



MALA TRIFÁSICA COM INJEÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE PARA ENSAIOS DE CARGA IMPOSTA APLICADA A SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA FATURAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Eduardo de Liz Hampel¹, Joabel Moia²

Resumo: Este artigo aborda o projeto de uma mala trifásica com injeção de tensão e corrente, através do uso de conversores CC-CA, para ser utilizada em Subestações com o objetivo de serem realizados ensaios de carga imposta durante o período de comissionamento ou manutenção da Subestação. O produto eletrônico em questão tem a principal aplicação em Sistemas de Medição para Faturamento e possui o diferencial de outros do mercado por ser alimentado por bateria e não depender de alimentação externa. O produto projetado atende todos os ensaios exigidos nos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – Módulo 12.

Palavras-chave: Sistema de Medição para Faturamento. Procedimento de Rede. Carga Imposta. Mala Trifásica. Conversor CC-CA.

Abstract: *This paper discusses the project of equipment able to inject voltage and current, through CC-CA converters, proposed to be used in Power Substation allowing to be realized burden tests during commissioning or maintenance period in Power Substation. The electronic product discussed has the main application into metering systems for billing and its advantage when compared to other products in market is that it can be fed by battery not depending on external power source. The proposed product meets all tests required in the “Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – Módulo 12”.*

Keywords: *Metering System for Billing, Burden test, Three phase source, CC-CA converter.*

¹ Especialista em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos, IFSC/Florianópolis <du.hampel@hotmail.com>.

² Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), IFSC/Florianópolis <joabel.moia@ifsc.edu.br>.

1 INTRODUÇÃO

Sistema de Medição para Faturamento (SMF) é um sistema composto por medidores principal e retaguarda, por transformadores para instrumentos (transformadores de corrente e potencial), por canais de comunicação entre o agente e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), e por sistemas de coleta de dados de medição para faturamento (ONS, 2017).

O SMF fornece:

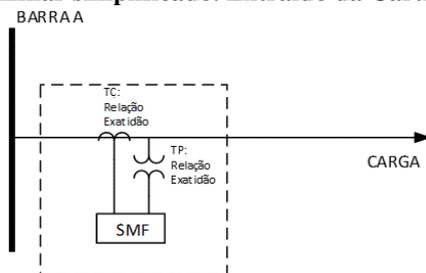
- dados para a apuração dos Encargos de Uso do Sistema de Transmissão – EUST e da eficiência da contratação do uso do sistema de transmissão, no âmbito do ONS;
- dados para a contabilização e liquidação da energia elétrica, no âmbito da CCEE;
- dados para a apuração dos encargos dos serviços ancilares, no âmbito da CCEE;
- dados para verificação do cumprimento das instruções de despacho nas unidades geradoras e para apuração dos serviços ancilares e das capacidades declaradas dessas unidades geradoras;
- dados para cálculo de fator de potência;
- dados para cálculo dos fatores de perda de transformação; e
- dados para cálculo dos indicadores de qualidade da energia elétrica (QEE) (ONS, 2017).

Dessa forma, fica evidenciado que o correto funcionamento do SMF é primordial para questões de faturamento, arrecadação de receita, e também para evitar penalidades dos agentes junto a CCEE, principalmente para Distribuidoras, Transmissoras e Geradores de energia elétrica.

Durante a instalação de um novo SMF o ensaio mais importante é o Ensaio de Carga Imposta, pois por meio dele é possível verificar se os equipamentos conectados aos secundários dos Transformadores de Instrumentos (TIs), bobinas dos medidores de energia elétrica, resistências dos contatos, blocos de terminais, resistência dos condutores e chaves de aferição não demandam uma carga imposta ao equipamento maior do que sua capacidade.

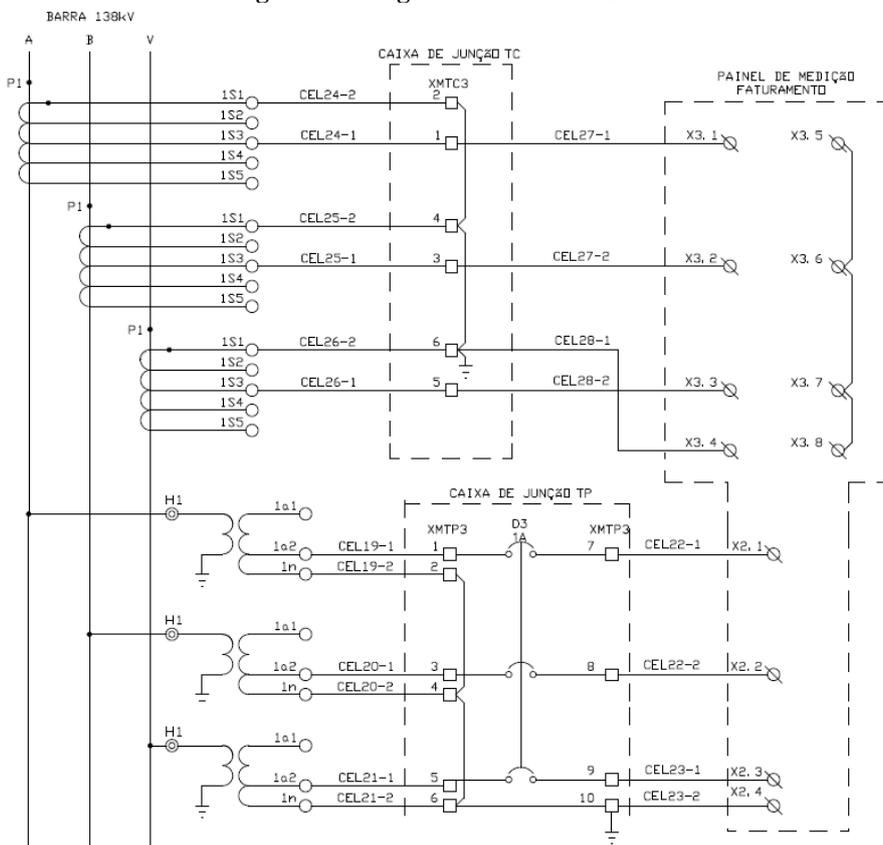
Devido a importância deste ensaio, o mesmo é exigido pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e cobrado através do Relatório de Comissionamento do SMF, pois além de garantir o perfeito funcionamento dos TIs, garante que o SMF foi ligado corretamente. Isto porque no caso de uma conexão de uma fase invertida ou mesmo a polaridade do circuito de corrente estiver invertida, é possível identificar durante o ensaio através do Diagrama Fasorial apresentado nos medidores. Na Figura 1 é demonstrado o exemplo de um diagrama unifilar simplificado de onde é instalado um SMF.

Figura 1 – Diagrama Unifilar simplificado. Extraído da Cartilha do SMF ONS (2015).



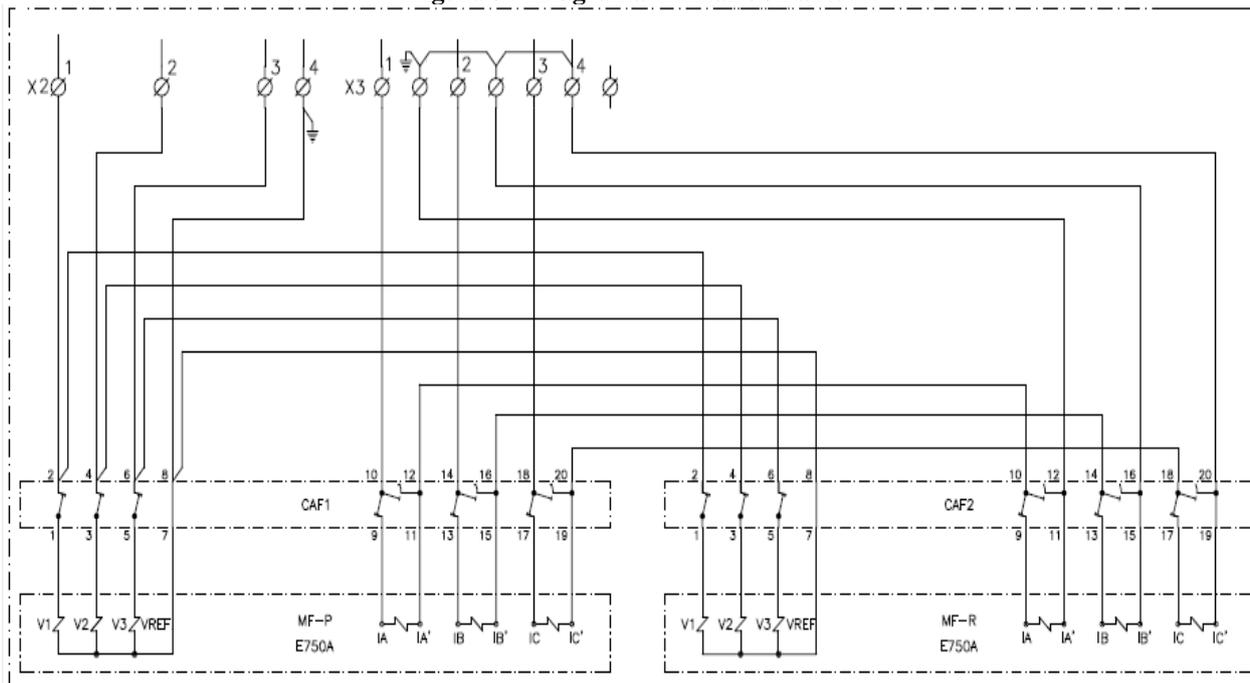
Na Figura 2 é demonstrado um típico diagrama trifilar de um SMF que contempla todas as instalações externas até o painel existente dentro da casa de comando de uma Subestação. Cabe salientar que na maioria das situações os cabos que interligam as caixas de junção dos transformadores de potencial (TPs) e destes até o painel dentro da casa de comando, possuem grandes distâncias, usualmente em torno de 300 metros, podendo ser maior ou menor dependendo do arranjo da subestação. A área da seção transversal (bitola) desses condutores deve ser calculada de modo a respeitar a potência máxima dos TIs.

Figura 2 – Diagrama Trifilar do SMF.



A fiação da parte interna do Painel, relativa à conexão dos medidores pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama Trifilar do Painel.



Em uma pesquisa de mercado realizada com os produtos que permitem realizar o ensaio, constatou-se que a maioria é de fabricantes internacionais e existem poucos fornecedores, o que acaba tornando o produto caro. Os produtos nacionais apresentam interfaces pouco amigáveis e mais indicadas para uso em laboratórios, já que aparentam ter pouca resistência mecânica. Outro fator importante é que todos os produtos existentes dependem de fontes de alimentações externas.

Dessa forma este artigo propõe o projeto de um produto eletrônico, comumente conhecido como “Mala Trifásica”, capaz de realizar os ensaios necessários para o comissionamento de SMF. O produto é baseado em conversores CC-CA (inversor) com modulações PWM, transformadores elevadores e filtros de harmônicos. É implementada também uma malha de controle para o ajuste das correntes.

