



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL- UFRGS
ESCOLA DE ENGENHARIA - DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA ELETRÔNICA



Levi Trevisan
Gustavo C. Casara
Pedro Henrique Dal Pizzol

Projeto Final da Disciplina de Aplicações Industriais da Eletrônica:
Implementação de um inversor trifásico para adaptação da geração
fotovoltaica à rede.

Porto Alegre, 2019

Resumo

O projeto desenvolvido teve como objetivo implementar um inversor trifásico que permite que a energia gerada a partir de uma planta solar (tensão DC) possa ser injetada na rede.

A partir de uma série de PWMs modulados senoidalmente, conseguimos utilizar o chip IM393-S6E da INFINEON de maneira semelhante a um driver, usando como fonte a tensão DC de alta potência.

O projeto é separado entre parte de controle e parte de potência, elas têm isolamento galvânico entre si a partir de optoacopladores, em momento nenhum o nível de 3.3V do microprocessador estará exposto diretamente a parte de potência.

Utilizando um filtro do tipo passa-baixa na saída trifásica do projeto, pode-se observar uma saída trifásica com três senóides defasadas em 120° . Também foi projetado um filtro LCL para ser utilizado após o inversor.

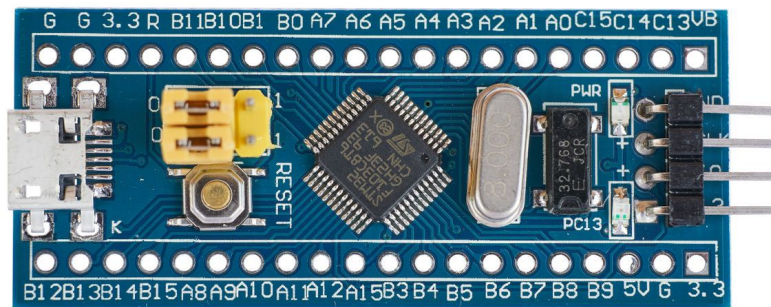
1- Alimentações

1.1 - Microprocessador

O microprocessador utilizado foi o BluePill STM32. Nele há um regulador 3.3V de forma que qualquer alimentação entre 5V e 3.3V é suficiente para utilizá-lo.

Foi escolhida então uma fonte comum de celular 5V e 1A, pois já é compatível com a entrada USB mostrada na Figura 1

Figura 1 - BluePill STM32



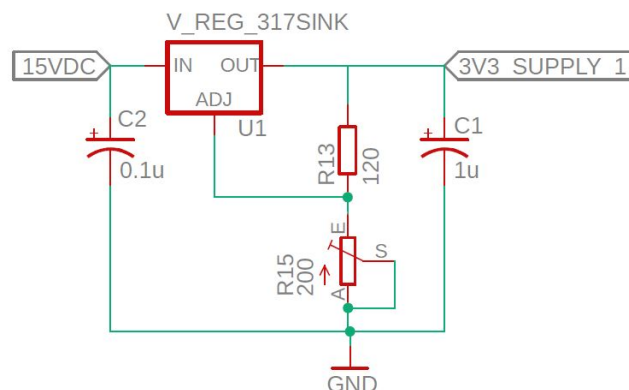
1.2 - IM393-S6E INFINEON

Para a alimentação do chip da INFINEON foi utilizada uma fonte de 15V 1,6A, que será conectada na rede para alimentar o chip e o regulador de 3.3V que será abordado a seguir.

1.3 Regulador 3.3V (parte de Potência)

Para alimentar o “secundário” dos optoacopladores com uma fonte isolada da parte de controle, aproveitamos os 15V que alimentam o INFINEON. A partir de um regulador LM317 ajustável, utilizamos um trimpot para ajuste fino da tensão que deve ser 3.3V.

Figura 2 - Esquemático do regulador de tensão de 3.3V



2- Controle

O controle da amplitude e da frequência do sinal de saída do inversor são feitos através de sinais PWM. Controlando a largura de cada pulso conseguimos, em média, diferentes níveis de tensão, da mesma forma, variando a média do sinal varia-se a frequência.

