



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

HUGO AVILA DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE CONTROLE PARA INVERSOR DE
TENSÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE
PLACAS FOTOVOLTAICAS**

ARAXÁ/MG

2016

HUGO AVILA DE OLIVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE CONTROLE PARA INVERSOR DE
TENSÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE
PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Automação Industrial, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Automação Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Henrique José Avelar

ARAXÁ/MG

2016

ATA DE APROVAÇÃO



Serviço Público Federal
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL/ ARAXÁ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC – ATA DE DEFESA

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE
AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL do aluno *Hugo Ávila de Oliveira*

As 19h do dia 04 de agosto de 2016, reuniu-se, no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG/ Unidade Araxá, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso para julgar, em exame final, o trabalho intitulado **Desenvolvimento de Controle para Inversor de Tensão na Geração de Energia Elétrica por Meio de Painéis Fotovoltaicos** como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Engenheiro de Automação Industrial. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. Henrique José Avelar, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final.

Após a reunião da Banca Avaliadora, o candidato foi considerado: APROVADO Com nota final de: 91 / 100.

O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. O aluno abaixo-assinado declara que o trabalho ora identificado é da sua autoria material e intelectual, excetuando-se eventuais elementos, tais como passagens de texto, citações, figuras e datas, desde que as mesmas identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos autores, quando necessárias. Declara ainda, neste âmbito, não estar a violar direitos de terceiros.

Hugo Ávila de Oliveira
Nome do aluno

Hugo Ávila de Oliveira
assinatura

Araxá, 04 de agosto de 2016.
local e data

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou os trabalhos e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Araxá, 04 de Agosto de 2016.

Prof. Dr. Wanderley Alves Parreira

H. J. Avelar
Prof. Dr. Henrique José Avelar (Orientador)

Frederico Duarte Fagundes
Prof. Frederico Duarte Fagundes

DEDICO ESTE TRABALHO

*Aos meus pais, Elenice e Hércules,
que infelizmente não estão aqui para ver esta vitória, mas onde estiverem sei que estão
orgulhosos.*

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e por iluminar os meus caminhos com a presença de pessoas tão especiais. Por me dar forças para vencer os momentos difíceis, coragem para continuar superando as dificuldades e paciência para não me entregar ao desânimo diante das minhas fraquezas.

À minha esposa Letícia, que em todos os momentos, sejam alegres ou tristes, fáceis ou difíceis, me apoiou e confortou, sempre ao meu lado.

À minha filha Valentina, que ainda não saiu da barriga da mãe, mas já me enche de alegria.

Ao professor Dr. Henrique José Avelar, por orientar este trabalho e disponibilizar seu conhecimento.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.”

Winston Churchill

RESUMO

Atualmente o Brasil está passando por severas crises hídricas que levam a crises energéticas, além de estar enfrentando uma crise econômica, levantando a necessidade de diminuir a dependência da geração de energia elétrica por meio de hidroelétricas e aumentar a utilização das fontes de energia renováveis como o sol, vento e etc. O sol é capaz de fornecer energia o suficiente para abastecer todo o consumo de energia elétrica do mundo, mas esta fonte não é amplamente utilizada devido à falta de tecnologia e ao alto custo das placas fotovoltaicas e dos componentes do sistema de geração, o que inibe a popularização do sistema em meio a uma crise econômica. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um inversor de tensão barato, controlado por um microcontrolador da família PIC, na geração de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas, de forma a reduzir os custos de fabricação do inversor em até 5 vezes, possibilitando que qualquer consumidor possa instalar um sistema de geração de energia elétrica simples e barato em sua residência, contribuindo para a redução da conta de luz.

Palavras-chave: Energia Elétrica. Inversor de Tensão. Pannel Fotovoltaico. PIC.

ABSTRACT

Currently, Brazil is experiencing severe water crises that lead to energy crises, as well as be facing an economic crisis, raising the need to reduce the dependence of power generation through hydro and increase the use of renewable energy sources such as sun, wind, etc. The sun is able to provide enough energy to supply the entire electricity consumption of the world, but this source is not widely used due to lack of technology and the high cost of photovoltaic panels and components of the generation system which inhibits the popularization of the system in the midst of an economic crisis. This work aims at the development of a cheap frequency inverter controlled by a microcontroller from PIC family in the generation of electricity through photovoltaic panels to reduce the inverter manufacturing costs by up to 5 times, enabling any consumer to install a system of simple and cheap electric power generation at home, helping to reduce the electricity bill.

Keywords: Electric Energy. Voltage Inverter. Photovoltaic Panel. PIC .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Gráfico de geração mundial de energia elétrica por fonte.....	17
Figura 2: Junção PN.....	20
Figura 4: Bateria estacionária.....	22
Figura 5: Esquema de blocos do circuito eletrônico.....	23
Figura 6: Microntrolador PIC 18F4550.....	24
Figura 7: Diagrama de blocos do Inversor de Tensão.....	25
Figura 8: (a) Semi-ciclos positivo e negativo de uma senóide. (b) Ponte H.....	26
Figura 9: Funcionamento da Ponte H.....	26
Figura 10: Composição do MOSFET.....	27
Figura 11: Filtro passivo LC utilizado no inversor.....	28
Figura 12: Forma de onda ilustrativa do funcionamento do PWM aplicado ao MOSFET e da saída de tensão senoidal após o filtro.....	28
Figura 13: Circulação de corrente no capacitor do filtro com o inversor sem carga.....	29
Figura 14: Símbolo do transformador.....	31
Figura 15: Diagrama de blocos do controle do inversor.....	32
Figura 16: Características do MOSFET IRF540 apresentadas no Datasheet.....	35
Figura 17: Circuito de ligação do CI IR2101 indicado pelo fabricante.....	35
Figura 18: Filtro LC com os valores de indutor e capacitor calculados.....	36
Figura 19: Transformador utilizado no projeto.....	37

Figura 20: Placa PROTO'n PIC 18F4550 do fabricante SmartRádio.	38
Figura 21: Oscilação crítica do sistema.	40
Figura 22: Ponte H montada para a simulação.	41
Figura 23: Circuito integrado IR2101 para acionamento dos MOSFETs Q2 e Q4.	41
Figura 24: Circuito integrado IR2101 para acionamento dos MOSFETs Q1 e Q3.	42
Figura 25: PIC18F4550 montado para a simulação.	42
Figura 26: Filtro Passivo LC e o transformador ligado a carga montada para a simulação.	43
Figura 27: Placa de circuito impresso do CI IR2101.	44
Figura 28: Placa de circuito impresso da ponte H.	45
Figura 29: Circuito de controle montado na protoboard.	45
Figura 30: Capacitores de 25 uF utilizados no circuito.	46
Figura 31: Indutor de 33 uH utilizado.	46
Figura 32: Senóide obtida de um gerador de funções.	47
Figura 33: Gráfico de saída de tensão do inversor sem carga.	47
Figura 34: Gráfico de saída de tensão do inversor com 50% de carga.	48
Figura 35: Gráfico de saída de tensão do inversor com 100% de carga.	48
Figura 36: Forma de onda de tensão na saída do inversor sem carga.	49
Figura 37: Saída de tensão do inversor com 50% de carga.	50
Figura 38: Saída de tensão do inversor com 100% de carga.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sintonia de controladores ziegler-nichols. Método da oscilação crítica.	33
Tabela 2: Relação de tempo e tensão correspondente em um período da senóide.	39
Tabela 3: Lista de componentes, quantidades necessárias e seus respectivos preços.	43
Tabela 4: Preços do componente necessários à montagem do sistema.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada
IRF	International Rectifier
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Semicondutor de Óxido Metálico
PIC	Controlador de Interface Periférica
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Modulação por Largura de Pulso
SCR	Retificador Controlado de Silício
TBJ	Transistor Bipolar de Junção
THD	Taxa de Distorção Harmônica

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Resistência Elétrica
μ	Notação científica, micro (10^{-6})
π	Constante matemática “pi” igual 3,141592
V_{rms}	Tensão eficaz

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA	19
2.1	A Energia Solar	19
2.2	Painéis Fotovoltaicos	19
2.3	Armazenamento de Energia.....	21
2.4	Circuito Eletrônico	22
2.4.1	Microcontrolador	23
2.4.2	Inversor de Tensão.....	24
2.4.3	MOSFET	27
2.4.4	Filtro Passivo LC	28
2.4.5	Transformador	31
2.5	Controle do Inversor	32
3	Metodologia.....	34
3.1	Cálculo dos Componentes	34
3.1.1	Circuito de Potência	34
3.1.2	Circuito do Filtro Passivo LC.....	35
3.1.3	Transformador	37
3.1.4	Placa do Microcontrolador	37
3.2	Desenvolvimento do Programa	38
3.3	Simulação	40
3.4	Levantamento dos Componentes.....	43
3.5	Montagem das placas.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Resultados da Simulação	47
4.2	Resultados do Circuito	49
4.3	Custos	51
5	CONCLUSÕES.....	52
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICE A – Programa desenvolvido	56

1 INTRODUÇÃO

Com o constante crescimento dos países, a energia elétrica vem se tornando cada vez mais essencial. Ela é de extrema importância para as indústrias, o comércio e praticamente todos os setores que geram riqueza. Além disso, o padrão de vida cai muito em uma residência que não tenha energia elétrica. Assim, a cada ano, a geração de energia tem que aumentar e, em vista disso, o profissional da área de automação pode atuar nessa área para proporcionar esse crescimento, isso porque a área de Engenharia de Automação Industrial tem evoluído muito, haja vista seu objetivo maior que é melhorar a eficiência de processos, bem como a vida das pessoas, projetando dispositivos que permitam a automatização, instalando-os e realizando a manutenção desses por meio de softwares especializados para o controle.

Nessa medida, tendo como foco de estudo a produção de energia elétrica, verifica-se que essa é gerada em grande parte por hidrelétricas, termelétricas e usinas nucleares. As hidrelétricas utilizam a força da água em queda para girar turbinas que geram a energia. Essas são responsáveis pela maior parte da geração de energia no Brasil, pois é relativamente barata devido à abundância dos recursos hídricos no país. Porém, o meio ambiente é profundamente afetado onde as usinas hidrelétricas são instaladas. Grandes regiões são alagadas, deixando debaixo d'água a flora da região e expulsando a fauna de seu habitat natural. Além disso, as famílias que moram na região que será alagada serão desalojadas e a terra não poderá mais ser utilizada para nenhum fim. Outro grande problema das hidrelétricas é o fato de que dependem da disponibilidade de água. Em tempos de seca, como o Brasil vive nos últimos anos, o nível das represas cai, a geração diminui e então há a necessidade de acionar as termelétricas, que são mais caras, para compensar esta diminuição.

As termelétricas, por sua vez, são as principais responsáveis pela geração de energia elétrica do mundo. Em 2010, a participação desse meio era de 66,5% do montante de energia gerado no mundo (BRASIL, 2013, p. 23). As usinas termelétricas convencionais queimam combustíveis fósseis, como carvão e derivados do petróleo, para aquecer a água gerando vapor que gira turbinas para gerar a energia elétrica. Essa fonte de energia é bastante utilizada devido ao fato de demandar tecnologia simples, além disso, a maioria dos países não tem grande disponibilidade hídrica, ao passo que possui abundância de combustíveis fósseis.

No entanto, a queima de combustíveis fósseis vem sendo muito discutida nas últimas décadas, pois é uma grande fonte de poluidores atmosféricos. Em vista disso, acordos estão sendo firmados entre os países para diminuir esse tipo de poluição, impondo limitações e

obrigações na sua execução, a fim de se preservar a saúde humana e a do planeta. Outro ponto de discussão sobre esse tipo de geração de energia é a disponibilidade de combustíveis fósseis ao longo dos próximos anos. Como não são renováveis, um dia irão acabar. E com o consumo aumentando cada vez mais, esse dia está se aproximando, fazendo com que se tenha que desenvolver alternativas mais sustentáveis.

As usinas nucleares, por fim, são responsáveis por 12,9% da geração de energia elétrica do mundo (BRASIL, 2013, p. 23). É o meio mais novo, em relação aos anteriores, de geração de energia, o qual utiliza a emissão de radiação de substâncias para aquecer a água, gerando vapor para girar turbinas que geram a energia. Essa fonte é relativamente cara, pois demanda alta tecnologia e a fonte de energia também é cara. Sobre essa produção, ressalta-se que a energia gerada pela usina nuclear é frequentemente chamada de energia limpa, pois não há a liberação de nenhum poluente no meio ambiente, mas os restos das substâncias radioativas têm que ser armazenados em grandes depósitos subterrâneos, com paredes grossas de concreto. Ademais, há uma rígida fiscalização governamental, visto que esse armazenamento gera um risco potencial muito grande, pois um vazamento é desastroso para o meio ambiente e para os seres humanos.