Como diferencial dos produtos existentes no mercado, a alimentação do equipamento é feita através de bateria, devido muitas vezes o equipamento ser utilizado em lugares remotos e o usuário não dispor de fontes de alimentação convencionais. Por fim é feita uma estimativa de preços e comparada com os equipamentos existentes no mercado.

1.1 Realização do Ensaio de Carga Imposta

Após a montagem de todo o circuito conforme a Figura 2 e a Figura 3, a equipe que realizar o serviço de posse de uma Mala Trifásica, que permita a injeção de tensão e corrente, pode iniciar o ensaio pelo circuito de potencial.

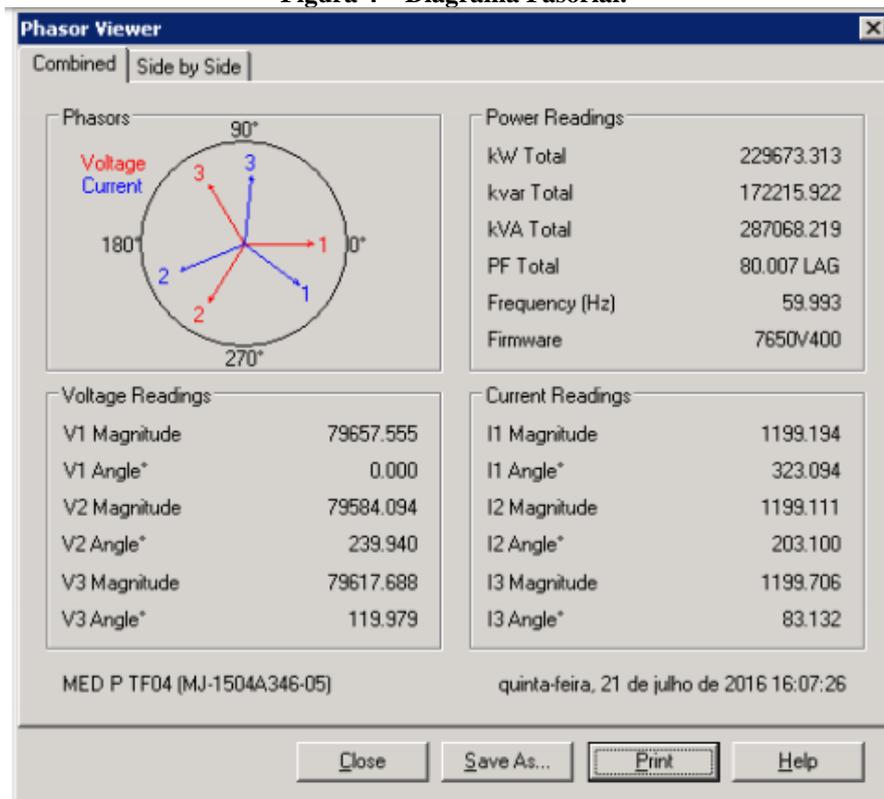
No caso do circuito de potencial devem ser desconectadas as ligações nos secundários dos TPs (terminais 1a2 e 1n – Figura 2) de cada TP. Após isto o equipamento deve ter suas saídas de tensão selecionadas para a mesma tensão do secundário do TP, usualmente $115 V_{RMS}$. Com o auxílio de um amperímetro é medida a corrente que circula por cada fase, seu valor eficaz/RMS é anotado. O produto resultante da corrente eficaz com a tensão eficaz aplicado em cada fase resulta na potência em VA demandada pelo circuito, a qual deve estar abaixo da especificada pelo fabricante do TP.

De forma análoga no circuito de corrente, o ensaio é realizado desconectando-se as ligações dos secundários (terminais 1S1 e 1S3 – Figura 2) dos transformadores de corrente (TCs) e conectando-as ao equipamento para teste. Neste caso a saída de corrente do equipamento deve ter sua saída configurada para 5 A ou 1 A, dependendo da especificação do TC, e com o auxílio de um voltímetro é mensurada a tensão nestes bornes para cada fase e seu valor é anotado. O produto resultante da tensão eficaz medida com a corrente eficaz aplicada resulta numa potência demandada pelo circuito, devendo estar abaixo da especificada pelo fabricante do TC.

Outro teste feito também que é exigido pelo ONS é o de estudo Fasorial, onde são aplicadas tensão e corrente nominais nas fiações que chegam aos secundários dos TIs. Nos medidores é capturado o Diagrama

Fasorial, dessa forma é possível visualizar se a alguma conexão está errada. Na Figura 4 é possível observar o exemplo de um Diagrama Fasorial capturado. Na Figura 4 é possível observar que as conexões estão corretas, pois as tensões estão defasadas 120° e cada uma está acompanhada de sua respectiva corrente.

Figura 4 – Diagrama Fasorial.



1.2 Requisitos do equipamento para realização do Ensaio de Carga Imposta

O equipamento para Ensaio de Carga Imposta em SMF, conhecido também como “Mala Trifásica Para Injeção de Tensão e Corrente”, deve possuir minimamente os seguintes requisitos para permitir que o ensaio possa ser realizado:

- Saídas em tensão trifásicas defasadas 120° entre si, com ajuste individual do valor eficaz para cada fase;
- Tensão de saída ajustável de 0 a $120 V_{RMS}$;
- Potência de 50 VA para a fonte de tensão;
- Saídas em corrente trifásicas defasadas 120° entre si, com ajuste individual do valor eficaz para cada fase;
- Corrente de saída ajustável de 0 a $5 A_{RMS}$;
- Potência de 50 VA para a fonte de corrente;
- A corrente deve estar atrasada em 30° em relação à tensão (fator de potência 0,866).

Os valores especificados são baseados nos TPs e TCs usualmente encontrados no mercado e em equipamentos existentes. No caso dos TPs sua relação é dimensionada de forma que a tensão de fase é sempre 66,39 ou 113,82 Vrms, Já para os TCs sua corrente de secundário é padronizada sempre para 1 ou 5 A.

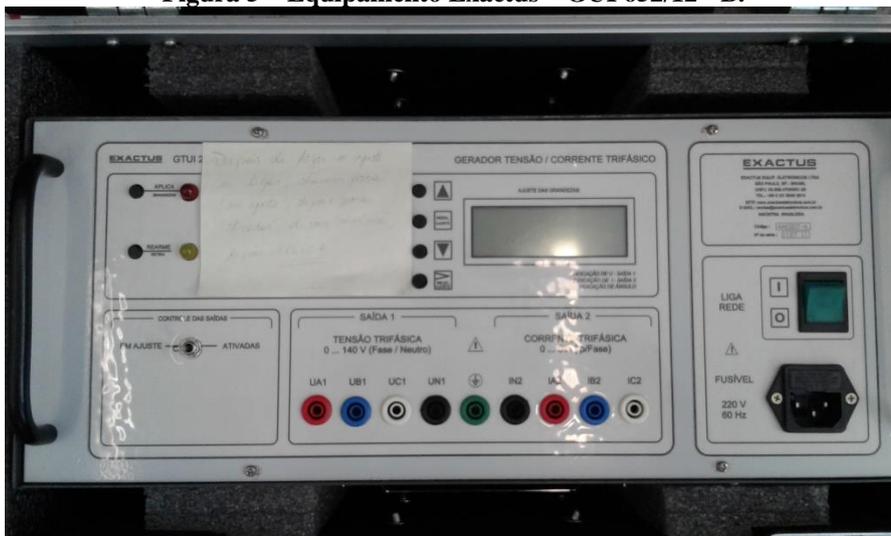
2 PESQUISA POR PRODUTOS CORRELATOS NO MERCADO

Para efeitos de especificação técnica e preço realizou-se uma pesquisa de mercado com alguns fabricantes que possuem o produto correlato. Este item resultou em apenas dois casos com cotações formais para pessoa jurídica. Os outros dois casos listados informaram o preço do equipamento por telefone.

2.1 Equipamento do fabricante Exactus: GUI 652/12 - B

Das pesquisas realizadas é o mais simples, mas atende perfeitamente todos os requisitos necessários para o ensaio, na Figura 5 pode se visualizar o mesmo.

Figura 5 – Equipamento Exactus – GUI 652/12 - B.



No site do fabricante são encontradas algumas informações técnicas, resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações do fabricante.

Dados Técnicos		
Alimentação	90 a 260 V _{ca}	50/60 Hz
Saída Trifásica 1	0 a 120 V _{ca}	30 VA/fase
Saída Trifásica 2	0 a 6 A	30 VA/fase
Defasagem angular	0 a 360°	
Apresentação	Bastidor metálico	
Dimensões	L=193 mm, A=449 mm, P=415 mm. 14 kg	
Acessórios	Manual, cabo de alimentação e mala para transporte	
Garantia	2 anos	

2.2 Equipamento do fabricante Metrum: PS-XVCCC

É o segundo mais caro dentre os pesquisados, no entanto apresenta mais funcionalidades (Figura 6).

Figura 6 – Equipamento do fabricante Metrum – PS-XVCCC (Extraído do Catálogo do fabricante).



O fabricante não informa a potência de saída, mas garante corrente de saída de 0 a 18 A e tensão eficaz de 0 a 300 V. Neste produto o controle dos sinais a serem aplicados pode ser ajustado por meio de software e é possível a injeção de harmônicos até 51ª ordem.

2.3 Equipamento do fabricante MTE: PPS 3.3C

Para este equipamento a cotação de preço foi feita por telefone, mas é um equipamento semelhante ao do item 2.2, no entanto não apresenta potência de saída suficiente (50 VA) para as fontes de tensão e corrente. Conforme catálogo do fabricante, na Tabela 2 estão resumidas as principais características do produto e na Figura 7 é possível visualizar o produto. Como vantagem, permite programação via software e possibilidade

de salvar os dados em um cartão de memória padrão MTE, permite também gerar sinais com harmônicos até 31ª ordem.

Tabela 2 – Especificações do fabricante.

Dados Técnicos		
Alimentação	88 a 264 V _{ca}	47 a 63 Hz
Saída Trifásica 1	300 a 480 V _{ca}	30 VA/fase
	150 a 300 V _{ca}	30 VA/fase
	75 a 150 V _{ca}	30 VA/fase
	30 a 75 V _{ca}	30 VA/fase
Saída Trifásica 2	10 a 120 A	60 VA/fase
	1 a 10 A	25 VA/fase
	1mA a 1 A	10 VA/fase
Defasagem angular	-180° a 180°	
Apresentação	Bastidor metálico	
Dimensões	L=465 mm, A=210 mm, P=375 mm. 21,5 kg	

Figura 7 – Diagrama Unifilar simplificado. Extraído do catálogo do fabricante (MTE, 2010).



