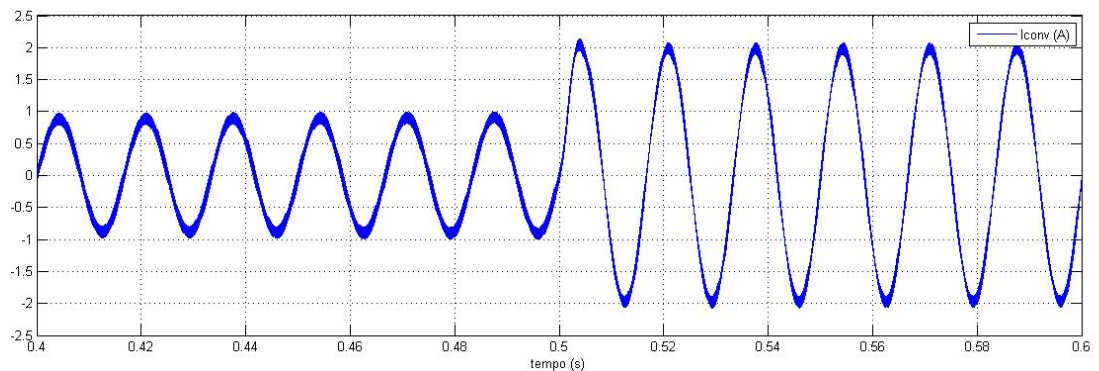
Figura 32 – Saída do conversor com o uso do filtro ressonante na simulação.



Analisando as formas de onda obtidas na simulação é possível observar a influência positiva do filtro ressonante. O controlador utilizando apenas os ganhos PI apesar de ter sido capaz de gerar uma corrente senoidal, teve uma diferença de fase maior do que se comparado ao controlador que utiliza o filtro ressonante.

Por fim foi conferido a capacidade do controlador de corrente de acompanhar variações no valor de referência desejado, A figura 33 mostra o comportamento do conversor controlado quando a referência de corrente é alterada de 1A para 2A.

Figura 33 – Corrente de saída em variação do valor de referência de corrente de 1A para 2A.



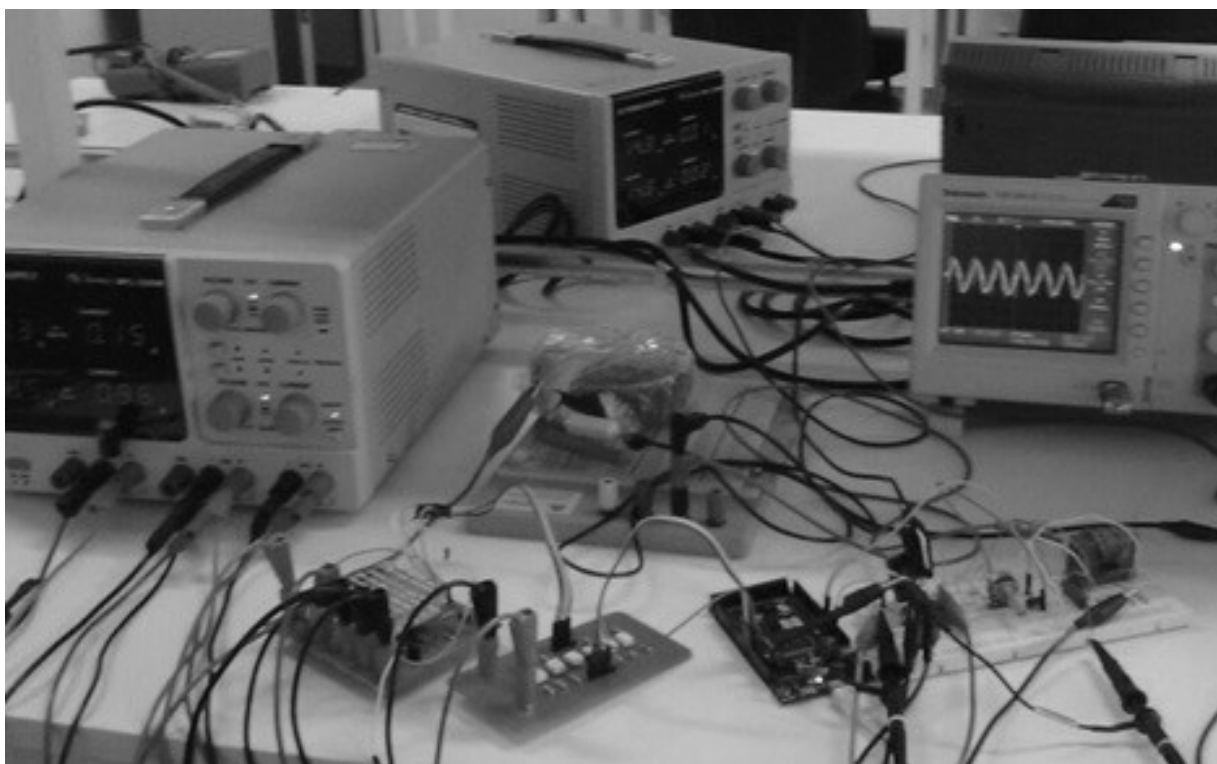
Desta forma é atestado que na simulação o conversor CC-CA com controlador de corrente teve o desempenho buscado, sendo capaz de fornecer corrente em fase para a rede,