Em vista dessas considerações, nota-se que o grande problema das usinas nucleares é que uma pequena falha pode levar a danos irreparáveis. O acidente de Chernobyl em 1986 é um exemplo do potencial de risco desse tipo de geração. Muitas pessoas morrem até hoje devido à exposição a radiação que foram submetidas naquela época, além do fato de que o local será inabitável por muitos anos. Em Fukushima, no Japão, devido a um terremoto em 2011, uma usina nuclear teve um dos reatores danificado, provocando um vazamento de radiação que afetou não só a terra, mas o mar. Nesse episódio, foram verificadas plantas próximas à usina com DNA alterado e o acesso à área está sendo controlado pelo governo para evitar ainda mais danos.

Diante dessas ponderações, por meio da Figura 1, retirada do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2013, disponibilizado pelo Governo brasileiro, mostra-se um gráfico com a participação de cada meio na geração total de energia elétrica do mundo.

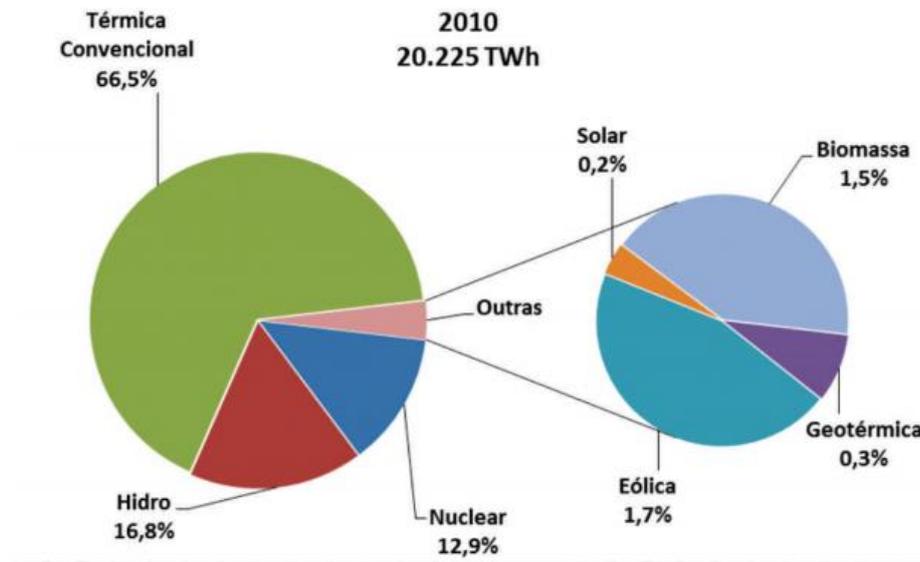


Figura 1: Gráfico de geração mundial de energia elétrica por fonte.

Fonte: BRASIL. Anuário Estatístico de Energia Elétrica, 2013, p. 23.

O gráfico da Figura 1 também expõe a participação das energias limpas na produção de energia elétrica mundial, a qual representa apenas 3,7%. Essas são, principalmente, a energia solar, a eólica, a geotérmica e a biomassa.

Sobre essas energias limpas, tem-se que a usina eólica aproveita a força dos ventos para movimentar grandes pás ligadas a um gerador de energia elétrica. Cada vez mais os países e as empresas vêm investido nesse tipo de geração, construindo grandes fazendas eólicas. A energia elétrica geotermal e a gerada pela biomassa, por sua vez, têm o mesmo princípio das termelétricas convencionais, porém o combustível utilizado no segundo tipo é o bagaço da cana, por exemplo, enquanto que no primeiro tipo é utilizado o calor das camadas mais profundas da terra. Por fim, a energia elétrica gerada pelo aproveitamento da luz do sol se dá por duas formas: aproveitando o calor do sol para aquecer a água em uma usina termelétrica e aproveitando a intensidade da luz solar por meio de placas fotovoltaicas.

As energias limpas ainda são muito pouco utilizadas devido ao alto custo de implantação e ao baixo rendimento, mas apresentam um potencial muito grande e são as alternativas sustentáveis para substituir os meios convencionais de geração de energia elétrica no mundo. A energia solar, aproveitada por placas fotovoltaicas, por exemplo, é muito pouco utilizada e tem um potencial enorme, pois o sol é uma fonte de energia inesgotável. Os painéis fotovoltaicos eram caros e de baixo rendimento, mas, devido a pesquisas nessa área, esses fatores vêm mudando, o que tem possibilitado que sistemas mais baratos sejam

desenvolvidos, podendo popularizar o uso dessa energia em residências, hospitais, universidades e na indústria.

A partir dessas considerações, neste projeto intenta-se criar um sistema barato e simples que controle a geração de energia elétrica produzida a partir de painéis fotovoltaicos e que produza uma corrente elétrica com o mesmo formato e frequência da rede, fornecendo, dessa forma, a energia proveniente do sol. Sendo assim, aventa-se a seguinte hipótese de pesquisa: se efetivado o desenvolvimento de um controle de inversor de tensão simples e barato na geração de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas, então será proporcionado menor custo para se aproveitar a energia solar e maior a popularização dessa forma de geração de energia.

A energia solar é inesgotável, grátis e hoje há tecnologia suficiente para desenvolver um sistema simples e barato que possa converter a luz do sol em energia elétrica, diminuindo a dependência que o consumidor brasileiro tem, por exemplo, da água que, em tempos de seca, falta e provoca grandes transtornos no sistema elétrico.

Atualmente, o Brasil passa por uma crise hídrica que está provocando grandes danos à população, seja pela falta de água nas residências ou pelo aumento do valor na conta de luz e o risco de um grande apagão.

Esta situação não é exclusiva do Brasil, é um problema mundial, e não há perspectivas de que vá melhorar. Sendo assim, novas ideias para utilizar energias renováveis vem surgindo a cada dia. Não é novidade aproveitar a energia do sol, do vento ou dos mares, assim como o fato de obter eficiências maiores e custos menores.

Equipamentos que convertem a energia do sol ou qualquer outra energia limpa só serão populares quando forem baratos e eficientes e a popularização destes irá causar um grande impacto positivo no meio ambiente e no bolso da população.

Este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um controle para inversor de tensão simples e com custo reduzido para geração de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas. Os objetivos específicos são:

- Utilizar um microcontrolador da família PIC para realizar o controle;
- Produzir uma tensão alternada com mesmo formato e frequência da rede;
- Simular o sistema em um software de simulação de circuitos;
- Montar um protótipo para demonstração;
- Realizar testes com cargas resistivas;
- Ter custo menor que os inversores disponíveis no mercado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Energia Solar

A energia solar oferece grande potencial para conversão em energia elétrica, capaz de garantir uma parte importante das necessidades de energia do planeta. Como a quantidade de energia do sol que chega à terra é gigantesca, da ordem de 10.000 vezes o consumo mundial atual de energia, as várias formas de energia renováveis reunidas teriam a capacidade de atender o chamado "desafio terawatt" de prover a atual demanda de 13 TW da humanidade (LUQUE; HEGEDUS, 2011apud CARVALHO; CARDOSO, 2012, p. 2).

Usando painéis fotovoltaicos com uma eficiência de 10%, a energia solar poderia ser convertida diretamente em eletricidade, capaz de prover 1.000 vezes o consumo atual da humanidade. Restringindo o aproveitamento de energia solar à superfície sólida da terra (um quarto da superfície total), ainda haveria um potencial 250 vezes maior que o consumo atual. Isso significa que usando 0,4% da área total de terra, pode-se produzir toda a energia demandada atualmente. Essa fração de terra é muito menor do que se usa atualmente para a agricultura (LUQUE;HEGEDUS, 2011apud CARVALHO;CARDOSO, 2012, p. 2).

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a energia solar pode ser definida como:

Aquela energia obtida pela luz do Sol que pode ser captada com painéis solares. É uma fonte de vida e de origem da maioria das outras formas de energia na Terra. A energia solar chega ao planeta nas formas térmica e luminosa. (CCEE, 2015)

2.2 Painéis Fotovoltaicos

Para Carvalho e Cardoso (2012, p. 2) “a conversão da energia fotovoltaica em elétrica ocorre quando uma junção semicondutora PN, construída de tal forma que possibilite a incidência de fótons em sua superfície, consegue gerar uma corrente CC fornecida a uma carga”.

A célula fotovoltaica é constituída de materiais semicondutores como o silício, que recebe uma dopagem, ou seja, misturas de outros materiais para poder conduzir corrente elétrica sobre a incidência da luz. De acordo com Nascimento (2004, p. 12).

A dopagem do silício com o fósforo obtém-se um material com elétrons livres ou materiais com portadores de carga negativa (silício tipo N). Realizando o mesmo processo, mas agora acrescentado Boro ao invés de Fósforo, obtém-se um material com características inversas, ou seja, falta de elétrons ou material com cargas positivas livres (silício tipo P).

A placa solar é, então, montada com duas camadas, uma de silício do tipo P e outra de silício do tipo N. Essa montagem é chamada de junção semicondutora PN.

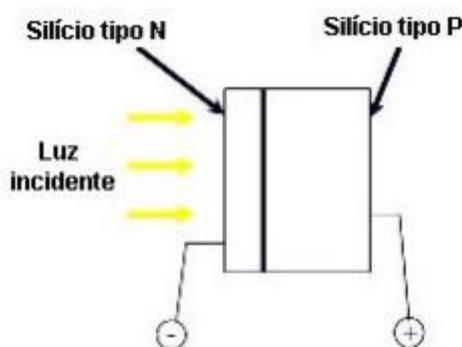


Figura 2: Junção PN.

Fonte: NASCIMENTO, 2004, p. 12.

A partir do momento em que a célula está montada, ela depende da incidência da luz para gerar a corrente elétrica. Quanto maior a quantidade de luz, maior será a corrente gerada. Se não houver luz, não há corrente. O seguinte trecho explica como as camadas reagem:

Separadamente, ambas as capas são eletricamente neutras. Mas ao serem unidas, na região P-N, forma-se um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam os vazios da estrutura do silício tipo P. Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com outros elétrons da estrutura do silício fornecendo-lhes energia e transformando-os em condutores. Devido ao campo elétrico gerado pela junção P-N, os elétrons são orientados e fluem da camada 'P' para a camada 'N'. (NASCIMENTO, 2004, p.13)

Várias células são montadas em série e paralelo formando um painel. Isso se deve ao fato de que a corrente e a tensão gerada por uma única célula são muito pequenas. Com esse

arranjo, é possível obter maiores níveis de potência (tensão x corrente), podendo alimentar mais cargas.



Figura 3: Montagem de uma placa fotovoltaica.

Fonte: paineisfotovoltaicos.com/funcionamento.php (2015).

A célula fotovoltaica apenas gera energia, ela não é capaz de armazená-la. E, como depende diretamente da luz do sol, ela só irá gerar energia durante o dia. Além disso, como a intensidade da luz solar varia durante o dia, a potência da célula também irá variar.

Para que uma carga ligada a uma célula fotovoltaica receba sempre uma alimentação de tensão constante e regulada, ela deve estar conectada a um circuito eletrônico de controle. Esse deve aumentar a tensão, controlar o fluxo de corrente, adaptando-se às variações de potência, e armazenar energia para que, quando não houver geração, ainda haja fornecimento de corrente.

2.3 Armazenamento de Energia

Faz-se necessário utilizar baterias no sistema para que a carga alimentada pelo circuito tenha sempre uma alimentação constante e uniforme, visto que a energia gerada pelas células varia conforme a intensidade da luz solar.

O armazenamento trata-se de canalizar a energia gerada pela célula e armazená-la em baterias. As baterias possuem normalmente 13,8 Volts e as células trabalham com uma tensão de aproximadamente 18 Volts, que diminui conforme a intensidade da luz solar diminui. Assim, é necessário utilizar um circuito que aplique nas baterias uma tensão um pouco maior que a das mesmas, sendo que, quanto maior a diferença, maior será a corrente de carga. Sabe-se que a corrente de carga não deve ser muito alta, pois pode diminuir a vida útil das baterias. Assim, deve-se consultar o manual das mesmas para saber o valor ideal de corrente de carga da bateria a ser utilizada.

O tipo de bateria utilizada neste sistema é chamado de estacionária, pois é própria para trabalhar com descargas bruscas e longos períodos com alimentação constante sem prejudicar sua vida útil.



Figura 4: Bateria estacionária.

Fonte: neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df1000-70ah-60ah.html (2016).

É necessário, para possibilitar a carga, que a tensão gerada seja superior à da bateria, assim, quando a geração for menor não haverá armazenamento.

Um regulador de carga toma uma referência da corrente ideal para a carga e, a partir disso, atua no circuito permitindo a passagem de corrente ou limitando-a até se igualar à referência. A carga continuará até que o valor de tensão nominal das baterias seja atingido.

2.4 Circuito Eletrônico

O sistema pode ser simplificado por um diagrama de blocos, conforme a Figura 5. Na primeira etapa do circuito, de cor verde, a energia gerada pela célula fotovoltaica é armazenada em baterias por meio de um controlador eletrônico de carga. Na segunda etapa, em azul, o inversor de tensão irá fazer o chaveamento da tensão contínua por meio de um sinal de controle. A tensão de saída é então filtrada, tendo como resultado uma tensão alternada senoidal.

