

ANÁLISE DE TÉCNICAS DE CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Douglas Gabriel Breda¹
Anderson Soares André²

Resumo

Este trabalho aborda as técnicas de correção do fator de potência de cargas lineares e não lineares, explorando tanto abordagens ativas quanto passivas. O objetivo central da pesquisa foi avaliar e comparar essas técnicas, com ênfase na implementação de protótipos de laboratório para validar seu funcionamento e sua eficácia.

No contexto das cargas lineares, a técnica passiva de correção do fator de potência, baseada no uso de capacitores, foi examinada em relação à melhoria da eficiência energética. Para cargas não lineares, estratégias ativas e passivas, como o uso do pré-regulador *Boost* e do filtro *Valley-Fill*, foram investigadas para otimizar o fator de potência e reduzir as distorções harmônicas.

Os resultados da pesquisa revelaram que a escolha da técnica de correção do fator de potência deve ser baseada nas características específicas do sistema e das cargas envolvidas. Além disso, a implementação de protótipos permitiu comprovar o funcionamento das técnicas estudadas em condições práticas.

Este estudo foi de grande relevância, pois demonstra a aplicação direta de conhecimentos teóricos em situações reais. Além disso, destaca a importância da correção do fator de potência, que afeta a eficiência energética de sistemas elétricos, pois reduz perdas de energia. Os resultados obtidos incentivam a aplicação prática dos princípios adquiridos ao longo do curso e contribuem para a otimização de sistemas elétricos em diversos setores, como indústrias, empresas e residências.

Palavras-chave: Fator de potência. Correção de potência. Cargas lineares e não lineares.

Abstract

This work addresses power factor correction techniques for linear and non-linear loads, exploring both active and passive approaches. The central objective of the research was to evaluate and compare these techniques, with an emphasis on the implementation of laboratory prototypes to validate their functioning and effectiveness.

¹ Graduando de Engenharia Elétrica da Unisul. E-mail: douglas.gbreda@gmail.com

² Professor de Engenharia Elétrica da Unisul. E-mail: anderson.andre@unisul.br

In the context of linear loads, the passive power factor correction technique, based on the use of capacitors, has been examined in relation to improving energy efficiency. For non-linear loads, active and passive strategies, such as the use of the Boost pre-regulator and the Valley-Fill filter, have been investigated to optimize the power factor and reduce harmonic distortions. The research results revealed that the choice of power factor correction technique should be based on the specific characteristics of the system and the loads involved. Furthermore, the implementation of prototypes made it possible to prove the functioning of the techniques studied in practical conditions.

This study was of great relevance, as it demonstrates the direct application of theoretical knowledge in real situations. Furthermore, it highlights the importance of power factor correction, which affects the energy efficiency of electrical systems, as it reduces energy losses. The results obtained encourage the practical application of the principles acquired throughout the course and contribute to the optimization of electrical systems in various sectors, such as industries, companies and homes.

Keywords: Power factor. Power correction. Linear and non-linear loads.

1. Introdução

O controle do fator de potência sempre foi um tema relevante porque pode representar desperdício de energia e, eventualmente, levar a sobrecarga do sistema elétrico. Por essa razão, o estudo das técnicas de correção e a melhora na eficiência dos equipamentos é primordial nos cursos de engenharia elétrica. Com os avanços tecnológicos registrados nos últimos anos nos sistemas de potência e na área de eletrônica, diversas inovações surgiram na forma de novos produtos ou soluções, que trouxeram melhorias para os consumidores e, ao mesmo tempo, desafios para o setor elétrico.

Vários exemplos podem ser citados como fontes cada vez menores melhorando a questão da portabilidade de dispositivos como as fontes carregadoras de celular. Computadores mais avançados e rápidos demandando fontes chaveadas cada vez mais potentes. Inversores de frequência que possibilitaram o controle preciso de velocidade de motores AC que até então era um desafio. Diversos são os exemplos que poderíamos citar e que se enquadrariam na questão levantada neste trabalho. Como alimentar todos estes equipamentos de forma adequada sem prejudicar o sistema elétrico?