efetuando o controle da corrente fornecida.

4.3 Testes práticos

Após a simulação, o próximo passo foi realizar os testes na montagem prática, que foi feita em laboratório, Figura 34. Foram utilizando todos os sistemas anteriormente citados, e os testes tem como objetivo validar as simulações confirmando o correto funcionamento do conversor CC-CA controlado em corrente projetado.

Figura 34 – Bancada de testes do Conversor CC-CA.



Na entrada do conversor foi utilizado baterias de 12V, Figura 36, com associação de duas foi obtido o valor desejado de 24V. Para proteção do arduino DUE foi usado opto-aclopadores (4N25) para ligação do sinal de controle aos IGBT's do conversor. Além disso foi utilizado um transformador elevador, Figura 36, para elevar a tensão de saída do conversor à tensão da rede elétrica de 127V.

Novamente, serão mostradas as formas de onda na saída do conversor conectado à rede para dois cenários distintos, assim como realizado na simulação. Estes testes foram feitos a princípio com o conversor isolado da rede elétrica, visando primeiro verificar seu correto funcionamento para depois conecta-lo à rede.

Figura 35 – Bateria utilizado nos testes.



Figura 36 – Transformador utilizado para conectar o conversor à rede.



As Figuras 37 e 38 apresentam as formas de ondas obtidas nos circuitos medidores de corrente e tensão, o valor de referência da corrente foi de 1A de pico.

Figura 37 – Saída do conversor sem o uso do filtro ressonante na montagem prática, sendo: CH1 = I_{conv} (medidor de corrente) e CH2 = V_{rede} (medidor de tensão).