Na terceira etapa do circuito, um transformador eleva a tensão para que esta tenha as mesmas características da tensão da rede. Esta então é fornecida a uma carga.

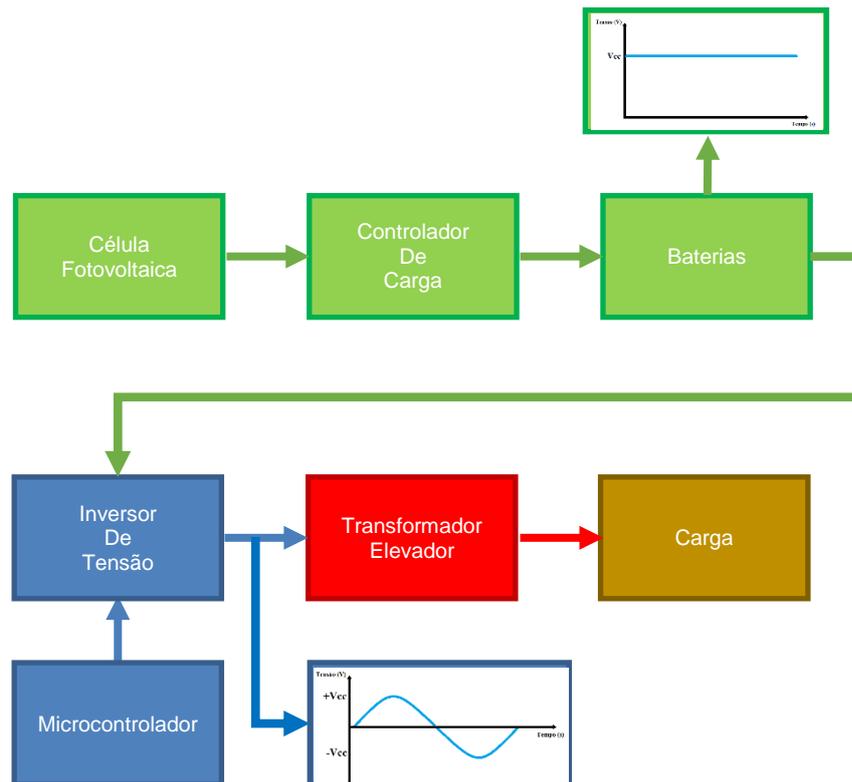


Figura 5: Esquema de blocos do circuito eletrônico.

2.4.1 Microcontrolador

Neste sistema será utilizado um microcontrolador da fabricante Microchip Technology Inc, o PIC 18F4550. Ele terá a função de ler as variáveis como tensão e corrente, além de gerar a base de tempo para o sistema. Com isso, seu programa interno irá gerar sinais de controle para atuar sobre os componentes do inversor de tensão. Este possui as seguintes características:

- Clock de 48MHz/12MIPs;
- USB 2.0 device nativa;
- 35 I/Os;
- 13 Entradas Analógicas AD de 10 bits;
- 32KB de Flash, 256 bytes de EEPROM e 2048 bytes de RAM;
- 1 canal PWM/CCP/ECCP e 2 comparadores;
- USART/Serial, SPI e I2C incorporados;
- Suporte para Debugger ICD;
- Interrupções com 2 níveis de prioridade;
- 32KB de memória Flash de programa;
- Suporte para modo baixo consumo: nanoWatt Technology;
- 2 saídas PWM;
- 4 Timers internos, sendo 3 de 16 bits.

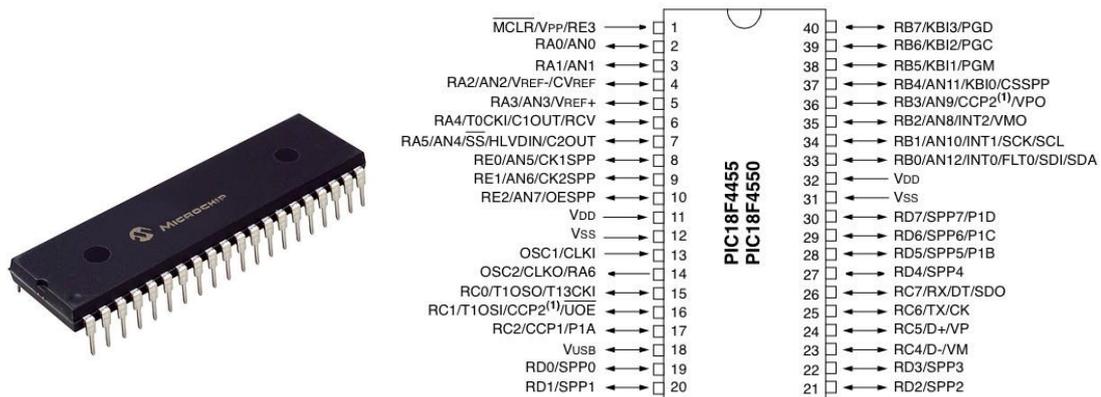


Figura 6: Microntrolador PIC 18F4550.

Fonte: Microchip Technology Inc (2015).

Este microcontrolador foi escolhido devido ao fato de já ter sido utilizado no curso. Sabe-se que o mesmo é potente, tem muitos recursos e já está disponível para a montagem do projeto.

2.4.2 Inversor de Tensão

A tensão a ser fornecida pelo sistema deve ter os seguintes parâmetros:

- Tensão senoidal de aproximadamente 127 Vrms;
- Frequência de 60 Hz;
- Baixa Taxa de Distorção Harmônica (TDH).

Assim ela será o mais próximo possível da tensão fornecida pela concessionária de energia elétrica. Há no mercado inversores que produzem uma tensão alternada, com 127 Vrms e 60 Hz, porém, a forma de onda da tensão é quadrada. Estes são chamados de inversores de onda quadrada, ou de semi-senoidais. Não são vantajosos pois, segundo Silva et al. (2003) citado por Silva et al. (2013, p. 2), seus principais inconvenientes são: alta taxa de distorção harmônica de tensão (TDH_v), superior a 40%, e baixa eficiência, em torno de 60 a 80 %. Já os inversores de onda senoidal são vantajosos por oferecerem um melhor controle da frequência e da amplitude da tensão, com alta eficiência, de 85 a 95%, e baixa TDH_v, de 1 a 5%, tornando-os tecnicamente desejáveis.

A THD nada mais é do que um valor que representa a quantidade e intensidade de sinais que tem alguma relação harmônica com o sinal principal, neste caso a senóide de tensão na saída do inversor.

Galhardo e Pinho (2003) citado por Silva et al. (2013, p. 2), afirmam que os inversores são, geralmente, constituídos de três etapas: bloco retificador, filtros e o inversor propriamente dito. O bloco retificador, normalmente constituído por diodos, transforma o sinal de entrada em contínuo pulsante. Os filtros, em seguida, atuam sobre os pulsos contínuos tentando linearizar a forma de onda. Por último o inversor, constituído por um conversor estático e componentes semicondutores como IGBTs, MOSFETs, TBJ e SCR, capazes de fazer o chaveamento em pequenas, médias e altas frequências, comandando uma etapa de potência através de um controle microprocessado, programado para obter a forma necessária de saída. Fazendo parte do inversor, complementando o circuito de chaveamento, é colocado um filtro LC para tornar a tensão senoidal.

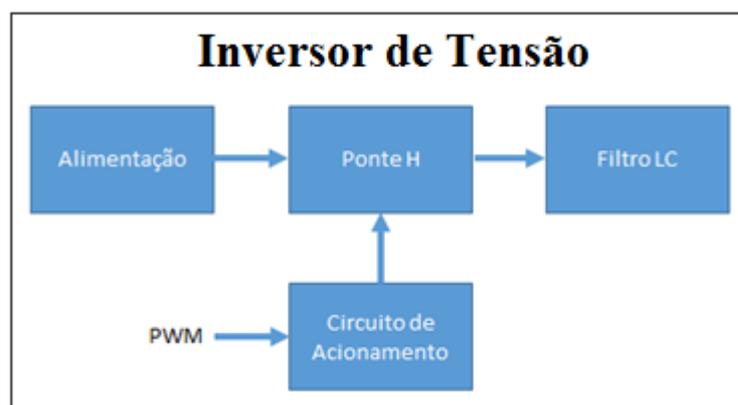


Figura 7: Diagrama de blocos do Inversor de Tensão.

Os mesmos autores ainda esclarecem que o chaveamento aplicado aos conversores estáticos, geralmente em circuitos mais simples, é por onda quadrada, conhecida também como trem de pulsos. A modulação por largura de pulso, mais conhecida pelo nome em inglês Pulse Width Modulation (PWM), é mais usual para circuitos de maior potência e que alimentam grandes diversidades de cargas, uma vez que consegue deixar a onda de saída do inversor igual ou muito próximo da forma de onda necessária. Com a utilização do PWM, é possível controlar a largura dos pulsos aplicados ao chaveamento do conversor estático de forma a obter o tempo necessário a cada disparo do elemento (SILVA et al, 2013, p. 2).

A senóide é dividida em dois semi-ciclos, um onde a tensão é positiva e outro onde ela é negativa, como pode ser visto na Figura 8.a. Para transformar uma tensão contínua em uma

senóide é preciso que o circuito seja capaz de inverter a polaridade tensão contínua na carga. Para isso, pode-se utilizar um arranjo de chaves em ponte H conforme a Figura 8.b.

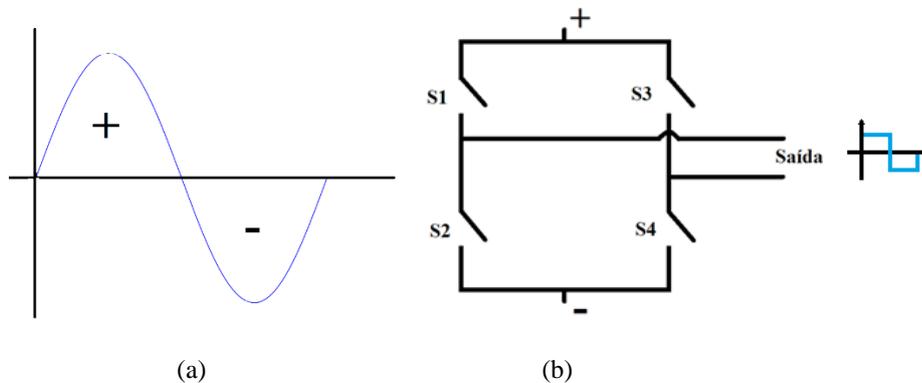


Figura 8: (a) Semi-ciclos positivo e negativo de uma senóide. (b) Ponte H.

A ponte H, conforme a Figura 8b, com todas as chaves abertas nada acontece. Quando as chaves S1 e S4 são fechadas, a saída tem a tensão da fonte positiva, e, quando apenas as chaves S2 e S3 estiverem fechadas a saída será negativa, pois o sentido da corrente é o contrário do modo anterior. A Figura 9 mostra estes dois modos de operação detalhando o sentido de corrente em cada um. Um fato importante é que nunca se deve acionar as duas chaves de um lado da ponte simultaneamente, pois isso fecharia um curto na alimentação da ponte.

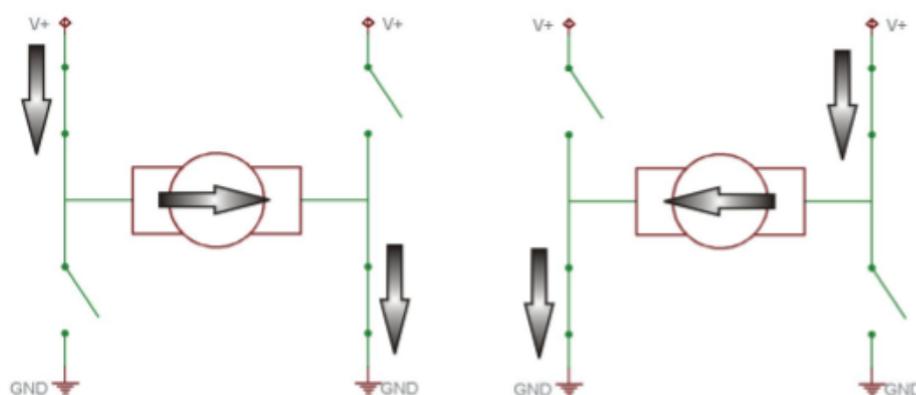


Figura 9: Funcionamento da Ponte H.

Fonte: PATSKO, 2006, p.2.

Somente com a ponte H a saída de tensão do inversor será quadrada, igualmente ao sinal de PWM aplicado às chaves. Para a tensão se torne uma senóide, um indutor será colocado

em série com a carga e um capacitor em paralelo, formando um filtro LC passa-baixa, capaz de absorver as harmônicas de alta frequência e permitir que apenas o sinal de 60 Hz chegue à carga.

2.4.3 MOSFET

No chaveamento do inversor serão utilizados transistores de efeito de campo de semicondutor de óxido metálico (MOSFET em inglês para "Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor"). Estes são transistores capazes de atuar em circuitos onde a frequência de chaveamento e a corrente sejam altas.