A maioria dos equipamentos ligados hoje no sistema elétrico tem perfil de consumo elétrico de caráter linear indutivo ou não linear tendo este último um aumento expressivo nos anos. Sabemos que equipamentos com estes tipos de cargas geram reativos e harmônicos em alguns casos, que são devolvidos a rede elétrica podendo causar diversos tipos de

problemas. Deste modo é importante buscarmos uma forma de corrigir tanto quanto possível a geração de reativos e harmônicos de modo a se mitigar estes efeitos negativos como por exemplo desperdício de energia elétrica, aumento de custos de eletricidade e, em casos mais severos, na sobrecarga dos componentes do sistema elétricos. A correção do fator de potência destas cargas indutivas e não lineares pode vir a ser um desafio principalmente deste último tipo o qual exige estudo de técnicas não tanto triviais para sua correção principalmente se for gerador de harmônicos.

Nesse momento cabe definir que o fator de potência (FP) é a razão entre a potência média (W) e a potência aparente identificada pela letra S (VA) que, por sua vez, é a soma vetorial da potência ativa (W) e da reativa (VAR). A potência ativa é considerada a parte útil da energia e que realiza trabalho através da produção de luz, calor, movimento etc. Já a potência reativa é aquela que não realiza trabalho, conforme o disposto por Markus (2004, cap 15).

Segundo Kassick (2008, pg. 16) a potência reativa pode ser classificada em dois tipos, potência reativa de deslocamento e potência reativa de distorção ou harmônico. Em geral, a potência reativa de deslocamento surge a partir de cargas lineares e de distorção de cargas não lineares.

O avanço tecnológico trouxe novos desafios para o sistema elétrico, como por exemplo, a geração cada vez maior de harmônicos e baixo fator de potência (FP). Equipamentos com carga de natureza não-lineares, como conversores estáticos chaveados, inversores de frequência, unidades ininterruptas de energia (UPS), computadores, lâmpadas elétricas produzem grande conteúdo harmônicos, conseqüentemente, baixando o fator de potência.

O baixo fator de potência registrado em algumas instalações elétricas e o eventual conteúdo harmônico gerado por carga não-lineares podem prejudicar o funcionamento de equipamento elétricos e eletrônicos, além de causar outros transtornos como atuação indevida de proteções, danos aos capacitores de bancos de capacitores, sobreaquecimento de transformadores, sobreaquecimento de neutro de instalações, elevada tensão entre neutro e terra.

Kassick (2008, pg. 31) descreve os problemas que podem ser causados em alguns tipos de componentes elétricos e eletrônicos por harmônicos, como segue abaixo:

- a) Capacitores em geral: aumento de temperatura, aumento de perdas, diminuição da vida útil. Sobretensões e ressonância podem causar a ruptura do dielétrico;
- b) Motores: aumento da temperatura, diminuição da vida útil, diminuição do rendimento, aumento de ruídos, danificação de mancais devido a batimentos de torque;
- c) Fusíveis/disjuntores/chaves seccionadoras: atuação indevida;

- d) Transformadores: aumento da temperatura, aumento das perdas no ferro e no cobre, diminuição da vida útil;
- e) Medidores: erros de medição;
- f) Acionamentos/UPS: Anomalia de operação, usualmente causado por múltiplas passagens por zero das tensões e correntes, falhas nos circuitos de comutação.

As instalações elétricas industriais no Brasil costumam apresentar um FP razoavelmente controlado, entretanto em aplicações domésticas e comerciais, muitas vezes nos deparamos com equipamentos que introduzem grande quantidade de conteúdo harmônico, como por exemplo, conversores estáticos chaveados, popularmente conhecidas por fontes chaveadas presentes na maioria dos dispositivos eletrônicos hoje, chuveiros eletrônicos, inversores de frequência comumente usados para controle de motores, lâmpadas incandescentes e até mesmo algumas indústrias siderúrgicas com equipamentos à arco voltaico. A tendência é aumentar cada vez mais no futuro, levando ao desafio inevitável de lidar com tais problemas com maior atenção.

Assim sendo, o problema abordado neste artigo consiste no estudo e aplicação de técnicas para a correção do baixo fator de potência em instalações elétricas não industriais, tipicamente encontradas em residências e pequenos comércios.

2. Fator de Potência

De acordo com diversos autores, o fator de potência (FP) é definido como a relação entre a potência média (medida em W) e a potência aparente (medida em VA). A potência aparente é composta pela soma vetorial da potência ativa (W) e da potência reativa (VAR). Enquanto a potência ativa é a porção da energia que realiza trabalho, como a produção de luz, calor e movimento, a potência reativa não desempenha trabalho efetivo (Smith, 2010; Jones, 2015).

