



# Otimização da energia produzida por sistemas fotovoltaicos de autoconsumo

**FABIANO PERETTI**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial (Ramo Engenharia Eletrotécnica), no âmbito do acordo de dupla diplomação firmado com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Câmpus Pato Branco.

*Supervisionado por*

Prof. Dr. Américo Vicente Teixeira Leite

Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira

Bragança

Novembro de 2020





# Otimização da energia produzida por sistemas fotovoltaicos de autoconsumo

**FABIANO PERETTI**

*Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial (Ramo Engenharia Eletrotécnica), no âmbito do acordo de dupla diplomação firmado com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Câmpus Pato Branco.*

*Supervisionado por*

Prof. Dr. Américo Vicente Teixeira Leite

Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira

Bragança

Novembro de 2020



# Agradecimentos

Tudo o que eu escrever aqui certamente é pouco para agradecer todo o apoio fornecido por essas pessoas nesta etapa muito importante em minha vida, tanto profissional como pessoal.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Deus, pela chance de dar o meu melhor todos os dias, pela oportunidade de poder viajar para Portugal e ampliar minhas capacidades profissionais e sociais, e por colocar tantas pessoas maravilhosas no meu caminho.

Ao meu orientador, Professor Doutor Américo Vicente Teixeira Leite, por todo conhecimento transmitido a mim especialmente durante o processo criativo de construção. O senhor contribuiu muito para a minha formação como profissional e ser humano.

À minha família, sobretudo aos meus pais Vanilde e Albino e meu irmão Bruno, porque sem eles nada seria possível. Obrigado por todo apoio e motivação demonstrados mesmo a uma distância tão grande, sem vocês não seria possível superar tantos dias difíceis.

À minha querida namorada Rafaela, pelo grande incentivo no dia a dia e pela companhia desde o período em que ainda estávamos distantes, por todo carinho e dedicação e finalmente por trazer tantas alegrias nesse período importante da minha vida.

Ao meu grande amigo Luiz Alexandre, que ainda distante me auxiliou com várias horas de discussão e reflexão sobre os mais variados assuntos, pelo ânimo e pela disponibilidade.

À todos meus amigos de longa data e também às fortes amizades criadas em Bragança, um enorme obrigado, por todos os momentos que vivemos juntos, pelo estímulo e apoio, vocês tornaram esse ano inesquecível.

E por último, mas não menos importante, um obrigado às minhas companheiras de moradia, pelos momentos de motivação, por terem sido minha família em Portugal e também por me ajudarem a superar os momentos difíceis.

À todos meu Muito Obrigado.

# Resumo

O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver uma solução inovadora com aplicação em um contexto real, que permita o reaproveitamento da energia produzida por sistemas fotovoltaicos residenciais, operantes na configuração de autoconsumo sem o auxílio de um banco de baterias. Geralmente esses sistemas injetam na rede da concessionária o excedente da potência gerada que não é consumida instantaneamente, e isso a um preço menor do que o preço de compra. A partir dessa problemática, desenvolveu-se um sistema "*plug and play*" de baixo custo baseado em eletrônica analógica, que tem a capacidade de monitorar a potência ativa média que o sistema está consumindo ou injetando na rede da concessionária, e realocar a maior parcela das sobras de potência para uma resistência inserida em um boiler. Dessa maneira o excedente de energia elétrica é transformada em energia térmica, passando a auxiliar o sistema de AQS principal da residência, podendo gerar para o auto consumidor uma boa economia no fim do mês. Conseguiu-se desenvolver o sistema na teoria e implementá-lo na prática, realizando alguns testes e melhorias no ambiente laboratorial. Os resultados obtidos foram muito prósperos, demonstrando que o sistema tem capacidade de reaproveitar em média 80% da energia excedente proveniente das fotovoltaicas. O sistema construído na prática é baseado em dispositivos integrados analógicos como o gerador de onda PWM TL494CN, um multiplicador analógico AD633JN, um sistema de comando baseado em acoplador óptico HCPL-J314 e um conversor DC-DC isolado. Também foram construídos uma fonte simétrica de  $\pm 15V$  para alimentação geral do circuito e um conversor DC-DC de potência, utilizado para dissipar a potência excedente na resistência inserida no boiler.

**Palavras-chave:** Autoconsumo; Fotovoltaico; Reaproveitamento; Baixo custo; AQS.

# Abstract

This work aims to develop an innovative solution with application in a real context, which allows the reuse of energy produced by residential photovoltaic systems, operating in the self-consumption configuration without the aid of a battery bank. Generally, these systems inject the surplus of the generated power into the utility grid that is not consumed instantly, and this at a lower price than the purchase price. Based on this problem, a low cost "plug and play" system was developed based on analog electronics, which has the ability to monitor the average active power that the system is consuming or injecting into the concessionaire's network, and reallocating the largest portion of the remaining power for a resistance inserted in a boiler. In this way, the surplus of electrical energy is transformed into thermal energy, starting to assist the main domestic hot water system of the residence, which can generate for the self-consumer good savings at the end of the month. It was possible to develop the system in theory and implement it in practice, performing some tests and improvements in the laboratory environment. The results obtained were very successful, showing that the system has the capacity to reuse an average of 80% of the excess energy from photovoltaics. The system built in practice is based on integrated analog devices such as the PWM wave generator TL494CN, an analog multiplier AD633JN, a control system based on HCPL-J314 optical coupler and an isolated DC-DC converter. A symmetrical power supply of  $\pm 15V$  was also built for general circuit power and a DC-DC power converter, used to dissipate the excess power in the resistance inserted in the boiler.

**Keywords: Self-consumption; Photovoltaic; Reuse; Low cost; Domestic hot water.**



# Conteúdo

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Acrônimos</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Estrutura do Documento . . . . .	2
<b>2 Enquadramento Legal, Descrição e Contextualização do Desafio</b>	<b>5</b>
<b>3 Descrição Geral da Solução</b>	<b>13</b>
3.1 Cálculo de Potência . . . . .	13
3.1.1 Potência Instantânea e Média . . . . .	13
3.1.2 Multiplicador Analógico . . . . .	15
3.1.3 Filtro Passa-Baixo Passivo . . . . .	16
3.2 Controle e PWM . . . . .	17
3.2.1 Gerador PWM . . . . .	17
3.3 Comando isolado . . . . .	20
3.3.1 <i>Driver</i> . . . . .	20
3.3.2 Conversor DC-DC Isolado . . . . .	21
3.4 Retificador AC/DC . . . . .	22
3.4.1 Retificadores de Onda Completa . . . . .	22
3.5 Fontes $\pm 15V$ . . . . .	23
3.5.1 Reguladores de tensão . . . . .	23

3.6	Conversor DC/DC . . . . .	24
3.6.1	Conversor DC/DC Chaveado . . . . .	24
3.6.2	IGBT . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Solução</b>	<b>27</b>
4.1	Cálculo de Potência . . . . .	27
4.2	Sistema de Controle . . . . .	37
4.3	Circuito de comando e de Potência . . . . .	43
4.4	Fontes . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>49</b>
5.1	Ensaio em Malha Aberta . . . . .	51
5.2	Ensaio em Malha Fechada . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Discussão e Análise</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>65</b>
	<b>Referências</b>	<b>67</b>

# Lista de Tabelas

5.1 Resultados do ensaio a malha fechada . . . . .	60
--	----



# Lista de Figuras

2.1	Contribuição desenvolvida para o desafio. . . . .	12
3.1	Gráfico da variação potência instantânea no tempo para um circuito qualquer. Adaptado de [9]. . . . .	15
3.2	Esquema de pinagem do CI, juntamente com um diagrama de blocos do seu funcionamento [Fonte: Folha de dados do fabricante]. . . . .	16
3.3	Esquemático de um filtro passa baixo à partir de um circuito RC. . . . .	16
3.4	Obtenção de uma onda PWM á partir de um sinal de controle. . . . .	18
3.5	Diagrama de blocos que representa o TL494CN [Fonte: Folha de dados do fabricante]. . . . .	19
3.6	Esquema de ligação interna de um HCPL-J314 [Fonte: Folha de dados do fabricante]. . . . .	21
3.7	Representação da porção da onda refletida pelo retificador. . . . .	22
3.8	Sugestão de implementação para fonte simétrica $\pm 15V - 1A$ [Fonte: Folha de dados do fabricante]. . . . .	24
3.9	Um conversor DC-DC chaveado básico. Adaptado de [10]. . . . .	25
3.10	Gráfico da tensão sobre a carga $R_L$ no tempo. Adaptado de [10]. . . . .	25
4.1	Modelo elétrico do circuito de uma residência alimentada com tensão monofásica. . . . .	28
4.2	Determinação das correntes para a análise de Kirchhoff do modelo. . . . .	29
4.3	Decomposição da corrente provenientes da concessionária nos eixo direto e em quadratura em relação à tensão da mesma. . . . .	30
4.4	Análise fasorial do modelo para o caso indutivo. . . . .	31
4.5	Divisor de tensão. . . . .	33
4.6	Circuito final de medição da potência média (ativa). . . . .	36
4.7	Sistema de controle geral em malha fechada. . . . .	37
4.8	Modelo atualizado da residência com a inserção da resistência nova no boiler. . . . .	38

4.9	Sistema de controle detalhado com malha fechada. . . . .	38
4.10	Demonstração da lógica abordada para a entrada do TL494CN. . . . .	40
4.11	Amplificador inversor com deslocamento da saída. . . . .	41
4.12	Circuito final para a etapa de controle por PWM. . . . .	42
4.13	Retificador de AC-DC para o circuito de potência. . . . .	43
4.14	Conversor DC-DC para o circuito de potência. . . . .	44
4.15	Circuito de comando, baseado em acoplador óptico, utilizado para acionar a chave de maneira isolada. . . . .	45
4.16	Circuito final para a fonte simétrica dedicada ao projeto. . . . .	46
4.17	Circuito final para a fonte isolada +15V, utilizada para o comando da chave do circuito de potência. . . . .	47
5.1	Circuito final para o dispositivo proposto. . . . .	49
5.2	Implementação prática do circuito concebido. . . . .	50
5.3	Montagem do sistema para o ensaio em malha aberta. . . . .	51
5.4	Resultados práticos obtidos a partir de um osciloscópio. . . . .	53
5.5	Layout das PCBs obtido com o software EAGLE, vistas superiores. . . . .	54
5.6	Resultado da construção da PCB de potência. . . . .	55
5.7	Montagem do novo layout dos circuitos. . . . .	56
5.8	Novos resultados obtidos com o novo layout, para o ensaio a malha aberta. . .	57
5.9	Componentes da estrutura construída para o ensaio a malha fechada. . . . .	59

# Acrônimos

<b>AC</b>	Alternating Current
<b>APESF</b>	Associação Portuguesa das Empresas do Sector Fotovoltaico
<b>APREN</b>	Associação Portuguesa de Energias Renováveis
<b>AQS</b>	Sistema de Água Quente Sanitária
<b>CI</b>	Circuito Integrado
<b>DC</b>	Direct Current
<b>DGEG</b>	Direção Geral de Energia e Geologia
<b>DIP</b>	Dual In-Line Package
<b>DTC</b>	Dead Time Control
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>MIBEL</b>	Mercado Ibérico de Energia Eléctrica
<b>MOSFET</b>	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
<b>NOR</b>	Not Or
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>PNEC</b>	Plano Nacional de Energia e Clima
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>RESP</b>	Rede Elétrica de Serviço Público
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>SERUP</b>	Sistema Eletrónico de Registro de Unidades de Produção
<b>SOIC</b>	Small-Outline Integrated Circuit
<b>UPAC</b>	Unidades de Produção para Autoconsumo
<b>UPP</b>	Unidades de Pequena Produção



# Lista de Símbolos

---

	Descrição	Unidade, se aplicável
$v(t)$	Tensão Variável no Tempo	Volts (V)
$i(t)$	Corrente Variável no Tempo	Ampere (A)
$p(t)$	Potência Instantânea	Volt Ampere (VA)
P	Potência Ativa Média	Watts (W)
V	Tensão	Volts (V)
I	Corrente Elétrica	Ampere (A)
R	Resistência	Ohm ( $\Omega$ )
L	Inductância	Henry (H)
C	Capacitância	Farad (F)
Z	Impedância	Ohm ( $\Omega$ )
$f$	Frequência	Hertz (Hz ou $s^{-1}$ )
$\omega$	Frequência Angular	Radianos por segundo (rad/s)
$t$	Tempo	Segundos (s ou $Hz^{-1}$ )
T	Período	Segundos (s ou $Hz^{-1}$ )
$\theta$	Defasagem de $I_C$ em relação a $V$	Graus ( $^\circ$ )
$\phi$	Defasagem de $I_Z$ em relação a $V$	Graus ( $^\circ$ )
$K_p$	Ganho Proporcional do Controlador	–

---



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

A produção e consumo de energia, nas mais diversas formas, é um fator importante no avanço da atividade humana. A crescente demanda por esses recursos, muitas vezes, desencadeia uma necessidade de exploração de novas fontes de energia. Atualmente, muitos países buscam aumentar sua sustentabilidade em termos energéticos através da exploração das energias renováveis [1].

Para aumentar a capacidade de produção de energia e conseguir suprir a alta demanda, os países vêm desenvolvendo diversas novas estratégias de produção de energia para, dessa forma, evitar o uso de combustíveis fósseis. Uma dessas estratégias consiste na produção local de energia elétrica, destinada quase inteiramente para autoconsumo, geralmente recorrendo a utilização de módulos fotovoltaicos como fontes geradoras [1].

A criação da legislação portuguesa para o autoconsumo e a sua recente atualização neste ultimo ano, são fatores que vieram facilitar o uso dessa estratégia para o consumidor local. Mas para que se consiga obter benefícios desse paradigma, é importante estudar as melhores técnicas para sua exploração, impactando dessa forma em um melhor aproveitamento de energia localmente e obter, assim, uma redução efetiva da fatura energética final [2].

Um problema que ronda a utilização de painéis fotovoltaicos como fonte para esse tipo de produção, é o fato de que o máximo de produção dos painéis e o pico de consumo em uma residência, normalmente não são coincidentes. Para contornar esse problema, geralmente se adiciona ao sistema um banco de baterias, que possibilita armazenar o excesso de energia produzido durante o dia para consumi-la em outro horário de necessidade, ou instala-se um dispositivo para realizar o gerenciamento de cargas durante o dia.

Porém, como é de conhecimento, baterias com uma capacidade moderada de armazenamento não são dispositivos baratos. Fato esse, que acaba encarecendo demais o sistema e impactando diretamente em um atraso no retorno do investimento como um todo. Com base nessa observação foram levantadas as seguintes questões: Seria possível encontrar uma maneira alternativa de armazenar energia, sem precisar investir em baterias? Ou então, será que não é possível desenvolver um sistema que pelo menos consiga aumentar a taxa de aproveitamento dessa energia localmente, sem utilizar baterias?

Dentro deste contexto, o presente trabalho pretende buscar uma solução inovadora para as dúvidas levantadas, empenhando-se em explorar ideias simples e de baixo custo com aplicação em contexto real.

## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo da presente dissertação consiste em desenvolver um sistema inovador de armazenamento de energia, que quando associado a um sistema fotovoltaico operante na configuração de autoconsumo, permita aumentar a taxa de energia renovável consumida localmente, impactando assim diretamente na redução do consumo de energias externas, de uma forma geral. Em seguida, o sistema desenvolvido deve ser validado experimentalmente.

## **1.3 Estrutura do Documento**

O documento está estruturado da seguinte forma, começamos com o Capítulo 2 que é dedicado ao Estado da Arte, o qual é muito importante para a contextualização do projeto sob os mais variados pontos de vista e que ajuda a justificar a motivação para o desenvolvimento da proposta aqui desenvolvida.

O Capítulo 3 apresenta uma Revisão Bibliográfica sobre os assuntos importantes para o desenvolvimento do projeto e também especifica alguns dispositivos que serão usados para obter a solução da proposta apresentada no Capítulo 2.

A seguir, no Capítulo 4, é demonstrada detalhadamente a abordagem escolhida para

solucionar a proposta do Capítulo 2, utilizando-se os recursos especificados no Capítulo 3, chegando, finalmente, em uma topologia que consiga atender todos, ou a grande maioria dos requisitos levantados na proposta.

O Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais obtidos com a solução levantada no Capítulo 4. No Capítulo 6 é feita toda a discussão e análise dos resultados experimentais, indicando o real comportamento da solução levantada considerando os problemas encontrados experimentalmente.

E, por fim, no Capítulo 7, são apontadas as conclusões finais referente a esse longo projeto, onde falaremos se a solução abordada atingiu as expectativas do projeto e qual foi o crescimento obtido durante todo esse período de trabalho. São, ainda, comentadas algumas sugestões para melhorias dos trabalhos futuros nessa linha de pesquisa.



## Capítulo 2

# Enquadramento Legal, Descrição e Contextualização do Desafio

Este capítulo descreve o “estado da arte” através da descrição e contextualização do problema (ou desafio), apresentado na introdução, bem como a contribuição desenvolvida para esse desafio. Como é conhecido, o Acordo de Paris estabeleceu uma meta global de longo prazo para contenção do aumento da temperatura média global, em um valor máximo de  $2^{\circ}\text{C}$  acima dos níveis pré-industriais, mas a comunidade internacional assumiu um compromisso de investir todos os esforços para que esse aumento não ultrapasse  $1,5^{\circ}\text{C}$ , pois esse é o valor que a ciência define como máximo para garantir a continuação da vida no planeta sem alterações [3].

Este Acordo representa uma mudança nos paradigmas de exploração dos recursos e desenvolvimento de tecnologias desse momento em diante. Agora, é importante reconhecer, explicitamente, que apenas com o contributo de todos é possível superar esse desafio e garantir a continuação da vida na terra como conhecemos.

Com tal motivação, muitas metas estão sendo criadas nos últimos tempos, como a busca pela redução das emissões de gases nocivos ao meio ambiente. Isso não exclui os setores relacionados à produção e utilização de energias. Como referido anteriormente, todas as áreas são significativas para garantir o resultado desejado.

Portugal, como um bom exemplo, vem mantendo uma posição de destaque no contexto internacional, no que diz respeito à redução das emissões de gases poluentes e também na larga utilização de energia proveniente de fontes renováveis, alcançando resultados bastante positivos nos últimos anos [4].

Essa busca do país pela neutralidade carbônica configura uma oportunidade única para

Portugal. Para nortear o desenvolvimento do país, o Plano Nacional de Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030), foi desenvolvido com uma forte componente participativa da sociedade, cujo contributo para uma visão estratégica para a próxima década é fundamental [5].