O MOSFET possui normalmente 3 terminais: Porta, Fonte e Dreno (ou Gate, Source e Drain respectivamente). Há dois tipos essenciais: o canal N e o canal P, e se diferenciam basicamente pela polarização. A corrente a ser fornecida para um circuito, que circulará entre o terminal Fonte e o Dreno do MOSFET, é controlada pela tensão aplicada no terminal Porta. Este último possui uma separação dielétrica dos outros dois, gerando portanto uma corrente quase nula no Gate, e um campo elétrico que influencia no Dreno e no Fonte. (LabdeGaragem,2016).

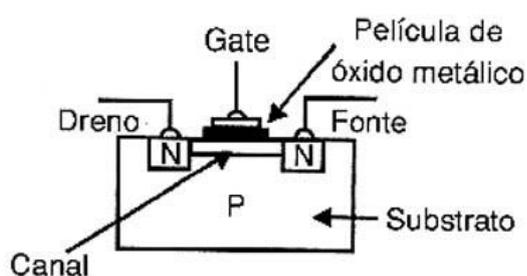


Figura 10: Composição do MOSFET.

Fonte: newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6417-art977 (2016).

2.4.4 Filtro Passivo LC

Os inversores estáticos de tensão modulados em alta frequência, com destaque para aqueles com modulação por largura de pulso, têm sido amplamente utilizados para sintetizar tensões senoidais para as mais variadas aplicações, tais como fontes ininterruptas de energia (UPS), geradores de tensões CA de potência (AC power sources) e compensadores de reativos (MOHAN et al., 1995 apud MICHELS et al, 2005, pg. 2).

Pelo fato destes inversores apresentarem uma elevada distorção harmônica nas tensões de saída, devido às componentes harmônicas de alta frequência introduzidas pela modulação, é de praxe a introdução de filtros LC passa-baixas entre o inversor e a carga. Para os inversores que operam em frequências de comutação na ordem de dezenas de kHz, estes filtros são projetados para atender às especificações de projeto da máxima THD aceitável nas tensões de saída, levando em consideração a estratégia de modulação empregada. Já para os inversores que operam em frequências de comutação superiores a estas, alguns cuidados adicionais devem ser tomados para que os filtros também atendam às especificações com relação aos índices máximos aceitáveis de interferência eletromagnética conduzida (REDL, 1996 apud MICHELS et al, 2005, pg. 2).

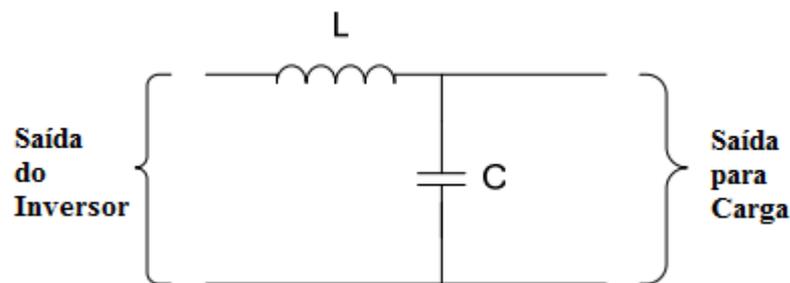


Figura 11: Filtro passivo LC utilizado no inversor.

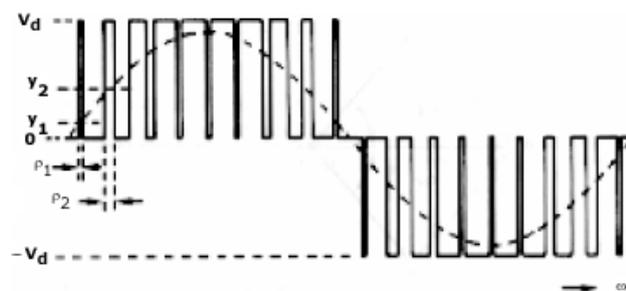


Figura 12: Forma de onda ilustrativa do funcionamento do PWM aplicado ao MOSFET e da saída de tensão senoidal após o filtro.

O funcionamento do filtro pode ser melhor observado pelo valor da relação entre a tensão de entrada pela tensão de saída, com a variação da frequência. Como o filtro somente atenua a tensão e não “corta” seu valor totalmente, existe um valor de referência utilizado, denominado frequência de corte, para qual o filtro passivo atenua para 70,7% (raiz quadrada de 2) a tensão de saída em relação à de entrada, na frequência de corte:

$$V_{saída} = V_{entrada} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707 \times V_{entrada} \quad (1)$$

A frequência de corte deve ser alta o suficiente para garantir um filtro pequeno e pequena o suficiente para filtrar eficientemente o espectro PWM. Pode-se assumir que ela seja 10 vezes menor que a frequência de chaveamento do inversor (2).

$$f_c = \frac{f_{chaveamento}}{10} \quad (2)$$

Onde:

f_c é a frequência de corte;

$f_{chaveamento}$ é a frequência de chaveamento do inversor.

Para calcular os valores dos componentes do filtro, deve-se iniciar pelo capacitor.

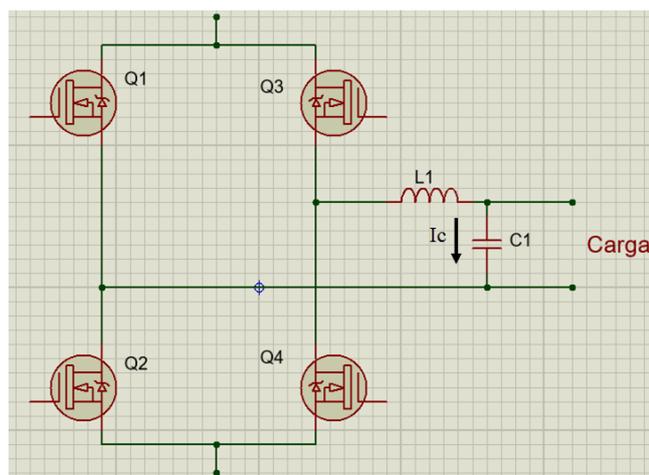


Figura 13: Circulação de corrente no capacitor do filtro com o inversor sem carga.

Mesmo com o inversor sem carga, uma corrente circulará pelo capacitor do filtro (I_c) conforme Figura 13: **Circulação de corrente no capacitor do filtro com o inversor sem**

carga.. Segundo Turcatto (2010, p. 25), a corrente I_c deve ser 10% da corrente máxima do inversor, porém, para este trabalho, esta será igual a 5%, evitando que o valor do capacitor seja muito alto, o que o torna inviável. Então, o valor do capacitor pode ser calculado pela equação 3.

$$I_c = I_{max} \times 0,05 \quad (3)$$

Onde:

I_c é a corrente do capacitor em Ampères;

I_{max} é a corrente máxima do inversor.

Com a corrente que circula pelo capacitor é possível calcular a reatância do mesmo a partir da equação 4.

$$X_c = \frac{V_s}{I_c} \quad (4)$$

Onde:

X_c é a reatância capacitiva em Ohms;

V_s é a tensão de saída do inversor em Volts.

Por fim, com a reatância é possível calcular a capacitância do capacitor conforme a equação 5.

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_c} \quad (5)$$

Onde:

f é a frequência de saída em Hz;

C é o valor do capacitor em Farad.

Com o valor do capacitor, pode-se calcular o valor do indutor a partir da equação do filtro passa baixa LC (6). Esta é uma relação entre o valor do capacitor, do indutor e da frequência de corte do filtro. Assim, tem-se que:

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}} \quad (6)$$

Isolando L, chega-se à equação 7:

$$L = \frac{\left(\frac{1}{f_c \times 2 \times \pi}\right)^2}{C} \quad (7)$$

Onde:

L é o valor da indutância em Henry.

2.4.5 Transformador

Os transformadores de tensão, chamados normalmente de transformadores, são dispositivos capazes de aumentar ou reduzir valores de tensão.

Um transformador é constituído por um núcleo, feito de um material ferromagnético, e duas bobinas isoladas entre si. O seu funcionamento é baseado na criação de uma corrente induzida no secundário, a partir da variação de fluxo gerada pelo primário.

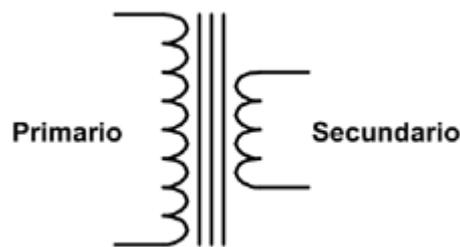


Figura 14: Símbolo do transformador.

Fonte: <http://eletronicanoel.blogspot.com.br/2012/06/curso-de-eletronica-transformadores.html> (2016).

O transformador utilizado no circuito do inversor terá a função de elevar a tensão senoidal de 12 Vrms para aproximadamente 127 Vrms. Como a tensão que chega no transformador é senoidal e de 60 Hz, este pode ser igual aos encontrados em fontes disponíveis no mercado, ou seja, com o núcleo de ferro. Ele deve ser capaz de suportar a potência máxima do sistema sem causar perdas ou distorções.

Em um transformador ideal, a potência na entrada é igual a potência na saída (equação 8). Assim, pode-se conhecer a corrente que o transformador deverá suportar na entrada e na saída (equação 9).

$$P_{entrada} = P_{saída} \quad (8)$$

$$V_{entrada} \times I_{entrada} = V_{saída} \times I_{saída} \quad (9)$$

2.5 Controle do Inversor

O controle do inversor será feito a partir de dois sinais PWM ligados cada um a dois MOSFETs da ponte do inversor, de forma que cada sinal controlará um semi-ciclo da senóide de saída. O diagrama de blocos abaixo demonstra o sistema de controle.

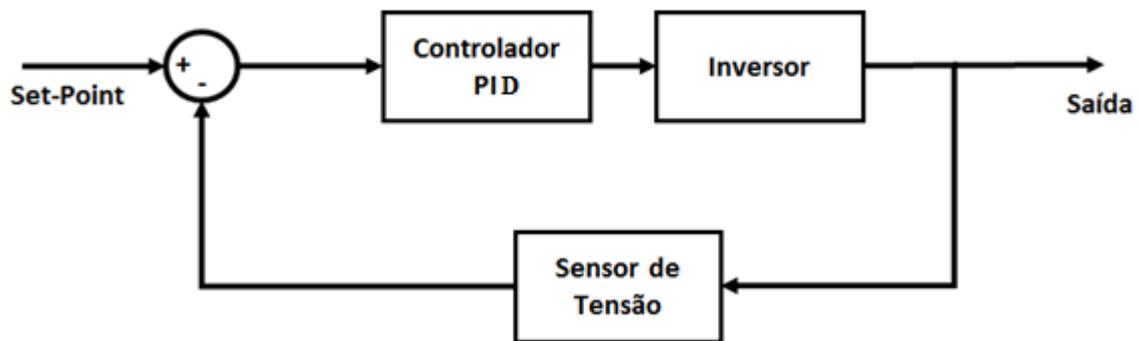


Figura 15: Diagrama de blocos do controle do inversor.

Um sensor irá fazer a medição da tensão de saída e o microcontrolador irá fazer a leitura desse valor por meio do conversor Analógico/Digital. Este valor então será comparado a um set-point para calcular o erro. O set-point está armazenado na memória de programa do microcontrolador e como o sinal de saída é variável, uma senóide, existirão então, vários set-points salvos, contendo os valores desejados de tensão para os pontos da senóide em que serão feitas medidas.

Para que o controle seja efetivo, a taxa de amostragem, ou seja, o número de amostras que serão feitas a cada período da senóide será de 10 pontos.

Feita a comparação, o erro será calculado e fornecido para o controlador atuar na saída. O controlador utilizará o PID, controle proporcional integral derivativo, que é uma técnica que une as ações derivativa, integral e proporcional, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipada pela ação derivativa. O controle PID pode ser descrito conforme a equação 10.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

Para se obter as constantes do PID utilizou-se o método de ziegler-nichols em malha fechada. Este consiste em utilizar apenas o ganho proporcional e aumentá-lo até que o sistema entre em oscilação. O ganho do controlador neste momento é chamado ganho crítico K_u e o período dessas oscilações é chamado de período crítico T_u .

Com estes valores, aplica-se as equações da Tabela 1 que resultam nos ganhos para os controladores proporcional, integral e derivativo.

Tabela 1: Sintonia de controladores ziegler-nichols. Método da oscilação crítica.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	0,5* K_u		
PI	0,4* K_u	0,8* T_u	
PID	0,6* K_u	0,5* T_u	0,125* T_u

Fonte: Ziegler & Nichols (1942).

3 METODOLOGIA

O circuito inicialmente será dimensionado, onde todos os componentes terão seus valores calculados de forma a garantir um resultado desejado. Ao mesmo tempo, o programa é desenvolvido no software MPLAB X para controlar o PIC no acionamento do inversor.

Após isso, será feita a simulação do sistema no software Proteus ISIS na versão 8. Esta é feita para testar o funcionamento do circuito e do programa antes da montagem, o que ajuda a localizar erros, problemas no dimensionamento dos componentes e oportunidades de melhoria antes da montagem final.