2.4 Equipamento do fabricante Salk: SK-303

É um equipamento de fabricação nacional, semelhante ao do item 2.1, porém aparenta ter uma resistência mecânica maior e ser mais aplicável ao uso no campo. No site do fabricante não há imagem do equipamento, porém existe uma imagem de um monofásico que dá uma ideia do *design*. Na Figura 8 é possível visualizar o equipamento monofásico.

Figura 8 – Equipamento Salk. Extraído do site do fabricante.



O equipamento possui entrada de alimentação trifásica comutável entre 127 e 220 V_{AC}, com saídas de corrente alternada em 60 Hz de 4,6 ou 10 A e saída de tensão ajustável de 115 ou $115/\sqrt{3}$, e variação de FP de 1,00 – 0,5 Capacitivo – 0,5 Indutivo.

2.5 Comparativo de preços

Em uma breve análise é possível perceber que o segundo produto cotado é mais completo e possui um *design* mais interativo com o usuário, pois sua interface apresenta-se mais moderna. Outra vantagem é que o seu revestimento, em forma de maleta, apresenta facilidade de transporte e maior resistência. Na Tabela 3 é possível identificar os preços dos quatro fabricantes.

Tabela 3 – Preços cotados.

Item	Equipamento	Valor (R\$)
1	Exactus	25.951,10
2	Metrum	64.715,00
3	MTE	170.000,00*
4	Salk	48.000,00*

*Preços informados por telefone.

O equipamento do item 1 é o mais barato e contempla os itens necessários para realização do ensaio, mas sua desvantagem é que é o mais frágil em relação aos outros, sendo mais indicado para uso em laboratório.

O produto do item 3 além de não possuir as especificações mínimas é o mais caro de todos o que torna praticamente inviável em relação aos concorrentes.

O equipamento do item 4 não cumpre a especificação mínima também, pois não possui ajuste de tensão e corrente em toda faixa e sim valores pré-estabelecidos.

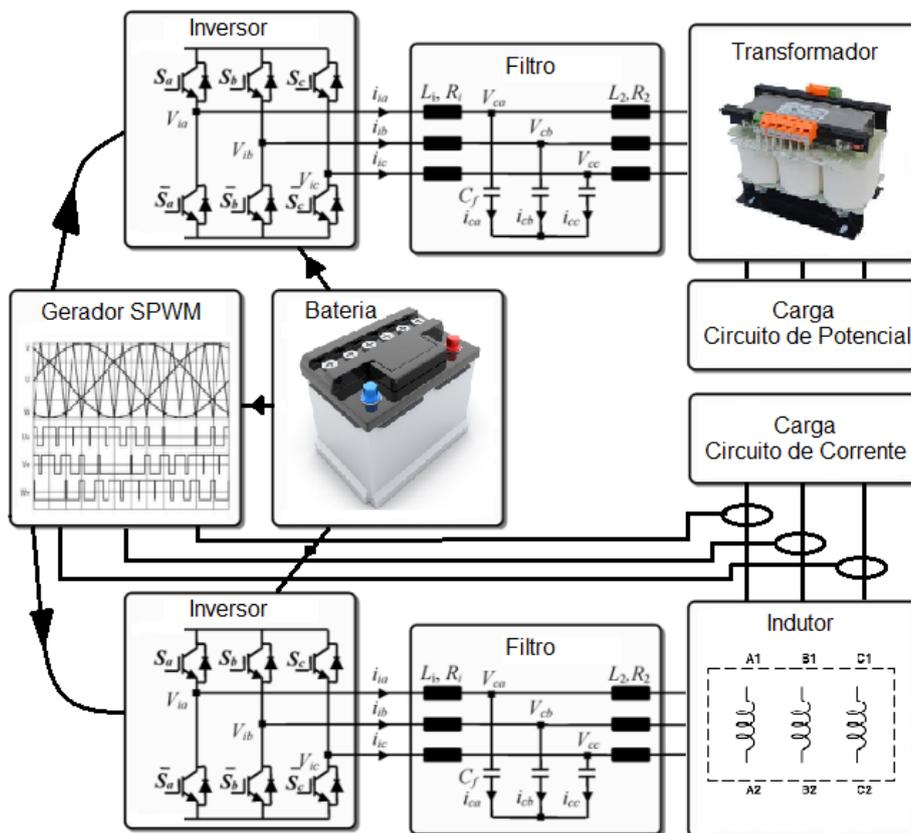
Outra desvantagem é que todos necessitam de fontes de alimentação externas, diferente da proposta deste trabalho onde o equipamento será alimentado por bateria.

3 EQUIPAMENTO PROPOSTO

De acordo com a pesquisa de equipamentos correlatos existentes no mercado, foi identificado que os produtos possuem um preço elevado em relação a proposta deste trabalho, além disso todos necessitam de fontes de alimentação externas que muitas vezes não estão disponíveis. O mercado nacional para o produto é vasto, pois além de ser um equipamento obrigatório para Agentes de Medição (Distribuidoras, Transmissoras, Geradores de energia elétrica) existem muitas empresas especializadas no mercado em oferecer este serviço de Ensaio de Carga Imposta.

A Mala Trifásica para Injeção de Tensão e Corrente proposta neste trabalho possui o diferencial dos outros produtos do mercado por ser alimentada por bateria de chumbo-ácido de 12 V/45 Ah, estacionária, facilmente encontrada no mercado. A bateria é especificada para durar 10 minutos com o equipamento sob carga nominal. Este tempo foi dimensionado de acordo com o tempo necessário para realizar um ensaio padrão de 2 a 3 minutos. Sendo assim são necessários conversores CC-CA para gerar os sinais senoidais. Na Figura 9 é possível visualizar o diagrama de blocos do produto proposto.

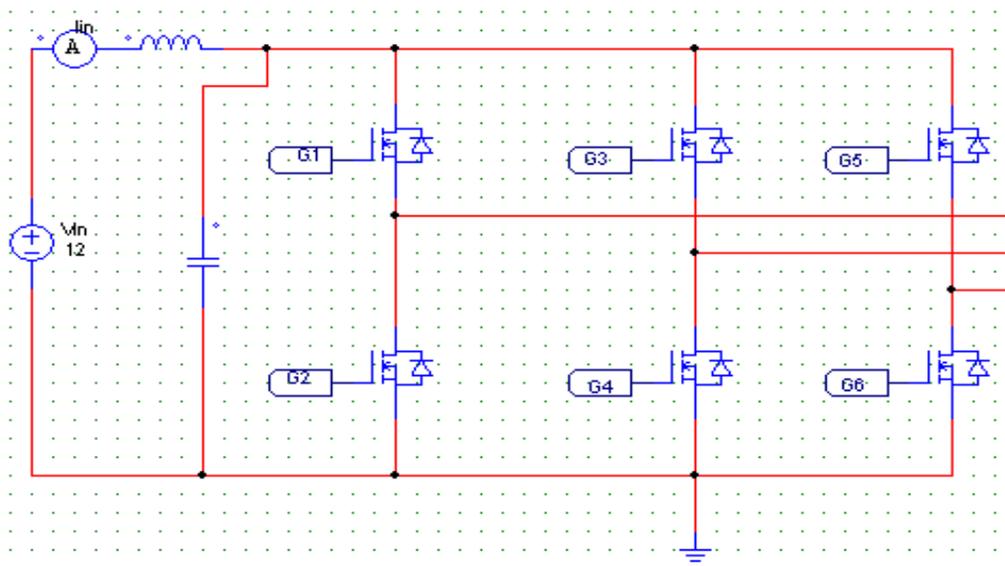
Figura 9 – Diagrama de blocos.



3.1 Topologia adotada

Um conversor CC-CA comumente conhecido por inversor é um dispositivo que converte corrente contínua em algum modo de corrente alternada. A fonte principal de energia é uma bateria. No caso de um inversor trifásico as saídas são defasadas 120° . A topologia de conversor CC-CA ou inversor que foi adotada é do tipo unidirecional, compostas por seis chaves e saída trifásica, conforme Figura 10.

Figura 10 – Topologia do Inversor trifásico.



Para o controle da forma de onda da saída foi utilizada a Modulação por Largura de Pulsos Senoidal (SPWM).

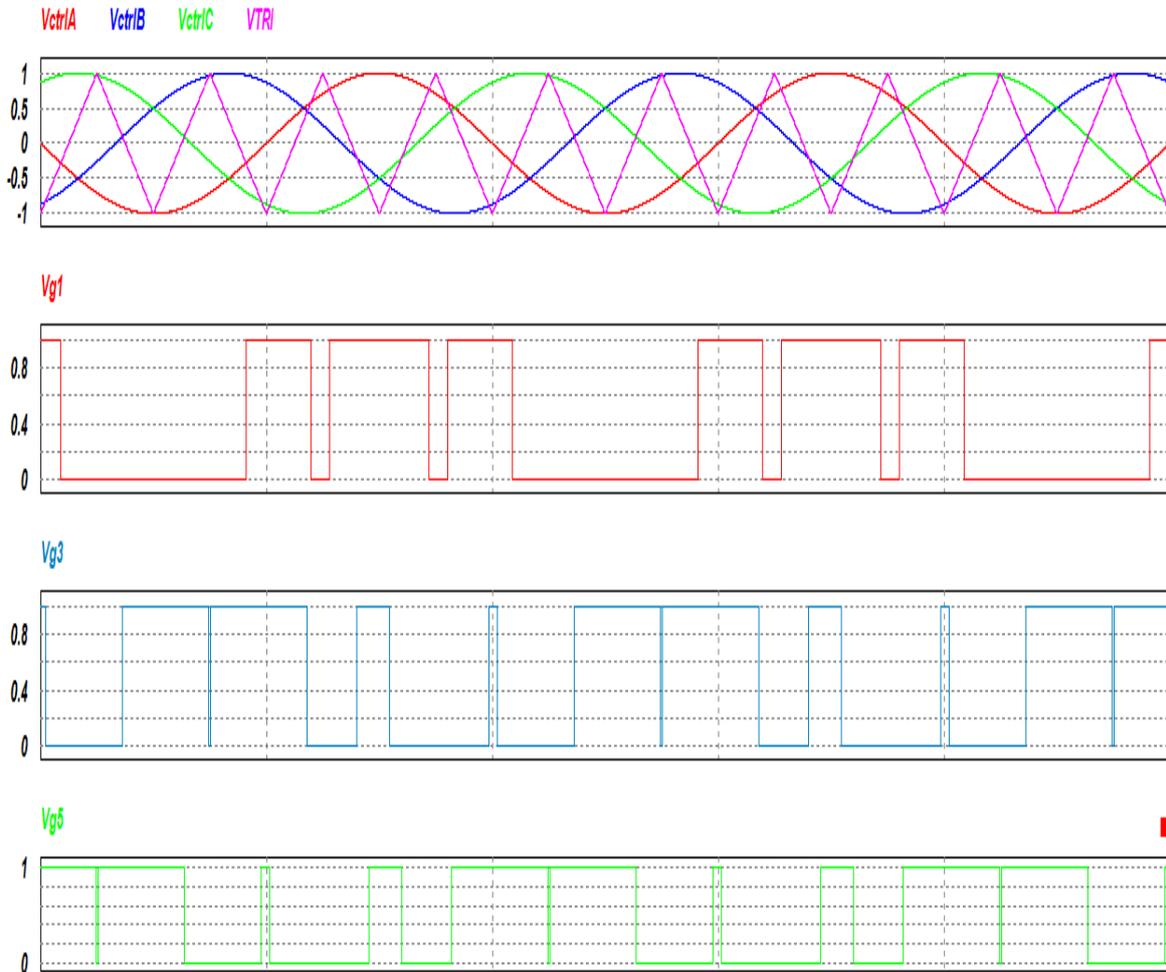
3.2 Técnica de Modulação por Largura de Pulsos Senoidal (SPWM)

A Modulação por Largura de Pulso (PWM) é uma técnica a qual é caracterizada pela geração de pulsos de amplitude constantes através da modulação da duração do pulso pela modulação do ciclo de trabalho. A modulação analógica PWM requer a geração de um sinal de referência (moduladora) e da portadora os quais são alimentados em um comparador e baseado em uma lógica a saída é gerada. O sinal de referência possui a forma desejada do sinal de saída o qual pode ser um valor contínuo, uma onda quadrada ou senoidal enquanto a portadora deve ser um sinal triangular ou dente de serra em uma frequência significante maior do que o sinal de referência (MAJHI, 2012).