Seguindo a visão estratégica estabelecida para os vários setores, algumas metas foram definidas para o horizonte 2030 no âmbito da PNEC. Porém, a mais significativa, para a nossa área de pesquisa, é o interesse do país em reforçar a aposta nas energias renováveis e reduzir sua dependência energética. Para tal, Portugal irá reforçar a diversificação de fontes de energia apostando na utilização crescente e sustentável de recursos internos, promover o aumento da eletrificação da economia e incentivar pesquisas em tecnologias limpas [5].

Segundo o PNEC 2030, relativamente ao setor da eletricidade, prevê-se um reforço na exploração do potencial de energias renováveis com especial enfoque nas tecnologias solar e eólica, em paralelo com o estímulo à produção distribuída e o reforço e otimização das redes de transporte e distribuição. Espera-se, ainda, que o aumento da parcela de eletricidade proveniente de energia fotovoltaica evolua de 2% agora em 2020, para 9% em 2030 [5].

De acordo com a Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), Portugal encontra-se em 5º lugar no top mundial da inserção de energias renováveis na produção de eletricidade. E se o país está dando grandes passos no setor de energias limpas, para melhorar ainda mais o cenário, os seus habitantes podem contribuir também para reduzir as emissões de carbono, dando preferência a utilização de energia proveniente de fontes limpas sempre que possível [6].

O crescente interesse pela utilização das fontes renováveis de produção de energia elétrica, instaladas com a finalidade de benefício próprio ou venda em sua totalidade, levou a necessidade do desenvolvimento de uma legislação voltada a regulamentação da exploração dessas fontes de energia em Portugal.

A elaboração desse trabalho passou justamente pela transição de vigência do Decreto-Lei 153/2014, que regulamentou a exploração das fontes renováveis de energia elétrica em Portugal até o fim de 2019, quando entrou em vigor o novo Decreto-Lei 162/2019, que está atualmente em vigência.

Para uma melhor compreensão do contexto que motivou esse trabalho, teremos uma

---

breve explicação sobre ambos os Decretos-Leis, auxiliando, assim, o leitor, a obter um bom entendimento sobre o regulamento vigente, e conduzindo o mesmo a perceber o horizonte da proposta.

Os Decretos-Leis regulamentam dois tipos de instalações, ambos produzindo energia elétrica a partir de fontes renováveis. A diferença é que se a produção é destinada inteiramente à venda, essa instalação é denominada de Unidade de Pequena Produção (UPP), mas se a produção é destinada a suprir as necessidades de consumo próprio, a instalação é denominada de Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC). É importante notar que as UPPs não são o foco desse trabalho, por isso será utilizada apenas a parte da legislação que tem finalidade de regulamentar as UPACs.

Inúmeras são as vantagens que se obtêm em instalar uma UPAC, seja em residências ou empresas. Um exemplo é diminuir a dependência da energia proveniente das concessionárias, agregar valores a empresa por utilizar uma energia proveniente de fontes renováveis e, por último, mas não menos importante, reduzir os custos com compra de energia elétrica.

Para poder usufruir desse último benefício, é importante que se saiba explorar essas fontes de maneira eficiente, evitando desperdícios e garantindo um rápido tempo de retorno do investimento inicial, que geralmente não é baixo. Para isso, é necessário conhecer como é a dinâmica da fonte de produção de energia, qual é a finalidade do investimento que está sendo feito e qual é a sua demanda de energia.

O antigo Decreto-Lei 153/2014, regulamentava as UPACs de acordo com a potência de instalação, ou seja, subdividia as instalações em 3 subgrupos denominados de escalões. Sendo eles:

- Escalão 1 – Sistemas com uma potência até 200 W que podiam ser instalados e ligados à rede do local de consumo sem qualquer tipo de autorização ou registro. O excesso eventual da produção não era remunerado.
- Escalão 2 – Uma UPAC com potência de 200 W até 1500 W podia ser instalada e ligada à rede sem autorização prévia. Contudo, o sistema devia ser registrado no Sistema Eletrônico de Registo de Unidades de Produção (SERUP) para que fosse contabilizado

nas estatísticas nacionais da produção de energia. Também devia ser comunicada a configuração do contador de energia. O excesso eventual de produção de energia não era remunerado. Um auto consumidor que queira receber uma compensação monetária para a energia injetada na Rede Elétrica de Serviços Públicos (RESP) tem de integrar o sistema no Escalão 3.

- Escalão 3 – Sistemas com uma potência superior aos 1500 W e até 1 MW careciam de autorização prévia. Após a sua instalação, eram objeto de uma inspeção técnica. Só depois de receber o certificado de exploração podiam ser colocados em funcionamento. Estes sistemas necessitavam de um contador de tele-contagem para enviar os dados totais de produção às entidades públicas, nomeadamente à Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) [7].

É visível que na legislação anterior a complexidade aumentava progressivamente do escalão 1 ao 3. Assim, quanto maior o nível de potência necessária, maiores seriam também as burocracias e dificuldades para realizar a ativação da UPAC. Inclusive, essa mesma complexidade se aplicava aos auto consumidores que queriam ter algum retorno do excesso de energia que seria cedido a rede, em períodos de baixo consumo.

Segundo um estudo feito pela Associação Portuguesa das Empresas do Sector Fotovoltaico (APESF), a produção de energia efetuada por uma UPAC tem um custo de operação, seja em manutenção ou investimento. Po isso, estima-se que a poupança na fatura energética por cada unidade de energia (kWh) consumida localmente para consumidores industriais fica em torno de 9-12cts€/kWh, enquanto que para os consumidores particulares, o valor é da ordem de 23cts€/kWh [7].

Agora com relação aos valores de venda do excesso da produção de energia elétrica, a tarifa é definida pela legislação em 90% do preço da energia comercializada no Mercado Ibérico de Energia Elétrica (MIBEL). Sabendo que nos últimos anos o preço do mercado variou entre 4-6cts€/kWh, logo a remuneração do excesso de produção injetada na RESP varia entre 3,6-5,4cts€/kWh [7].

É muito importante perceber que o preço pago pelos excessos de energia injetados na RESP,

---

é geralmente inferior ao custo de produção, tornando totalmente inviável a implementação de um valor de potência maior que o necessário para suprir a demanda local.

Fica claro nessa legislação que não é interessante para o auto consumidor, que se enquadra em qualquer escalão, fazer a instalação de painéis com um nível de potência superior ao da demanda instantânea durante o período de insolação, sem que se tenha um bom sistema de armazenado de energia, como por exemplo bancos de baterias.

Com a atualização da legislação que regulamenta o autoconsumo da energia renovável, efetuado pelo Decreto-Lei 162/2019, que veio com a proposta de promover e facilitar o autoconsumo de energia e as comunidades de energia renovável, e também criando condições para o estabelecimento de soluções inovadoras, o cenário agora se altera parcialmente.

A classificação das UPACs também foi alterada, não sendo mais dividida por escalões. Agora, a divisão é feita apenas pela potência. É importante notar também que as burocracias para ativar unidades de potências maiores diminuíram, como podemos notar:

- A UPAC, com potência instalada igual ou inferior a 350 W, não está sujeita a controlo prévio.
- A UPAC, com potência instalada superior a 350 W e igual ou inferior a 30 kW, está sujeita a mera comunicação prévia.
- A UPAC, com potência instalada superior a 30 kW e igual ou inferior a 1 MW, está sujeita a registro prévio e a certificado de exploração.
- A UPAC, com potência instalada superior 1 MW, está sujeita a atribuição de licença de produção e de exploração.

A política de remuneração para a energia excedente do autoconsumo também foi atualizada com o Decreto-Lei 162/2019, agora a tarifação não está mais definida rigidamente à 90% do valor da energia comercializada pelo MIBEL, abrindo assim possibilidade para ser transacionada no mercado organizado ou bilateral.

Essa flexibilização não abre portas para que se possa obter um ótimo retorno com a energia excedente injetada na RESP. O objetivo de quem instala uma UPAC voltada para o

autoconsumo, é sempre dimensioná-la da melhor forma para garantir a maior aproximação possível da energia produzida com a quantidade de energia consumida pelo auto consumidor.

Devido a essas questões apontadas acima, o que se faz hoje em dia para conseguir usufruir bem desses sistemas é realizar um bom gerenciamento das cargas da unidade consumidora, quando possível, de modo que se possa alterar o horário de uso dessas cargas ativando-as no período de insolação, para assim aproximar a região de máxima produção do painel com a de maior consumo da residência.

Outra alternativa também, como já mencionado antes, é fazer o uso de um banco de baterias para armazenar essa energia excedente, possibilitando assim utilizá-la em outros períodos do dia, à custa de um elevado investimento no sistema, pois as baterias hoje em dia são ainda dispositivos geralmente muito caros.

O desafio proposto neste trabalho é desenvolver um sistema de armazenamento de energia não usual, que quando associado a uma configuração de autoconsumo, permita um melhor aproveitamento da energia proveniente da UPAC, diminuindo assim a necessidade de se instalar um banco de baterias com uma alternativa de baixo custo.

A ideia é que, esse dispositivo seja capaz de perceber a quantidade de potência excedente instantaneamente nos momentos de baixo consumo, e utilize essa energia de alguma forma que traga benefícios para o consumo da residência, tendo um retorno maior do que teria se estivessem sendo injetados na rede a um custo zero.

Lembrando que geralmente uma residência possui gastos com mais de um tipo de energia, como por exemplo a energia térmica, geralmente utilizando-se gás ou até mesmo derivados de petróleo como fonte de calor. Assim, nasceu a ideia de explorar alguma forma de utilizar essa energia excedente das UPACs, transformando-a em algum outro tipo de energia.

Geralmente as casas em Portugal possuem um Sistema de Água Quente Sanitária (AQS). Esse sistema é, muitas vezes, composto por um reservatório de água quente que pode ser aquecido por uma resistência elétrica, queima de gás natural, gásóleo ou *pellets*, ou até mesmo por sistemas mais complexos como as bombas de calor, que por sua vez, são consideradas no país como fontes renováveis.

O ponto importante é que, se esses sistemas, ao invés de precisarem aquecer a água a

---

temperatura ambiente puderem já partir de uma temperatura inicial maior que o ambiente, o gasto de energia necessário por esses equipamentos para atingir a temperatura final na hora de necessidade, deve ser menor. Com efeito, os combustíveis podem ser muito mais caros para adquirir do que se recebe por vender a eletricidade.

Como a água é um fluido que tem um alto valor de calor específico, uma vez aquecida, esse fluido demora muito tempo para perder seu calor naturalmente, e essa característica ainda é melhorada nos sistema com um reservatório isolado [8].

Finalmente, juntando esses pontos, podemos explicar a proposta do trabalho desenvolvido aqui, que é justamente utilizar a energia excedente dos painéis fotovoltaicos, os quais possuem uma alta produção durante o dia. Neste período, onde geralmente não tem ninguém em casa e o consumo é baixo, redirecionamos essa energia para aquecer a água do reservatório do sistema de AQS da residência, permitindo assim que se possa gerar uma economia na queima de combustíveis quando esse sistema for solicitado mais tarde.

Essa solução ainda pode ser bem interessante se aplicada, por exemplo, em uma habitação residencial nova, onde há interesse do proprietário em instalar coletores solares térmicos juntamente com módulos fotovoltaicos. Com a redução do custo dos módulos fotovoltaicos nos últimos anos, juntamente com a maior facilidade do seu licenciamento com a legislação atual, pode ser mais vantajoso aumentar a potência fotovoltaica instalada, do que investir em um sistema de coletores solares térmicos.

Um requisito de suma importância que deve ser levado em conta nesse projeto, é a criação de um sistema de gerenciamento, que possibilite desligar o dispositivo de aquecimento auxiliar, assim que a temperatura máxima do boiler seja alcançada. Tal assunto não será aprofundado nesta dissertação por atraso de projeto devido à pandemia mundial do Corona Vírus.

Caso o reservatório adotado seja compartilhado diretamente com o sistema de AQS principal da residência, esse sistema de gerenciamento, deve ainda ser capaz de restringir, durante alguns horários específicos do dia, o período de trabalho do sistema principal de aquecimento. Se essa restrição não for bem definida, o dispositivo aqui proposto perderá grande parte de seu potencial de economia, pois se o reservatório de água já estiver aquecido

quando tivermos radiação solar a energia sobressalente continuará sendo "desperdiçada" na RESP.

No decorrer do desenvolvimento do projeto, não foram encontrados no mercado equipamentos que realizem a mesma função, pelo menos da mesma maneira que foi proposta por esse trabalho. Isso, motivou ainda mais a construção de tal equipamento, com a promessa de resolver um problema do mundo real, que parece até o momento muito pouco explorado. A contribuição desenvolvida para esse desafio está demonstrada na Figura 2.1, que será descrita melhor no capítulo seguinte.

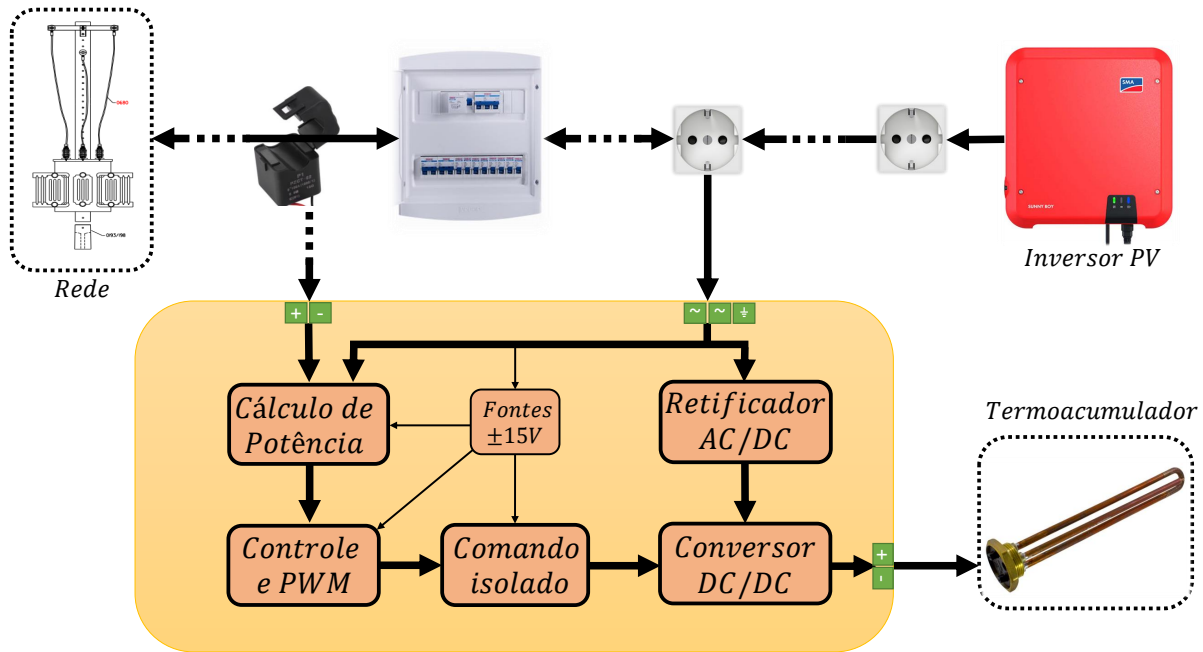


Figura 2.1: Contribuição desenvolvida para o desafio.

# Capítulo 3

## Descrição Geral da Solução

Neste capítulo será apresentada a funcionalidade dos blocos que foram retratados anteriormente pela Figura 2.1, demonstrando também os principais conceitos e componentes que serão utilizados para obter esta solução.

### 3.1 Cálculo de Potência

Este bloco é responsável, pela amostragem dos sinais necessários e cálculo da potência ativa média que está sobrando no sistema, devido ao excesso de produção, resultando assim em um sinal de tensão que deve representar, para as etapas seguintes, a condição de potência ativa do sistema.

#### 3.1.1 Potência Instantânea e Média

Potência instantânea  $p(t)$  (em VA) é a potência absorvida por um elemento em dado instante de tempo. A potência instantânea absorvida por um elemento é o produto da tensão instantânea  $v(t)$  no elemento pela corrente instantânea  $i(t)$  que passa através dele [9].

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (3.1)$$

Consideremos o caso geral de potência instantânea absorvida por uma associação arbitrária de elementos de circuito sob excitação senoidal. Levando em conta que a tensão e a

corrente nos terminais do circuito sejam

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad (3.2)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad (3.3)$$

onde  $V_m$  e  $I_m$  são as amplitudes,  $\theta_v$  e  $\theta_i$  são, respectivamente, os ângulos de fase da tensão e da corrente e  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  o período de ambos os sinais. Assim, a potência instantânea absorvida pelo circuito é

$$p(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i) \quad (3.4)$$

que também pode ser escrito da seguinte maneira, aplicando as identidades trigonométricas corretas.

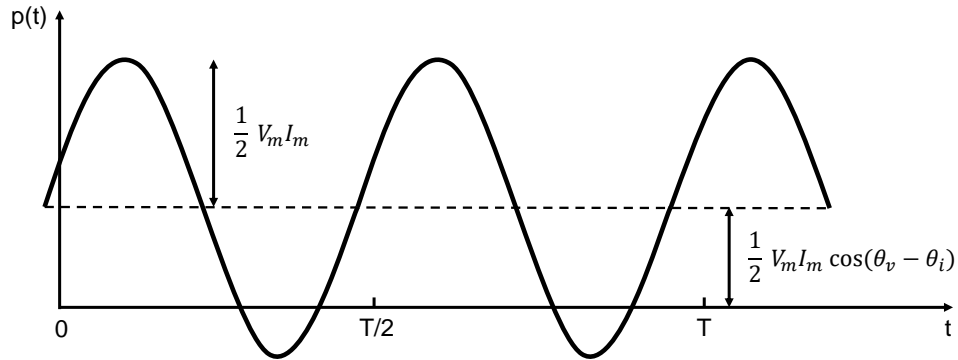
$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{1}{2} V_m I_m \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) \quad (3.5)$$

Com isso podemos perceber que a potência instantânea é composta por duas partes, uma independente e outra dependente do tempo e com o dobro da frequência angular da tensão e da corrente. Um gráfico de  $p(t)$  é mostrado abaixo na Figura 3.1, onde  $T$  é o período da tensão ou corrente. Aqui podemos perceber que a potência instantânea pode variar entre valores positivos e negativos, isso significa que nos instantes em que a onda está com valores positivos o circuito está absorvendo energia, e nos instantes em que ela está negativa a fonte de energia é quem está consumindo potência, isso ocorre devido aos elementos reativos do sistema que armazenam energia [9].