Após a simulação e a correção ou melhoria dos circuitos e do programa é feita a montagem do circuito final utilizando o software Proteus ARES, para criar os esquemas das placas de circuito impresso, e a compra dos componentes é feita, levando em conta o melhor custo benefício.

3.1 Cálculo dos Componentes

3.1.1 Circuito de Potência

Deseja-se na uma potência de 200 Watts e uma tensão de 12 Volts na saída do inversor, então tem-se a equação 11:

$$P = V \times I \quad (11)$$

Onde:

P é a potência máxima do inversor, sendo esta igual 200 Watts;

V é a tensão rms da saída do inversor, igual a 12 Volts.

I é a corrente máxima suportada pelo inversor.

$$I = \frac{200}{12} = 16,67 \text{ Ampères}$$

Assim, cada MOSFET precisa suportar mais do que 16,67 Ampères. Foi escolhido então o MOSFET IRF540 da fabricante International Rectifier. Este suporta até 100 Volts entre o dreno e a fonte, e até 33 Ampères quando no estado fechado.

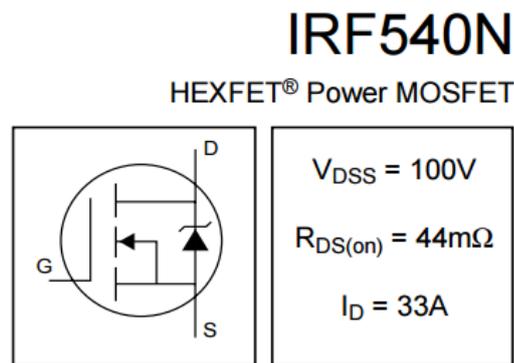


Figura 16: Características do MOSFET IRF540 apresentadas no Datasheet.

Fonte: Datasheet do MOSFET IRF540.

Para acionar os MOSFETs na Ponte H, foi utilizado um circuito integrado específico para essa aplicação. O IR2101 é um driver capaz de acionar independentemente os MOSFETs da parte alta e baixa de um lado da ponte H. Assim, serão necessários dois circuitos para acionar toda a ponte. A Figura 17 representa o circuito que foi montado, seguindo as recomendações técnicas do fabricante.

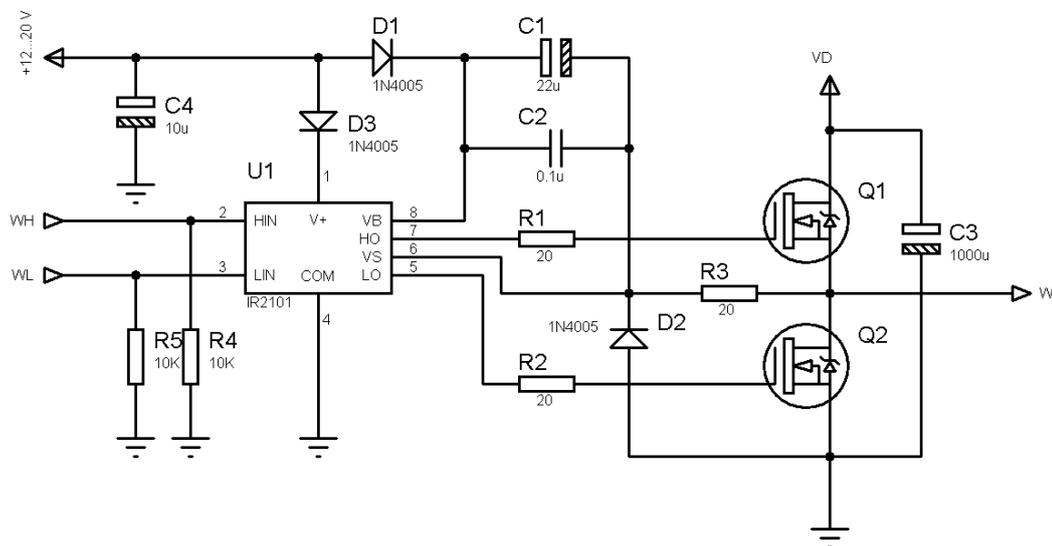


Figura 17: Circuito de ligação do CI IR2101 indicado pelo fabricante.

Fonte: Datasheet do IR2101 (2016).

3.1.2 Circuito do Filtro Passivo LC

Como a potência máxima do circuito é igual a 200 W, a corrente máxima será igual a 16,67 Ampères. Com isso pode-se calcular o valor da corrente que irá circular pelo capacitor

do filtro utilizando a equação 3, a reatância a partir da equação 4 e a capacitância do mesmo na equação 5, considerando que a saída estará a uma frequência de 60 Hz.

$$I_c = I_{max} \times 0,05 = 16,67 \times 0,05 = 0,83 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{V_s}{I_c} = \frac{12}{0,83} = 14,46 \text{ } \Omega$$

$$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_C} = \frac{1}{2 \times \pi \times 60 \times 14,46} = 183 \text{ } \mu\text{F}$$

O valor de 183 μF não é comercial, ou seja, não há disponível um capacitor com este valor. Assim, serão utilizados oito capacitores de 25 μF em paralelo, de forma a resultar em um valor de 200 μF , que se aproxima do valor calculado.

$$C = 8 \times 25\mu = 200\mu\text{F}$$

Com o valor do capacitor, pode-se calcular o valor do indutor a partir da equação (7). Como a frequência de chaveamento é igual a 20 kHz, a frequência de corte do filtro será 10 vezes menor, ou seja, igual a 2 kHz, utilizando a equação (2).

$$f_c = \frac{f_{chaveamento}}{10} = \frac{20000}{10} = 2 \text{ kHz}$$

$$L = \frac{\left(\frac{1}{f_c \times 2 \times \pi}\right)^2}{C} = \frac{\left(\frac{1}{2000 \times 2 \times \pi}\right)^2}{200\mu} = 31,66 \text{ } \mu\text{H}$$

Após os cálculos dos componentes do filtro, pode-se então montá-lo conforme a Figura 18: **Filtro LC com os valores de indutor e capacitor calculados.**

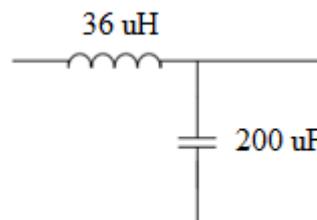


Figura 18: Filtro LC com os valores de indutor e capacitor calculados.

3.1.3 Transformador

O transformador utilizado no circuito é responsável por alimentar diretamente a carga. Portanto, este deve suportar a potência total do inversor, ou seja, pelo menos 200 Watts. A relação entre espiras do transformador permite que ao aplicar uma tensão de 12 V_{rms} no secundário tenha-se aproximadamente 127 V_{rms} no primário.

Com esses valores de tensão e a corrente máxima do inversor, pode-se calcular a corrente máxima de saída para a carga a partir da equação 9.

$$\begin{aligned} V_{entrada} \times I_{entrada} &= V_{saida} \times I_{saida} \\ 12 \times 16,67 &= 127 \times I_{saida} \\ I_{saida} &= 1,57 A \end{aligned}$$

Assim, o inversor pode fornecer a uma carga na saída uma corrente de até 1,57 A.



Figura 19: Transformador utilizado no projeto.

3.1.4 Placa do Microcontrolador

Foi utilizada a placa PROTO'n, fabricada pela SmartRádio conforme a Figura 20. Nela, o PIC 18F4550 é montado juntamente com um cristal oscilador de 20 MHz. O microcontrolador vem programado com um “bootloader”, um programa que permite a gravação do PIC via USB, sem a necessidade de outros circuitos. A placa também permite ser alimentada por uma fonte de 12 Volts contínua ou pela própria porta USB.



Figura 20: Placa PROTO'n PIC 18F4550 do fabricante SmartRádio.

Fonte: embarcados.com.br/proton-pic18f4550 (2016).

3.2 Desenvolvimento do Programa

O programa gravado no PIC pode ser dividido em 4 partes: as configurações necessárias para o funcionamento do microcontrolador, a coleta de dados, os cálculos do controle e a atuação.

O microcontrolador tem configurações que devem ser feitas antes de iniciar o programa principal. Estas envolvem a frequência de trabalho, ativação de fusíveis, definições de entradas e saídas, ativação de interrupções e configuração de periféricos. Para este programa foram ativados o conversor A/D, Timers 1, 2 e 3, módulos de PWM 1 e 2.

Para a coleta de dados foi feito um loop de interrupção com o Timer1, este foi configurado de forma que trabalhasse como contador de tempo. Quando o timer chegar à última contagem, uma interrupção é acionada, sendo que esta foi configurada para acontecer a cada 1,667 ms, pois se a frequência do sinal de saída é de 60 Hz, o período de amostragem será conforme as equações 12 e 13.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} = 0,01667 \text{ s} \quad (12)$$

$$T_a = \frac{0,01667}{10} = 1,667 \text{ ms} \quad (13)$$

Onde:

T é o período;

T_a é o período de amostragem.

Assim, a cada 1,667 ms, ou seja, a cada interrupção, o microcontrolador acionará uma leitura do conversor A/D para capturar a tensão de saída e irá compará-la com um set-point disponível no programa. Estes valores foram calculados anteriormente e correspondem à terceira coluna da Tabela 2:

Tabela 2: Relação de tempo e tensão correspondente em um período da senóide.

Nº	Tempo (ms)	Seno do Ângulo	Tensão (V)
1	0	0	0
2	1,667	0,59	9,98
3	3,334	0,95	16,14
4	5,001	0,95	16,14
5	6,668	0,59	9,97
6	8,335	0	-0,01
7	10,002	-0,59	-9,99
8	11,669	-0,95	-16,14
9	13,336	-0,95	-16,13
10	15,003	-0,59	-9,96
11	16,667	0	0

O microcontrolador coleta a tensão analógica na saída do inversor e o programa recebe este valor na forma digital. O conversor está configurado para ter uma resolução de 10 bits, ou seja, pode variar de 0 a 1023, correspondendo a valores de 0 a 5 Volts na entrada analógica.

Após feita a leitura, o programa chama uma função para calcular o erro. Há uma variável com a função de contabilizar quantas interrupções do timer 1 aconteceram, esta é utilizada para informar qual é o set-point a ser aplicado conforme a Tabela 2. O erro então é calculado e aplicado na equação do PID objetivando o sinal de controle. O sinal de saída é então aplicado ao PWM1 ou PWM2, o primeiro aciona os MOSFETs que estão dispostos de forma a produzir o semi-ciclo positivo e o segundo o negativo.

O valor das constantes do PID foram obtidas a partir do método da oscilação crítica de Ziegler e Nichols. Para realizar o teste, foi inserido um set-point fixo de aproximadamente 50% da faixa e o sistema foi levado a oscilação com um ganho proporcional igual a 50. A Figura mostra um período de aproximadamente 750 μ s.

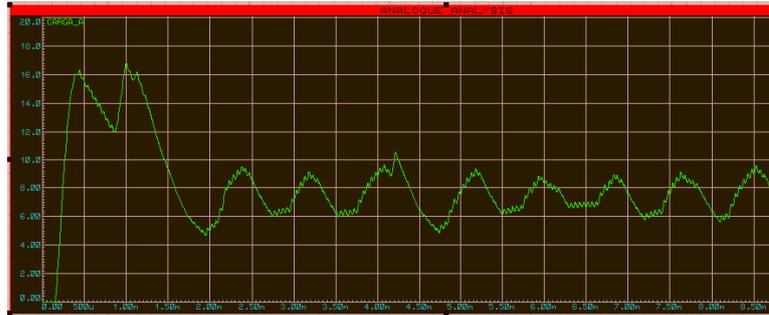


Figura 21: Oscilação crítica do sistema.

Assim, as constantes dos PID seria iguais a:

$$Kp = 0,6 \times 50 = 30$$

$$Ti = 0,5 * 750 \times 10^{-6} = 3,75 \times 10^{-4}$$

$$Td = 0,125 \times 750 \times 10^{-6} = 9,373,75 \times 10^{-4}$$

Quando o circuito foi simulado, estes valores não controlaram bem o circuito, sendo necessário alterações que foram obtidas experimentalmente.

$$Kp = 5$$

$$Ti = 1,5 \times 10^{-3}$$

$$Td = 2 \times 10^{-6}$$

3.3 Simulação

O circuito foi montado no software Proteus na versão 8.0 e simulado. A Figura 22 mostra a ponte H do inversor. Ela é alimentada pela fonte de 24 Volts e cada MOSFET possui o terminal GATE ligado aos seus respectivos circuitos.

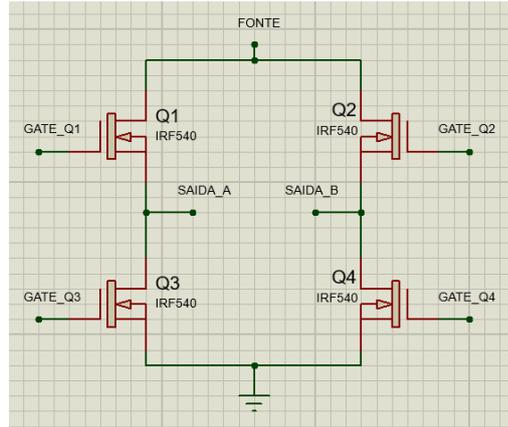


Figura 22: Ponte H montada para a simulação.