A técnica de modulação SPWM é caracterizada por pulsos de amplitude constante com diferentes ciclos de trabalho para cada período. A largura desses pulsos é modulada para obter a tensão senoidal na saída do inversor, reduzindo assim o conteúdo de harmônicos. A modulação SPWM é o método mais usado para controle de motores, aplicações solares e aplicações industriais. Nesta técnica três ondas senoidais e uma portadora triangular são utilizadas para gerar o sinal PWM. Essas três ondas senoidais são utilizadas para inversores trifásicos. As ondas senoidais são os sinais de referência e devem ser defasados obrigatoriamente em 120° . A frequência destas referências é escolhida de acordo com a aplicação ou a rede a ser conectada, neste projeto foi utilizada a frequência de 60 Hz, pois é o padrão utilizado no Brasil. A portadora, de sinal triangular, deve ter uma frequência muito maior do que o sinal de referência, na ordem de kHz. O sinal para chaveamento é gerado pela comparação das ondas senoidais com as ondas triangulares. O comparador gera um pulso em sua saída quando a tensão da onda senoidal é maior do que a onda triangular e estes pulsos são utilizados para acionar as chaves do inversor. Com o objetivo de evitar curto de braço entre as chaves, qualquer um dos três ramos do inversor não pode ser acionado simultaneamente (RAJU, 2013).

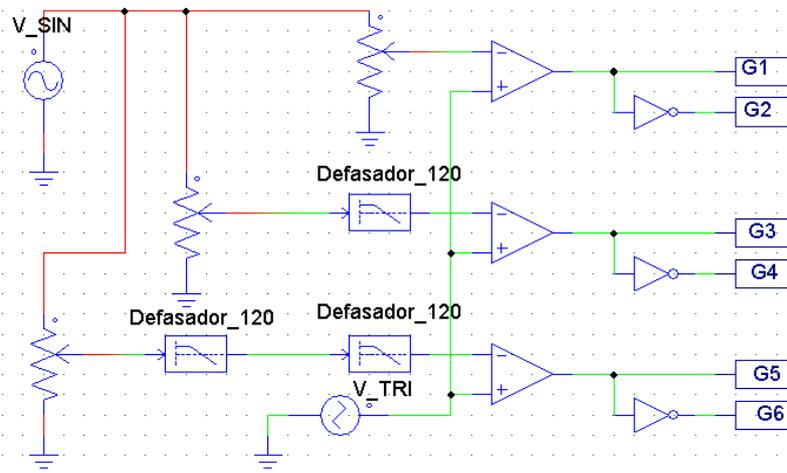
Na Figura 11 é possível visualizar as formas de ondas típicas de uma modulação SPWM. As três ondas senoidais defasadas 120° são aplicadas a entrada inversora dos comparadores e a onda triangular é aplicada a entrada não inversora dos comparadores. As formas de onda V_{g1} , V_{g3} e V_{g5} , são resultantes da comparação destas ondas, quando a onda senoidal é maior do que a onda triangular é gerado um pulso na saída do comparador, este por vez sua alimenta os drivers responsáveis por acionar as chaves do inversor. As formas de onda V_{g2} , V_{g4} e V_{g6} , não estão demonstradas no gráfico, pois são complementares as V_{g1} , V_{g3} e V_{g5} , respectivamente.

Figura 11 – Forma de ondas modulação SPWM.



Para gerar as formas de onda conforme a Figura 11, propõe-se a utilização de circuitos analógicos devido a facilidade de se trabalhar com os mesmos e terem um custo de implementação menor, já que para gerar os sinais seria necessário um microprocessador (microcontrolador, DSP etc.). A desvantagem é que as frequências de operação e filtragem ficam dependentes da precisão dos componentes e ajustes na hora de fabricação e primeiros testes. O circuito fica limitado também a operar nas frequências e fator de potência pré-estabelecidos. Na Figura 12 é possível visualizar o diagrama de blocos completo do circuito para gerar os sinais SPWM.

Figura 12 – Diagrama de blocos do circuito para gerar o SPWM.

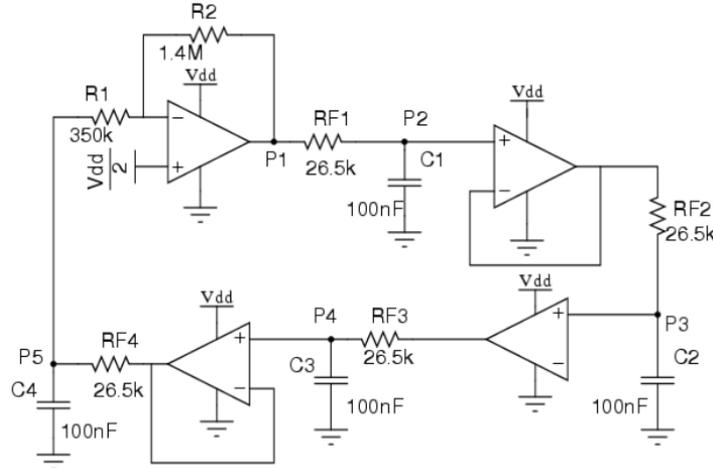


Para alimentar esses circuitos auxiliares utilizaram-se os componentes LM7805 e LM7905, para gerar uma fonte de alimentação de -5 V a $+5\text{ V}$ responsável por alimentar os circuitos auxiliares. A forma de ligação segue a folha de dados do fabricante.

3.2.1 Gerador de onda senoidal

Como o sinal de saída é um reflexo do sinal de referência, é muito importante que o mesmo possua baixa distorção. O AD639 é um circuito integrado que proporciona a geração deste sinal, mas como se tornou obsoleto e não há substituto direto, propõe-se a utilização do “*Bubba Oscillator*”. O Oscilador de Bubba é um circuito que fornece uma onda senoidal filtrada na frequência desejada baseada na configuração dos capacitores e resistores no circuito (DOUCET *et al.*,2007). Na Figura 13 é possível visualizar o circuito projetado para operar em 60 Hz. O amplificador operacional utilizado neste caso é o TLV2474.

Figura 13 – Gerador de onda senoidal (DOUCET, *et al.*,2007).



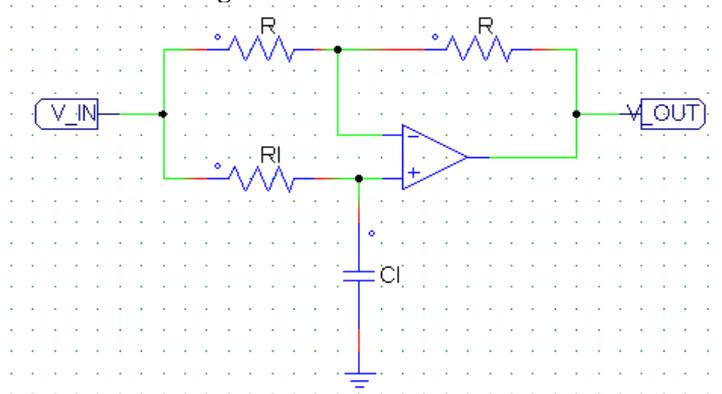
3.2.2 Ajuste amplitude tensão de saída

Os potenciômetros existentes entre a saída do oscilador e a entrada de cada comparador servem para ajustar a amplitude de saída do sinal por fase do inversor, é o controle que o operador do equipamento deve utilizar para o controle da amplitude de saída.

3.2.3 Defasador de 120°

Como o oscilador utilizado possui apenas saídas em quadratura, foi utilizado um filtro passa tudo com o objetivo de provocar apenas um deslocamento de fase, no caso 120° para a fase B e 240° para a fase C. A defasagem de 240° é obtida associando dois defasadores em série. Na Figura 14 é possível identificar o circuito utilizado.

Figura 14 – Defasador de 120°.



A tensão de saída é dada pelas Equações 1 e 2.

$$V_{out} = V_{in} \angle -\theta \tag{1}$$

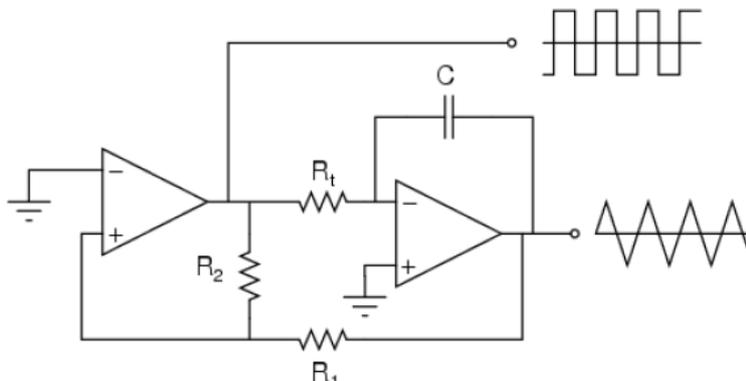
$$\theta = 2 \arctan(2\pi f R_i C_i) \tag{2}$$

Para uma defasagem de 120° obteve-se os seguintes valores para o capacitor e o resistor: $R_i = 5,51 \text{ k}\Omega$ e $C_i = 1 \mu\text{F}$.

3.2.4 Gerador de onda triangular

O circuito gerador de onda triangular consiste num gerador de onda quadrada e um integrador, conforme demonstrado na Figura 15.

Figura 15 – Gerador de onda triangular (DOUCET *et al.*, 2007).