Assim, temos que, por período, a potência média que está realmente sendo consumida pela carga, chamada de potência ativa  $P$ , em watts, pode ser encontrada através do valor médio da onda de potência instantânea. Assim temos que a potência ativa do circuito é dada por

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (3.6)$$

Finalmente, se aplicarmos a Equação 3.5 na integral da Equação 3.6 obtemos o valor da potência ativa em termos dos parâmetros presentes nos terminais do elemento. Como podemos ver a seguir na Equação 3.7.



**Figura 3.1:** Gráfico da variação potência instantânea no tempo para um circuito qualquer. Adaptado de [9].

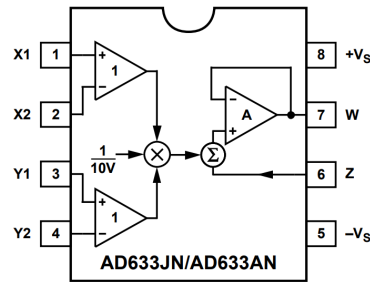
$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \quad (3.7)$$

#### 3.1.2 Multiplicador Analógico

Um multiplicador analógico, assim como o nome já diz, possui a função de multiplicar sinais analógicos que lhe são fornecidos, portanto esse dispositivo é necessário para que possamos realizar a multiplicação entre os sinais de tensão e corrente presentes na entrada da residência, assim como demonstrado pela Equação 3.1, resultando na onda de potência instantânea que o sistema está consumindo. O multiplicador escolhido para a aplicação desse projeto foi o circuito integrado AD633JN. Essa escolha deu-se a disponibilidade desse circuito integrado no laboratório e também pelas suas características funcionais. Segue abaixo a Equação 3.8 que define o funcionamento desse dispositivo, precedido pela Figura 3.2 com o diagrama de blocos do CI em questão, para facilitar a compreensão de sua funcionalidade.

$$W = \frac{(X1 - X2)(Y1 - Y2)}{10V} + Z \quad (3.8)$$

As características elétricas fornecidos pelo fabricante dizem que este integrado pode ser alimentado com tensões de  $\pm 8V$  até  $\pm 18V$ , porém, com um máximo de performance em

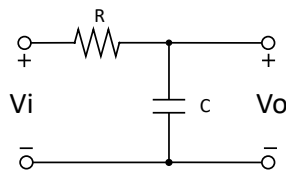


**Figura 3.2:** Esquema de pinagem do CI, juntamente com um diagrama de blocos do seu funcionamento [Fonte: Folha de dados do fabricante].

$\pm 15V$ . Já com relação aos sinais de tensão das entradas, elas podem variar entre  $\pm 10V$  e sua saída entre  $\pm 11V$ .

### 3.1.3 Filtro Passa-Baixo Passivo

Como já é amplamente conhecido, uma forma elementar para construção de um filtro passa-baixo é a partir de um circuito RC como ilustrado na Figura 3.3. Neste circuito o elemento capacitivo tem comportamento dinâmico com relação à frequência. Para baixas frequências ele possui uma reatância muito maior do que a resistência associada, comportando-se como um circuito aberto e deixando a maior parte da tensão na saída. Já para altas frequências seu comportamento é o oposto, a reatância capacitiva se torna muito menor do que a resistência e assim o elemento se comporta próximo a um curto-circuito, deixando a maior parcela da tensão sobre o resistor, diminuindo assim a magnitude da oscilação na saída. Esse dispositivo é necessário para que possamos obter o valor médio da onda de potência instantânea obtida na saída do multiplicador analógico, assim conseguimos obter o valor de potência ativa média do sistema diretamente dessa onda, alcançando de forma simples o resultado da Equação 3.7, que será utilizado pelas etapas seguintes.



**Figura 3.3:** Esquemático de um filtro passa baixo à partir de um circuito RC.

Um elemento que ainda deve ser entendido para que possamos evoluir para o projeto desse filtro é a frequência de corte  $\omega_c$ . A frequência de corte é a frequência na qual a magnitude da tensão na saída desse filtro é aproximadamente 70% do valor da tensão na sua entrada. Assim, conseguimos chegar na Equação 3.9 que nada mais é do que a equação necessária para projetar os elementos de um filtro passivo passa-baixo [9].

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (3.9)$$

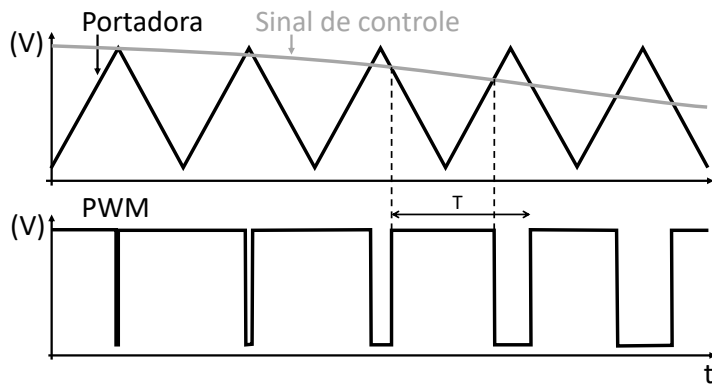
## 3.2 Controle e PWM

O bloco que realiza o controle do sistema é responsável pela análise do sinal proveniente do filtro passa-baixo, obtendo assim o erro do sistema, onde é aplicado o ganho proporcional necessário para obter a resposta desejada, sendo essa, a injeção nula de potência na rede. Após isso o mesmo é responsável por gerar um sinal PWM, que é utilizado para acionar nas etapas seguintes o circuito de potência.

### 3.2.1 Gerador PWM

Relembrando que a sigla PWM vem do inglês *Pulse Width Modulation*, que significa Modulação de Largura de Pulso, nada mais é do que uma forma de controlar uma grandeza, muitas vezes tensão, através de uma onda quadrada de magnitude e frequência constantes. Essa onda é obtida pela comparação do sinal de controle, sinal que se deseja modular, com uma onda chamada de portadora, que na maioria das vezes é triangular, como pode ser visto na Figura 3.4.

Já que a magnitude e a frequência da onda gerada são constantes, o único parâmetro que é variável e que se utiliza para transportar a informação das características da onda de controle, é justamente a largura de cada pulso, como se pode verificar na imagem anterior. O interessante de utilizar essa técnica, é que podemos modular todas as formas de sinais, variáveis ou não no tempo, através de uma onda quadrada, possibilitando assim utilizar



**Figura 3.4:** Obtenção de uma onda PWM a partir de um sinal de controle.

técnicas mais fáceis para transmitir potências específicas a dispositivos robustos, como motores e cargas elevadas.

Importante notar que se obtivermos o valor médio (ou a componente fundamental) do sinal PWM gerado à saída, a partir de uma onda de controle DC (ou AC), iremos ver uma onda com exatamente a mesma forma que a onda de controle (modulante), mas provavelmente com magnitude diferente dependendo do projeto. Portanto se o sinal modulante for DC, a saída é DC e teremos um conversor DC-DC, por outro lado, se o sinal modulante for AC (por exemplo senoidal), a saída será AC (senoidal) e teremos, assim, um conversor DC-AC, ou também conhecido como inversor. Esse princípio é muito utilizado por exemplo nos *drivers* dos conversores chaveados e também no controle de motores.

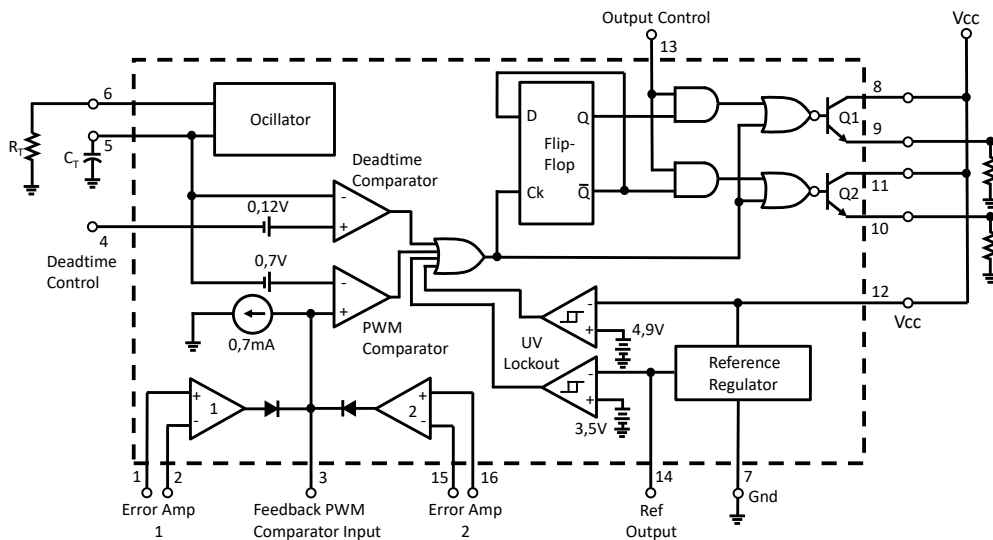
No mercado existem muitos dispositivos integrados que possuem todas as funções necessárias para a construção de um circuito de controle PWM, em um único chip, alguns deles muito utilizados, como é o caso do TL494CN que será usado neste projeto, e que foi originalmente projetado para o controle de fontes de alimentação. É importante referir que a escolha deste integrado se deu devido a afinidade de trabalho e a principalmente sua grande disponibilidade no laboratório utilizado.

Segundo o fabricante, o circuito integrado possui dois amplificadores de erro, onde conseguimos obter o sinal de erro e aplicar o ganho do controlador proporcional, com faixa de operação de  $-0,3V$  a  $VCC - 2V$ , um oscilador ajustável no chip que pode ser utilizado ou não, um controle de tempo morto por comparador (DTC) que possui um deslocamento

### 3.2. Controle e PWM

fixo de 5%, um *flip-flop* de controle de direção de pulso, um regulador interno de 5V com precisão de 5% e circuitos de controle de saída que podem ser operados por *push-pull* ou *single-ended*.

É importante salientar algumas características específicas desse componente. Em primeiro lugar, a lógica de funcionamento do PWM é inversa pois como podemos ver no diagrama de blocos da Figura 3.5, o acionamento dos transistores de saída é precedido por uma porta NOR que inverte a lógica de acionamento. É possível, também, escolher a frequência de oscilação  $f_{OSC}$  da onda triangular a partir da alteração dos componentes  $R_T$  e  $C_T$  demonstrados na mesma figura, a partir da Equação 3.10. Por último, o fabricante do dispositivo recomenda o uso de capacitores de desacoplamento para as fonte de alimentação, pois o mesmo é sensível aos ruídos provenientes do chaveamento.



**Figura 3.5:** Diagrama de blocos que representa o TL494CN [Fonte: Folha de dados do fabricante].

$$f_{osc} = \frac{1}{R_T C_T} \quad (3.10)$$

### 3.3 Comando isolado

O bloco de comando é responsável pelo acionamento do circuito de potência através do sinal de saída do gerador PWM. O mesmo é composto por um *driver* isolado, juntamente com uma fonte isolada, para que possamos alcançar um nível de proteção entre os sistemas eletrônicos de controle e de potência, evitando assim também a propagação de ruídos.

#### 3.3.1 *Driver*

Na eletrônica um *driver* é um circuito capaz de acoplar um circuito de controle com o circuito que se deseja controlar. Muitas vezes o circuito de controle desenvolvido não opera na mesma faixa de tensão que o circuito controlado, ou até mesmo, não possui capacidade de fornecer a corrente necessária para acionar os dispositivos utilizados como meio de controle. Existem muitas topologias para *drivers* de chaves eletrônicas, muitas podem ser com, ou sem, isolamento entre a parte de comando e a sua saída. Esse isolamento muitas vezes pode ser implementado com o uso de um circuito acoplador óptico.

Circuitos acopladores ópticos são dispositivos que permitem obter um isolamento elétrico entre dois circuitos, geralmente porque um deles é muito sensível e necessita de certa proteção. Esse elemento é composto basicamente por um LED emissor de luz e um fototransistor sensível ao espectro da fonte emissora, ambos encontram-se dentro de um invólucro de encapsulamento. A grande vantagem de utilizar esse integrado é que, além do isolamento elétrico, o mecanismo de chaveamento óptico é muito rápido, possibilitando maiores faixas de frequência de trabalho.

O circuito integrado que escolhemos é da família HCPL-J314, que são circuitos específicos para o comando (*driver*) de MOSFETs/IGBTs, com isolamento óptico. Essa escolha foi baseada na grande disponibilidade desse CI no laboratório utilizado e também por ser um dispositivo ideal para disparar IGBTs.

Esse integrado, segundo o fabricante, pode ser alimentado por fontes de 10V a 30V, a porta de entrada é ativada com correntes entre 8 e 12mA e, por fim, a saída é composta por 2 transistores associados, como podemos ver na Figura 3.6, onde temos o esquema de ligação

### 3.3. Comando isolado

---

interna do dispositivo.

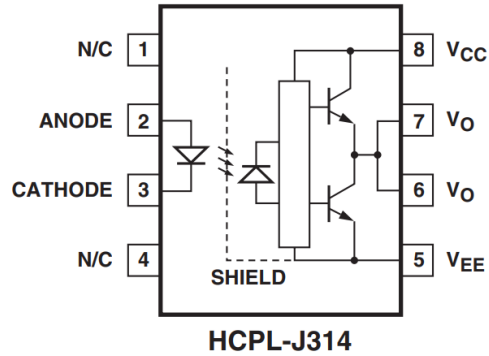


Figura 3.6: Esquema de ligação interna de um HCPL-J314 [Fonte: Folha de dados do fabricante].

#### 3.3.2 Conversor DC-DC Isolado

Como vimos na seção anterior, utilizamos um *driver* isolado para acionamento do IGBT, isso se deve ao fato de querermos controlar, com sinais DC de baixa tensão, um circuito de potência que trabalha com uma tensão DC elevada. Portanto precisamos desacoplar as referências de ambos os circuitos, para que não circule uma corrente elevada pelo aterramento, que possa danificar algum componente do circuito de controle, evitando também danos por sobretensão em algum dispositivo. Para garantir esse desacoplamento, precisamos, além da implementação de um *driver* isolado, utilizar uma fonte DC de baixa tensão também isolada para alimentar a saída desse *driver* e acionar assim o IGBT.

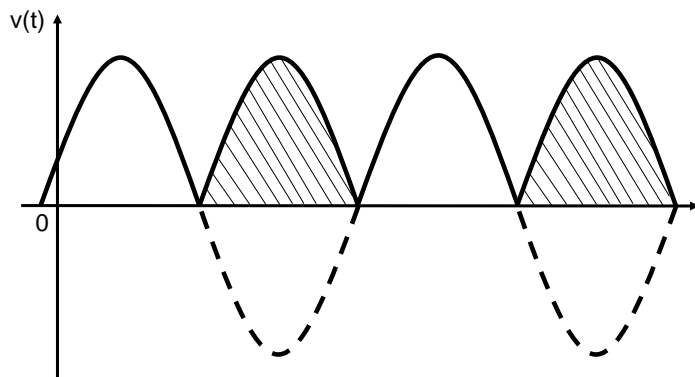
Para conseguir essa fonte utilizamos um dispositivo conversor DC-DC isolado, modelo MEJ2D1515SC, capaz de fornecer uma saída isolada de  $\pm 15V$  à partir de uma fonte de  $15V$ . O dispositivo possui dois pinos de entrada e três de saída, devido a possibilidade de criar uma fonte simétrica na saída, com uma capacidade de suprir uma carga de até  $2W$ . O mesmo apresenta uma elevada capacidade de isolamento elétrico, suportando até  $5,2kV$  DC, sendo mais que suficiente para a aplicação do nosso projeto.

## 3.4 Retificador AC/DC

O bloco de retificação que precede o conversor DC/DC de potência, é destinado exclusivamente à transformação da corrente alternada em corrente contínua, para que, assim, o controle do acionamento da carga seja facilitado.

### 3.4.1 Retificadores de Onda Completa

Estes dispositivos são fundamentais para o processo de transformação de tensões alternadas CA em tensões contínuas DC, eles possuem a capacidade de refletir a porção da onda que está no quadrante negativo para o positivo como podemos ver na Figura 3.7, ou vice-versa. Nessa imagem a tensão que está sendo retificada é de origem senoidal, a porção que está negativa é representada pela linha pontilhada, e na saída do retificador essa porção é refletida para o quadrante positivo, sendo representada agora pela área destacada. Portanto, a onda que teremos na saída será a soma da onda positiva mais a refletida, virando uma onda de pulsos com o dobro da frequência da onda inicial.



**Figura 3.7:** Representação da porção da onda refletida pelo retificador.

Como utilizaremos um retificador na construção das fontes, já iremos aproveitar a seção para mencionar o mesmo aqui. Nesse projeto foram usados dois dispositivos retificadores, o primeiro opera com um nível baixo de tensão retificando a onda fornecida pelo transformador

abaixador que está conectado na tomada, é essencial para construção das fontes internas de alimentação  $\pm 15V$ , que são utilizadas para alimentar todos os componentes eletrônicos do dispositivo. Já o segundo, destinado para a etapa de potência, opera com elevados níveis de tensão, e tem a função de retificar a onda proveniente da tomada para que posteriormente possamos aplicá-la na resistência do boiler. Ambos foram escolhidos com base na disponibilidade do laboratório e também com base nas suas características elétricas, como por exemplo o próprio nível de tensão e corrente.

O retificador de baixa tensão escolhido é o B40C 2300-1500, que têm a capacidade de suportar uma tensão alternada na entrada de até  $40V_{RMS}$ . Já o retificador de potência escolhido foi o FB1008, com capacidade de suportar uma tensão AC de entrada de até  $380V$  e com capacidade de fornecer uma corrente de até  $10A$ .

## 3.5 Fontes $\pm 15V$

O bloco das fontes é responsável pela alimentação dos componentes utilizados nos blocos de medição, controle e comando, por isso a qualidade de sua construção é muito importante. A implementação desse bloco torna nosso dispositivo independente de fontes externas de alimentação, se tornando assim um dispositivo de fácil manuseio e instalação.

### 3.5.1 Reguladores de tensão

Reguladores de tensão são dispositivos semicondutores que têm a capacidade de atenuar um faixa de tensão para um valor específico, ele é utilizado para a construção de fontes de alimentação nos mais variados projetos. Geralmente se injeta em sua entrada uma tensão não regulada, devido ao processo de retificação, esse dispositivo consegue regular essa tensão DC "poluída" para um valor específico que deve ser menor que essa faixa de variação.

Nesse projeto foram utilizados dois reguladores, devido a necessidade de se obter uma fonte simétrica para suprir as demandas do circuito, os modelos escolhidos foram o L7815, modelo que obtém uma tensão de  $+15V$  a partir de um valor de entrada entre  $18,5$  e  $30V$ , e o

L7915 que é o modelo que regula uma tensão de  $-15V$  a partir de uma entrada de  $-18,5$  e  $-30V$ , ambos conseguem entregar uma corrente de até  $1A$  em suas saídas.