Para gerar os sinais PWM, que controlam cada um dos seis semi-ciclos (um semi-ciclo positivo e negativo para cada uma das três fases) foram utilizadas as portas PWM do microprocessador BluePill STM32, seus timers e funções de interrupção.

Foi definido que o sinal teria sessenta diferentes níveis de tensão, níveis estes, que seriam aplicados em sequência na saída, gerando uma senóide com “degraus”.

Para atender esta definição as interrupções foram definidas para ocorrerem a cada 277,77778µs e, assim, atualizar o valor do PWM para o valor seguinte.

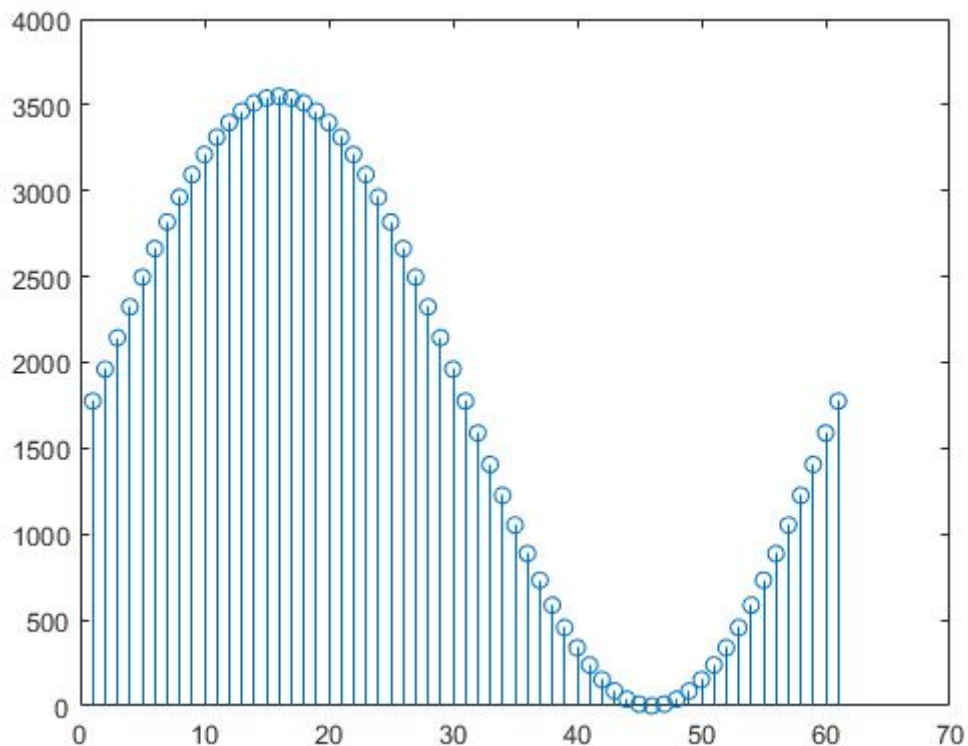
Para o microprocessador utilizado temos que o valor máximo do sinal PWM é de 3550, para este valor o nível lógico da saída fica alto por do 100% do duty cycle. E para o valor zero o nível lógico fica baixo para todo o duty cycle.

Dividindo um período da senóide em 60 amostras, foi feito um vetor que apresenta os valores que devem ser utilizados para controlar o duty cycle do PWM.

```
senoid_pwm = [1775 ,1961 ,2144 ,2324 ,2497 ,2663 ,2818 ,2963 ,3094 ,3211 ,3312 ,3397  
,3463 ,3511 ,3540 ,3550 ,3540 ,3511 ,3463 ,3397 ,3312 ,3211 ,3094 ,2963 ,2818 ,2663  
,2497 ,2324 ,2144 ,1961 ,1775 ,1589 ,1406 ,1226 ,1053 ,888 ,732 ,587 ,456 ,339 ,238 ,153  
,87 ,39 ,10 ,0 ,10 ,39 ,87 ,153 ,238 ,339 ,456 ,587 ,732 ,887 ,1053 ,1226 ,1406 ,1589]
```

Plotando o vetor acima obtemos o seguinte gráfico:

Figura 3 - Plot com os gráficos de valores utilizados na função PWM do microprocessador.



Como pode ser visto na Figura 2, a sequência dos valores do vetor *senoid_pwm* formam a senóide desejada e necessária para o projeto.