O circuito da Figura 15 oscila numa frequência dada pela Equação 3:

$$f_{osc} = 1/4R_tC \quad (3)$$

A frequência de comutação escolhida foi 60 kHz, pois permite utilizar componentes para a filtragem com valores menores, diminuindo o custo do filtro, entretanto este valor de frequência deve ser escolhido cuidadosamente, pois quanto maior a frequência, maiores são as perdas de comutação. Para a frequência de 60 kHz obteve-se os seguintes valores para os componentes: $R_t = 4,2 \text{ k}\Omega$ e $C = 1 \mu\text{F}$. Os resistores R_1 e R_2 controlam a amplitude do sinal de saída, e seus valores são iguais a $1 \text{ k}\Omega$.

Como a frequência de saída foi selecionada para 60 kHz o amplificador operacional deve possuir um *slew rate* elevado, portanto, escolheu-se o LM7171.

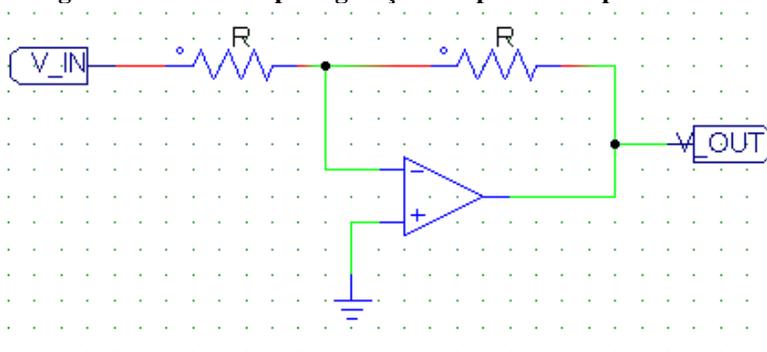
3.2.5 Comparador

O circuito integrado escolhido para a função de comparador, a ser utilizado no circuito gerador de SPWM, é o LM319 por ser um componente facilmente encontrado e de alta velocidade.

3.2.6 Geração dos Pulsos Complementares

O circuito utilizado para gerar a saída complementar do sinal de disparo das chaves da parte inferior de cada braço do inversor é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Circuito para geração dos pulsos complementares.



Neste caso os dois resistores devem possuir o mesmo valor a fim de se obter ganho unitário para o amplificador inversor. Cabe salientar que este circuito foi utilizado apenas para simulação do funcionamento já que o driver utilizado já tem a funcionalidade de gerar os pulsos complementares.

3.3 Chaves estáticas

Em aplicações de inversores os MOSFETs e IGBTs são largamente aplicados. Os MOSFETs de potência podem operar em frequências maiores na ordem de dezenas de kHz, mas é limitado na questão de potência, geralmente 1.000 V com corrente de 50 A. Já o IGBT é um transistor de potência controlado por tensão que é

utilizado quando aplicado em tensões maiores e oferece maior velocidade do que um BJT, mas não tão rápido quanto um MOSFET. No caso do produto proposto, como a potência necessária é relativamente baixa e a frequência de chaveamento elevada, foi escolhida a tecnologia MOSFET para utilização no inversor. O componente escolhido é o STD130N6F7 que tem aplicação em chaveamentos de alta velocidade, e a vantagem de apresentar baixa resistência quando em condução.

As perdas de condução e chaveamento para as chaves utilizadas foram calculadas através das Equações 4 e 5, respectivamente.

$$P_{cond} = R_{ds} \cdot (I_{RMS})^2 \quad (4)$$

$$P_{comut} = \frac{f_{comut}}{2} V_{pico} I_{pico} (t_r + t_f) \quad (5)$$

Sendo:

R_{ds}	resistência dreno- <i>source</i> em condução do transistor;
I_{RMS}	valor da corrente eficaz do transistor;
f_{comut}	frequência de comutação de operação do transistor;
V_{pico}	valor da tensão de pico sobre o transistor;
I_{pico}	valor da corrente de pico do transistor;
t_r	tempo de subida do transistor, fornecido pelo fabricante, e;
t_f	tempo de descida do transistor, fornecido pelo fabricante.

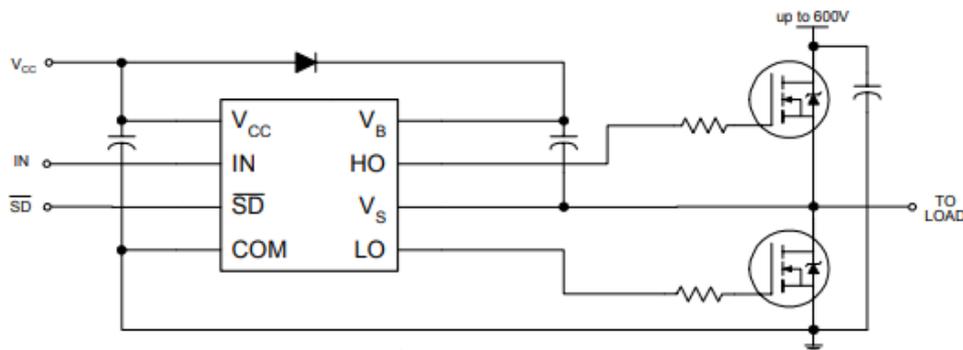
Com os seguintes valores: $R_{ds} = 5,0 \text{ m}\Omega$; $I_{RMS} = 6,8 \text{ A}$; $f_{comut} = 60 \text{ kHz}$; $V_{pico} = 12 \text{ V}$; $I_{pico} = 8 \text{ A}$; $t_r = 44 \text{ ns}$ e $t_f = 24 \text{ ns}$, os quais são resultantes da simulação e da folha de dados do fabricante e as Equações 4 e 5, chega-se ao valor de 427 mW de perdas totais. Com essa potência, foi feito o cálculo térmico e confirmou-se que não há necessidade de utilização de dissipadores nas chaves.

3.4 Acionamento para as chaves (*driver*)

Com todos os circuitos descritos anteriormente implementados o sinal SPWM já está apto a ser aplicado nas chaves, no entanto, como serão utilizados MOSFETs do tipo N são necessários circuito de acionamento (*drivers*) com o objetivo de acionar as chaves da parte superior do inversor, pois deve-se existir uma tensão no *gate* do MOSFET maior que em seu dreno para que ele possa conduzir. Os *drivers* de MOSFET são capazes de atingir esta tensão rapidamente através das técnicas de *Charge Pumps* e *Boot Strapping*.

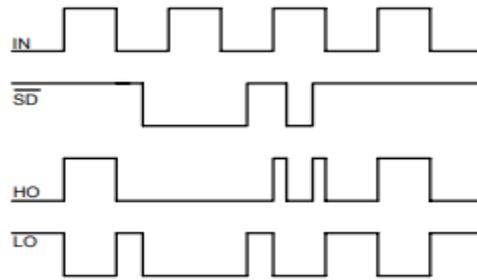
O *driver* escolhido para esta função é o IR2104 o qual excede todos os requisitos necessários para os acionamentos dos MOSFETs. Ele é capaz de suportar tensão de 600 V sob corrente de 130 mA e rápidas velocidades de chaveamento. A típica conexão deste circuito é demonstrada na Figura 17.

Figura 17 – Conexão típica IR2104 (INFINEON TECHNOLOGIES, 2018).



A operação deste dispositivo é feita através do sinal SPWM, os quais alimenta o pino IN. Os pinos HO e LO são acionados conforme os sinais da entrada IN, sendo que o sinal complementar é gerado pelo próprio circuito, além disso, ele fornece um tempo morto de 520 ns para evitar curto entre braços, o pino SD (*shutdown*) permite realizar o desligamento das duas saídas independentemente dos sinais de entrada, e para o caso em questão deve ser mantido aterrado. Na Figura 18 segue a lógica de funcionamento.

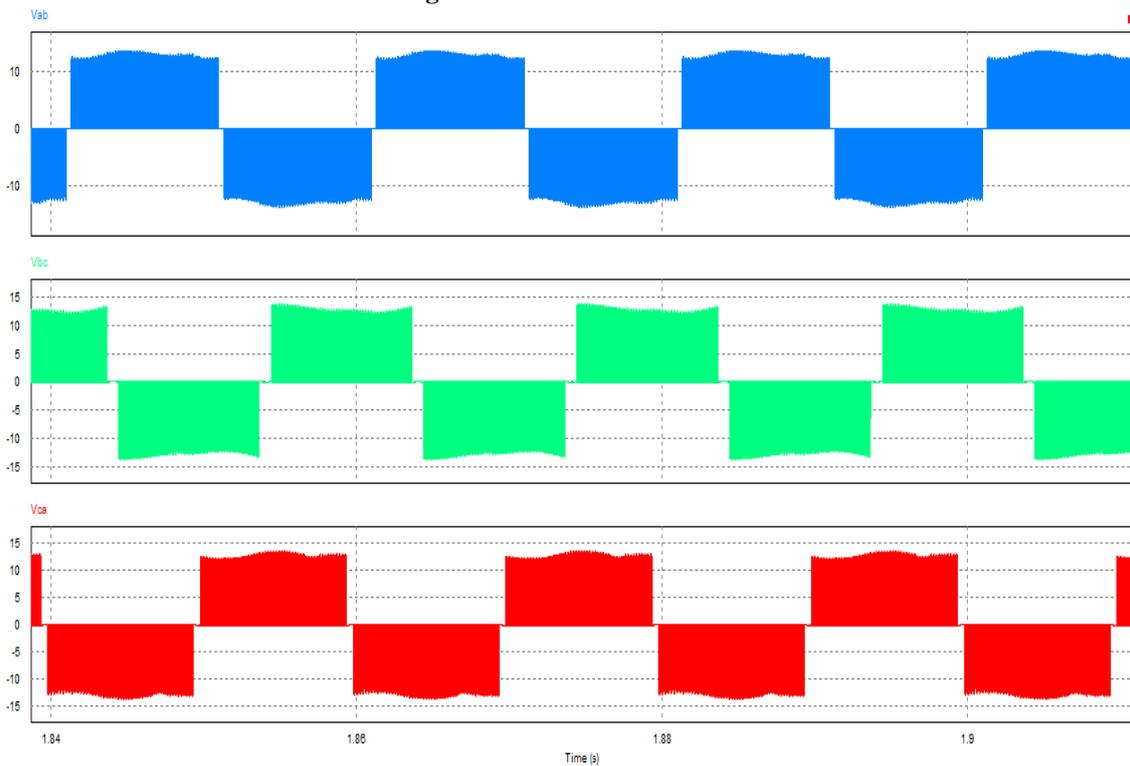
Figura 18 – Saída e entrada (INFINEON TECHNOLOGIES, 2018).