Abaixo na Figura 3.8 segue uma topologia de implementação com esses integrados, para conseguirmos obter uma fonte simétrica de  $\pm 15V$  com corrente de até  $1A$ , essas informações são sugestões do próprio fabricante do dispositivo e pode ser encontrado facilmente nas folhas de dados dos integrados.

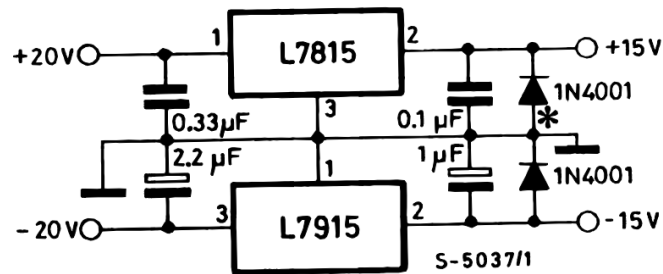


Figura 3.8: Sugestão de implementação para fonte simétrica  $\pm 15V - 1A$  [Fonte: Folha de dados do fabricante].

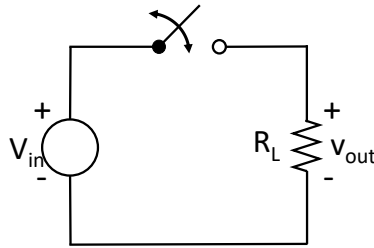
## 3.6 Conversor DC/DC

Esse bloco é responsável por proporcionar o controle da dissipação de potência na resistência do boiler apenas com o acionamento por PWM, através do circuito de comando, da chave eletrônica presente em sua topologia, possibilitando ligar e desligar a carga por um tempo desejado.

### 3.6.1 Conversor DC/DC Chaveado

Conversores DC-DC são circuitos eletrônicos de potência utilizados para converter diferentes níveis de tensão DC, fornecendo assim uma saída regulada [10]. Para entendermos melhor o conceito de um conversor chaveado básico, tomemos o circuito da Figura 3.9, que representa esse conversor, para analisarmos o seu funcionamento.

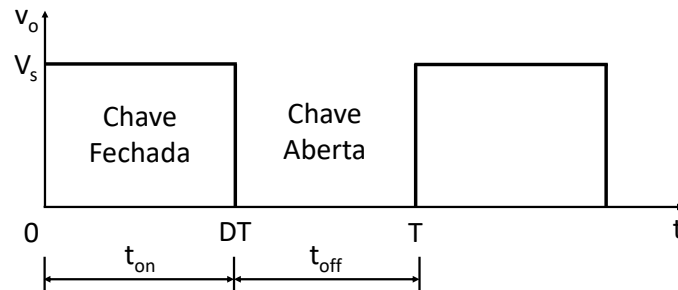
Vamos definir a fonte  $V_{in}$  como a tensão de entrada do conversor, e a tensão  $v_{out}$  sobre o resistor de carga  $R_L$ , como a tensão de saída desse conversor. A ligação da fonte com a carga



**Figura 3.9:** Um conversor DC-DC chaveado básico. Adaptado de [10].

ocorre por meio de uma chave, que pode abrir ou fechar o circuito a qualquer momento, vamos supor ainda que esta chave é ideal, ou seja, não possui perdas.

Quando a chave está fechada, a tensão da fonte é diretamente aplicada sobre a carga  $R_L$ , já quando a chave está aberta, não existe corrente no circuito e a tensão sobre a carga  $R_L$  é nula, como podemos ver no gráfico ilustrado na Figura 3.10.



**Figura 3.10:** Gráfico da tensão sobre a carga  $R_L$  no tempo. Adaptado de [10].

Vamos imaginar que essa variação é cíclica, tendo seu período (constante) representado por  $T$ . Dessa forma, podemos definir que o tempo em que a chave permanece conduzindo é dado por  $DT$ , sendo  $D$  um coeficiente chamado de ciclo de trabalho ou *Duty Cycle* dado por

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (3.11)$$

Com isso podemos definir a componente média, ou DC, da tensão de saída para esse conversor com base na sua frequência de trabalho, como podemos ver a seguir na Equação 3.12.

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_{out}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = \frac{T_{on}}{T} V_s = DV_s \quad (3.12)$$

Essa é a ideia mais básica para entender o funcionamento desses dispositivos, é importante salientar que em uma aplicação real essa chave ideal é substituída por um transistor de potência, como MOSFETs ou IGBTs, e esses dispositivos jamais estarão livres das perdas de condução.

### 3.6.2 IGBT

O Transistor Bipolar de Porta Isolada, ou *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), é um semicondutor de potência híbrido de alta eficiência, que alia as vantagens de chaveamento dos transistores bipolares, proporcionando alta capacidade de corrente, com a alta impedância de entrada dos MOSFETs, que possibilitam uma velocidade elevada de chaveamento devida a baixa tensão de saturação.

Esse semicondutor é geralmente aplicado em dispositivos que necessitam sintetizar ondas complexas através de PWM e filtros passa-baixo. O IGBT foi escolhido para ser implementado nesse projeto, devido a sua alta capacidade operar com tensões elevadas a um preço inferior comparado aos MOSFETS, e também por ter a possibilidade de trabalhar com frequências mais elevadas caso fosse necessário.

O modelo escolhido foi o IRG4PH40KD, com as seguintes características elétricas, capacidade de tensão entre coletor e emissor de 1200V, capacidade de corrente contínua de 15A e tensão de típica de saturação por volta dos 2,74V. No capítulo seguinte iremos perceber que esses valores parecem exagerados, mas isso é devido a disponibilidade dos componentes do laboratório, estava prevista ainda um período de otimização do projeto, que não ocorreu devido as restrições impostas pela pandemia global.

# Capítulo 4

## Solução

A proposta desse trabalho, como já dito nos capítulos anteriores, consiste em buscar uma forma para armazenar a energia excedente dos painéis fotovoltaicos e assim aquecer um reservatório de água, o qual será utilizado posteriormente pelo sistema de AQS de uma residência.

Vamos partir com a premissa de que a residência em questão já possui, ou tem espaço para adicionar facilmente um reservatório de água do tipo boiler, que pode ser integrado em série precedendo o sistema de AQS original sem malefício algum. Esta consideração nos permite trabalhar com uma resistência de aquecimento dedicada para o nosso sistema, tornando-o independente do sistema de AQS que a residência esteja usando. Assim, podemos desenvolver uma solução mais abrangente, que poderá ser utilizada e adaptada facilmente por todos.

O primeiro desafio que teremos será buscar uma forma de realizar a medição da quantidade de energia que está sobrando no sistema, em tempo real. Isso é um passo muito importante para que possamos criar um sistema de controle, que nos permita "gastar" essa mesma quantidade de energia na resistência do boiler, evitando assim a perda de energia para a rede.

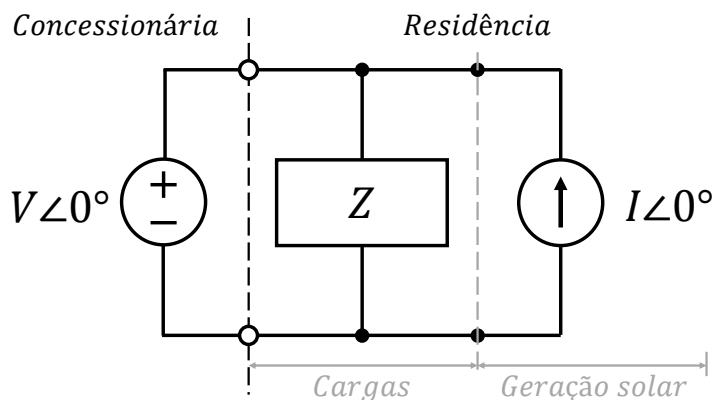
### 4.1 Cálculo de Potência

Antes de começar é importante ter uma noção de como funciona o sistema de medição e cobrança de energia, realizada pela concessionária de energia elétrica. Hoje em dia o que se tem no quadro de medições nada mais é do que, uma leitura da potência ativa média que é consumida. Isso demonstra que em sistemas residenciais, pelo menos para o cálculo da

tarifa, a concessionária despreza a injeção ou consumo de reativos da rede, mas isso não quer dizer que podemos desprezar essa potência.

Portanto, o que precisamos fazer primeiramente é descobrir uma forma de medir a potência ativa média que está circulando na residência que iremos trabalhar. Nesta etapa, iremos supor que a residência trabalha com o padrão de alimentação mais simples possível, ou seja, monofásico a dois fios mais proteção.

Vamos criar um modelo elétrico para essa residência permitindo assim a expansão da visão que temos sobre o problema abordado. Começaremos representando a concessionária como uma fonte de tensão com ângulo de fase igual a  $0^\circ$ , pois essa será a nossa referência para a análise dos fasores. Logo em seguida temos as cargas dessa residência representadas por um bloco genérico de impedância  $Z$ , podemos deixá-las associadas pois todas as cargas da residência são adicionadas em paralelo no sistema através das tomadas, garantindo sempre a mesma tensão. Por último, vamos representar o sistema de geração fotovoltaica através de uma fonte de corrente, cujo ângulo de fase é também  $0^\circ$ . Isso ocorre pois os inversores conseguem sincronizar a corrente gerada com a tensão da concessionária, permitindo a melhor eficiência possível para o sistema, buscando alimentar somente as cargas ativas da residência. A representação gráfica do modelo para um instante de tempo pode ser vista na Figura 4.1, é importante notar que essa modelagem é muito simples e despreza várias perdas do sistema, porém é suficiente para que se consiga entender o comportamento do sistema.

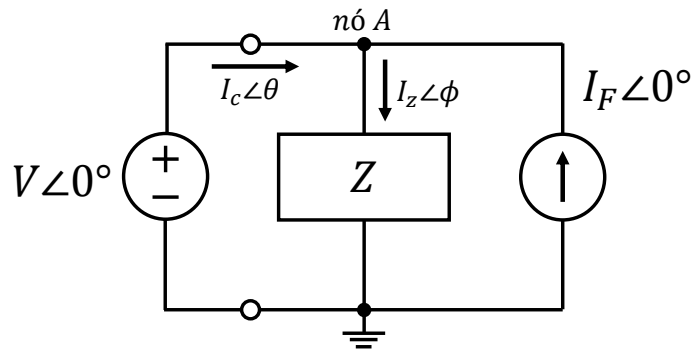


**Figura 4.1:** Modelo elétrico do circuito de uma residência alimentada com tensão monofásica.

Com esse modelo em mente, podemos partir para a análise da dinâmica do circuito, essa

#### 4.1. Cálculo de Potência

etapa é de extrema importância pois uma vez entendida a dinâmica podemos construir o sistema de medição. Iniciaremos analisando o circuito através da lei dos nós de Kirchhoff, que nos diz que a soma das correntes em um nó do circuito deve ser sempre igual a zero. A Figura 4.2 ilustra o nó A, que será analisado, o ponto de aterramento para a análise e também o sentido adotado para as correntes do modelo construído.



**Figura 4.2:** Determinação das correntes para a análise de Kirchhoff do modelo.

Tomemos a corrente  $I_C$  como a corrente proveniente da concessionária com ângulo  $\theta$  de defasagem em relação à tensão da mesma, representada por  $V$ . Em seguida, temos a corrente  $I_Z$  que é a corrente consumida pelas cargas da residência, com ângulo  $\phi$  de defasagem em relação à tensão  $V$ . E, finalmente, a corrente  $I_F$  que representa a corrente gerada pelo sistema fotovoltaico, estando essa em fase com a tensão  $V$ , como já mencionado.

Portanto segundo a lei dos nós de Kirchhoff, adotando as correntes que entram no nó como positivas e as que saem como negativas, temos:

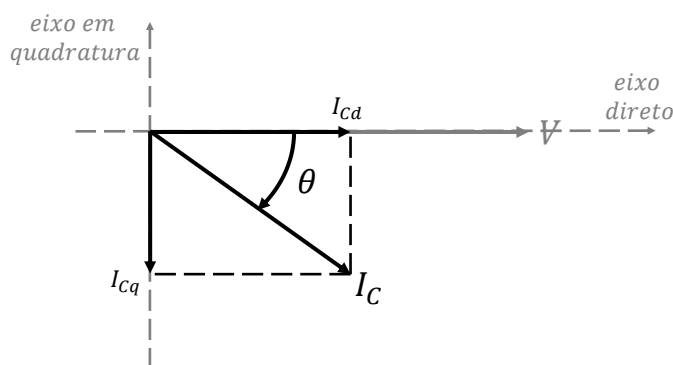
$$I_C \angle \theta + I_F \angle 0^\circ - I_Z \angle \phi = 0 \quad (4.1)$$

Assim, podemos manipular a equação anterior para obter uma equação da corrente  $I_C$ , que nos diz a respeito sobre o seu comportamento em função das demais correntes do circuito. Importante lembrar que  $I_C$  é a corrente que passa pelo quadro de medições da residência.

$$I_C \angle \theta = I_Z \angle \phi - I_F \angle 0^\circ \quad (4.2)$$

Atente-se ao fato de que a corrente gerada pela fotovoltaica é sempre maior ou igual a zero, nunca será negativa pois as fotovoltaicas não irão consumir potência. Com isso, podemos analisar algumas condições importantes do sistema.

É indispensável perceber nesse momento que, como tomamos anteriormente o ângulo de fase da tensão como referência, as correntes podem ser decompostas espacialmente em seu eixo direto, e em quadratura, como podemos ver na Figura 4.3. Sendo as componentes do eixo direto as responsáveis suprir as cargas ativas, e as componentes do eixo em quadratura as responsáveis pelas cargas reativas do sistema.

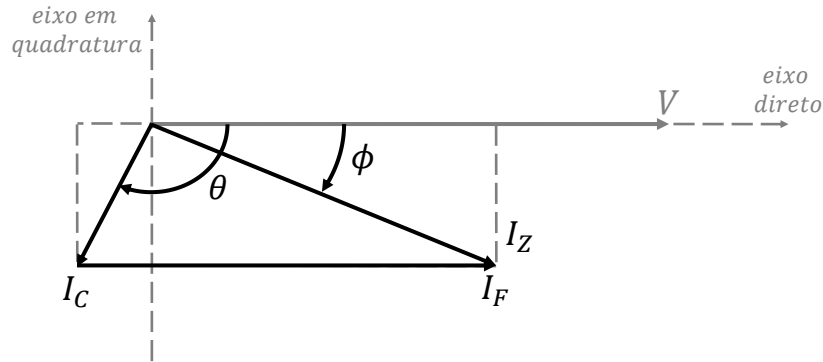


**Figura 4.3:** Decomposição da corrente provenientes da concessionária nos eixo direto e em quadratura em relação à tensão da mesma.

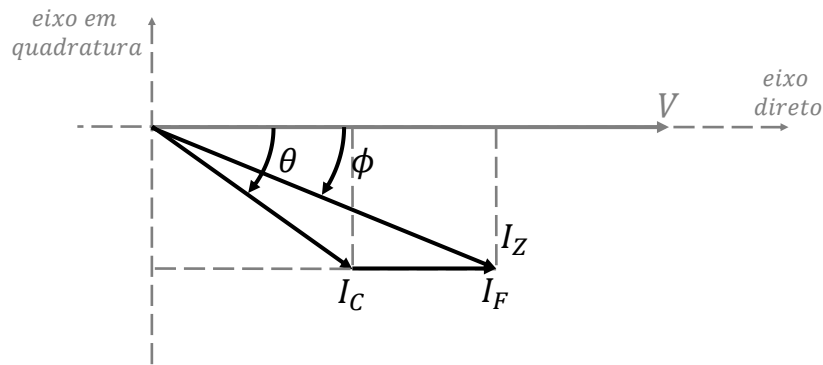
Sabendo disso, podemos fazer uma análise gráfica dos fasores de todas as correntes desse modelo, respeitando a Equação 4.2. Essa análise é importante para que possamos compreender o comportamento das correntes da residência. Vamos supor que, as cargas reativas do sistema são predominantemente indutivas, portanto as correntes serão defasadas com relação a tensão  $V$ .

A seguir, na Figura 4.4, temos a representação dessa análise em duas situações com diferentes produções de energia fotovoltaica. Na Figura 4.4a o sistema está operando com excesso de energia gerada e portanto há uma injeção de corrente na rede. Já na Figura 4.4b o sistema está operando com o auxílio da rede, portanto há um consumo de corrente proveniente da concessionária. Ambos os casos levam em consideração exatamente o mesmo consumo na

#### 4.1. Cálculo de Potência



(a) Injetando.



(b) Consumindo.

**Figura 4.4:** Análise fasorial do modelo para o caso indutivo.

residência, exigindo a mesma corrente  $I_Z$  com defasagem  $\phi$ .

Analisando esses gráficos, agora percebe-se facilmente que a corrente  $I_F$  só possui componente no eixo direto, portanto não interfere nas componentes reativas do sistema como já dito. Assim, a componente reativa da carga residencial sempre será atribuída à corrente da rede. Outro ponto que ficou mais claro é que, quando a corrente  $I_F$  for igual a zero, a corrente  $I_C$  será exatamente a corrente requerida pela carga, chamada de  $I_Z$ .

Como nosso real interesse é na quantidade de energia excedente, produzida pela fotovoltaica, vamos refazer a análise sobre essas componentes no eixo direto. É importante notar que a lei dos nós de Kirchhoff, ainda vale para as componentes das correntes em cada um dos

eixos. Decompondo as correntes no eixo direto, temos:

$$I_{Zd} = I_Z \cos(\phi) \quad (4.3)$$

$$I_{Cd} = I_C \cos(\theta) \quad (4.4)$$

$$I_{Fd} = I_F \quad (4.5)$$

E aplicando essas componentes na Equação 4.2:

$$I_C \cos(\theta) = I_Z \cos(\phi) - I_F \quad (4.6)$$

A partir desta análise, podemos ver que no caso onde há excesso de potência gerada, a componente ativa da corrente  $I_C$  fica negativa, indicando que ela está contrária ao sentido adotado na Figura 4.2 e está sendo injetada na rede. No caso de consumo essa componente é positiva e está no sentido para a carga. Sabendo que a magnitude da corrente representada por um fasor nunca é negativa, nos resta concluir que a corrente será injetada na rede quando o  $\cos(\theta)$  for negativo, e isso ocorre somente quando a defasagem entre a corrente  $I_C$  e a tensão  $V$  for maior que  $90^\circ$  e menor que  $-90^\circ$ .