Os circuitos que acionam os MOSFETs, compostos pelos CIs IR2101, foram montados conforme indicação do fabricante e são alimentados com 12 Volts oriundos de um regulador de tensão 7812.

O circuito para acionar os MOSFETs Q2 e Q4 foi montado conforme a Figura 23.

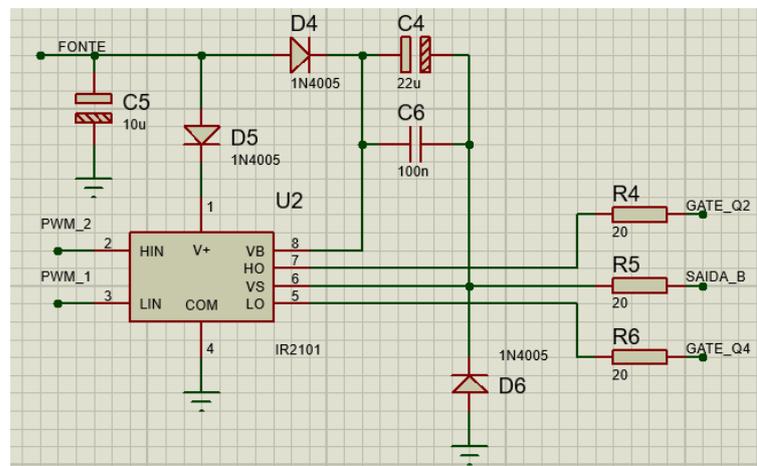


Figura 23: Circuito integrado IR2101 para acionamento dos MOSFETs Q2 e Q4.

Para acionar os MOSFETs Q1 e Q3 o circuito foi montado da mesma forma.

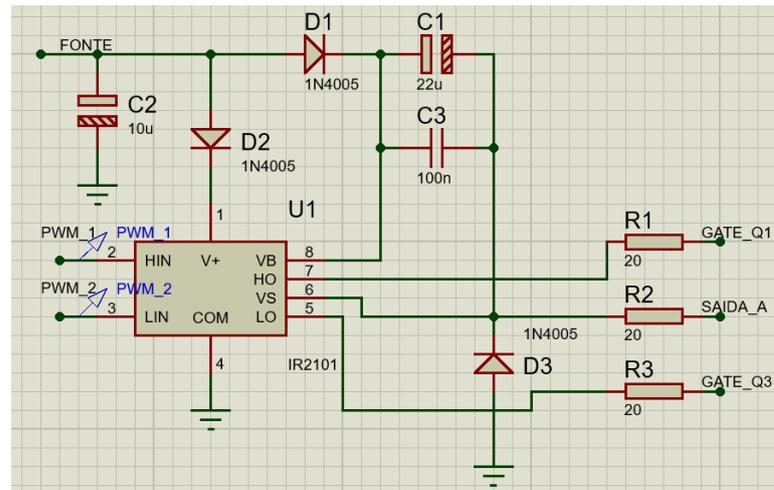


Figura 24: Circuito integrado IR2101 para acionamento dos MOSFETs Q1 e Q3.

A única diferença entre os circuitos é a de que os sinais de acionamento que entram nos CIs IR2101 são invertidos, ou seja, na entrada HIN do primeiro circuito é injetado o sinal do PWM_2 e no segundo circuito PWM_1. O mesmo acontece com a entrada LIN, que recebe PWM_1 no primeiro circuito e PWM_2 no segundo. Isto acontece para garantir o funcionamento correto da ponte H.

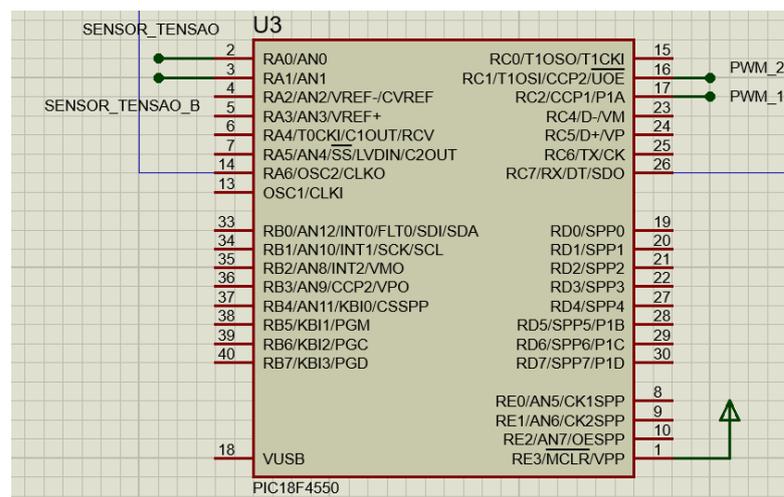


Figura 25: PIC18F4550 montado para a simulação.

O filtro LC montado conforme os cálculos, ligados na saída do inversor e no transformador que, por fim, alimenta a carga.

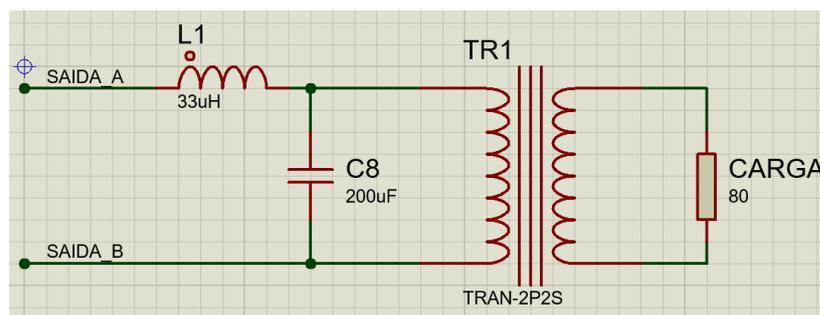


Figura 26: Filtro Passivo LC e o transformador ligado a carga montada para a simulação.

3.4 Levantamento dos Componentes

Os componentes utilizados nos circuitos foram escolhidos levando em conta o preço, a disponibilidade e facilidade de uso. Assim, reunindo os componentes, as quantidades necessárias e seus respectivos preços pode-se chegar ao valor final do inversor. A Tabela 3 reúne estas informações.

Tabela 3: Lista de componentes, quantidades necessárias e seus respectivos preços.

Material	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
Placa PROTO'n PIC18F4550	1	R\$ 79,62	R\$ 79,62
Transformador 300 Watts 127V/12V	1	R\$ 110,00	R\$ 110,00
Placa de Fenolite 10x10 cm	1	R\$ 20,00	R\$ 20,00
MOSFET IRF540	4	R\$ 5,00	R\$ 20,00
CI IR2101	2	R\$ 15,00	R\$ 30,00
Resistor 20 ohms	6	R\$ 0,15	R\$ 0,90
Resistor 10k ohms	8	R\$ 0,15	R\$ 1,20
Resistor 100K ohms	2	R\$ 0,15	R\$ 0,30
Diodo 1N4005	6	R\$ 0,25	R\$ 1,50
Capacitor Eletrolítico 22uF/25V	2	R\$ 0,20	R\$ 0,40
Capacitor Eletrolítico 10uF/25V	2	R\$ 0,20	R\$ 0,40
Indutor 33uH	1	R\$ 50,00	R\$ 50,00
Capacitor 25uF/440V	8	R\$ 10,00	R\$ 80,00
Sensor de Tensão	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
Total			R\$ 399,32

Tem-se então o custo final do inversor igual a R\$ 399,32. Para a montagem do restante do sistema são necessárias placas fotovoltaicas, baterias e um controlador de carga para baterias. Porém, não foi feito um trabalho sobre estes componentes, sendo assim serão

comprados ao preço do mercado. A título de informação os custos destes componentes são apresentados conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Preços do componente necessários à montagem do sistema.

Material	Quantidade	Preço Unitário	Preço Total
Placa Fotovoltaica 260 Wp	1	R\$ 959,00	R\$ 959,00
Controlador de Carga	1	R\$ 129,00	R\$ 129,00
Bateria estacionária 12V/40Ah	2	R\$ 269,90	R\$ 539,80
Mão de Obra	1	R\$ 300,00	R\$ 300,00
		Total	R\$ 1.927,80

O sistema tem um custo total de R\$ 2327,12 somando os preços do inversor e do restante do sistema.

3.5 Montagem das placas

Inicialmente, as placas da ponte H (Figura 28: **Placa de circuito impresso da ponte H.**) e do acionamento dos MOSFETs (Figura 27: **Placa de circuito impresso do CI IR2101.**) foram projetadas no software Proteus Ares.

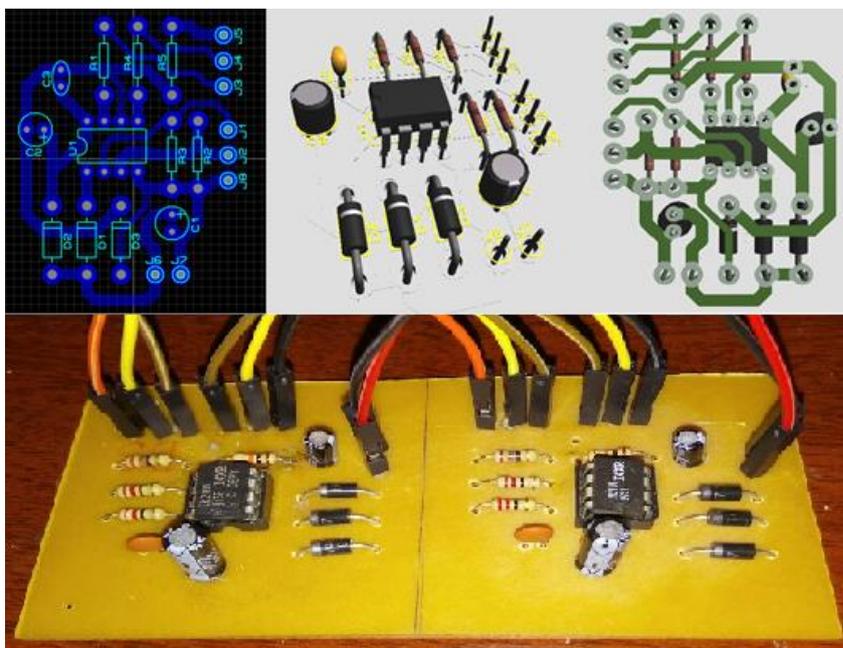


Figura 27: Placa de circuito impresso do CI IR2101.

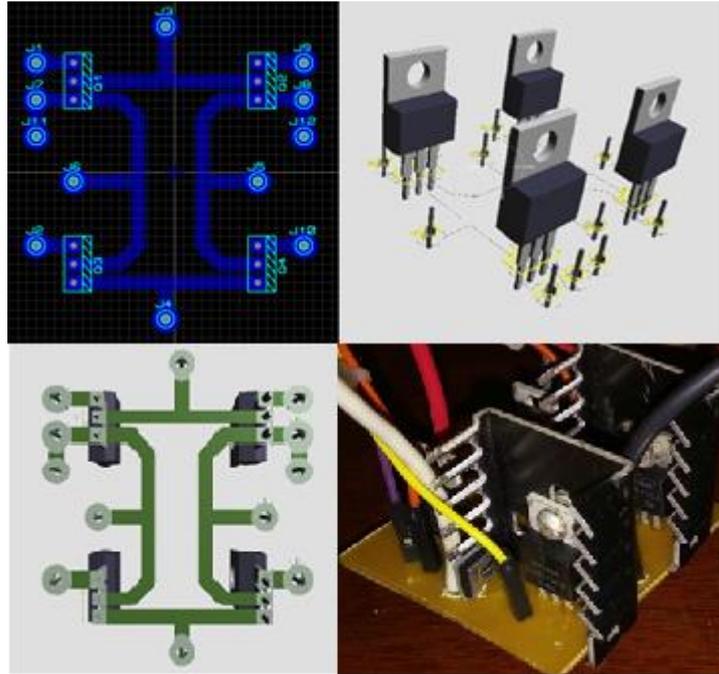


Figura 28: Placa de circuito impresso da ponte H.

Após o projeto, as placas foram montadas e os componentes soldados. As placas foram feitas separadamente para que a parte de potência esteja separada da parte de controle. Assim, evita-se ruídos gerados pela corrente alta no inversor e, em uma eventual falha, apenas uma parte do circuito terá que ser reparada.

Não foi feita uma placa para o microcontrolador, pois este já está em uma placa e para facilitar a programação e mudança de portas ele foi instalado em uma protoboard, onde também está o sensor de tensão, bem como um display LCD que foi adicionado ao circuito com a finalidade de facilitar os testes, pois este pode exibir valores de variáveis desejadas.