Além disso, Brown (2012), Kassick (2008) e White (2014) categorizam a potência reativa em dois tipos distintos: a potência reativa de deslocamento, que é predominantemente gerada por cargas lineares como motores e transformadores; e a potência reativa de distorção ou harmônica, originada pela presença de cargas não lineares no sistema elétrico, como retificadores e fontes chaveadas.

Assim, a partir desse ponto, discutiremos as técnicas mais comumente utilizadas na correção do fator de potência de cargas lineares e não lineares.

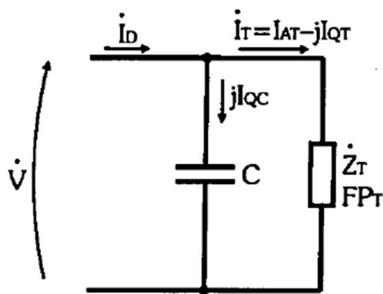
2.1 Correção do fator de potência cargas lineares indutivas

O tipo mais frequente de carga sobretudo em indústrias é a indutiva que resulta de equipamentos que possuem enrolamentos como por exemplo transformadores e motores. Neste tipo de carga tipicamente a corrente está atrasada com relação a tensão.

Na representação proposta por Markus (2004, pg.178) temos que a carga indutiva equivalente $\dot{Z}_T = Z_T \angle \varphi_T$, com fator de potência total FP_T . Se a carga indutiva atrasa a corrente com relação a tensão e como sabemos, a carga capacitiva adianta a corrente com relação a tensão então quando se acrescenta um capacitor em paralelo com uma carga indutiva um compensa o outro e quando corretamente calculado, aumentando o fator de potência.

Esta técnica é simples e eficaz para estes tipos de cargas e é a forma mais utilizada. Na Figura 1 abaixo é possível ver o acréscimo de um capacitor em paralelo com a carga.

Figura 1 - Capacitor em paralelo com a carga indutiva industrial



Fonte: Markus (2004, p. 178).

Para o cálculo do valor deste capacitor de forma a se corrigir o fator de potência da instalação para o valor desejado ($FP_D = \cos \varphi_D$) é necessário que se saiba o atual fator de potência da instalação ($FP_T = \cos \varphi_T$).

Utilizando a análise do cálculo deste capacitor disposto por Markus (2004, pg.179), obtemos a equação abaixo onde o resultado é o valor da capacitância C de modo a corrigir o fator de potência para o valor desejado FP_D .

$$C = \frac{P_T}{\omega V^2} \cdot (\tan \varphi_T - \tan \varphi_D)$$

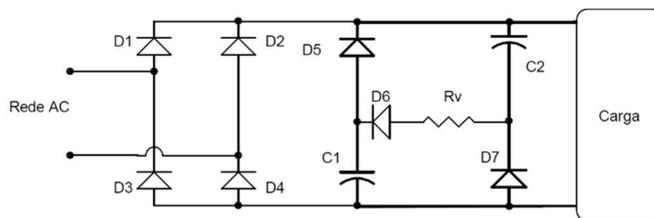
2.2 Correção do fator de potência cargas não lineares usando filtro *Valley-Fill*

Para o caso das cargas não lineares, a correção do fator de potência não pode ser feita apenas colocando capacitor em paralelo com a carga já que o perfil de consumo destas cargas não tem característica indutiva pura. Esta ação acarretaria uma distorção ainda maior gerando ainda mais harmônicos em consequência.

Um dos circuitos de carga não linear e que é amplamente utilizado nos mais diversos equipamentos em seus estágios de entrada é a ponte retificadora de tensão que converte a tensão de corrente alternada CA da rede para corrente contínua CC. Estes circuitos em sua maioria são potenciais fontes de baixo fator de potência e geradores de harmônicos. Para minimização deste problema pode se usar um filtro passivo denominado “*Valley-Fill*”.

Louro (2017, pg. 34) destaca que este filtro é simples e barato já que com poucos componentes é possível ter uma solução de correção do fator de potência para equipamentos de baixo consumo. Fator de potência este sendo possível alcançar até 0,95 a custos de reduzir a eficiência do equipamento. Ainda segundo Louro (2017, pg. 34) outra desvantagem é o alto *ripple* da tensão de saída.