Para conseguir a defasagem de 120° entre as fases, a função PWM deve começar com primeira posição do vetor para a fase R, com a vigésima posição para a fase S e com a quadragésima posição para a fase T.

3- Isolamento Galvânico

O isolamento galvânico consiste em ter dois sistemas elétricos com terras diferentes que se comuniquem sem o fluxo de correntes indesejadas.

A isolamento galvânica é importante para fins de segurança, de forma que um usuário que tenha acesso a botões ou ao microprocessador nunca entre em contato com a parte de potência e também é importante para fins de proteção, pois se houver algum problema com o circuito de potência o mesmo não afetará a parte de controle.

Para obter tal isolamento, são utilizados optoacopladores. Foram feitos testes iniciais com os modelos 4N25 e PC817, porém nenhum deles demonstrou uma resposta satisfatória na frequência de 20kHz que o nosso PWM opera.

Optou-se então por utilizar um optoacoplador de alta velocidade. O modelo que encontramos em Porto Alegre para comprar foi 6N135. Quando este optoacoplador recebe o PWM na entrada do seu LED emissor interno diretamente do microprocessador ele inverte a saída, optamos por utilizar uma topologia alternativa mostrada na figura abaixo, nela temos dois ganhos, o microprocessador não precisa fornecer a corrente do PWM (um microprocessador sempre suporta receber mais corrente do que fornecer) e a saída do optoacoplador é a mesma que o PWM gerado no microprocessador.

Figura 4 - Topologia do 6N135

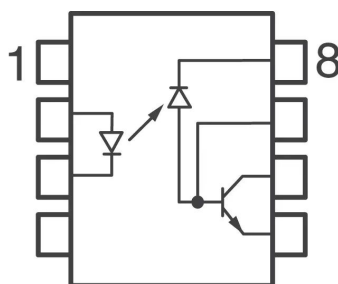
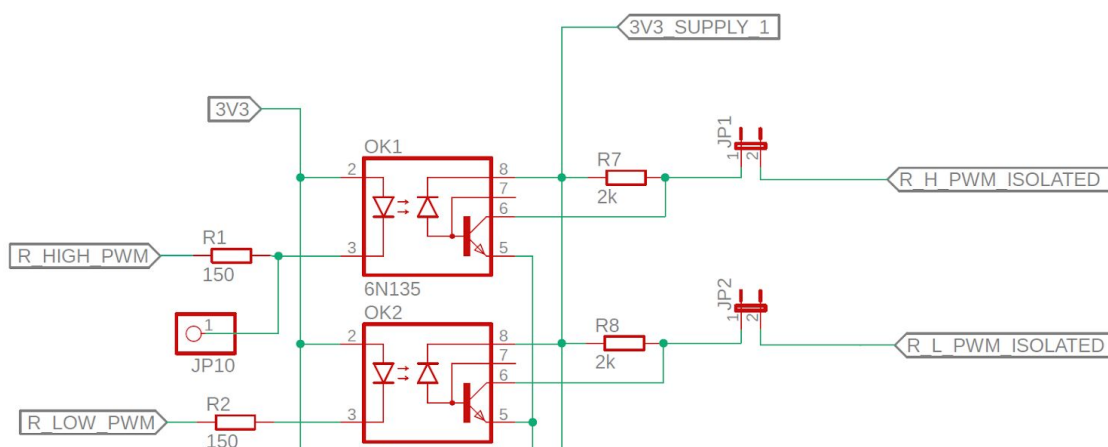


Figura 5 - Esquemático do isolamento galvânico através de optoacopladores



Podemos ver no lado “primário” do optoacoplador os PWMs do High Input e do Low Input do INFINEON. Os resistores R1 e R2 foram projetados para que haja uma corrente grande suficiente para que os LEDs emitam o sinal com a intensidade necessária.

Já no lado “secundário” há um resistor recomendado no datasheet do 6N135 e jumpers para fins de testes do circuito.

4- INFINEON

Caracterizamos como a parte de potência o nosso chip da INFINEON e o que envolve a tensão de 300V.