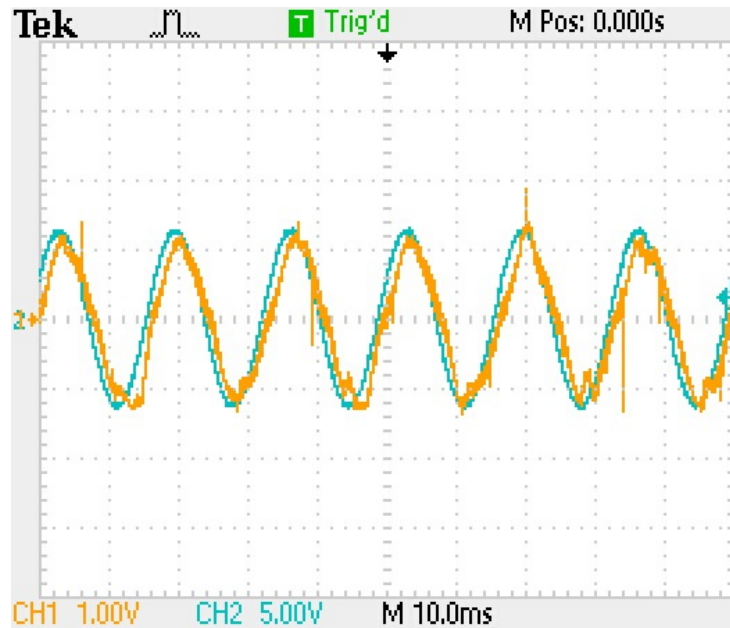
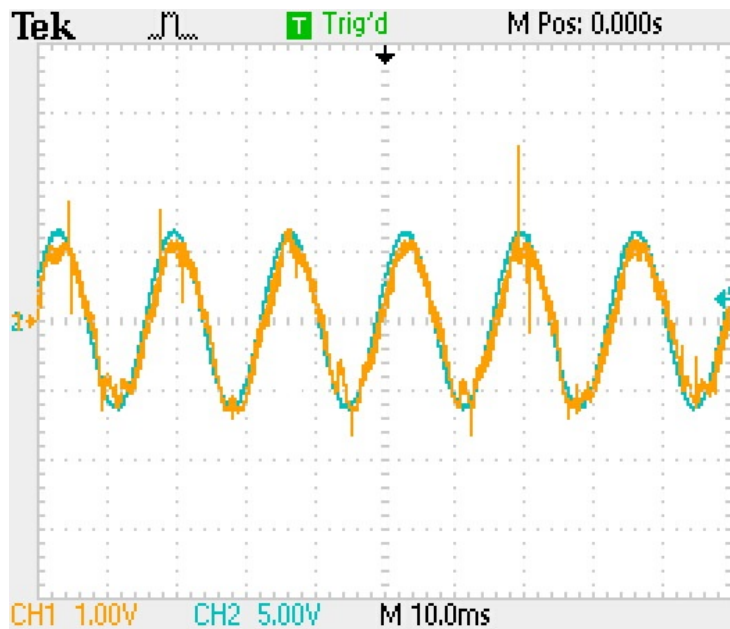


Figura 38 – Saída do conversor com o uso do filtro ressonante na montagem prática, sendo: CH1 = I_{conv} (medidor de corrente) e CH2 = V_{rede} (medidor de tensão).



De maneira semelhante ao ocorrido na simulação, novamente nota-se o efeito positivo do filtro ressonante, sendo capaz de colocar corrente a saída do conversor mais próxima da fase da tensão da rede.

Então, com o conversor conectado à rede elétrica, foi obtida a forma de onda apresentada nas Figura 39 e 40, que mostra a corrente de saída do conversor para referência em 2A.

Figura 39 – Corrente de saída do conversor conectado à rede.