Figura 2 - Filtro *Valley-Fill*



Fonte: André (2010, pg. 1)

Abaixo é descrita as etapas de funcionamento do filtro:

- ➔ Etapa um: Considerando o sistema já em regime, quando a tensão de entrada da rede cai abaixo da tensão dos capacitores C1 e C2, os diodos D5 e D7 conduzem conectando os capacitores em paralelo e alimentando a carga.
- ➔ Etapa dois: quando a tensão da rede supera a tensão na carga dos capacitores os diodos D1 e D4 conduzem enquanto os diodos D5 e D7 bloqueiam.
- ➔ Etapa três: A tensão da entrada da rede continua a aumentar e quando esta supera o valor da soma dos dois capacitores o diodo D6 entra em condução permitindo a carga dos capacitores conectados em serie.
- ➔ Etapa quatro: Na etapa quatro o diodo D6 bloqueia quando os capacitores terminam de carregar e a carga segue sendo alimentada pelos diodos D1 e D4.
- ➔ Etapa cinco: Quando a tensão da rede cai abaixo do valor da tensão dos capacitores, os diodos D5 e D7 entram em condução enquanto os diodos D1 e D4 bloqueiam, reiniciando assim o ciclo.

2.3 Correção do fator de potência cargas não lineares usando conversor *Boost*

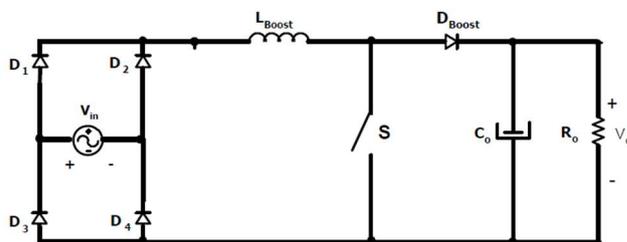
O uso de filtros ativos, também conhecidos como pré-reguladores, podem ser bastante uteis para este tipo de correção. Eles utilizam componentes eletrônicos ligados de modo a garantir que a tensão e corrente consumida da rede estejam em fase e com formato próximo

de uma senoide, o que garante um alto fator de potência e também provém uma regulação da tensão de saída. Daí seu nome popular PFC ativo, do inglês *Power Factor Correction* que significa Correção de Fator de Potência ativo.

Louro (2017, pg. 41) cita algumas topologias de conversores que podem ser utilizadas como conversores PFC, entre eles estão o *buck*, *boost*, *buck-boost*, *flyback*. Sua principal função em geral, quando o objetivo é a correção do fator de potência, é a modelagem da forma de onda da corrente consumida da rede, mesmo para cargas não lineares.

Entre estes o mais utilizado pela indústria está o tipo *boost* devido a características da topologia. BARBI (2015, pg. 3) cita que com técnicas de controle adequadas, a topologia é capaz de emular uma carga resistiva elevando o fator de potência próximo do unitário.

Figura 3 - Topologia retificador *boost*



Fonte: BARBI (2015, pg. 4)

Percebe-se que o circuito acima é muito semelhante ao da topologia de conversão CC-CC boost, porém aqui aplicado entre a retificação e o filtro capacitivo com o propósito de correção do fator de potência de um circuito retificador de onda completa tipicamente carga não linear. Por isso denominado como retificador boost. Abaixo esta é descrito as etapas de operação do conversor.

Primeira etapa (t_0, t_c) – Magnetização:

- A chave S está fechada, ou seja, conduzindo o que por consequência fecha o circuito entre a fonte, diodos D1, D2 e Indutor L_{boost} ;
- O indutor L_{boost} está armazenando energia vinda da fonte $V_{in}(t)$;
- A corrente no indutor aumenta de acordo com a taxa de variação $\frac{V_{in}(t)}{L_{boost}}$;
- A corrente circulando da chave S é a mesma do indutor L_{boost} ;
- O diodo identificado por D_{boost} está bloqueado já que esta reversamente polarizado pela tensão de V_o que está sobre o resistor R_o e C_o ;
- O capacitor C_o está fornecendo energia para a carga representada por R_o .

A primeira etapa se encerra quando a chave S é aberta, ou seja, para de conduzir.

Segunda etapa (t_c, t_a) – Desmagnetização:

- Com o comando para a chave S abrir o diodo D_{boost} fica diretamente polarizado;

- b) A energia armazenada no indutor L_{boost} na primeira etapa é agora fornecida ao capacitor C_o e a carga R_o ;
- c) A tensão sobre a chave S é a mesma que V_o ;
- d) A corrente no indutor L_{boost} diminui de acordo com a taxa de variação $\frac{V_o - V_{in}(t)}{L_{boost}}$;
- e) A corrente sobre o diodo D_{boost} é a mesma que a do L_{boost} .