Portanto, agora foi possível perceber, de forma mais visual, como o sistema da residência funciona, permitindo que se possa avançar para a etapa de cálculo da potência ativa média. Este estudo foi muito relevante, pois deixa mais claro que, mesmo que o sistema da concessionária despreze a potência reativa, ela está ainda presente no sistema, então devemos analisar a defasagem da corrente  $I_C$  em relação à  $V$ , para que se consiga obter uma informação real da potência ativa da residência.

Apenas para fim de curiosidade, a mesma análise se aplica para o caso de cargas predominantemente capacitivas, onde os gráficos fasoriais são muito similares porém espelhados no eixo direto.

Para que possamos prosseguir com a ideia, é importante relembrar o conteúdo visto na Seção 3.1.1 do Capítulo de Revisão, onde tínhamos o cálculo da potência ativa média de um circuito. Esse cálculo foi definido pela Equação 3.7, obtido através da tensão e da corrente

#### 4.1. Cálculo de Potência

---

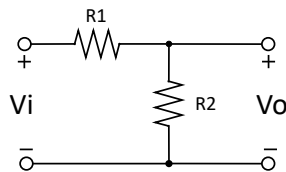
aplicados nos terminais de alimentação do dispositivo de interesse.

Portanto, olhando o modelo abordado na Figura 4.1 temos que, para conseguir obter a potência ativa que está sendo consumida ou injetada pela residência na concessionária, devemos adotar como os terminais, os condutores que conectam o quadro geral dessa residência até a rede, onde circula  $I_C$ .

Sabemos que a tensão  $V$  é igual em todas as tomadas da residência, uma vez que as cargas são ligadas todas em paralelo para garantir a mesma tensão. Assim, fica fácil obter a onda da tensão para nosso sistema, podemos obtê-la diretamente da tomada em que nosso protótipo será ligado. Já para a onda da corrente  $I_C$  não temos escolha, deve-se obter diretamente a de entrada do quadro de distribuição da residência.

Para calcular a onda de potência instantânea iremos utilizar um dispositivo multiplicador analógico, especificamente o AD633JN que está descrito na Seção 3.1.2 do Capítulo de Revisão. Sabemos que as entradas de tensão podem variar entre  $\pm 10V_p$ , e portanto teremos que obter as ondas do circuito e adequá-las a esse dispositivo.

A onda de tensão  $V$ , como já mencionado, será obtida da própria tomada que alimentará o nosso protótipo. Portanto, para reduzir o tamanho desse sinal foi aproveitado a disponibilidade de um transformador no circuito, que originalmente foi destinado para a construção da fonte alimentação, como veremos na Seção 4.4. Esse dispositivo reduz a tensão de entrada de  $230V_{RMS}$  para duas saídas de  $24V_{pico}$ , uma vez que esse transformador possui tap central. Ainda, com a finalidade de ajustar a onda para o intervalo de tensão suportado pelo multiplicador, é aplicado um divisor de tensão como poderemos ver a seguir.



**Figura 4.5:** Divisor de tensão.

A equação que demonstra o comportamento desse circuito é a seguinte:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i \quad (4.7)$$

Portanto, para que nossa tensão de  $24V_{pico}$  seja reduzida a um valor igual ou menor que  $10V_{pico}$  na saída, devemos adotar resistências de tal modo que a fração descrita na equação atinga um valor mínimo de  $1/(2,4)$ . Respeitando isso, foi definido que a resistência  $R_1$  tivesse um valor de  $2,4k\Omega$  e a resistência  $R_2$  tivesse um valor de  $1k\Omega$  resultando exatamente na tensão desejada na saída.

Resolvida a primeira parte do problema, devemos agora obter a forma de onda da corrente  $I_C$  no quadro de distribuição. Sabendo que nosso dispositivo deve ser algo genérico, que pode ser adaptado e utilizado em qualquer instalação, é importante notar que dificilmente o quadro de distribuição da residência estará no mesmo cômodo que o sistema de AQS. Assim se faz necessário ter um sistema de medição que seja fiel, mesmo para distâncias de muitos metros, e nada melhor que transmitir essa informação via cabo através de um sinal de corrente, pois assim evitaremos um problema muito comum que é a queda de tensão, e a perturbação do sinal por ruídos.

Para que isso seja possível, utilizaremos um transformador de corrente do tipo janela de  $60A : 30mA$  (valores de pico) e assim conseguiremos mandar esse sinal via cabo até a placa do nosso sistema. Localmente, devemos lembrar que o dispositivo multiplicador trabalha com tensões e não corrente, assim devemos transformar esse sinal. A forma de transformação mais simples encontrada foi passar esse sinal de corrente por um resistor e aferir a tensão que surgirá em seus terminais.

O resistor deve ser projetado corretamente, para que não ultrapassemos o valor de  $\pm 10V_p$ , para isso devemos aplicar a lei de ohm e calcular o valor máximo para essa resistência.

$$R_3 = \frac{V}{I} = \frac{10V}{30mA} = 333,33\Omega \quad (4.8)$$

Definido o valor máximo devemos procurar qual o valor comercial, ou associação, mais

#### 4.1. Cálculo de Potência

---

próxima possível do valor calculado, assim foi definido um resistor de  $330\Omega$  para nossa resistência de transformação, respeitando todos os critérios estabelecidos.

Finalmente, para concluir essa etapa de cálculo de potência, vamos imaginar o caso onde iremos obter o valor máximo de potência instantânea, que ocorre quando as ondas  $I_C$  e  $V$  estão em fase e em suas amplitudes máximas,  $60A$  e  $230V_{RMS}$  respectivamente. Assim no ponto máximo teremos aproximadamente  $10V$  em cada uma das duas entradas do multiplicador, e como sabemos a equação que rege seu funcionamento Equação 3.8, podemos concluir então que a sua saída irá variar aproximadamente entre  $\pm 10V$ .

Como visto na Seção 3.1.1 do Capítulo de Revisão, a potência ativa é dada pelo valor médio da onda de potência instantânea, ou seja sua componente DC, iremos aplicar então um filtro passa-baixo na saída do multiplicador, com uma frequência de corte muito abaixo do valor da frequência da onda de potência instantânea, resultando assim apenas em sua componente DC.

Para o cálculo dos elementos do filtro passa-baixo, é bom lembrar que a frequência da onda de potência é o dobro da frequência da rede elétrica, portanto ronda os  $100Hz$ . Assim, definimos experimentalmente, uma frequência de corte suficientemente pequena ( $1,5Hz$ ) e um capacitor disponível de  $22\mu F$ , portanto a partir da Equação 3.9 temos que:

$$R4 = \frac{1}{2\pi f_c C} = \frac{1}{2\pi 1,5 \cdot 22\mu} = 4,822k\Omega \quad (4.9)$$

Assim, adotamos um resistor comercial de  $4,7k\Omega$  e continuamos com uma frequência de corte baixa, que nos garante uma boa filtragem da componente AC da potência.

Cabe ainda uma última análise para esse circuito. Como ambas as ondas  $I_C$  e  $V$  são ondas cossenoidais o resultado de sua multiplicação ainda será uma cossenoide, assim quando  $I_C$  e  $V$  estiverem em fase e com seu valor máximo de magnitude, a onda da potência não irá cruzar o eixo das abscissas e assim seu valor médio será exatamente metade da sua magnitude. O que podemos concluir com essa análise é que o sinal de potência ativa média, que irá sair do filtro, será um sinal DC que pode variar entre valores de  $\pm 5V$ , representando linearmente os valores reais de potência média de  $\mp 11,95kW$ , como podemos conferir através do cálculo

abaixo a partir da Equação 3.7. Esse valor é elevado para representar uma residência comum, onde geralmente a potência contratada pode ir até  $6,9kW$ , mas ainda é satisfatório para fins experimentais.

$$P_{med} = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) = \frac{\sqrt{2}}{2} 230.60 \cos(0^\circ) = 11,95kW \quad (4.10)$$

Importante perceber que como o intuito do nosso projeto é mais prático do que teórico, inicialmente foram desprezados os possíveis atrasos de fase que poderiam ser inseridos pelas etapas de condicionamento de sinal, se os resultados forem muito discrepantes será revisado essa etapa.

O circuito final para essa fase de medição, está demonstrado detalhadamente na Figura 4.6.

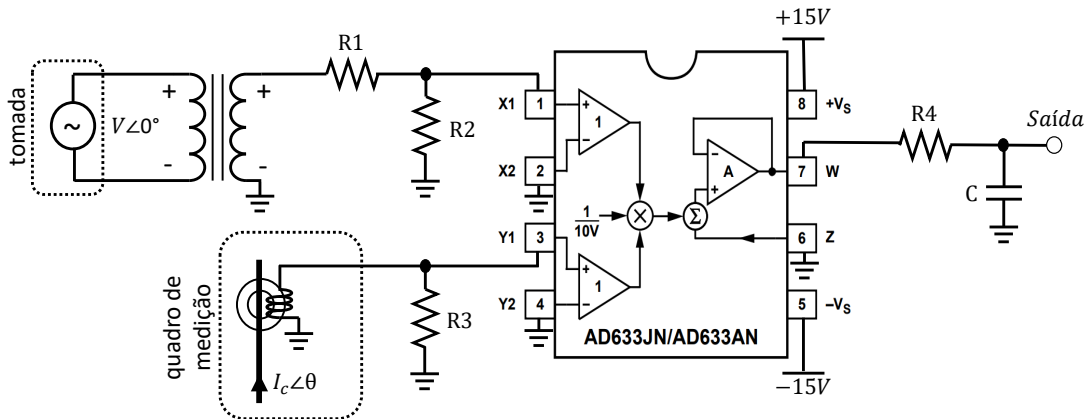
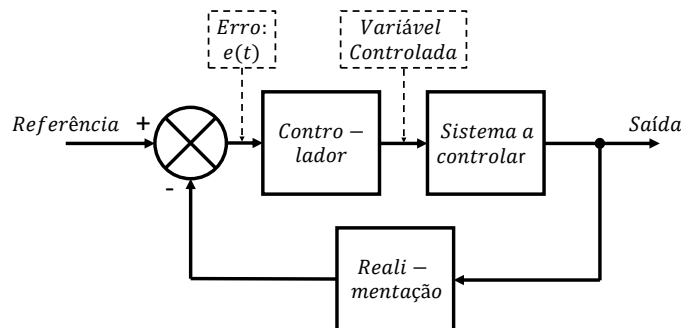


Figura 4.6: Circuito final de medição da potência média (ativa).

## 4.2 Sistema de Controle

O sistema de controle que será escolhido para o projeto, deve ser algo simples, barato e que busque diminuir as perdas do sistema. Obviamente que no mundo da engenharia temos muitas soluções possíveis com um controle muito preciso, mas escolher uma solução exagerada para tentar reduzir as perdas a zero não é algo essencial nesse momento. Devemos lembrar que a premissa dessa proposta é buscar uma soluções simples e barata que possa gerar uma boa economia para os auto consumidores.

Tendo em mente que aplicar uma abordagem perfeita, pode não ser muitas vezes uma solução ótima, portanto escolhemos um sistema de controle que é barato e funcional em várias aplicações que não exige um controle muito refinado de grandezas. Esse sistema é obtido a partir de um controlador proporcional operando em malha fechada, como podemos ver abstratamente pela Figura 4.7.



**Figura 4.7:** Sistema de controle geral em malha fechada.

Tendo essa ideia sobre a topologia básica do controlador, podemos agora começar a entender o que cada parte realmente representa no sistema real, e buscar desenvolver o que falta. Vamos fazer uma pequena alteração no modelo apresentado na Figura 4.2, inserindo uma resistência variável  $R$  no sistema, que irá representar a resistência utilizada para dissipar o excesso de potência ativa, sob a forma de calor, dentro do boiler de água. Podemos visualizar o novo modelo na Figura 4.8.

Como já esperado, uma carga puramente resistiva só consome potência ativa. Sabendo

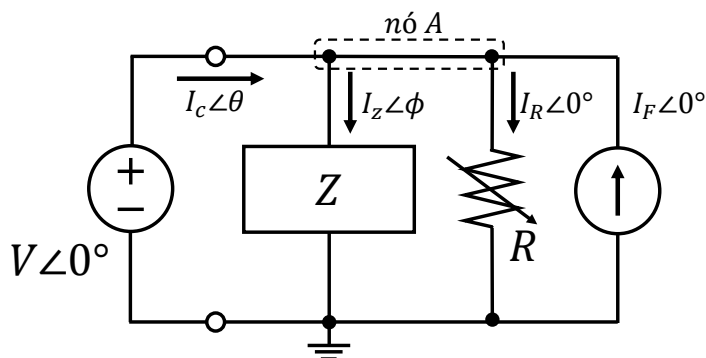


Figura 4.8: Modelo atualizado da residência com a inserção da resistência nova no boiler.

disso, a corrente  $I_R$  representada no ramo da resistência  $R$  possui ângulo zero, pois está em fase com a tensão  $V$ . Portanto se conseguirmos medir de alguma forma a quantidade de potência que está sendo injetada na rede, poderíamos ajustar a resistência  $R$  para que consumisse uma potência ativa semelhante, atingido assim o objetivo do nosso trabalho.

Como visto na seção anterior, já construímos um sistema de medição capaz de nos dar um sinal de tensão que varia entre  $\pm 5V$ , e que representa muito bem a variação de potência ativa média do sistema. O que temos que desenvolver agora é um sistema capaz de ajustar a resistência  $R$  do modelo, buscando sempre um mínimo de perdas de energia. Portanto vamos atualizar a malha de controle demonstrada na Figura 4.7 com as informações que já sabemos, resultando assim na Figura 4.9.

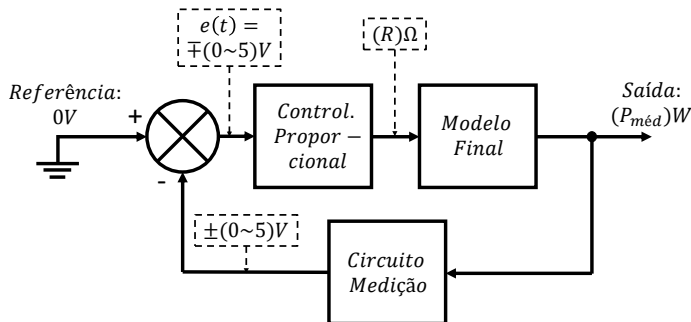


Figura 4.9: Sistema de controle detalhado com malha fechada.

É de suma importância notar que adotamos o sinal positivo de  $P_{med}$  para os casos onde

há injeção de potência na rede, e que nosso sistema só tem controle para essa parte positiva, já que a resistência  $R$  não pode operar como uma fonte. A referência do nosso sistema está em  $0V$ , pois desejamos que a  $P_{med}$  esteja sempre igual a zero para que não tenhamos sobras de energia e muito menos consumo de energia da rede por parte de  $R$ .

Sabendo disso, escolhemos uma técnica amplamente usada no mundo da eletrônica para controlar uma grandeza de saída com um sinal de controle, essa técnica é usar uma onda modulada PWM como visto na Seção 3.2.1 do Capítulo de Revisão. Essa abordagem nos dá uma solução alternativa, pois podemos simular a carga  $R$  de resistência variável, através da utilização de um resistor fixo  $R'$ .

Tal abordagem somente é possível tendo uma frequência de oscilação do PWM, com período  $T$ , muito menor que a frequência da rede, assim temos instantaneamente uma potência constante. Portanto se pegarmos essa porção  $T$  de tempo infinitesimal, e deixarmos a carga ligada durante  $DT$  e, conseqüentemente, desligada durante  $(1 - D)T$ , temos como resultado uma potência média nesse tempo  $T$  de ordem  $DP$ . Sendo  $P$  a potência instantânea consumida pela carga  $R'$ , e  $D$  o *duty cycle* da onda PWM. Portanto fazendo a seguinte análise temos:

$$P = \frac{V^2}{R'} \quad (4.11)$$

$$DP = \frac{V^2}{R} \quad (4.12)$$

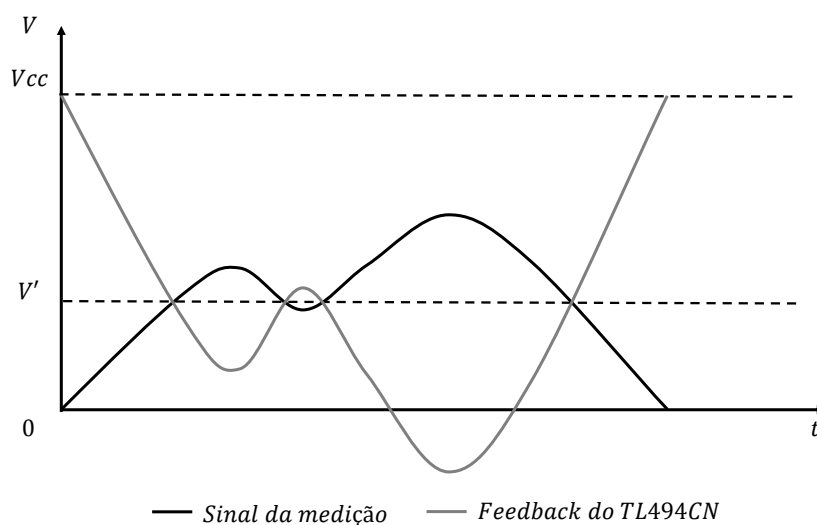
$$\therefore R = \frac{R'}{D} \quad (4.13)$$

Portanto, como foi demonstrado pela Equação 4.13 conseguimos simular uma resistência variável, usando apenas uma onda modulada PWM para ligar e desligar uma resistência fixa. Agora nos falta construir do restante da malha de controle apresentada na Figura 4.9, utilizando os recursos que conseguimos com o circuito de medição.

Para concluir essa etapa resolvemos utilizar um circuito integrado capaz de realizar todas as funções faltantes. O dispositivo é o TL494CN, que já foi apresentado previamente na

Seção 3.2.1 do Capítulo de Revisão. Manipulando o amplificador operacional presente em sua entrada, conseguimos realizar a etapa de obtenção do erro juntamente com o ganho do controlador proporcional, tendo diretamente em sua saída uma onda PWM que iremos utilizar futuramente para chavear a carga  $R'$ .

Mas as coisas não são tão simples, como visto na apresentação do integrado TL494CN, sua lógica de chaveamento na saída é precedida por uma porta NOT, resultando assim na inversão da onda de erro. Para que possamos reverter essa condição, e lembrando que estamos interessados na parte positiva do erro que varia de  $0 - 5V$ , será necessário inverter o sinal de erro e deslocá-lo para o eixo positivo, como poderemos ver na Figura 4.10 a seguir.