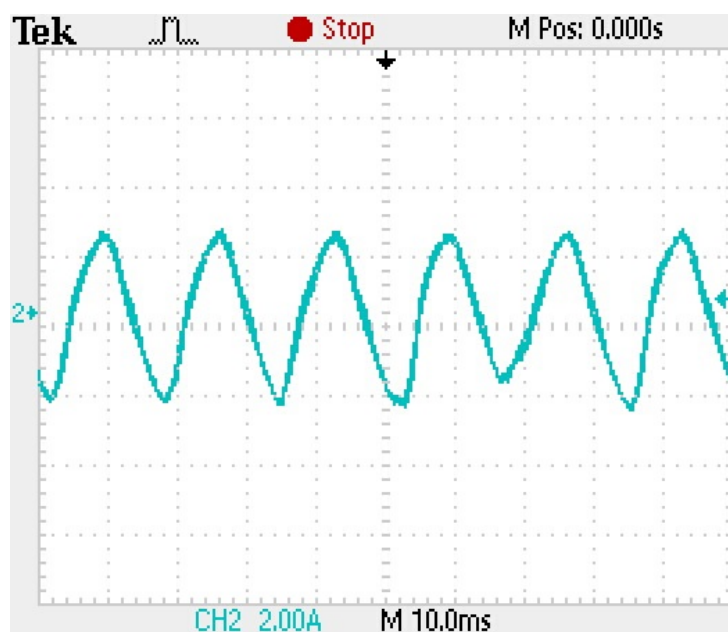
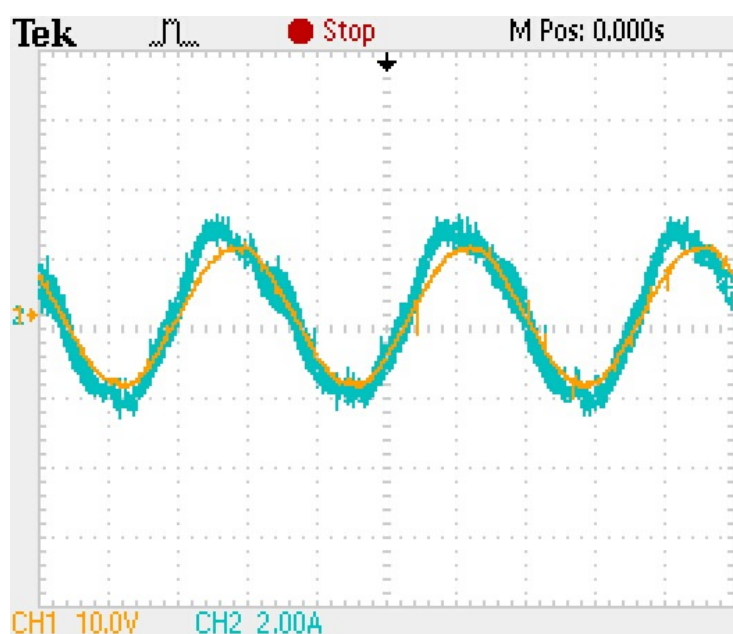


Figura 40 – Corrente de saída do conversor conectado à rede e tensão da rede.



5 Considerações finais

5.1 Conclusão

Diversos estudos apontam a grande necessidade de acompanhar a crescente na demanda de energia elétrica, que acompanha o aumento do desenvolvimento industrial e a expansão demográfica. Com isso faz-se necessária a ampliação do sistema de geração, seja no Brasil ou no mundo. Uma forma de fugir um pouco da geração centralizada como única opção para isto foi obtida com a Geração Distribuída, trazendo a oportunidade de conciliar a capacidade de suprir a demanda de forma rápida e limpa, com as fontes de energia renováveis que são a base da Geração Distribuída.

Com isso o desenvolvimento de todos os dispositivos e componentes necessários para o avanço tecnológico da Geração Distribuída como um todo tem sido constantemente buscado, tais pesquisas visam aumentar a eficiência possibilitando que as fontes renováveis possam quebrar a última fronteira que falta para se estabelecerem de vez no mundo atual, a viabilidade financeira, o que já está sendo alcançado atualmente. Visto isso governos do mundo inteiro tem cada vez mais apoiado esse tipo de conceito, e o que já era realidade a alguns anos em países da Europa tem também ganhado forças em países emergentes como o Brasil, que hoje possui várias leis e regulamentações que ajudam no crescimento dessas tecnologias.

Este trabalho segue está ideia, fazendo o desenvolvimento de um conversor monofásico simples e de fácil implementação. Utilizando os conceitos já bem firmados para a realização do conversor CC-CA, que foi feito com topologia em ponte completa, PWM bipolar senoidal, filtro L de saída e uma malha de controle de corrente, contando com controlador PI em paralelo com um filtro ressonante.

As simulações no software PSIM, foram determinantes para atestar o correto funcionamento do controlador PI, bem como do correto funcionamento do filtro ressonante. Além disso foi testado a base do código que posteriormente foi implementado no arduíno DUE para os testes práticos.

Os resultados obtidos com os testes foram corretos, o conversor foi capaz de ser acoplado à rede elétrica fornecendo potência a ela. Ficou claro a contribuição positiva que o filtro ressonante levou a malha de controle, fazendo com que a fase da corrente fornecida pelo conversor ficasse bem mais próxima da fase da rede.

Como possibilidades de melhora para este projeto, dois pontos podem ser destacados: Utilização de um indutor com maior indutância ou substituição do filtro L por um filtro LCL, e aumento da frequência de chaveamento. Ambos pontos possibilitariam a obtenção de uma senoide mais fiel na saída, suprimindo as harmônicas geradas e garantindo um

conversor CC-CA mais otimizado.