A segunda etapa se encerra quando a chave S é comandada a fechar novamente reiniciando o processo.

Louro (2017, pg. 46) destaca que para o conversor boost possa se tornar um PFC ativo é necessário que se feche a malha de realimentação e que se use a técnica de controle adequada de forma a garantir que a tensão de saída não varie e que a corrente consumida da rede mantenha uma forma sinusoidal e em fase com a tensão.

3. Metodologia

Este trabalho adotou uma abordagem de pesquisa experimental para investigar e avaliar diferentes técnicas de correção de fator de potência, analisando os resultados da correção de carga linear com capacitor, da correção de carga não linear com filtro *Valley-Fill* e da correção de carga não linear através de um conversor *Boost*, além de passar por protótipos testados na prática para comprovação da teoria estudada.

Além disso, o trabalho teve como tipo de pesquisa quantitativa pois busca uma relação com princípios matemáticos da teoria de fator de potência e sua correção. Também pode ser considerado do tipo bibliográfico, já que usou se materiais externos como fonte de pesquisa.

4. Resultados e Discussão

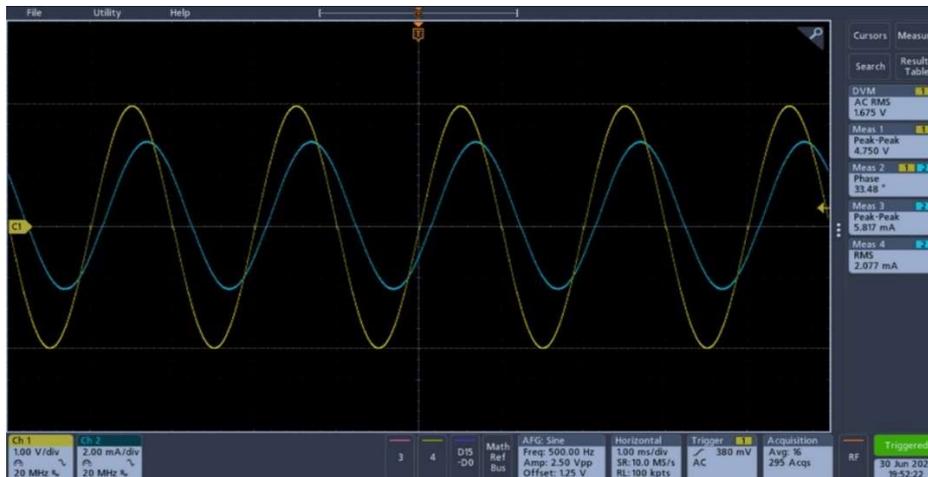
Abaixo é descrito os materiais e métodos usados na montagem dos protótipos bem como as medições e resultados obtidos com objetivo de comprovar na pratica a correção para cada tipo de circuito estudado.

4.1 Linear Indutivo

Para a comprovação e correção do circuito linear indutivo foi utilizado de um pequeno transformador rebaixador originalmente transformando de 220V para 15+15V, desmontado e retirado totalmente suas aletas ferromagnéticas de modo que se torna-se um indutor puro com núcleo de ar. Foi feito medições do indutor com um osciloscópio utilizando-se de ponteiros de tensão e corrente do modo a conseguir capturar ambas e sua respectiva defasagem. Como

fonte foi utilizado o gerador de função do próprio osciloscópio, saída senoidal com frequência de 500Hz. Na Figura 4 abaixo é mostrado a mediação sem o capacitor de correção.

Figura 4 - Medição circuito linear indutivo sem correção.



Fonte: Autor (2023)