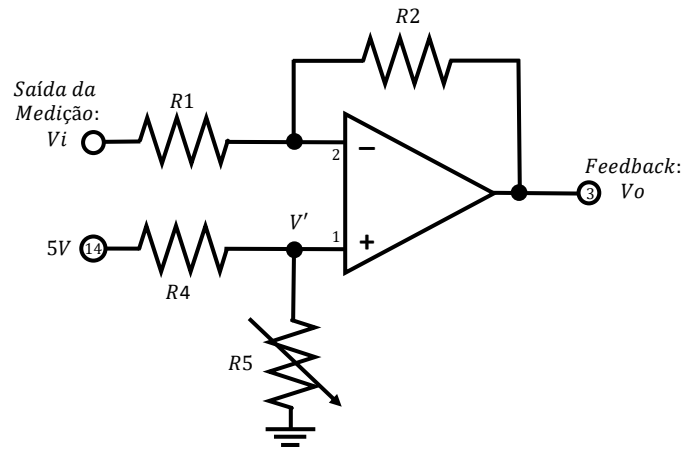


**Figura 4.10:** Demonstração da lógica abordada para a entrada do TL494CN.

A imagem retrata um exemplo aleatório com sinal de medição qualquer, assim a tensão  $V'$  representa o eixo ao qual o sinal será invertido. Importante notar que as magnitudes estão diferentes, pois já foi adotado o ganho do controlador proporcional. Pelo gráfico podemos ver que  $V'$  é ajustado de tal maneira que o valor nulo do sinal de medição seja refletido, já com o ganho, para a posição  $V_{cc}$ . Isso indica que se o erro for nulo, o sinal no pino de *Feedback* do TL494CN ficará em seu valor máximo e portanto, como a lógica de chaveamento é invertida, teremos um valor nulo na saída. Esse ajuste será obtido diretamente na prática, e como o ganho deverá ser considerável para obtermos um controle relativamente rápido, esse valor ficará bem baixo de  $5V$ .

## 4.2. Sistema de Controle

Finalmente, tendo compreendido a lógica de funcionamento do integrado TL494CN, podemos partir para o projeto dos componentes e da topologia ao qual ele será implementado. Para conseguir o resultado almejado na Figura 4.10, vamos configurar o amplificador operacional disponível na entrada do integrado, com a topologia do amplificador inversor que está demonstrado na Figura 4.11.



**Figura 4.11:** Amplificador inversor com deslocamento da saída.

Como já dito, o valor de  $V'$  é definido experimentalmente de forma manual, para isso foi projetado um divisor de tensão com um potenciômetro de  $R5 = 10k\Omega$  e uma resistência  $R4 = 4,7k\Omega$ . Já as resistências  $R1$  e  $R2$  determinam o ganho  $K_p$  do controlador proporcional, atribuindo um ganho no sinal de medição, que é erro da nossa malha de controle, e impactando assim na velocidade e estabilidade do nosso sistema. Essas resistências foram definidas experimentalmente por tentativa e erro, obtendo-se  $R1 = 1M\Omega$  e  $R2 = 2,2M\Omega$ . A relação entre as resistências e o comportamento do circuito estão representadas abaixo.

$$V' = 5 \frac{R5}{R4 + R5} \quad (4.14)$$

$$Vo = V' \frac{R1 + R2}{R1} - Vi \frac{R2}{R1} \quad (4.15)$$

Onde o ganho  $K_p$  é definido por:

$$K_p = \frac{R_2}{R_1} \quad (4.16)$$

Inserindo a Equação 4.16 em 4.15, temos:

$$V_o = V'(1 - K_p) - V_i(K_p) \quad (4.17)$$

Agora precisamos definir a frequência de oscilação da onda PWM. Podemos projetar isso facilmente através da Equação 3.10 vista na Seção 3.2.1 do Capítulo de Revisão. Como o capacitor é um dispositivo mais crítico para obtermos um valor comercial desejável, começamos escolhendo um valor comercial para o capacitor  $C_T$ , que nesse caso foi  $100nF$ , e uma frequência de trabalho desejável  $f_{OSC}$ , escolhemos uma frequência por volta dos  $(19-20)kHz$  para que não esteja na faixa audível, a partir disso obtemos o valor da Resistência  $R_T = 520\Omega$ .

Sendo assim, o circuito final obtido para a etapa de controle está demonstrado com detalhes na Figura 4.12 logo a seguir.

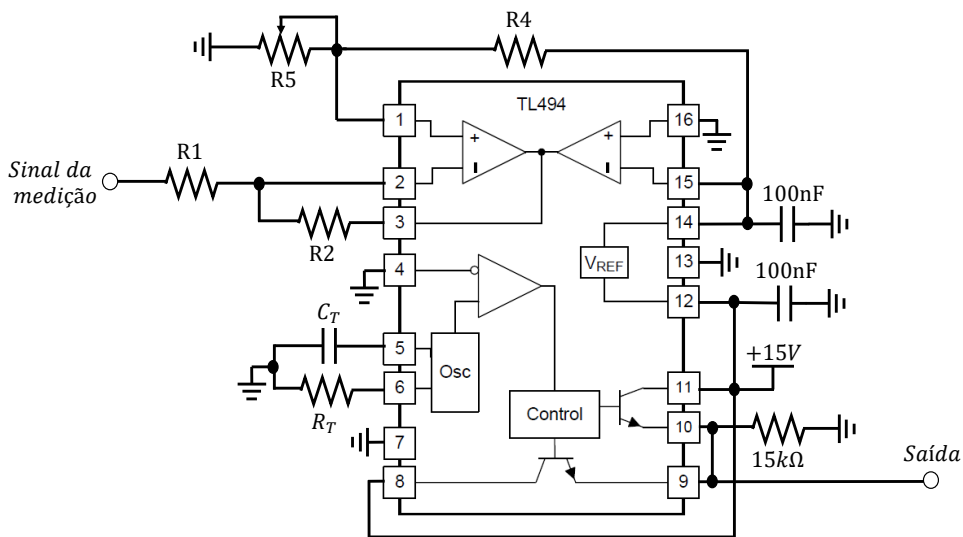


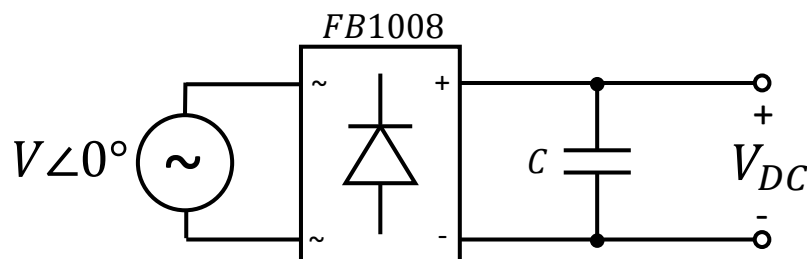
Figura 4.12: Circuito final para a etapa de controle por PWM.

Lembrando que os capacitores de desacoplamento de  $100nF$ , presentes na alimentação de  $15V$  e na saída do regulador de tensão interno de  $5V$ , são recomendações do fabricante. O Resistor de  $15k\Omega$  é apenas um resistor de *Pull-Down*.

## 4.3 Circuito de comando e de Potência

Como já temos um sinal PWM que consegue controlar a potência média dissipada pela carga, com base na leitura de potência que vai para a rede, vamos utilizar o conceito abordado na Seção 3.6.1 do Capítulo de Revisão para construir um conversor DC-DC. Esse conversor terá capacidade de transmitir uma boa quantidade de potência para a resistência que será instalada no boiler.

Como iremos trabalhar com corrente contínua, devemos antes de tudo montar um circuito para retificar o sinal alternado da rede. Como visto na Seção 3.4.1 do Capítulo de Revisão, escolhemos o retificador FB1008 que é capaz de retificar diretamente a tensão da rede e atender assim nossa demanda. Após o retificador, colocamos um capacitor de  $330\mu F$  com capacidade de suportar até  $400V$ , para reduzir as variações da tensão retificada. O circuito pode ser visto a seguir na Figura 3.4.1



**Figura 4.13:** Retificador de AC-DC para o circuito de potência.

Após obter o sinal retificado, podemos iniciar a construção do conversor DC-DC que irá nos permitir acoplar e desacoplar a carga com a fonte de tensão  $V_{DC}$ . A topologia escolhida

está representada na Figura 4.14. Pode-se averiguar que diferentemente da topologia vista na Seção 3.6.1, escolhemos trabalhar com a chave no terminal negativo da fonte, pois facilita o seu controle. O IGBT que escolhemos para este projeto é o IRG4PH40KD, que está detalhado na Seção 3.6.2 do Capítulo de Revisão. O diodo  $D$  que está representado ao lado da resistência  $R'$  é um diodo de roda livre e o modelo escolhido foi o Dsei 30-10AR com capacidade de bloquear até  $1000V$  e conduzir até  $30A$  de corrente, ele é usado para amenizar os impactos do transitório na carga. E por último, a carga  $R'$  é a resistência que será inserida no boiler, ela pode ter valores distintos dependendo muito do modelo adotado em cada residência, importante ter consciência que aumentar ou diminuir essa resistência vai gerar também um impacto no erro de estado estacionário do controlador.

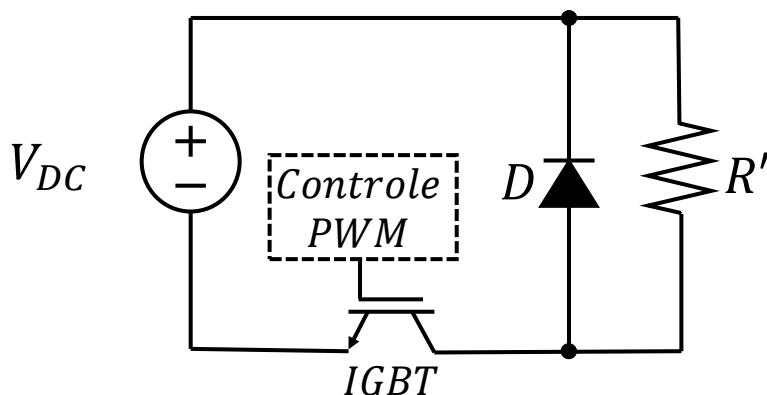


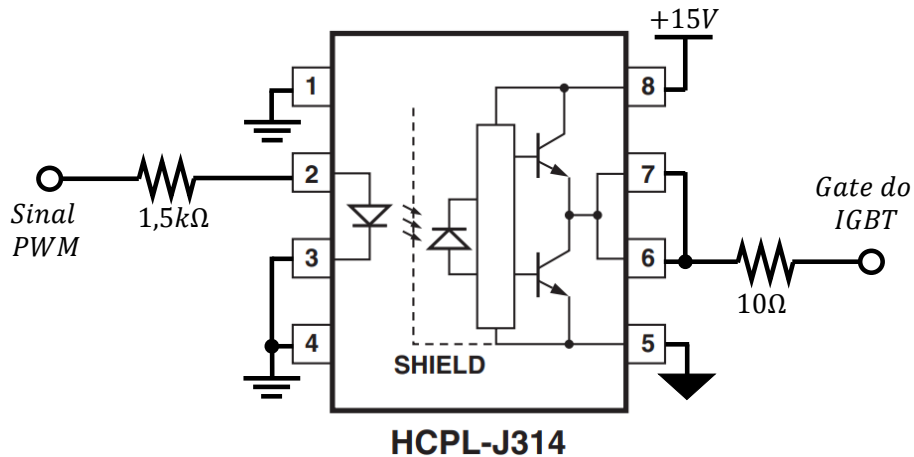
Figura 4.14: Conversor DC-DC para o circuito de potência.

Cabe notar que estamos trabalhando com um circuito de medição e controle que opera em baixa tensão, e um circuito de potência usado para conectar e desconectar a carga, que trabalha com tensões elevadas. Se trabalharmos sem um isolamento elétrico entre esses circuitos, é possível que por algum momento correntes elevadas possam fluir pelos aterramentos dos circuitos podendo queimar alguns dispositivos. Para evitar isso, optamos trabalhar com referências distintas, desenvolvendo uma fonte de tensão isolada e um *driver* isolado para acionar a chave do conversor.

O *driver* é obtido a partir de um dispositivo acoplador óptico, que está descrito na Seção 3.3.1 do Capítulo de Revisão. Ele nos permite acionar o IGBT de forma isolada, uma vez

#### 4.4. Fontes

que o dispositivo consegue replicar o sinal de controle gerado pelo TL494CN a partir de uma fonte de tensão secundária. A topologia do mesmo está demonstrada a seguir na Figura 4.15.



**Figura 4.15:** Circuito de comando, baseado em acoplador óptico, utilizado para acionar a chave de maneira isolada.

Podemos notar que precisamos de uma resistência em série ao diodo emissor de luz, para definir a corrente de entrada requerida pelo diodo. Já no lado isolado, utilizamos uma resistência de  $10\Omega$  para limitar os picos de corrente devidos à carga e descarga das capacidades de entrada do IGBT.

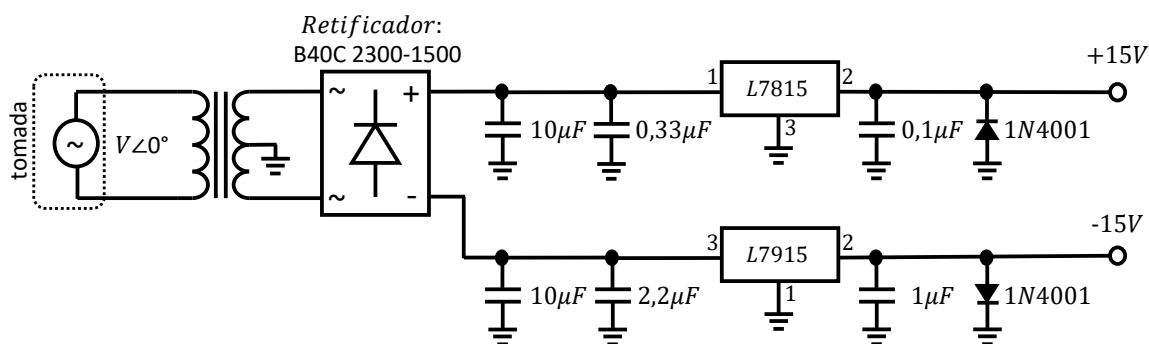
## 4.4 Fontes

Finalizado a construção do circuito, devemos construir as fontes de alimentação para que o sistema opere independentemente de fontes e dispositivos externos. Quanto mais *plug and play* o nosso sistema for, mais atraente e mais acessível ele estará se tornando.

Portanto o primeiro passo que devemos dar, assim como na construção do conversor DC-DC, é a retificação da tensão alternada. Como já comentado na primeira seção deste capítulo, utilizaremos um transformador de tensão para que possamos diminuir os níveis de tensão fornecidos pela rede, como esse dispositivo possui duas saídas de mesma tensão, podemos obter um tape central para que possamos criar uma referência para as fontes simétricas.

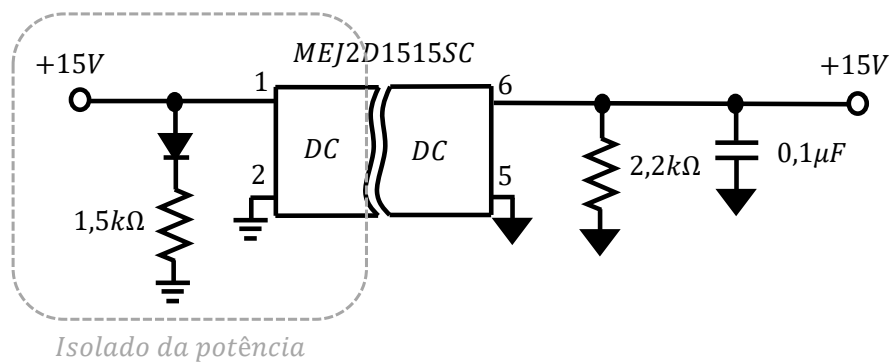
Após o transformador passamos o sinal por um retificador de onda completa, o qual está detalhado na Seção 3.4.1 do Capítulo de Revisão, onde também estão detalhadas as características do modelo B40C 2300-1500 que foi o escolhido. Tendo o sinal retificado, inserimos capacitores de  $10\mu F$  nos terminais positivo e negativo do retificador para reduzir as variações das tensões retificadas.

Finalmente podemos aplicar o modelo proposto pelos fabricantes dos reguladores utilizados, como está demonstrado na Figura 3.8 na Seção 3.5.1 do Capítulo de Revisão. Demonstrado na Figura 4.16 a seguir, temos a representação de como ficou o circuito da fonte simétrica desenvolvida para este projeto.



**Figura 4.16:** Circuito final para a fonte simétrica dedicada ao projeto.

Agora devemos construir a fonte de alimentação isolada para o comando da chave do circuito de potência. Essa fonte isolada será construída facilmente através do uso de um conversor DC-DC isolado de 15 – 15V como visto na Seção 3.3.2 do Capítulo de Revisão. A topologia da fonte isolada está demonstrada a seguir na Figura 4.17.



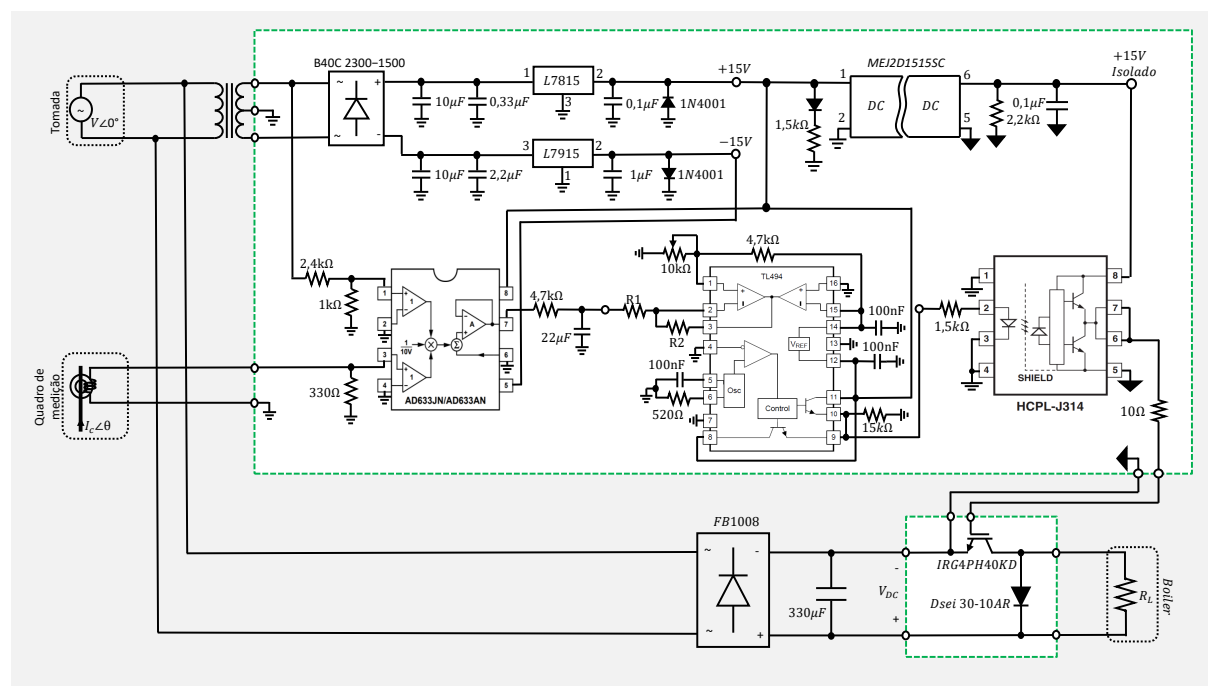
**Figura 4.17:** Circuito final para a fonte isolada +15V, utilizada para o comando da chave do circuito de potência.