3.5 Filtragem

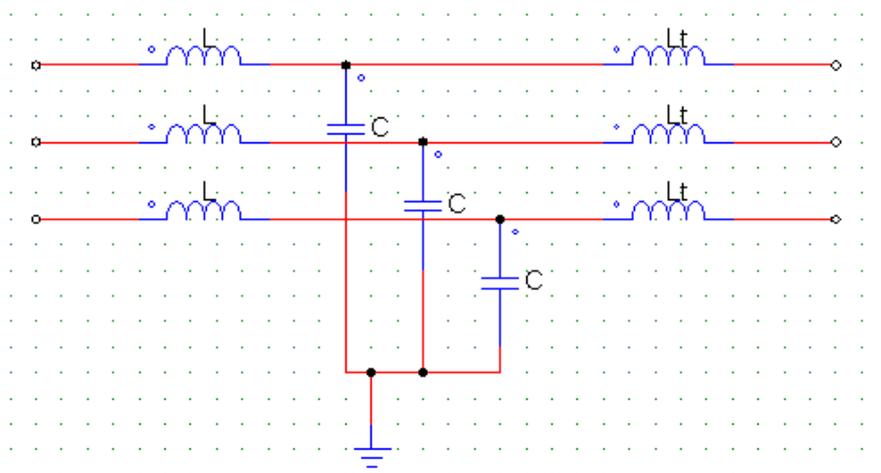
A saída do inversor pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 19 – Saída do inversor.



Percebe-se que o conteúdo da forma de onda de saída possui a frequência fundamental do sinal de referência e o conteúdo do sinal na frequência de chaveamento utilizado, dessa forma faz-se necessária a eliminação das frequências indesejadas. Assim, foi utilizado um filtro LCL, conforme circuito da Figura 20.

Figura 20 – Filtro LCL (RAJU, 2013).

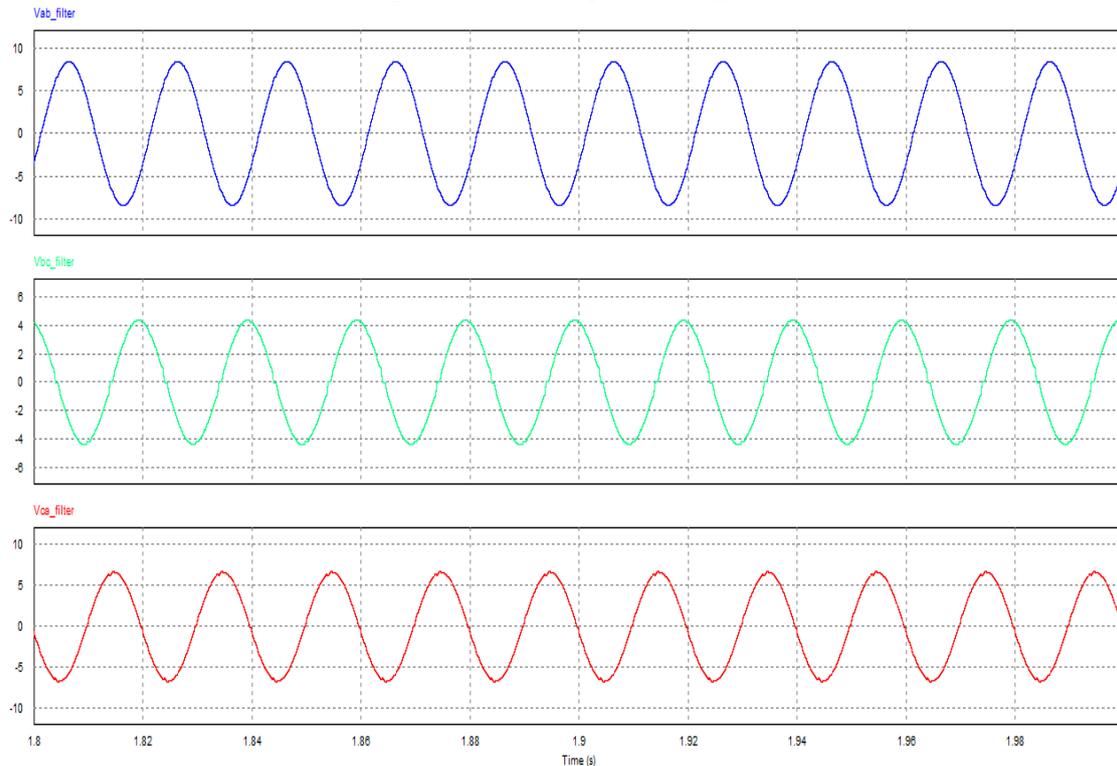


O indutor L_t é a indutância do transformador a ser colocado após o filtro com o objetivo de elevar a tensão de saída para o valor desejado. Para este circuito a frequência de corte pode ser calculada pela Equação 6.

$$f_{3db} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L + L_t}{L * L_t * C}} \quad (6)$$

Na Figura 21, é possível visualizar os sinais de tensão na saída do inversor após a filtragem.

Figura 21 – Saída após a filtragem.



As formas de onda apresentadas são as tensões de fase após a filtragem, onde se percebe que as componentes de alta frequência foram eliminadas.

Após a bateria foi implementado um filtro de corrente para retirar os chaveamentos da corrente fornecida pela bateria, na Figura 10 pode ser visualizada implementação do filtro de entrada através de um capacitor e um indutor.

3.6 Transformador elevador

Como a fonte de alimentação da entrada possui uma tensão de 12 V e é desejada uma tensão de 120 V_{RMS} na saída do inversor, faz-se necessária a utilização de um transformador elevador de tensão. Em aplicações no Sistema Elétrico de Potência o primário dos transformadores é ligado em delta e uma das grandes vantagens disto é o confinamento do harmônico de terceira ordem. No caso do produto em questão não é possível que o primário seja conectado em delta, pois assim, o controle de tensão não fica independente por fase, portanto optou-se por um transformador com o primário e o secundário ambos ligados em estrela. Na Figura 22 é possível visualizar o circuito com o filtro, o transformador e a carga na saída.

A relação de transformação utilizada para o transformador foi de 1:40, pois com a filtragem a componente fundamental foi levemente atenuada, o que resultou em uma tensão de saída menor que os 12 V da fonte.

3.7 Tensão de saída com carga

Para simular o funcionamento do circuito na máxima potência foram colocados resistores de 250 Ω nas saídas para atingir a potência de 50 W. Na Figura 23 é possível visualizar as formas de onda na saída, com diferentes valores, decorrente de ajuste através dos potenciômetros que controlam a amplitude do sinal de referência. Foi plotado também a corrente de entrada do inversor suportada pela bateria.

Figura 22 – Saída do inversor com transformador elevador.

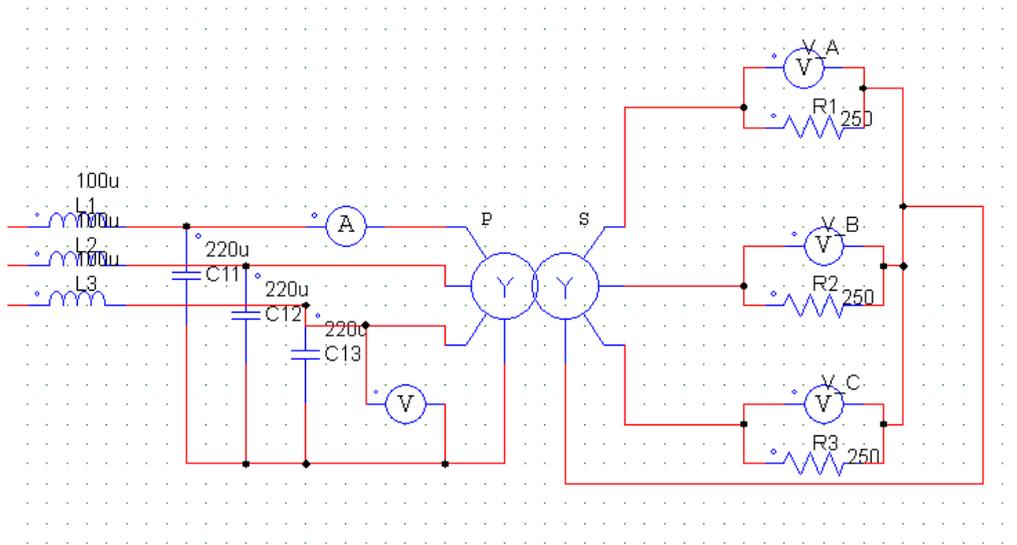
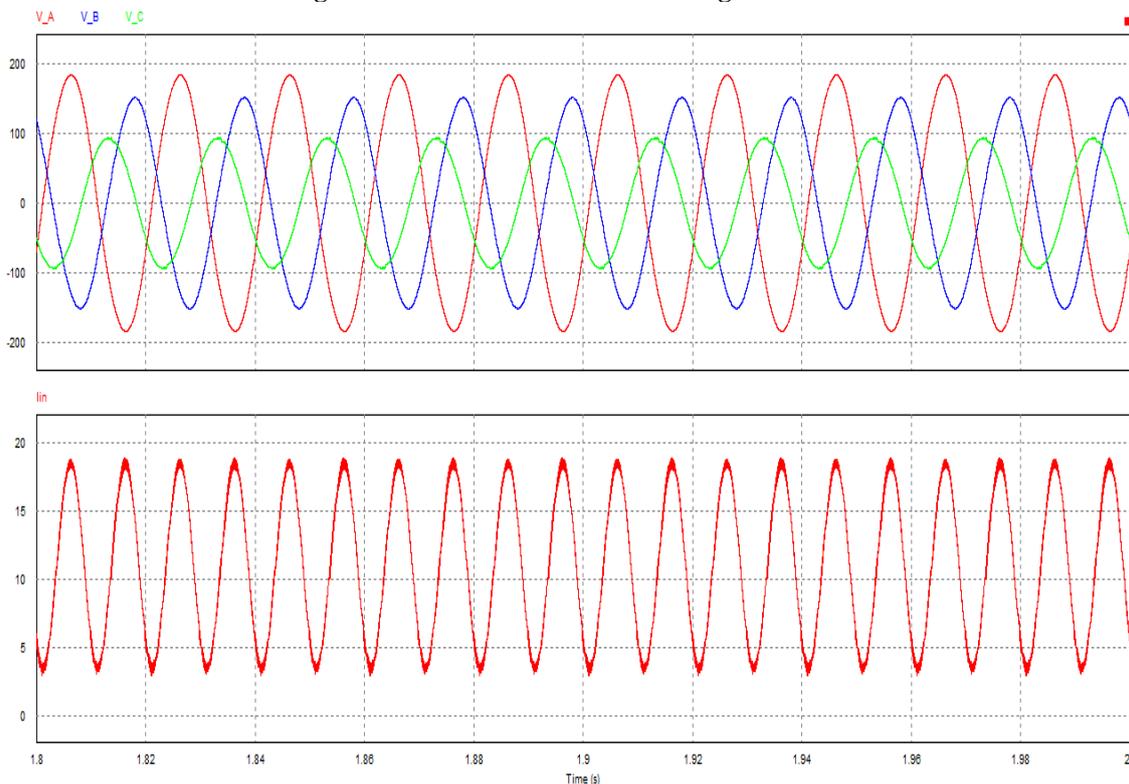


Figura 23 – Saída do inversor sob carga nominal.