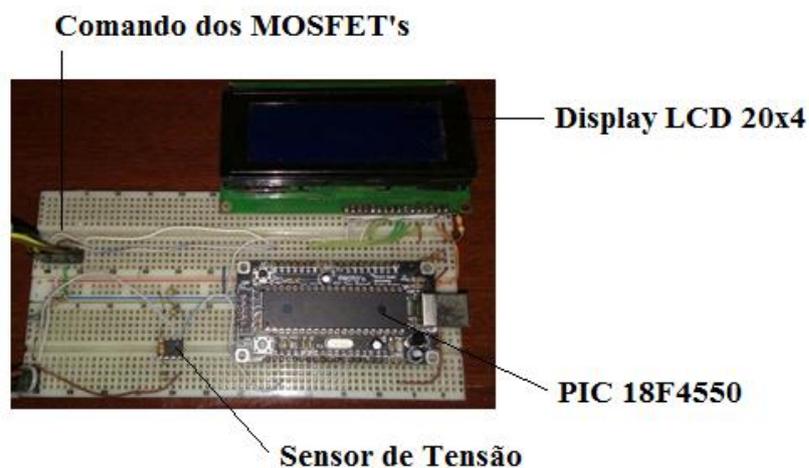


Figura 29: Circuito de controle montado na protoboard.

Por fim, o filtro de saída do inversor foi montado conforme os cálculos e utilizando os componentes disponíveis. A Figura 30 mostra os capacitores utilizados e a Figura o indutor. Este último suporta uma potência elevada porque fica em série com o circuito do inversor.



Figura 30: Capacitores de 25 uF utilizados no circuito.



Figura 31: Indutor de 33 uH utilizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da Simulação

Inicialmente fez-se a análise dos dados obtidos com a simulação. Para isto, o inversor foi energizado sem carga, com 50 % e 100 % da capacidade total. Assim, pode-se verificar como o circuito se comportará em todas as situações.

A Figura 32: **Senóide obtida de um gerador de funções.** mostra uma senóide obtida de um gerador de funções a fim de se comparar com a saída do inversor.

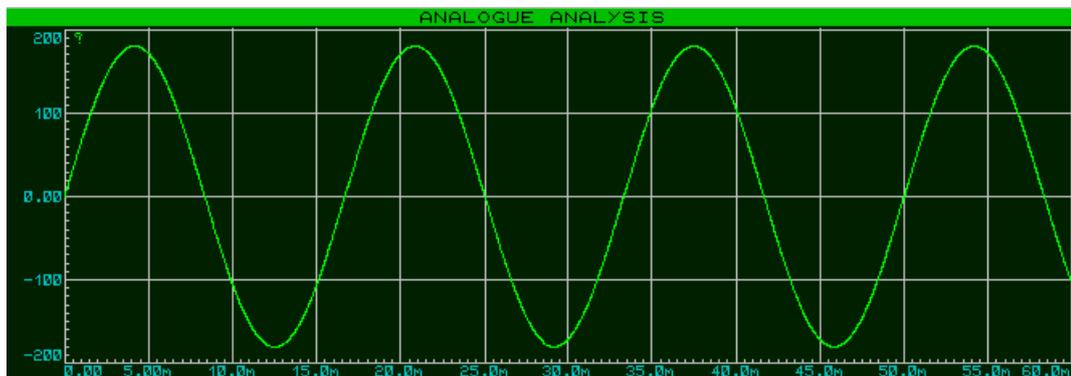


Figura 32: Senóide obtida de um gerador de funções.

Quando o inversor está aberto, ou seja, sem carga, há corrente circulando pelo capacitor do filtro e pelo transformador, porém este último está aberto e consumirá apenas uma corrente de manutenção. A Figura mostra que a tensão na saída do inversor é um pouco distorcida em relação a uma senóide. Isto acontece porque os componentes do filtro não têm onde descarregar a sua energia, assim ficam carregados por mais tempo e não variam conforme o controle pede.

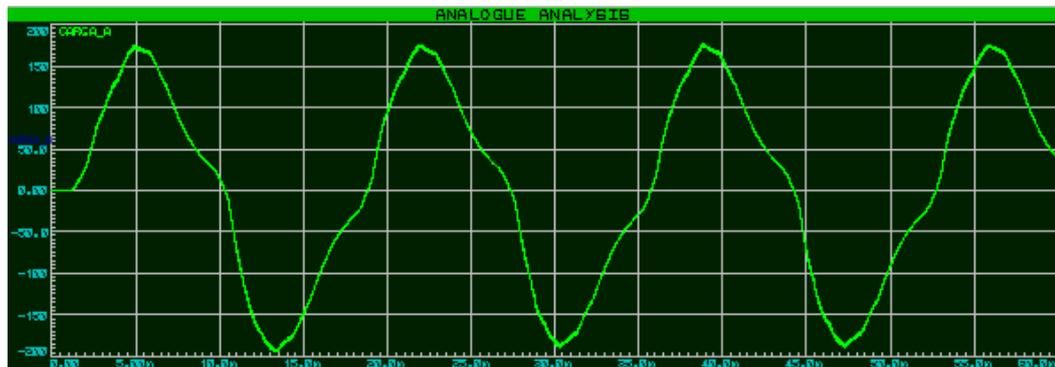


Figura 33: Gráfico de saída de tensão do inversor sem carga.

Para realizar o teste com 50% de carga, primeiramente foi calculado qual o valor de resistência que deve ser utilizado. Se a corrente máxima de saída é igual a 1,57 A e a tensão é igual a 127 V_{rms} temos uma carga de 162 Ω para consumir metade dessa corrente.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{127}{1,57/2} = 162\Omega$$

Com este valor de carga, a Figura mostra o comportamento da tensão na saída do inversor. Percebe-se uma menor distorção na senóide.



Figura 34: Gráfico de saída de tensão do inversor com 50% de carga.

Quando o circuito alimenta uma carga consumindo a corrente máxima do inversor a tensão se comporta como na Figura . Neste caso, há uma distorção mais elevada da senóide, isto se deve ao fato de que a corrente é muito alta no inversor, prejudicando o funcionamento do filtro e induzindo correntes que interferem no acionamento dos MOSFETs.

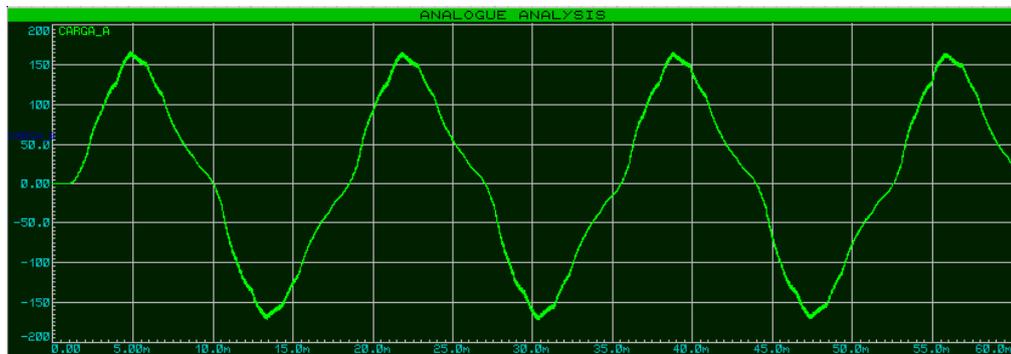


Figura 35: Gráfico de saída de tensão do inversor com 100% de carga.

O resultado da simulação é bastante satisfatório e permite que os testes com circuito sejam feitos com confiança de bons resultados.

4.2 Resultados do Circuito

O circuito foi testado nas mesmas condições da simulação, em aberto, com 50% e 100% de carga. Foi utilizado um osciloscópio para verificar a forma de onda de saída. Assim, sem carga, a tensão na saída do inversor pode ser vista na Figura .

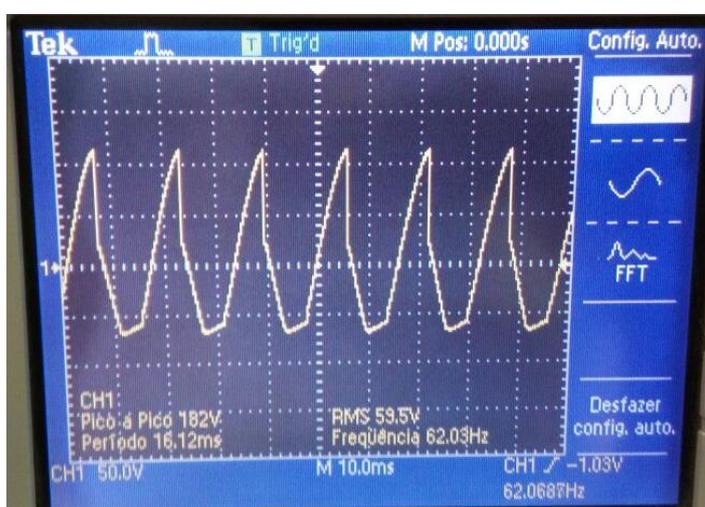


Figura 36: Forma de onda de tensão na saída do inversor sem carga.

Com o inversor funcionando sem carga, a forma de onda de saída se distancia muito de uma senóide. Apenas a frequência, que neste momento indicava 62,03 Hz, se aproximou do resultado esperado. Porém, não há carga ligada ao circuito, assim não há a cobrança para que os resultados sejam iguais aos esperados.

Colocando o inversor para fornecer corrente para uma carga resistiva de 160Ω , ou seja, 50% de carga, o circuito apresentou seu melhor resultado, conforme visto na Figura . A tensão de saída de manteve em aproximadamente $125 V_{rms}$, variando $\pm 5 V_{rms}$, a frequência se manteve em 60 Hz variando ± 1 Hz.

Pode-se perceber uma semelhança muito grande entre a forma de onda de saída do inversor e a tensão presente na rede. Há apenas um ruído em cada pico da onda, mas que não representa problemas.

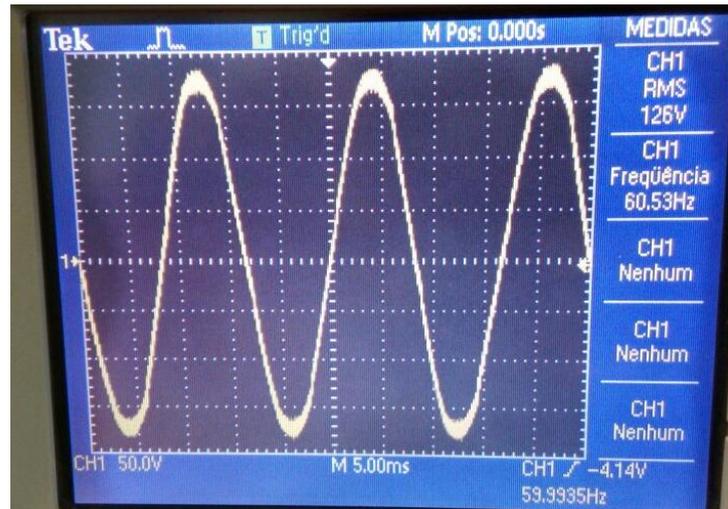


Figura 37: Saída de tensão do inversor com 50% de carga.

Para testar o inversor com 100% de carga, uma carga de 80Ω deveria ser colocada na saída. Neste valor, a tensão de saída se comportou conforme a Figura . A frequência se mantém próxima a 60 Hz, porém a tensão sofre um corte no pico da onda e, à medida que a carga e a temperatura dos componentes do circuito aumentam, a forma de onda corta e diminui ainda mais.

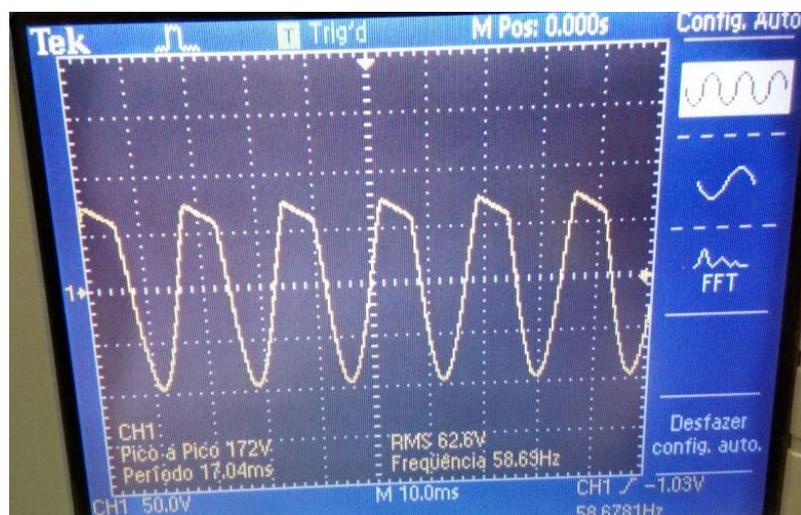


Figura 38: Saída de tensão do inversor com 100% de carga.

Este resultado é aceitável, pois esta carga está no limite da capacidade do inversor, porém, como foi visto, a temperatura dos componentes influencia nos resultados. Portanto, um ventilador deve ser adicionado ao circuito para resfriar os componentes.