A tag “High DC in” é a entrada de 300V. Ela é conectada ao pino V+ do INFINEON. As alimentações de 15V vão nos pinos de VDD do chip. Adicionalmente, ambas referências (da fonte de 15V quando da fonte de 300V) irão no pino de COM do INFINEON.

Todos os pinos de *Hin* e *Lin* estão diretamente ligados nos “secundários” dos optoacopladores.

Também foram inseridos capacitores de bootstrap entre os pinos da saída Vs e os pinos de Vb, conforme indicado tanto no datasheet do chip quando em manuais de aplicação indicados pelo Professor.

Figura 6 - Esquemático utilizado para as ligações do INFINEON

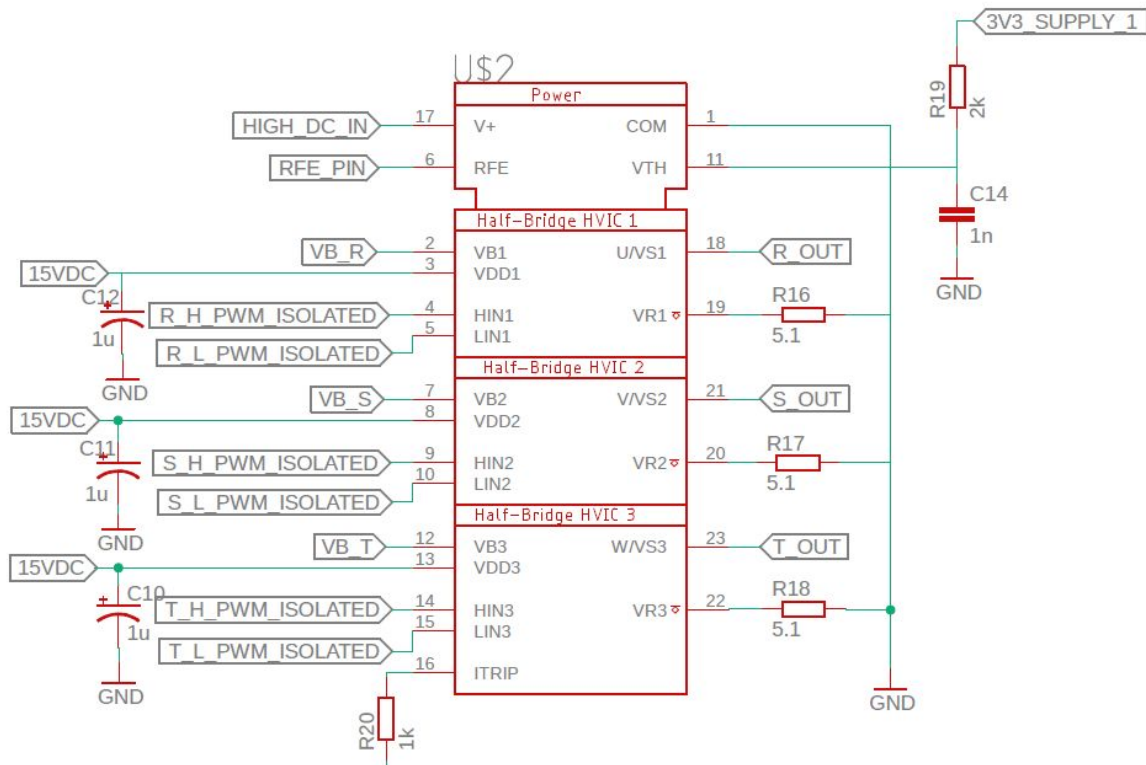
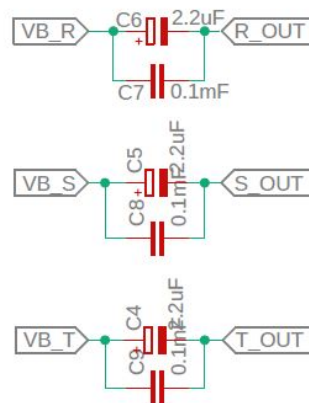