3.8 Fonte de Corrente

Conforme a Figura 9, o projeto da fonte de corrente é muito próximo ao da fonte de tensão, no lugar do transformador foram colocados indutores para caracterizar a saída em corrente. Foram adicionados sensores de corrente também em cada saída, pois a corrente é monitorada e caso esteja abaixo ou acima da referência configurada pelo usuário, seu valor é corrigido através de uma malha de controle com um controlador Proporcional Integral.

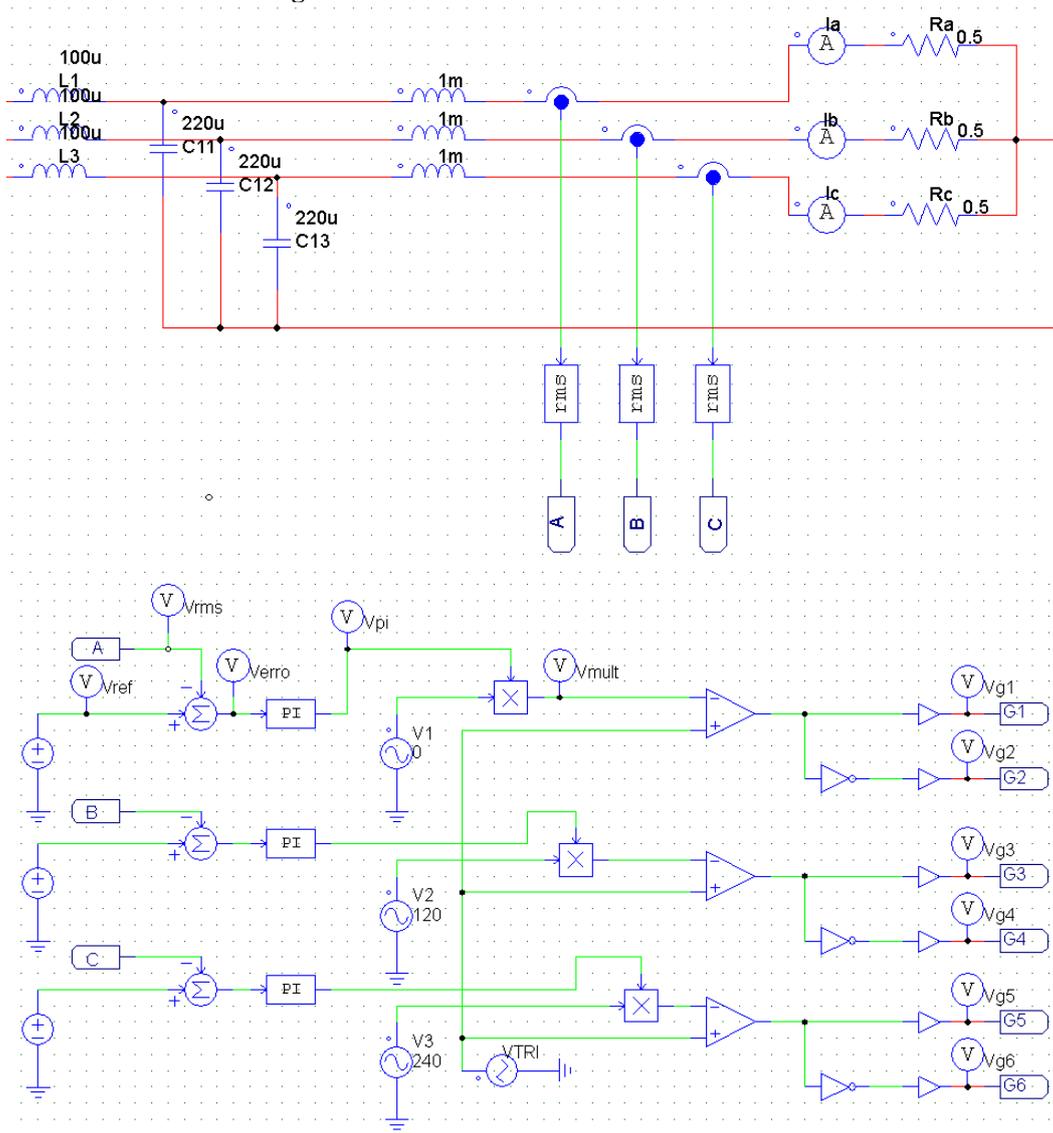
Deve ser observado também que o circuito defasador que vai pegar o sinal de referência deve possuir o resistor R_i e o capacitor C_i ajustáveis para permitir ao usuário o controle da defasagem entre o circuito de tensão e corrente, já que o transformador e os outros componentes ao longo do circuito geram uma defasagem.

3.8.1 Circuito de controle da corrente de saída

Como a corrente varia com a carga, projetou-se um circuito controlador com malha fechada, onde monitora-se a corrente de saída e conforme o erro em comparação com a entrada estabelecida pelo usuário; a

amplitude do sinal de referência é ajustada automaticamente. Na Figura 24, é possível visualizar o circuito da saída da fonte de corrente com seu circuito de controle.

Figura 24 – Fonte de corrente com controlador.



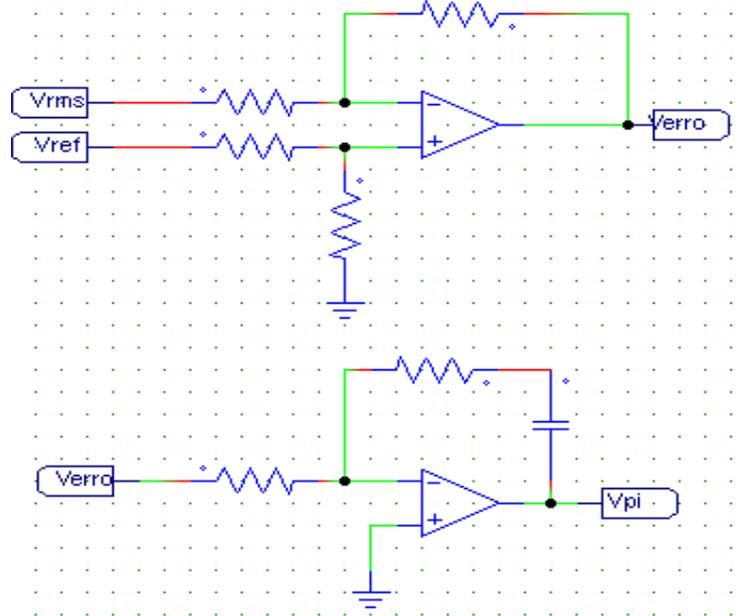
Neste caso optou-se por utilizar componentes ideias para facilitar a simulação e o entendimento do funcionamento.

Logo após a saída do filtro do inversor, foram colocados indutores de 1 mH para caracterizar a saída do inversor em corrente. Os resistores de 0,5 Ω representam a carga. A corrente que passa pela carga é monitorada através de sensores de corrente, (transdutores), os quais transformam a corrente em um valor de tensão. Deste valor de tensão, é extraído seu valor eficaz que por sua vez é comparado com um valor de referência, estabelecido pelo usuário. Dessa comparação surge um valor de tensão de erro o qual passa por um controlador Proporcional Integral (PI) e a sua saída é aplicada a um amplificador controlado por tensão o qual possui em sua entrada o sinal de referência.

Em linhas gerais, a amplitude do sinal de referência é controlada por um sinal proporcional a diferença entre o valor ajustado pelo usuário e o valor medido na carga, dessa forma quanto maior for a diferença maior será a amplitude do sinal de referência.

O controlador PI e o somador de diferença, podem ser implementados por meio de amplificadores operacionais, conforme Figura 25.

Figura 25 – Circuito de controle Proporcional Integral com Amplificador Operacional.

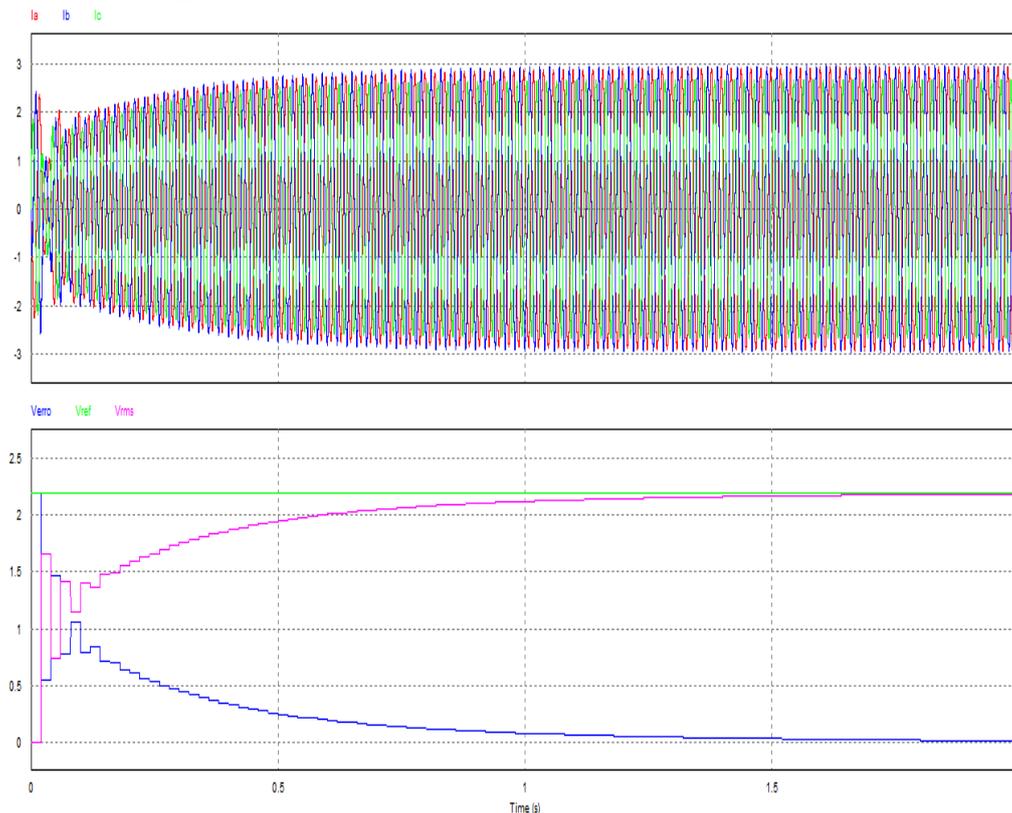


O amplificador controlado por tensão, por ser um circuito não linear e, portanto, de difícil implementação através de amplificadores operacionais, optou-se por utilizar o componente THAT2181, o qual realiza esta multiplicação.

Para monitorar a corrente de saída devem ser utilizados mini transformadores de corrente, facilmente encontrados no mercado, como sugestão o componente DL-CT1005A, pode ser utilizado, em sua saída deve ser colocado um resistor para converter a saída de corrente para tensão.