# Capítulo 5

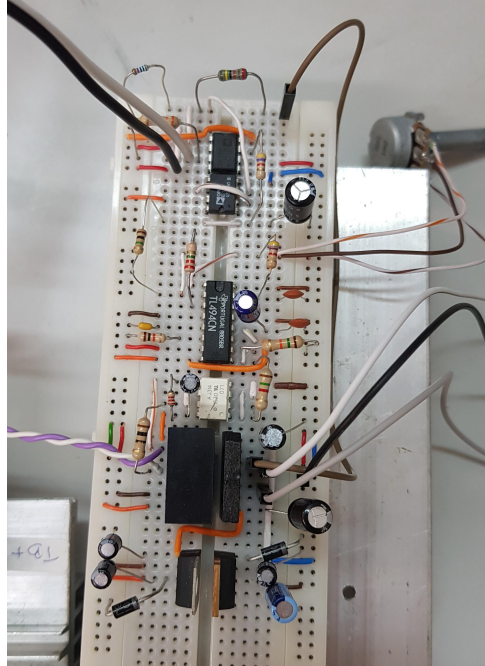
## Resultados Experimentais

Juntando todos os circuitos construídos na etapa de projeto, podemos obter agora o circuito completo do dispositivo que deve solucionar o problema abordado na proposta deste trabalho. Esse circuito está demonstrado a seguir na Figura 5.1.

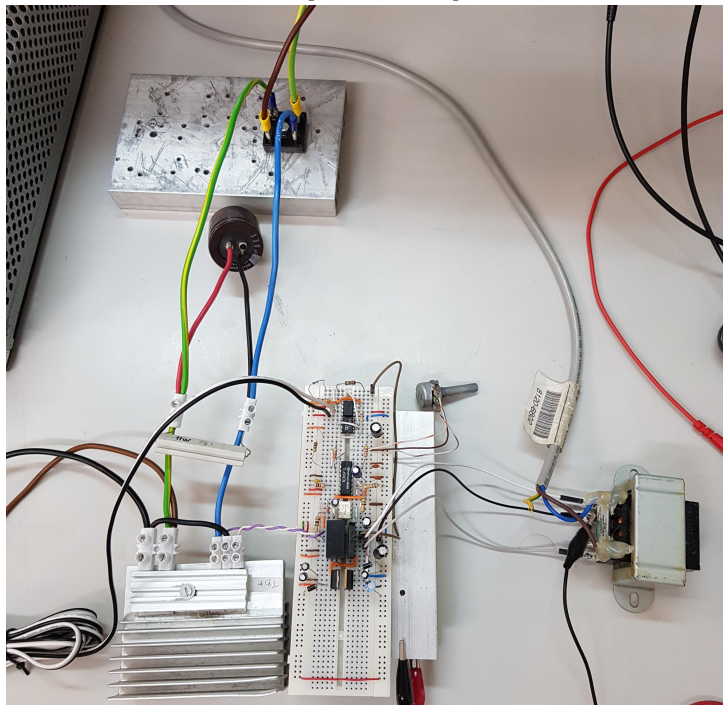


**Figura 5.1:** Circuito final para o dispositivo proposto.

Inicialmente, o circuito foi montado na prática utilizando uma protoboard para os componentes eletrônicos de baixa tensão, e um conjunto de cabos e bornes para a ligação direta dos componentes do circuito de potência. A seguir, na Figura 5.2 podemos ver uma série de ilustrações que demonstram essa montagem. Como temos um circuito de potência muito exposto, para o testes foi adicionado um resistor de descarga em paralelo com o capacitor, uma vez que o componente permanece carregado por muito tempo.



(a) Circuito implementado em protoboard.



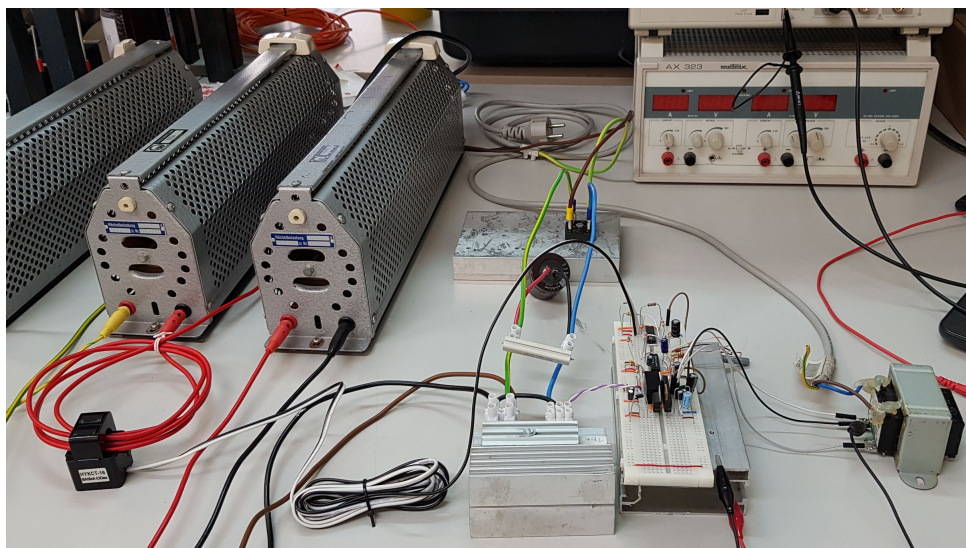
(b) Implementação do sistema completo.

**Figura 5.2:** Implementação prática do circuito concebido.

## 5.1 Ensaio em Malha Aberta

Com essa montagem, realizamos um ensaio em malha aberta para que pudéssemos ver o comportamento do sistema e a qualidade dos seus sinais em cada etapa de processo. O teste consiste basicamente em simular uma potência puramente ativa sendo injetada na rede. Essa simulação se dá, através da leitura invertida da corrente consumida por uma carga resistiva, para isso foi utilizado um conjunto de varistores como carga resistiva. Porém, como o sensor de corrente utilizado é um transformador de corrente do tipo janela, podemos simular níveis de corrente elevadas sem necessariamente obtê-las, apenas dando mais voltas com o fio de alimentação da carga ao redor do núcleo desse transformador. E por fim, para simular a resistência que ficaria inserida no boiler, utilizamos mais um varistor como carga dissipativa.

Esse ensaio é considerado de malha aberta, pois a corrente que estamos medindo não se altera com a variação da quantidade de potência que o dispositivo irá dissipar na resistência do boiler. A seguir, na Figura 5.3, temos uma representação de como ficou essa montagem, o primeiro varistor, da direita para a esquerda, é a carga que irá representar o resistor inserido no boiler.



**Figura 5.3:** Montagem do sistema para o ensaio em malha aberta.

Os resultados obtidos com essa montagem não foram muito satisfatórios, observamos muito problema com propagação de ruídos devido aos chaveamentos, e a falta de um plano

de aterramento bem elaborado. Podemos ver a seguir na Figura 5.4 algumas capturas de tela que foram obtidas diretamente do osciloscópio durante o ensaio.

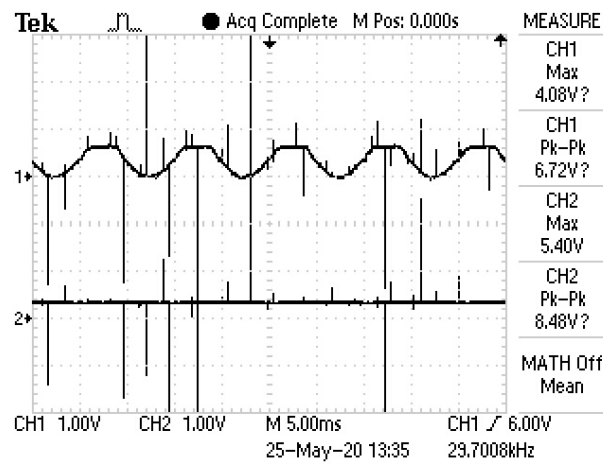
Como o integrado TL494CN é um dispositivo sensível aos ruídos, era esperado que precisássemos fazer melhorias nos aterramentos dessa montagem. Após muitos testes, encurtando alguns condutores e inserindo algumas capacitâncias em alguns pontos estratégicos do sistema, chegamos a conclusão que a melhor solução seria desenvolver placas de circuito impresso (PCB), com um ampla área de aterramento.

Com isso, pensamos em desenvolver duas placas separadas, uma para a parte de potência e outra para todo o resto do circuito. No começo do Capítulo, na Figura 5.1 temos dois retângulos pontilhados na cor verde, estes indicam exatamente o que cada uma das placas deverá comportar. Para o desenvolvimento do *layout* da placa e seu roteamento, foi utilizado o *software* EAGLE da empresa Autodesk a partir de uma licença de estudante. A seguir, na Figura 5.5 temos a representação dos *layouts* de ambas as PCBs, desenvolvidas dentro desse *software*.

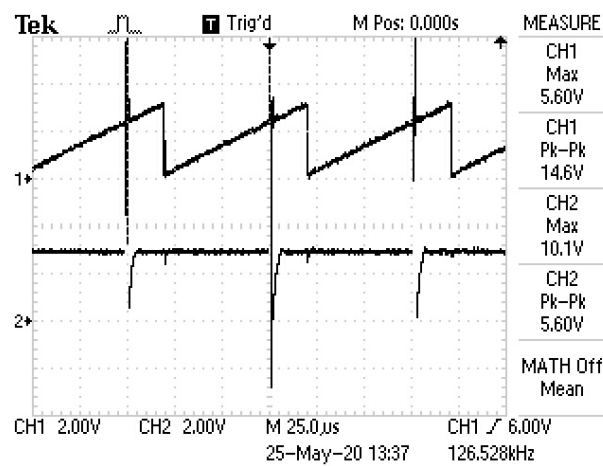
Nessa etapa tivemos um grande imprevisto devido aos problemas de saúde pública em que o mundo se encontrava, houve uma falta de material no laboratório e a encomenda com as placas para o procedimento de implementação da PCB principal não chegou a tempo. Portanto, acabei voltando para o Brasil sem finalizar essa placa. Porém, como a placa de potência era bem pequena, conseguimos implementá-la com restos de outras placas. Na Figura 5.6 temos o resultado final do desenvolvimento da placa de potência.

Os *layouts* das placas foram desenvolvidos com base ao espaço disponível de uma caixa de alumínio fornecida pelo professor, essa serviria de carcaça para o nosso dispositivo. Essa caixa de alumínio teria dupla função, proteção dos componentes e dissipação do calor gerado pelos dispositivos de potência. A montagem foi realizada mas não ficou completa, uma vez que a placa principal não pôde ser finalizada. Assim, a nova montagem do circuito, que deve encarar os próximos ensaios esta demonstrada na Figura 5.7. Como não conseguimos implementar a placa de principal, colocamos provisoriamente a protoboard sobre uma placa de alumínio e a aterramos.

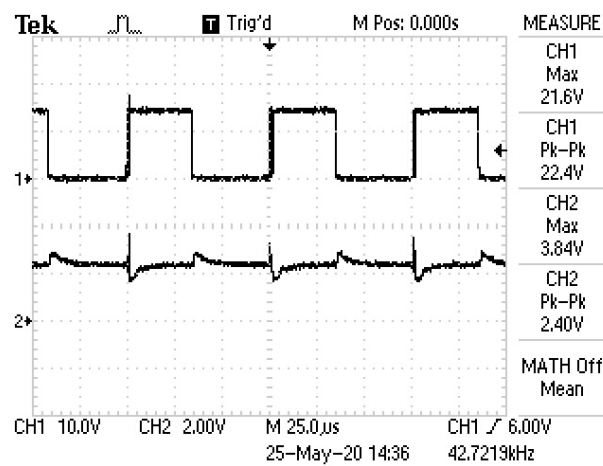
## 5.1. Ensaio em Malha Aberta



(a) CH1 saída do multiplicador e no CH2 saída do filtro.

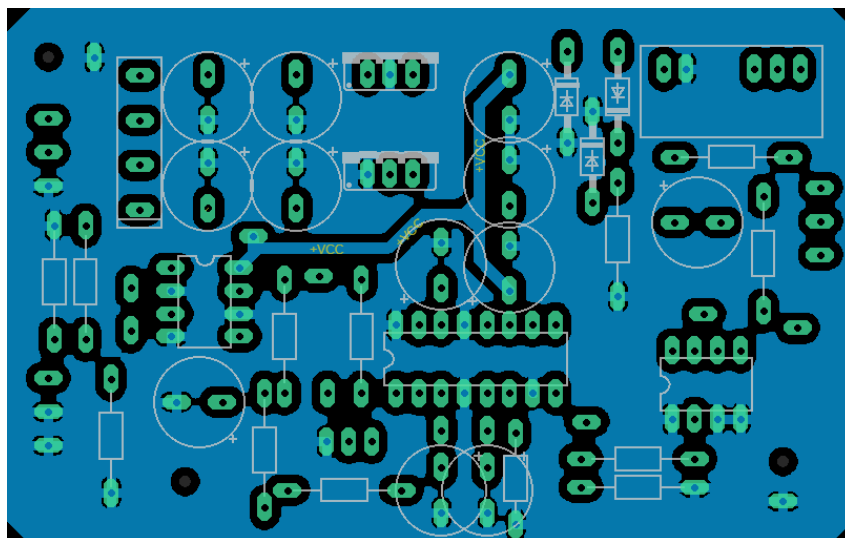


(b) CH1 onda triangular do TL494CN e no CH2 pino de feedback do mesmo.

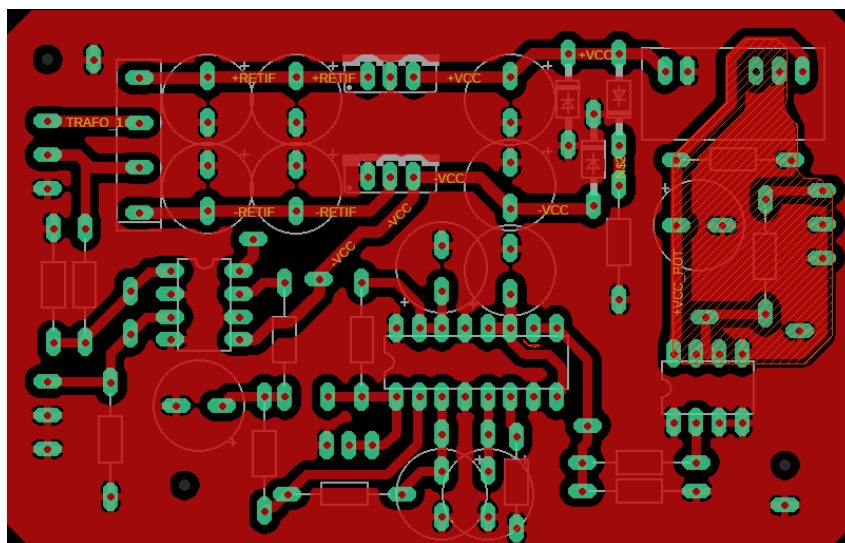


(c) CH1 sinal pwm e no CH2 pino de feedback do TL494CN.

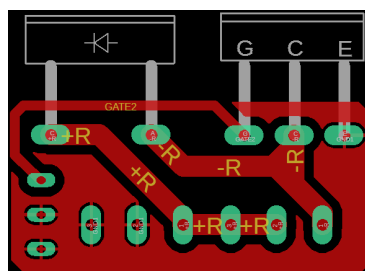
**Figura 5.4:** Resultados práticos obtidos a partir de um osciloscópio.



(a) Face superior da placa principal.



(b) Face inferior da placa principal.

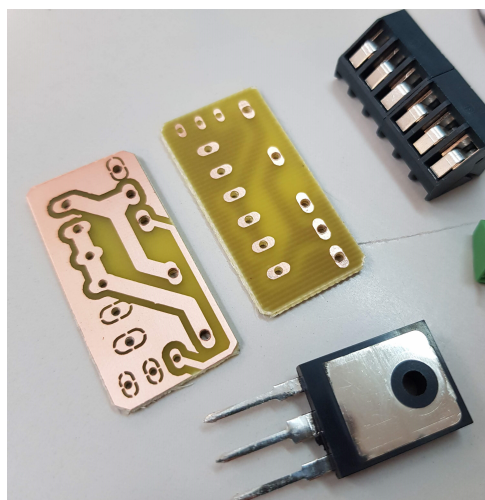


(c) Face inferior da placa de potência.

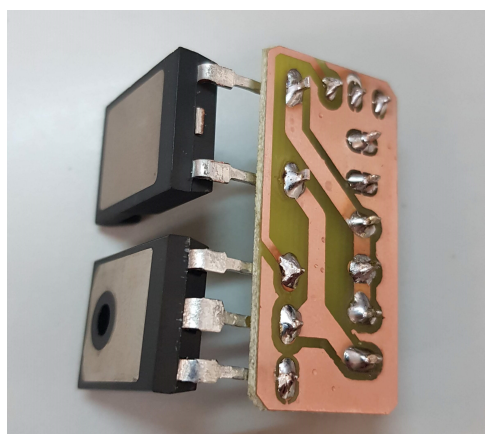
**Figura 5.5:** Layout das PCBs obtido com o software EAGLE, vistas superiores.

## 5.1. Ensaio em Malha Aberta

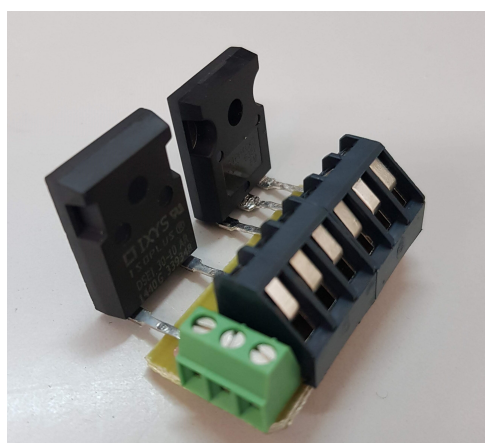
---



(a) Placa logo após o processo de corrosão.