Figura 7 - Capacitores de BootsTrap entre a Vs e Vb



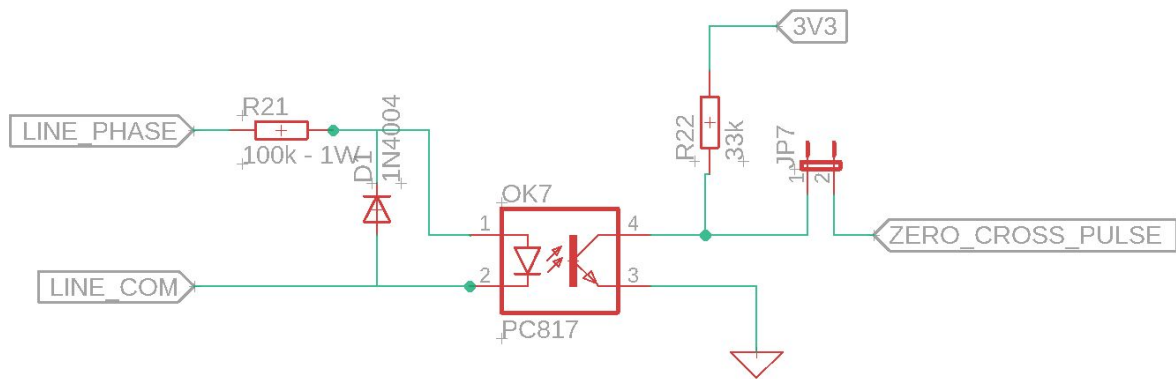
5- Detector de Passagem por zero

O detector de passagem por zero é o circuito capaz de detectar quando a tensão da rede AC passa de uma tensão negativa para positiva e vice-versa. Essa informação é útil em retificadores trifásicos *grid-tie*. Essa informação será utilizada pelo microprocessador para ajustar as fases deixando-as sincronizadas com a rede, ou levemente adiantada para que a energia flua dos painéis solares para a rede.

O led do optoacoplador conduzirá em apenas metade do período, o período positivo, assim obtém-se um sinal digital que indica quando a fase está no ciclo positivo e quando não está.

O resistor de 100K Ω limita a corrente evitando queimar o led. O diodo em paralelo com o optoacoplador serve para evitar a tensão reversa sobre o led. Além do optoacoplador fornecer um sinal digital de interesse ele também serve de isolamento galvânico para o microprocessador.

Figura 8 - Esquemático do detector de zero.

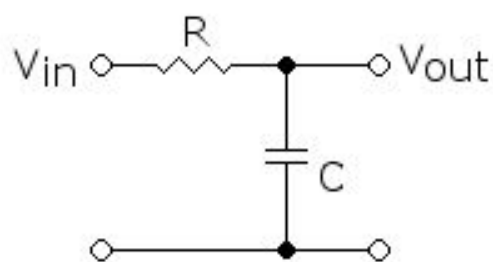


6- Filtro de saída

Para o filtro de saída de testes, foi utilizado um filtro RC passa-baixa. Utilizamos como frequência de corte 120Hz no teste.

O capacitor utilizado foi de 22 μ F e a resistência de 60 Ω .

Figura 9 - Filtro passa-baixa RC.



Foi pedido também no projeto o dimensionamento de um filtro LCL. Foi utilizado como referência a dissertação de mestrado de Rômulo Diniz Araujo (<http://www.gpec.ufc.br/novasdissertacoes/13.pdf>) e também as notas de aula do Prof. Heverton Augusto Pereira da UFV (http://www.gesep.ufv.br/wp-content/uploads/Aula_06-Conversores-cc_ca-Filtro-LCL.pdf).