Dessa saída de tensão, é extraído o seu valor eficaz através de um detector de pico seguido por um amplificador com ganho $1/\sqrt{2}$. Essa premissa adotada é válida porque se assumiu que o sinal de saída é uma onda puramente senoidal. Na Figura 26, é possível observar as correntes de saída e também a atuação do circuito realimentado.

Figura 26 – Saídas da fonte de corrente e circuito realimentado.



Pelo gráfico da Figura 26 é possível identificar as correntes ajustando seus valores para o valor selecionado pelo usuário, no caso $3,2 A_{RMS}$. O sinal em V_{RMS} representa a medição da corrente de saída, esse sinal é diminuído do sinal de referência V_{ref} , o resultado passa então pelo controlador PI e controla a amplitude do sinal de referência que por sua vez controla a amplitude do sinal de saída, a qual fica em um valor fixo quando atinge o valor de referência.

4 PROJETO DE INTERFACE

Para a interface com o usuário sugere-se que sejam adotadas as melhores práticas observadas nas teorias de interface. A proteção externa deve ser em formato de maleta com rodinhas e alça para facilitar o transporte do equipamento devido ao peso resultante principalmente da bateria. Na Figura 27, é possível visualizar o exemplo citado.

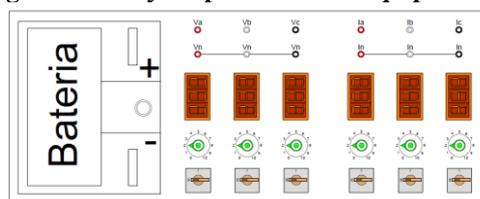
Figura 27 – Sugestão de proteção externa do equipamento.



Esse tipo de maleta protege o equipamento durante o transporte dentro de veículos, contra choques com outros objetos e permite também grau de proteção IP50. É importante ressaltar que a parte externa da maleta deve de material não condutor por questões de segurança.

Se tratando da interface com o usuário para realização do ensaio, elaborou-se um *layout* provisório do produto, conforme demonstrado na Figura 28.

Figura 28 – *Layout* provisório do equipamento.



O *layout* proposto possui a finalidade de ser o mais intuitivo o possível para o usuário. Suas saídas em tensão e corrente possuem entradas para pinos do tipo “banana” e cada fase tem uma cor diferenciada. Foram colocados voltímetros e amperímetros digitais para o usuário ter uma indicação do valor da tensão e correntes aplicadas em cada fase respectivamente. O ajuste de seus valores é feito através de potenciômetros. Foram inseridas chaves ainda para acionar ou não cada saída. Antes de acionar as chaves o usuário deve lembrar que o circuito conectado a fonte de corrente deve permanecer fechado para evitar danos internos ao equipamento.

O equipamento deve estar disposto internamente na mala de tal forma que a bateria fique na parte inferior deslocando o centro de massa para a parte inferior do equipamento, facilitando assim o transporte.

No *layout* provisório não foi inserida uma chave geral de emergência, a qual deve ser do tipo *push-button*, para facilitar a desenergização do equipamento em caso choque elétrico ou outro tipo de risco.

O peso do produto fica em torno de 25 kg, com 12 kg proveniente da bateria, 8 kg do transformador e os outros 5 kg provenientes dos demais componentes. Já sua dimensão ficou em 600 x 300 x 250 mm (CxLxA).

5 CUSTO DO PRODUTO

Todos os componentes eletrônicos utilizados no produto tiveram seus custos cotados com fornecedor o fornecedor internacional Mouser, os preços foram convertidos de US\$ para R\$ com o valor de 3,50. A bateria foi cotada num site de fornecimento nacional e é o único produto cotado em reais. Para o caso do transformador elevador, não foi informado preço, pois é um componente feito sob especificação e seu custo estimado é em torno de R\$ 500,00. No Quadro 1, estão listados os preços dos componentes eletrônicos necessários para a implementação do produto.

Quadro 1 – Estimativa de preços dos componentes eletrônicos.

Planilha de custos dos componentes eletrônicos do produto					
			Quant.	Preço unit.	Total (R\$)
Bateria	12 V	45 Ah	1	R\$ 279,90	279,9
Gerador SPWM - tensão	Gerador de onda senoidal	TLV2474	1	\$ 1,51	5,285
		Resistores	10	\$ 0,14	4,9
		Capacitor	4	\$ 0,77	10,78
	Ajuste Tensão saída	Potênciômetros	3	\$ 4,24	44,52
	Defasador 120	TL082	2	\$ 0,80	5,6
		Resistores	9	\$ 0,14	4,41
		Capacitor	3	\$ 0,77	8,085
	Gerador de onda triangular	LM7171	2	\$ 3,21	22,47
		Resistores	3	\$ 0,14	1,47
		Capacitor	1	\$ 0,77	2,695
	Comparador	LM319	3	\$ 0,57	5,985
	Inversor	Chaves Estáticas	STD130N6F7	12	\$ 1,39
Drivers		IR2104	6	\$ 1,62	34,02
Filtro	Filtro LCL	Capacitor	6	\$ 1,66	34,86
		Indutor	6	\$ 2,97	62,37
Transformador	Transformador elevador		1		
Gerador SPWM - corrente	Ajuste Tensão saída	Potênciômetros	3	\$ 4,24	44,52
	Defasador 120	TL082	2	\$ 0,80	5,6
		Resistores	12	\$ 0,14	5,88
		Capacitor	4	\$ 0,77	10,78
	Gerador de onda triangular	LM7171	2	\$ 3,21	22,47
		Resistores	3	\$ 0,14	1,47
		Capacitor	1	\$ 0,77	2,695
	Comparador	LM319	3	\$ 0,57	5,985
	Controlador PI	TL082	2	\$ 0,80	5,6
		Resistores	6	\$ 0,14	2,94
		Capacitor	3	\$ 0,77	8,085
	Somador diferença	TL082	2	\$ 0,80	5,6
Resistores		12	\$ 0,14	5,88	
Amp. controlado por tensão	THAT 2181	3	\$ 5,05	53,025	
Conversor RMS	Detector de pico	1N4007	3	\$ 0,48	5,04
		Capacitor	3	\$ 0,77	8,085
	Atenuador 1/R2	TL082	2	\$ 0,80	5,6
		Resistores	6	\$ 0,14	2,94
Indutor	Indutor saída corrente	157D	3	\$ 16,78	176,19
				Total	R\$ 964,12

Além dos componentes listados acima, tem-se mais a estimativa dos seguintes custos:

- Placa de Circuito Impresso: R\$ 300,00;
- Caixa metálica: R\$ 400,00;
- Acessórios diversos, como suporte para pino banana, cabos para conexões, botões, parafusos :R\$ 200,00;

- Amperímetros: R\$ 100,00;
- Voltímetros: R\$ 100,00.

Por fim, o último item seria a mala externa de alumínio com rodas, conforme Figura 27, com custo estimado por pesquisa de R\$ 400,00, para transporte e proteção do equipamento. Somando todos os itens chega-se a um custo de materiais de R\$ 2.864,12.

É importante lembrar que os custos dos componentes eletrônicos foram tomados sob preços unitários, um compra em quantidade, por exemplo, para montagem de 20 unidades há redução no custo.

Outro item que não está listado é o carregador de bateria que seria necessário para carregá-la antes de utilizar o produto. O preço deste foi cotado (para o modelo Cbv950 12-90 Ah – Vonder) em alguns sites da Internet e é facilmente encontrado, o seu valor médio ficou em R\$ 360,00.

Para os custos de serviço, ou seja, montagem e testes de funcionamento do equipamento, estima-se que um técnico com formação em eletrônica, levaria 40 horas para uma montagem de um protótipo conforme o projeto. Pelo site www.salariobr.com.br é possível verificar que o salário médio de um profissional com essa formação é R\$ 2.323,66, portanto considerando os encargos e impostos deste profissional chega-se a um custo de R\$ 4.647,32, utilizando o divisor 200 para o cálculo de R\$/hora, chega-se ao valor de R\$ 23,24/hora, no caso do produto proposto o custo para produção seria R\$ 929,46.

Portanto, um valor de R\$ 4.500,00 é uma boa estimativa do custo total do produto já incluindo gastos com energia elétrica, água, aluguel e outras despesas.

O preço de lançamento do equipamento no mercado no valor de R\$ 10.000,00 permite obter um lucro relativamente elevado e ainda teria a vantagem de ser relativamente mais barato que os equipamentos dos concorrentes.

6 CONCLUSÃO

Projetar um produto eletrônico com o objetivo de comercialização a nível nacional e talvez mundial é uma tarefa que depende de várias áreas de conhecimento muitas além de engenharia, como o design de interface, por exemplo, que quando bem projetado vende o produto facilmente, além de proporcionar vantagens como facilidade de uso e segurança.

O custo final de um produto vai muito além de seus componentes eletrônicos e demais itens que o compõem, e tampouco acabam quando comercializado, pois, uma vez que esteja na mão do consumidor final, o fabricante é responsável por fornecer suporte técnico e dar garantia. Dessa forma o custo de manter esse canal com o consumidor deve ser levado em conta para levantar o custo do produto.

O produto proposto foi todo projetado com circuitos analógicos por facilidade de simulação e entendimento, mas para trabalhos futuros sugere-se a substituição da geração dos sinais SPWM de circuitos analógicos para circuitos microcontrolados. Outro ganho que se teria em produzir o produto utilizando circuitos digitais seria a possibilidade de incluir novas funções como a injeção de harmônicos.

Por fim, constatou-se que pode ser produzido e comercializado um produto com mais funcionalidades e inovações, como no caso de alimentação por bateria, do que os produtos correlatos existentes no mercado, por um preço menor ainda, porém mantendo uma margem de lucro elevada. Sugere-se ainda que como modelo de negócio, além da venda do equipamento seja vendida a execução do serviço para o cliente quando desejado e sejam oferecidos cursos sobre o equipamento, pois assim a fonte de receita não seria exclusivamente dependente da venda de equipamentos.

REFERÊNCIAS

DOUCET, J. *et al.* **DC/AC Pure Sine Wave Inverter**. MQP Terms A–B–C 2006-2007.

INFINEON TECHNOLOGIES. **Folha de dados do componente IR2110**. Disponível em: <<https://www.infineon.com/>>. Acesso em: 27. abr. 2018.

MAJHI, B. **Analysis of Single-Phase SPWM Inverter**. Department of Electrical Engineering – National Institute of Technology, Rourkela. 2012.

MTE **Meter Test Equipment – Catálogo do fabricante**. Edição 10. 2010.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede – Módulo 12**. Vigência 01/01/2017, 2017.

RAJU, N.I. *et al.* Sinusoidal PWM Signal Generation Technique for Three Phase Voltage Source Inverter with Analog Circuit & Simulation of PWM Inverter for Standalone Load & Micro-grid. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 3, n. 3, 2013.