Por fim, o trabalho mostrou que de forma simples foi implementado um conversor capaz de cumprir seu papel de conectar uma fonte de energia CC a uma rede convencional CA, ampliando o horizonte para diversos outros testes que podem ser realizados, como situações de ilhamento e controle de potência.

5.2 Possibilidades para trabalhos futuros

O desenvolvimento da placa com o CI FNA41560 e seu circuito de acionamento proporcina vislumbrar diversos outros trabalhos de eletrônica de potência, que utilizam chaveamento para unidades de potência, como: conversores CC-CC, inversores de frequência para motores CA, conversores CC-CA trifásicos, etc.

Em relação o presente trabalho, é possível fazer diversas melhorias e comparações em relação ao conversor CC-CA desenvolvido, dentre elas:

- Estudo do funcionamento das demais topologias de conversor CC-CA utilizando o CI FNA41560;
- Utilização de maiores frequências de chaveamento e de diferentes filtros;
- Implementação da técnica PLL;
- Testes de detecção de ilhamento;
- Verificação das condições de conexão;
- Desenvolvimento de um conversor CC-CA trifásico de baixa potência.

Referências

- ABNT. *Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 16149 Sistemas fotovoltaicos - Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição*. 2014. 26
- ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica - Resolução Normativa 482*. 2012. 3, 8
- ANEEL. *Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída*. 2016. 7
- ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 3*. 2016. 4, 6, 24
- BLAABJERG, F. et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 53, n. 5, p. 1398–1409, 2006. 22, 23
- BOLZON, A. D. S. *Estudo e Implementação de um Conversor Bidirecional CC-CA MONOFÁSICO DE DOIS ESTÁGIOS COMO INTERFACE ENTRE UMA NANORREDE E A REDE ELÉTRICA*. Dissertação (Mestrado) — UFMG, 2014. 11
- BRAUN-GRABOLLE, P. *A Integração de Sistemas Solares Fotovoltaicos em Larga Escala no Sistemas Elétrico de Distribuição Urbana*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. 3, 6, 7
- CASSIUS, R. A. *Estudo e Análise de Algoritmos de Detecção de Ilhamento em Sistemas de Geração Distribuída Conectados à Rede de Distribuição*. Dissertação (Mestrado) — São Carlos: USP, 2012. 23
- CEMIG. *Companhia Energética de Minas Gerais - ND 5.30: Requisitos para a Conexão de Acessantes ao Sistema de Distribuição Cemig D – Conexão em Baixa Tensão*. 2014. 2, 3
- EPE. *Empresa de Pesquisa Energética: Estudos da Demanda de Energia - Demanda de Energia 2050*. 2014. 1, 2
- EPE. *Empresa de Pesquisa Energética: Recursos Energéticos - Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos*. 2016. 25, 26
- FAIRCHILD. *Motor Drive Solutions*. 2010. 13
- GONZATTI, R. B. *Controle PLL-Less para Filtros Ativos Híbridos Baseado em Compensadores Ressonantes*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2012. 22
- GONÇALVES, A. F. Q. *Sistema de Geração Distribuída Controlado em Tensão e Potência e Utilizado de Forma Isolada ou Conectado à Rede de Distribuição*. Dissertação (Mestrado) — São Carlos: USP, 2015. 1, 21
- MACHADO, R. Q. *Sistema de Geração Distribuída com Fontes CA e CC Conectado a Rede Monofásica e Controle Eletrônico da Qualidade da Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2005. 20