Figura 10 - Topologia Filtro LCL

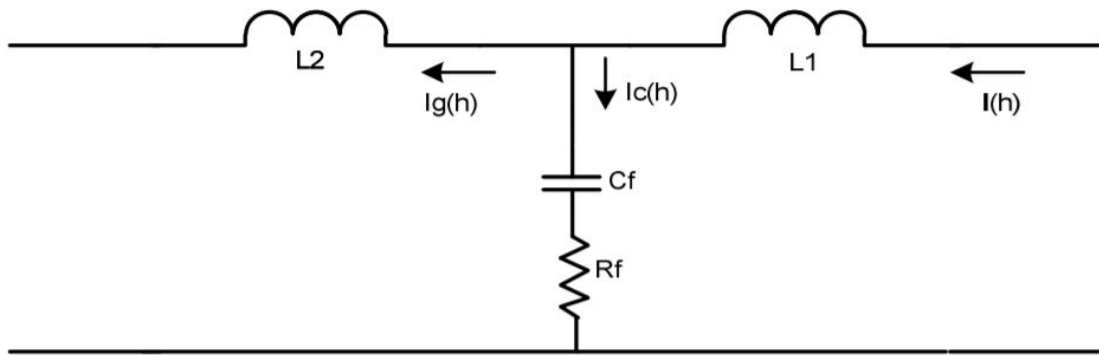


Figura 11 - Resposta em frequência do Filtro LCL

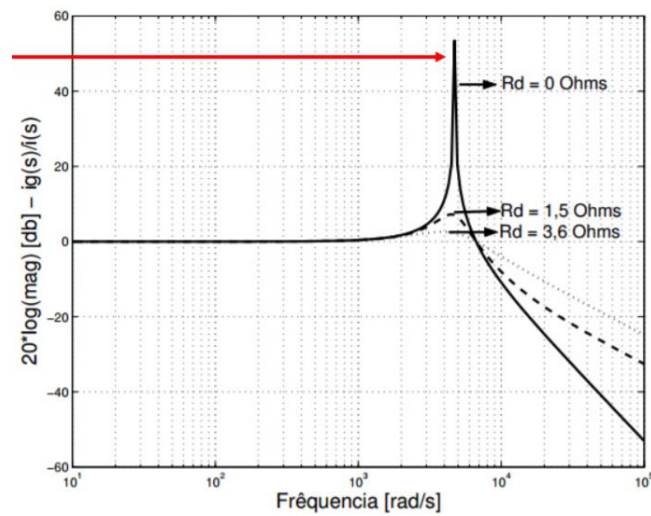
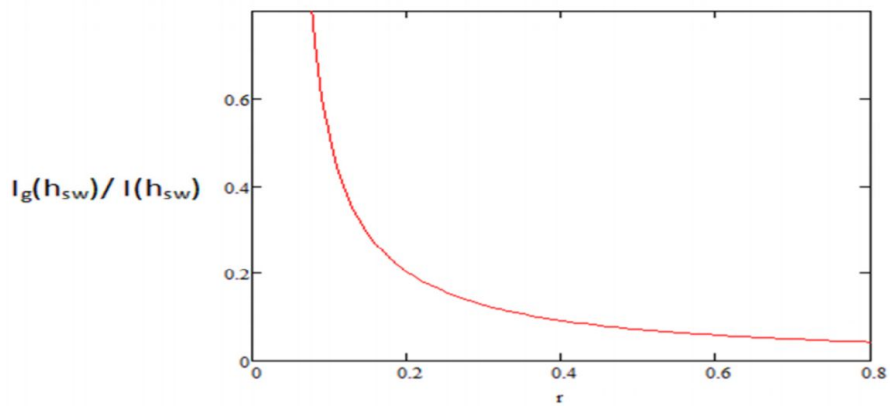


Figura 12 - Relação entre a atenuação das harmônicas e o parâmetro r



Para o dimensionamento do filtro foram utilizadas as equações abaixo, uma delas para definir o valor máximo do capacitor, outra para definir o valor do indutor L1 e a última para definir o valor do indutor L2.

O valor da capacitância máxima é representado na equação abaixo, ela é definida para que o fator de potência do filtro se mantenha alto, quanto maior a capacitância utilizada menor será o indutor necessário.

Foi utilizada como a nossa tensão de saída a tensão de linha da rede, a corrente máxima como 6A e frequência de chaveamento de 20kHz. No artigo, Rômulo Araujo utilizou como % de ripple na corrente 31% e o fator r como 20%, seguimos estas definições para o dimensionamento.

$$C_s \leq \frac{0.05 P}{120 \cdot \pi \cdot f_{rede} \cdot v_0^2} \quad L = \frac{V_{rms}}{2\sqrt{6} f_{sw} I_{ripple}} \quad L_2 = r \cdot L_1$$

Os valores do dimensionamento estão no quadro abaixo.