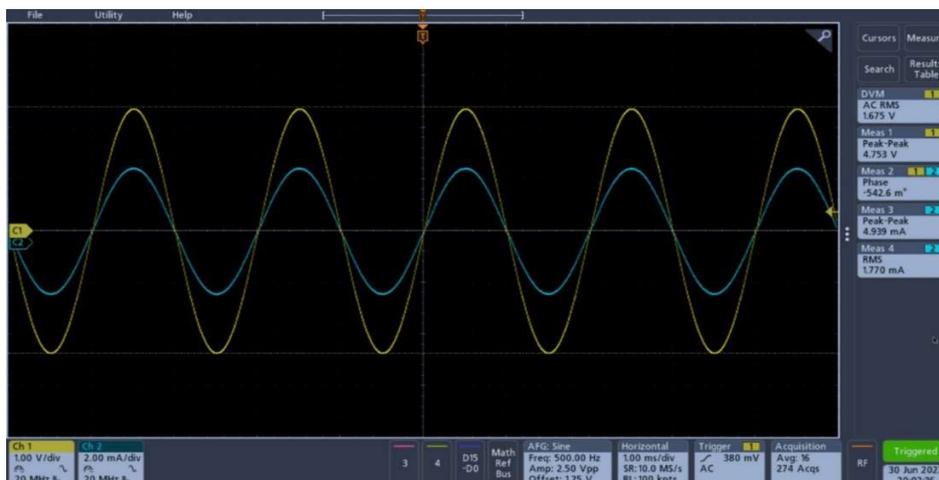
Podemos perceber claramente a defasagem entre a tensão (amarelo) e a corrente (azul), com o valor de aproximadamente 33,5° graus e, portanto, potência reativa de deslocamento.

Usando como base o valor de tensão e corrente RMS bem como a defasagem em graus foi calculado o capacitor necessário para correção da defasagem observada utilizando-se da fórmula já estudada na seção 2.1, segue abaixo.

$$C = \frac{(1,675 * 0,002077)}{2 * \pi * 500 * 1,675^2} \cdot (\tan(33,5^\circ) - \tan(0^\circ)) = 261,249 \times 10^{-9} \text{ ou } 261 \text{ nF.}$$

Foi adotado o valor de 220 nF devido a disponibilidade de valores e refeito a medição:

Figura 5 – Medição circuito linear indutivo com correção.



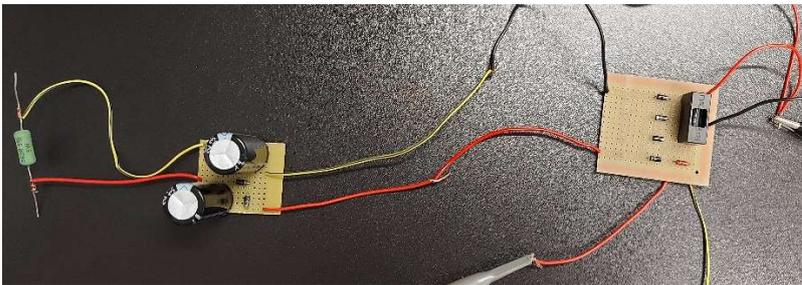
Fonte: Autor (2023)

Agora pela medição do osciloscópio vemos que a defasagem entre tensão e corrente está em aproximadamente $0,5^\circ$ negativos o que nos dá praticamente um fator de potência unitário.

4.2 Não Linear Utilizando Filtro Valley-Fill

No caso dos circuitos não lineares, inicialmente foi montado um retificador de onda completa com filtro capacitivo, o que como visto comporta-se como carga não-linear. O *setup* do teste pode ser visto na Figura 6 abaixo.

Figura 6 – Retificador e filtro Valley-Fill.

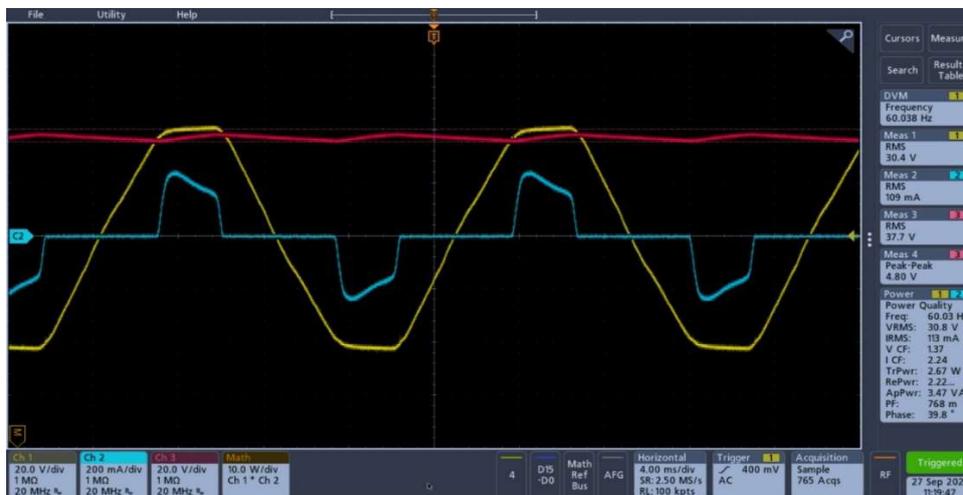


Fonte: Autor (2023)

Como observado o retificador foi montado com diodos discretos e o filtro separado do mesmo, usando uma carga resistiva. Por segurança foi utilizado uma fonte de tensão AC de 30V.