4.3 Custos

Em relação aos custos, pode-se observar que no mercado, inversores do tipo senoidal, de potência semelhante custam em média de R\$ 1000,00 a R\$ 2000,00. Ou seja, aproximadamente de 3 a 5 vezes mais caros do que o inversor projetado. Até mesmo os inversores de onda quadrada, nesta potência, custam em média R\$ 400,00. Isto sem saber a qualidade dos componentes nem a metodologia dos circuitos. Se a busca for filtrada para apenas inversores de marcas reconhecidas pela boa qualidade o preço aumenta ainda mais.

5 CONCLUSÕES

Pode-se concluir com este trabalho que é possível construir e controlar um inversor de tensão, com um microcontrolador PIC18F4550, capaz de converter a energia gerada por células fotovoltaicas em energia elétrica semelhante à distribuída pelas concessionárias de energia, com um custo baixo, bem menor do que os disponíveis no mercado para a compra.

Sabe-se que o inversor projetado não tem o nível de complexidade e proteção dos disponíveis no mercado, principalmente em comparação aos inversores de alta qualidade, que apresentam proteções contra curtos, sobrecargas, e que protegem tanto o circuito quanto o consumidor, além de níveis de ruído muito baixos.

Porém o inversor projetado atende as necessidades de um consumidor comum, aquele que o utilizará em uma residência convencional, em iluminação e aparelhos domésticos. Este fornece uma tensão bastante aproximada da senoidal de 127 V_{rms} a 60 Hz, o que é bastante satisfatório.

Outra desvantagem deste inversor é a baixa potência, mas este foi projetado com o valor de 200 Watts para permitir um melhor estudo e uma maior facilidade de montagem. Mas ainda é aplicável, pois com esta potência é possível ligar até 22 lâmpadas de LED de 9 W simultaneamente. Para que a potência seja elevada, pode-se utilizar o mesmo circuito de controle, adequando apenas os componentes da ponte H, do filtro e o transformador.

Pode-se utilizar o MOSFET IRF1404 que pode suportar até 200 A na ponte H, assim a potência pode ser elevada a 1000 W. O filtro deve ser adequado para funcionar corretamente sem danificar os componentes. Já o transformador deve ser trocado, mantendo a relação de espiras, com a relação 127V/12V, mas com a potência de acordo com o novo consumo.

Aumentar a potência deste inversor causaria um aumento do custo, porém, ainda assim este continua sendo mais barato, sendo que inversores senoidais com potência de 1000 Watts ultrapassam os R\$ 4000,00. Com este valor é possível fabricar o inversor que foi projetado, comprar baterias e as células fotovoltaicas, ou seja todo o sistema.

Assim, com um inversor de menor custo, a tarefa de popularizar a utilização de energia solar para geração de energia elétrica se torna mais fácil, visto que, além da crise hídrica e energética, o país também passa por uma crise econômica, o que deixa as pessoas mais receosas para investir seu dinheiro em despesas altas.

Se em cada residência do país fosse instalado um sistema de geração de energia elétrica a partir da luz solar, a redução do consumo de energia elétrica total das concessionárias talvez

não seria muito grande, visto que os maiores consumidores são as indústrias, porém para o consumidor que teria sua conta de energia reduzida a valor mais baixo, mantendo seu estilo de vida, o impacto será considerável.

Este projeto abre caminho para outros como, por exemplo, a melhoria do controle realizado, inserindo um controle de corrente e frequência. A aplicação de proteções para o circuito e para o consumidor e um sistema de cogeração de energia, para devolver energia para a rede elétrica, onde é preciso sincronizar o sistema com a tensão da rede.

REFERÊNCIAS

CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica). **Fontes de Energia**. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_afLoop=296869444868406#%40%3F_afLoop%3D296869444868406%26_adf.ctrl-state%3D2kr8l79da_17>. Acesso em: 15 de novembro de 2015.

CARVALHO, Edson de Paula; CARDOSO, Rômulo de Almeida. **Controle do Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos com Microcontrolador PIC**. Disponível em: <<http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos12/59816477.pdf>>. Acesso em: 15 de novembro de 2015.

BRASIL. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf>. Acesso em: 15 de novembro de 2015.

INSTITUTO NEWTON C. BRAGA. **Como Funciona o MOSFET (ART977)**. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6417-art977>>. Acesso em: 23 de junho de 2016.

INTERNATIONAL RECTIFIER. **Datasheet IR 2101**. Disponível em: <<http://www.infineon.com/dgdl/ir2101.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7a755166c>>. Acesso em: 12 de junho de 2016.

INTERNATIONAL RECTIFIER. **Datasheet MOSFET IRF 540**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>. Acesso em: 07 de novembro de 2015.

LabDeGaragem. **Tutorial: Conheça e utilize os MOSFET's**. Disponível em: <<http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-conhe-a-e-utiliza-mosfets>>. Acesso em: 27 de maio de 2016.

MICHELS, Leandro; CAMARGO, Robinson F. de; BOTTERÓN, Fernando; PINHEIRO, Humberto. **Metodologia de Projeto de Filtros de Segunda Ordem para Inversores de Tensão com Modulação PWM Digital**. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/%0D/ca/v16n2/a10v16n2.pdf>>. Acesso em: 17 de março de 2016.

MICROCHIP. **Datasheet PIC18F4550**. Disponível em:

<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>. Acesso em: 10 de outubro de 2015.

NASCIMENTO, Cássio Araújo do. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. Disponível em:

<http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>. Acesso em: 23 de novembro de 2015.

NEOSOLAR ENERGIA. **Bateria Estacionária**. Disponível em:

<neosolar.com.br/loja/bateria-estacionaria-freedom-df1000-70ah-60ah.html>. Acesso em: 12 de maio de 2016.

PATSKO, Luís Fernando. **Tutorial Montagem da Ponte H**. Disponível em:

<http://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_montagem_de_uma_ponte_h.pdf>. Acesso em: 21 de maio de 2016.

SILVA, Fernando Santana Lima da; SILVA, Thiago Santana Lima da; SILVA, Arlete Vieira da; HORTA, Mário Marcos Brito. **Conversores de Frequência CC-CA**. Disponível em:

<revistas.unibh.br/index.php/dcet/article/download/883/559>. Acesso em: 18 de abril de 2016.

TURCATTO, Carlos Alberto. **Inversor de Tensão**. Disponível em:

<<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/33028/000788193.pdf?...1>>. Acesso em: 14 de março de 2016.

APÊNDICE A – PROGRAMA DESENVOLVIDO

```

#include "config.h"

#include <xc.h>
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>
#include "lcd.h"

//*****

// Configurações dos fuses
#pragma config PLLDIV    = 5      // (20 MHz crystal on PICDEM FS USB board)
#pragma config CPUDIV    = OSC1_PLL2
#pragma config USBDIV    = 2      // Clock source from 96MHz PLL/2
#pragma config FOSC      = HSPLL_HS
#pragma config FCMEN     = OFF
#pragma config IESO      = OFF
#pragma config PWRT      = OFF
#pragma config BOR       = ON
#pragma config BORV     = 3
#pragma config VREGEN    = ON      //USB Voltage Regulator
#pragma config WDT       = OFF
#pragma config WDTPS     = 32768
#pragma config MCLRE     = ON
#pragma config LPT1OSC   = OFF
#pragma config PBADEN    = OFF
#pragma config STVREN    = ON
#pragma config LVP       = OFF
#pragma config XINST     = OFF      // Extended Instruction Set
#pragma config CP0       = OFF
#pragma config CP1       = OFF
#pragma config CPB       = OFF
#pragma config WRT0      = OFF
#pragma config WRT1      = OFF
#pragma config WRTB      = OFF      // Boot Block Write Protection
#pragma config WRTC      = OFF
#pragma config EBTR0     = OFF
#pragma config EBTR1     = OFF
#pragma config EBTRB     = OFF

//*****

#define PWM1 CCPR1L
#define PWM2 CCPR2L

//*****

int N_Voltas = 0, N_Voltas2 = 0;

int contador_sp = 0, semi_ciclo = 0, i=0;

uint16_t resultado = 0, Tempo = 0;

double tensao = 0, erro = 0, soma_erro = 0, saida = 0, ultimo_erro = 0,
dev_erro = 0;
double kp = 5, ki = 0.0015, kd = 0.000002;

double set_point[5] = {0, 9.98, 16.14, 16.14, 9.98};

```

```

char txt[5];

//*****

void Calculo_PI(void);
void Correcao_Saida(void);

//*****

void interrupt isr()
{
//*****

    if(INTCONbits.TMR0IF == 1)
    {
        INTCONbits.TMR0IF = 0;

        TMR0 = 65536 - 6666;

        ADCON0bits.GO_nDONE = 1;
    }

//*****

    if(PIR1bits.ADIF == 1)
    {
        PIR1bits.ADIF = 0;

        resultado = ((ADRESH << 8) + ADRESL);

        tensao = (float)resultado/420;

        erro = tensao - set_point[contador_sp];

        Calculo_PI();

        if(contador_sp < 4)
        {
            contador_sp++;
        }
        else
        {
            contador_sp = 0;
            semi_ciclo =~ semi_ciclo;
        }
    }
}

void Calculo_PI()
{
    soma_erro += erro;
    dev_erro = erro - ultimo_erro;

    saida = kp * erro + ki * soma_erro + kd * dev_erro;

    ultimo_erro = erro;

    Correcao_Saida();

    if(semi_ciclo == 0)

```

```

    {
        PWM1 = saida;
        PWM2 = 0;
    }
    if(semi_ciclo == 1)
    {
        PWM1 = 0;
        PWM2 = saida;
    }
}

void Correcao_Saida()
{
    if(saida >= 255)
    {
        saida = 255;
    }
    if(saida <= 0)
    {
        saida = 0;
    }
}

//*****

void main()
{
//*****
*****

    RCON = 0X80;                                     // LIMPA REGISTRO DE RESET

//*****

    TRISA = 0x0F;
    PORTA = 0X00;

    TRISB = 0x00;
    PORTB = 0x80;

    TRISC = 0x00;
    PORTC = 0X00;

    TRISD = 0x00;
    PORTD = 0X00;

    TRISE = 0x00;
    PORTE = 0X00;

//*****

    T0CONbits.T08BIT = 0;
    T0CONbits.T0CS = 0;
    T0CONbits.PSA = 0;
    T0CONbits.T0PS2 = 0;
    T0CONbits.T0PS1 = 0;
    T0CONbits.T0PS0 = 0;
    T0CONbits.TMR0ON = 1;

    TMR0 = 65536 - 6666;

```

```

//*****

T1CONbits.T1CKPS0 = 1;
T1CONbits.T1CKPS1 = 1;
T1CONbits.T1OSCEN = 0;
T1CONbits.TMR1CS = 0;

TMR1 = 0;

//*****

ADCON0bits.CHS0 = 1;
ADCON0bits.CHS1 = 0;
ADCON0bits.CHS2 = 0;
ADCON0bits.CHS3 = 0;
ADCON0bits.ADON = 1;

ADCON1bits.VCFG0 = 0;
ADCON1bits.VCFG1 = 0;
ADCON1bits.PCFG0 = 1;
ADCON1bits.PCFG1 = 0;
ADCON1bits.PCFG2 = 1;
ADCON1bits.PCFG3 = 1;

ADCON2bits.ADFM = 1;
ADCON2bits.ACQT0 = 1;
ADCON2bits.ACQT1 = 1;
ADCON2bits.ACQT2 = 1;
ADCON2bits.ADCS0 = 1;
ADCON2bits.ADCS1 = 0;
ADCON2bits.ADCS2 = 1;

//*****

T2CONbits.TOUTPS = 0;
T2CONbits.T2CKPS = 0;
T2CONbits.TMR2ON = 1;

//*****

CCP1CONbits.CCP1M0 = 0;
CCP1CONbits.CCP1M1 = 0;
CCP1CONbits.CCP1M2 = 1;
CCP1CONbits.CCP1M3 = 1;

CCP2CONbits.CCP2M0 = 0;
CCP2CONbits.CCP2M1 = 0;
CCP2CONbits.CCP2M2 = 1;
CCP2CONbits.CCP2M3 = 1;

PR2 = 99;

//*****

T3CONbits.RD16 = 1;
T3CONbits.T3CKPS0 = 0;
T3CONbits.T3CKPS1 = 1;
T3CONbits.TMR3CS = 0;
T3CONbits.TMR3ON = 1;

TMR3 = 0;

```

```
//*****

INTCONbits.GIE = 1;          //Geral
INTCONbits.PEIE = 1;       //Periféricos
INTCONbits.TMR0IE = 1;    //Timer 0
PIE1bits.TMR1IE = 1;      //Timer 1
PIE1bits.ADIE = 1;

IPR1bits.ADIP = 1;
IPR1bits.TMR1IP = 1;

//*****

lcd_init();
lcd_clear();
lcd_home();
lcd_print("      INVERSOR      ");

PWM1 = 0;
PWM2 = 0;

while(1);

//*****
}
```