- MAFARÃO, F. P. *Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2004. 23, 24
- MARANGONI, F. *Inversores Monofásicos para Conexão de Sistemas Fotovoltaicos à Rede*. Dissertação (Mestrado) — Pato Branco: UTFPR, 2012. 6, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 19, 23, 29
- NAKABAYASHI, R. *Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica*. 2015. 3, 8
- NARUTO, D. T. *Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica*. 2010. 7, 8
- PACHECO, J. O. *Desenvolvimento de um Sistema Didático para Ensino de Conversores CC-CA com Monitoramento por Microcontroladores*. Monografia (Pos Graduação). 2012. 9, 14
- PAUKNER, F. L. *Comparação do Controle do Inversor Trifásico Conectado à Rede Com Filtro LCL Considerando o Amortecimento Passivo e Ativo*. Dissertação (Mestrado) — Pato Branco: UTFPR, 2016. 9, 10, 16
- TEODORESCU, R. et al. Synchronization Methods for Three Phase Distributed Power Generation Systems. An Overview and Evaluation. In: IEEE. *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.], 2005. 22, 23

6 Anexos

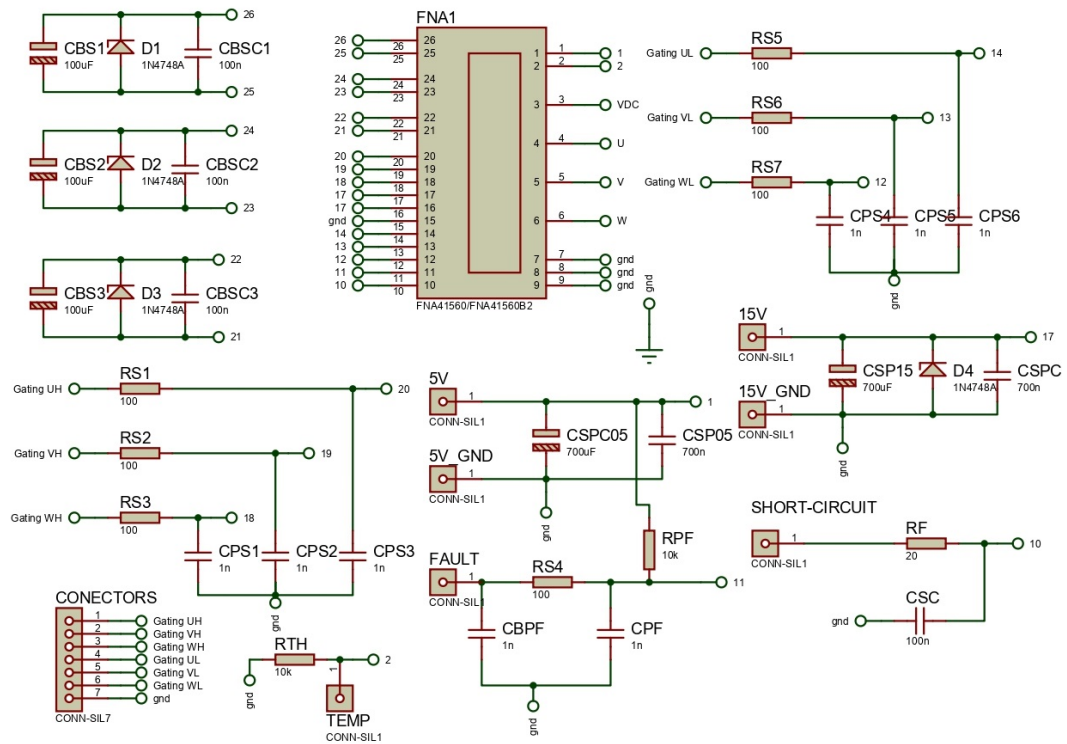


Figura 41 – Esquemático do FNA41560 montado pelo Software Proteus, correspondente ao circuito da Figura 21.

Componentes	Quantidade	Nomenclatura
resistor 100 Ω 1/4 W	8	RS e RPF
capacitor 1nF	8	CPS, CBPF e CPF
diodo zener 22V/1W	4	D1,D2,D3 e D4
capacitor 0,1uF eletrolítico 50V	3	CBS
capacitor 0,1uF cerâmico	3	CBSC
capacitor 0,68uF eletrolítico 50V	2	CSP15 e CSPC05
capacitor 330nF poliester	2	CSPC15 e CSP05
resistor de 1k Ω	1	RTH
capacitor de 10nF poliester	1	CSC
resistor de 200 Ω	1	RF

Tabela 6 – Componentes utilizados na montagem do circuito FNA41560.