L1 [mH]	L2 [mH]	Cf [nF]	Rf [Ω]
7,2	1,44	60	3,6

7 - Roteiro de Testes

Para um correto uso do inversor deve-se seguir os seguintes passos:

1. Ainda com o circuito desligado, deve-se retirar todos os 6 jumpers presentes na placa. Para impedir que qualquer qualquer sinal chegue em chip da INFINEON.
2. Alimentar o microprocessador com a fonte de 5V e verificar se ele está gerando os sinais PWM.
3. Alimentar o circuito com a fonte de 15V. Os 15V alimentam o regulador de tensão que alimenta os optoacopladores e demais circuitos relevantes.
4. Verificar se o regulador de tensão, agora alimentado com 15V, possui 3,3V na sua saída. Não sendo verdadeiro a tensão de saída pode ser regulada ajustando o trimpot.
5. Com o passo 4 atendido verifica-se as saídas dos optoacopladores. Neles devem ser observados os mesmos sinais PWM observados no passo 2.
6. Ligar uma das fases ao detector de passagem por zero. Verificar se existem pulsos na sua saída.
7. Verificar se o chip da INFINEON está alimentado com 15V nos pinos 3, 8 e 13.
8. Ligar a fonte de 300V.
9. Ler as saídas. O sinal deve ser parecido ao dos itens 2 e 5.
10. Conectar o filtro a saída trifásica.
11. Ler as saídas depois de passarem pelo filtro.

Figura 13 - Saída do inversor após o filtro RC (fonte DC de 22,5V como alimentação)

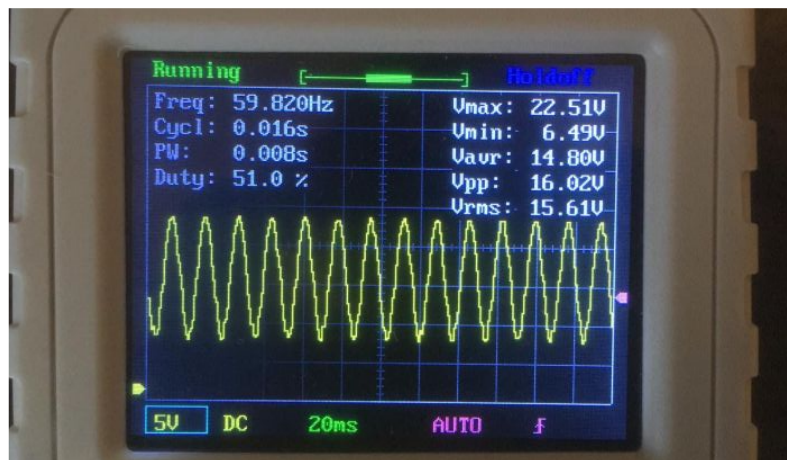


Figura 14- PWM na entrada do INFINEON (pelas limitações do osciloscópio só conseguimos congelar a parte de duty cycle baixo)

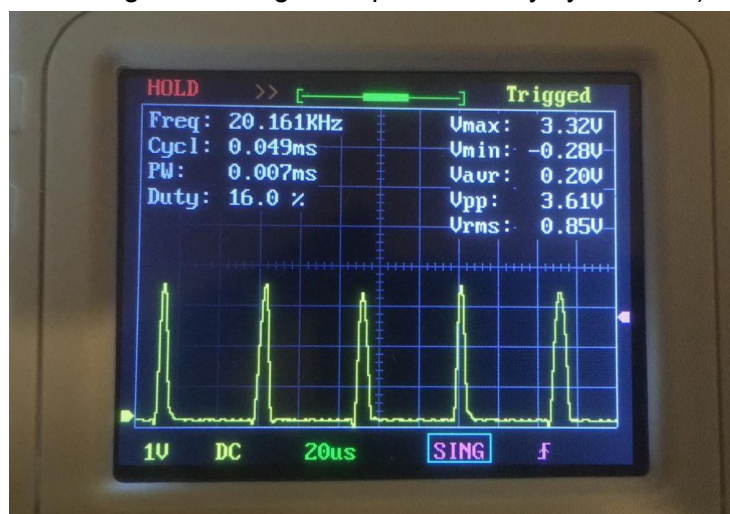


Figura 14- PWM na saída do INFINEON com 24V CC.