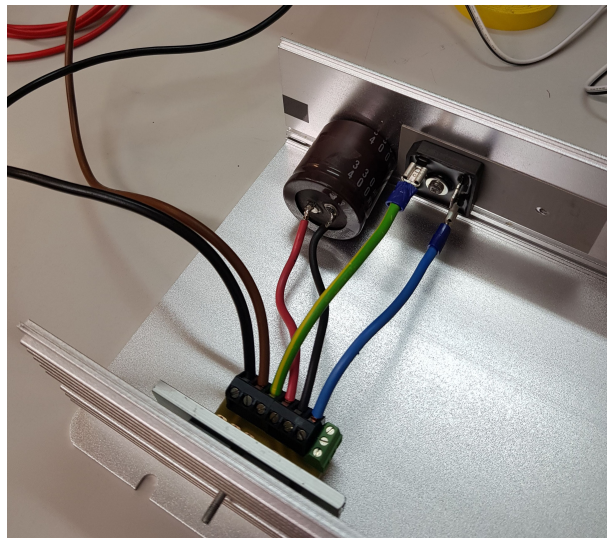


(b) Processo de soldagem dos componentes.

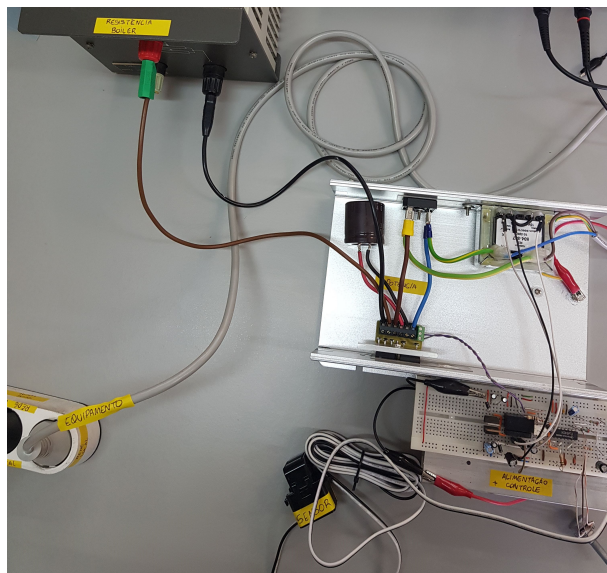


(c) Apresentação final da placa com os bornes de conexão.

**Figura 5.6:** Resultado da construção da PCB de potência.



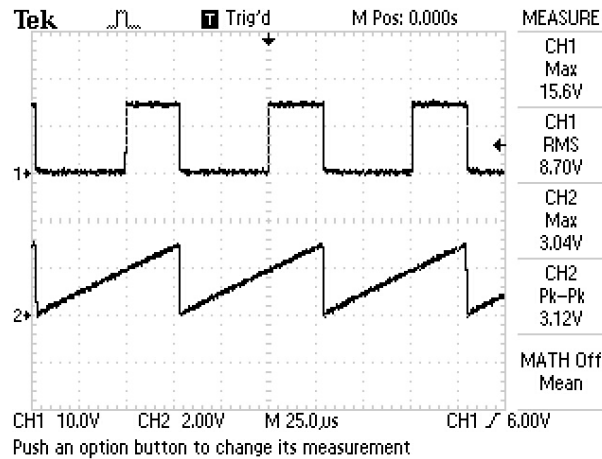
(a) Fixação do circuito de potência na caixa.



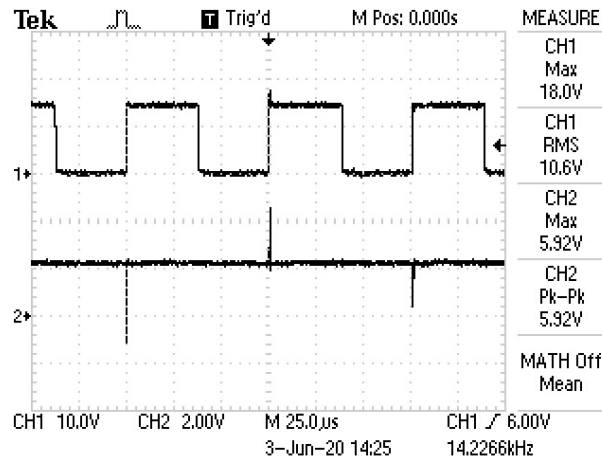
(b) Montagem de todos os componentes do dispositivo.

**Figura 5.7:** Montagem do novo layout dos circuitos.

## 5.1. Ensaio em Malha Aberta



(a) CH1 sinal pwm e no CH2 onda triangular do TL494CN.



(b) CH1 sinal pwm e no CH2 pino de feedback do TL494CN.

**Figura 5.8:** Novos resultados obtidos com o novo layout, para o ensaio a malha aberta.

Com essa nova montagem, foram repetidos os ensaios em malha aberta para que possamos analisar se a implementação do circuito de potência em PCB ajudou a reduzir a propagação do ruído entre os circuitos, e se a utilização de uma área de aterramento maior também agregou boas melhorias na qualidade dos sinais. Os resultados obtidos estão demonstrados na Figura 5.8.

Comparando esses resultados obtidos após a mudança de layout com os resultados obtidos antes dela, vemos uma redução significativa na propagação de ruídos entre as placas. Isso nos diz que a mudança adotada foi muito positiva e ajudou a melhorar a qualidade dos sinais. Portanto, tomamos o resultado como satisfatório, e agora iremos seguir para o ensaio

em malha fechada, para que possamos ver como o dispositivo irá se comportar com sistema em dinâmica.

## 5.2 Ensaio em Malha Fechada

A estrutura muda totalmente para o teste em malha fechada. Utilizamos um inversor da marca SOLIS com uma fileira de módulos fotovoltaicos com cerca de 1000W de potência instalada, que estavam disponíveis no laboratório. Esse inversor irá injetar a potência gerada pelas fotovoltaicas na nossa micro-rede. Vamos montar uma micro-rede apenas com uma régua de três tomadas, sendo uma delas destinada ao inversor, outra às cargas da residência e a última para alimentar o nosso dispositivo. As cargas da residência, por sua vez, serão simuladas através de um banco de resistores com chaves que nos permitem alterar as associações entre as resistências. Por último, ligaremos a régua a uma tomada do laboratório e, portanto, a energia que vier da tomada será a energia proveniente da concessionária, a qual devemos medir com nosso sensor de corrente. A seguir, na Figura 5.9 temos a representação de todos os componentes montados para o ensaio de malha fechada.

Para validar esse ensaio, precisamos ligar o sistema durante o período de insolação, tendo assim alguma potência sendo gerada no sistema fotovoltaico. Primeiramente, deixamos a micro-rede ligada por um período de tempo sem conectar o dispositivo desenvolvido, e monitoramos assim a sua saída com um analisador de qualidade de energia, que irá nos indicar quanta potência está sendo injetada ou consumida pela residência. Após isso, ligamos o nosso dispositivo e monitoramos novamente a micro-rede para que possamos comparar os comportamentos e analisar como nosso dispositivo vai impactar realmente o sistema.

Como os testes foram realizados em um período onde temos baixa incidência de raios solares na região norte do país, é muito difícil dizer que os resultados apresentados estão com uma potência gerada constante, pois ela varia muito no decorrer do ensaio. Na tabela a seguir apresentaremos alguns dados. Cada linha se refere a um instante de tempo, onde podemos dizer que, momentaneamente, há mesma produção de energia fotovoltaica e mesma carga sendo consumida pela residência. Essa afirmação não é verdadeira para comparar os valores

## 5.2. Ensaio em Malha Fechada

---



(a) Inversor de corrente SOLIS.



(b) Banco de resistores ajustável.



(c) Micro-rede construída para o ensaio.

**Figura 5.9:** Componentes da estrutura construída para o ensaio a malha fechada.

entre as linhas, pois temos muita variação de potência sendo gerada, e para aumentar a fidelidade do ensaio, foram alteradas as associações entre os resistores no banco de cargas, para simularmos ainda um consumo variável no tempo dentro da residência. Portanto, os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 5.1.

Infelizmente, talvez até por falta de atenção, não conseguimos anotar os dados de geração instantânea injetada na micro-rede pelo inversor, e também o valor exato da resistência de consumo que representa a residência. Com esses dados, poderíamos ter algumas informações adicionais como a quantidade exata de potência gerada, consumida pela residência e injetada na rede. Porém, para fins de validação do experimento, como temos uma aleatoriedade das condições simuladas no ensaio, ainda podemos considerar os resultados com tranquilidade.

**Tabela 5.1:** Resultados do ensaio a malha fechada

Caso 1	Caso 2	Reaproveitamento	
Injeção (W)	(W)	(%)	
650	70	580	89,23
536	70	466	86,94
304	67	237	77,96
207	51	156	75,36
168	32	136	80,95
133	27	106	79,70
-2	-2	0	0,00
-53	-53	0	0,00
-134	-134	0	0,00
-311	-311	0	0,00
-644	-644	0	0,00

O Caso 1 indica que o sistema está operando sem o equipamento desenvolvido, e o Caso 2 ele opera com o equipamento. Os dados apresentados nas duas primeiras colunas são, as potências ativas, medidos diretamente na entrada da residência. Valores negativos indicam consumo de energia proveniente da concessionária, e valores positivos indicam injeção de

## *5.2. Ensaio em Malha Fechada*

---

potência na rede. A coluna "Reaproveitamento", demonstra a quantidade de energia que o dispositivo conseguiu redirecionar para a resistência do boiler, em relação à quantidade que estava sendo injetada no Caso 1.



# Capítulo 6

## Discussão e Análise

Analisando a Tabela 5.1 do Capítulo anterior, observamos que quando o dispositivo é conectado no sistema da residência, a perda de potência para a rede cai drasticamente. Em média, 80% da energia é reaproveitada para aquecer o boiler com água. Com esse resultado podemos perceber os impactos de utilizar apenas um controlador proporcional, uma vez que esse é conhecido por apresentar um erro de estado estacionário na resposta final, o que acaba limitando nossa capacidade de atingir resultados muito melhores do que esse.

Outra informação importante que podemos tirar da tabela é com relação a confiabilidade do dispositivo em não inserir mais cargas na rede, quando essa já estiver consumindo potência da concessionária. Caso contrário, o dispositivo em vez de gerar economia poderia acabar gastando mais energia, aumentando assim a conta final do proprietário. Isso é importante pois temos que lembrar que esse não deve ser o sistema de aquecimento principal da residência, é apenas um aquecimento auxiliar a partir de um reaproveitamento de energia, o que possibilita reduzir os gastos do sistema principal. Essa característica pode ser vista nas linhas da tabela onde a potência injetada é negativa, e conseqüentemente ficamos com reaproveitamento de 0W, o que significa que a carga no boiler está completamente desligada.

O dispositivo como um todo mostrou-se muito prático, já que qualquer pessoa poderia instalá-lo na sua residência apenas com um pouco de atenção, uma vez que ele é constituído de uma caixa fechada de alumínio, um plugue para ligar na tomada mais próxima do local de instalação, um sensor que deve ser ligado ao quadro geral da residência e uma saída onde deve ser conectada a resistência do boiler. O sensor é a única coisa crítica nesse conjunto, pois ele que deve ser instalado na posição correta para garantir o funcionamento do dispositivo.

Não podemos esquecer também que esse não é um dispositivo pronto e já destinado aos consumidores, uma vez que não foi desenvolvido um sistema para proteção do boiler contra

sobreaquecimento. Se isso não for levado em consideração, podemos ter uma situação de risco, causada por uma sobra de potência gerada durante um dia todo associado a um baixo consumo de água quente. Esse episódio acabaria elevando a temperatura da água até o ponto de fervura o que poderia causar um aumento de pressão considerável no boiler.

A construção de um circuito com um bom isolamento entre a eletrônica de potência e o restante do circuito foi um dos melhores investimentos, uma vez que não tivemos problema algum com queima de componentes durante todo o período de construção e testes. Esse tipo de abordagem colabora muito para que o nosso dispositivo seja robusto, durável e confiável. Ainda temos um impacto positivo na segurança, já que devido ao isolamento, uma eventual manutenção na placa principal não vai oferecer tantos riscos para o técnico.

Outro ponto relevante foi o comportamento do dispositivo com relação à necessidade de um plano de aterramento bem amplo. O impacto na qualidade dos sinais teve uma melhora muito significativa e, conseqüentemente, o dispositivo terá um bom funcionamento nos vários cenários em que ele estará inserido posteriormente. Como conseguimos uma boa qualidade em um ambiente como o laboratório, onde há grande presença de vários dispositivos chaveados capazes de injetar bastante ruídos na rede. Isso nos dá alguma segurança quanto ao bom funcionamento desse dispositivo já que ele é destinado para residências.

Embora as várias dificuldades encontradas no decorrer desse longo caminho, devido tanto a inexperiência com a construção prática de um equipamento, como também as questões reacionadas à pandemia global Covid-19, que resultaram em restrições de uso dos laboratórios e atrasos de entrega de encomendas no país, podemos dizer que a conclusão do projeto foi muito satisfatória.

# Capítulo 7

## Conclusões

Um dispositivo inovador *plug and play*, foi desenvolvido no decorrer deste trabalho. Quando associado a um sistema fotovoltaico, é capaz de reaproveitar a potência gerada que não é consumida pela residência, para beneficiar o sistema de aquecimento de água sanitária. O funcionamento do dispositivo se dá, inicialmente, pelo monitoramento da corrente de entrada da residência, possibilitando assim calcular a potência líquida que está sendo consumida ou injetada pelo sistema. Com isso, foi construído um sistema de controle, baseado em um controlador proporcional, que é capaz de processar a informação de potência líquida e gerar uma onda PWM de acordo com esse excesso de potência. A onda PWM, é utilizado para controlar o acionamento de uma carga resistiva, através de um conversor DC-DC chaveado. Foram implementados ainda, um sistema de comando isolado, baseado em um dispositivo acoplador óptico, para isolar o circuito de controle do circuito de potência.

Mesmo com tantos contratempos devido à Covid-19, foi possível desenvolver o sistema proposto, obtendo resultados muito promissores, uma vez que o mesmo conseguiu reaproveitar em média 80% da energia sobressalente do sistema. O dispositivo desenvolvido possui algumas limitações, como a falta de um travamento de segurança, para evitar sobreaquecimento do boiler e erro de estado estacionário na resposta do controlador escolhido, que impossibilita um reaproveitamento melhor da energia excedente.

A topologia desenvolvida demonstrou muitas vantagens, são algumas delas, a possibilidade de expandir a análise da potência para sistemas polifásicos sem alterações complexas, robustez elétrica, uma vez que foram realizados testes em uma rede ruidosa e ainda obtivemos um bom funcionamento, manutenção fácil e barata, pois o sistema desenvolvido é baseado em eletrônica analógica, e finalmente, alta confiabilidade do dispositivo, evitando dissipar potência da rede quando a produção está quase se igualando ao consumo.

No contexto dos auto consumidores, onde foi baseado o projeto, percebemos agora que a contribuição com essa linha de pesquisa é muito positiva, uma vez que a relação entre a concessionária e esse tipo de consumidor é bem desvantajosa, ou seja, não há como se obter um bom retorno injetando o excedente da sua produção na rede, tal posicionamento pode até desmotivar a instalação desses sistemas, portanto, o desenvolvimento de dispositivos como esse que é capaz de redirecionar a energia excedente, gerando assim economia em outro setor da residência, se demonstra muito atrativo para o investidor.

Uma abordagem alternativa do uso desse dispositivo em residências, com instalações novas, ou que não tenham coletores solares para AQS, o sistema fotovoltaico pode ser "sobredimensionado" para garantir ambas as funções: produção de energia elétrica e térmica, evitando assim os coletores solares e os respectivos custos de instalação e manutenção.

São vários os pontos relevantes para trabalhos futuros, baseado nas considerações obtidas no Capítulo 6. Primeiramente, é interessante realizar uma análise detalhada sobre a capacidade de economia que o dispositivo proporciona aos auto consumidores a longo prazo, gerando assim um estudo de viabilidade dos investimentos necessários para se instalar um dispositivo como esse. Ainda, poderia ser estudada a real viabilidade em implementar uma melhoria no controlador, substituindo o controlador proporcional por um controle do tipo PI ou até mesmo PID, o que possibilitaria aumentar o reaproveitamento de energia.

Assim, constata-se que no decorrer desse longo período de trabalho, conseguimos atingir os principais objetivos da proposta de trabalho, porém, muito mais do que isso, conquistamos um crescimento pessoal imensurável, aumentando nossa capacidade de trabalho em conjunto não só como aluno e professor, mas sim como colegas. Importante relatar que a via de informação entre aluno e professor nunca foi estreita e tampouco unidirecional, obtivemos uma construção conjunta baseada em longas sessões de trabalho e discussões.

# Referências

- [1] P. G. Amado, «Sistema de Gestão de Energia Renovável para Autoconsumo,» 2015, pp. 1–9. URL: <http://hdl.handle.net/10362/16863>.
- [2] V. M. F. A. N. da Cruz, «Autoconsumo e abandono da rede em Portugal,» 2015, pp. 1–11. URL: <http://hdl.handle.net/10451/20631>.
- [3] U. N. C. Change. (2015). «The Paris Agreement,» URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [4] L. Pinto. (2019). «Portugal consegue a maior redução de emissões de CO2 da União Europeia,» URL: <https://www.publico.pt/2019/05/08/sociedade/noticia/portugal-reduz-9-emissoes-co2-maior-reducao-ano-ue-1871893>.
- [5] Portugal, «PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030,» dez. de 2019.
- [6] E. Comercial. (2020). «PORTUGAL, CAMPEÃO DAS RENOVÁVEIS,» URL: <https://www.edp.pt/content-hub/portugal-campeao-das-energias-renovaveis/>.
- [7] A. e LNEG. (2019). «GUIA PARA O AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO – PORTUGAL,» URL: [https://www.pvp4grid.eu/wp-content/uploads/2019/05/1905\\_PVP4Grid\\_Bericht\\_Portugal\\_web.pdf](https://www.pvp4grid.eu/wp-content/uploads/2019/05/1905_PVP4Grid_Bericht_Portugal_web.pdf).
- [8] H. A. Duarte, «Água - Uma visão Integrada,» mai. de 2014.
- [9] M. N. O. S. Charles K. Alexander, *Fundamentos de circuitos elétricos*, sér. 5 edição. AMGH, 2013, ISBN: 9788580551730.
- [10] D. W. Hart, *Power Electronics*, sér. alk. paper. McGraw-Hill, 2011, ISBN: 9780073380674.