Inicialmente foi medido apenas o retificador com o objetivo de verificar o perfil de corrente e a distorção estudada, a medição feita no osciloscópio pode ser vista na Figura 7 abaixo.

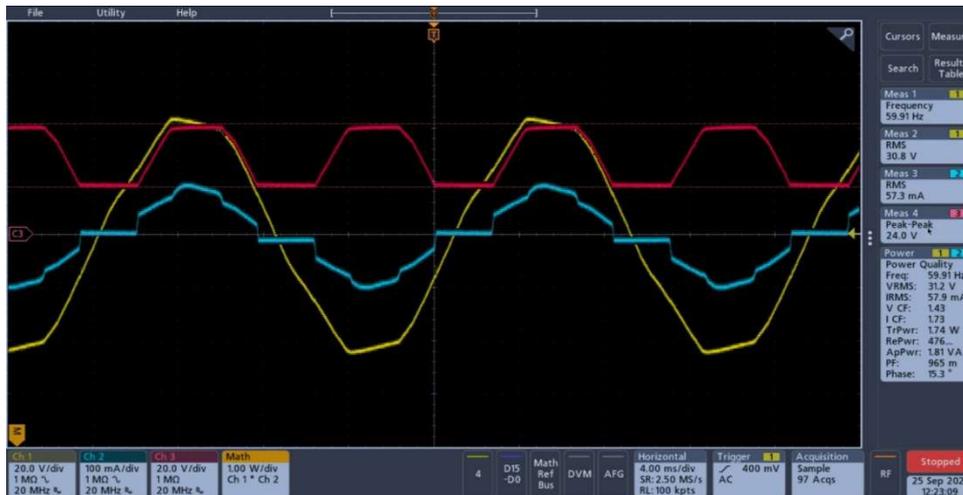
Figura 7 – Medição osciloscópio retificador.



Fonte: Autor (2023)

Podemos observar o pico rápido da corrente em azul na entrada da ponte retificadora causador dos problemas estudados e abaixando o fator de potência, o que de fato pode ser notado no cálculo do osciloscópio onde é mostrado um fator de potência de 0,7. Em seguida foi incluído em serie o filtro *Valley-Fill*, a medição pode ser vista na Figura 8 abaixo. abaixo.

Figura 8 – Medição filtro *Valley-Fill*.



Fonte: Autor (2023)

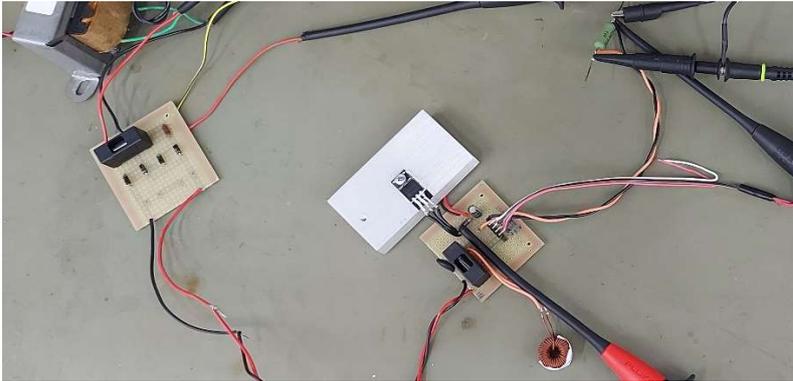
No sinal em azul podemos perceber claramente a forma de onda corrente ficou significativamente mais parecida com uma senoide, melhorando o fator de potência que agora é calculado em mais de 0,95 embora com um alto *ripple* na saída o que é intrínseco ao filtro.

4.3 Não Linear Utilizando Conversor *Boost*

Embora com o filtro acima o osciloscópio tenha medido um fator de potência alto, analisando a forma de onda da corrente fica claro que ainda não é uma senoide perfeita, possuindo muitas distorções o que com certeza não é o ideal. Tendo em mente aproximar a forma de onda da corrente mais próxima de uma senoide foi implementado um conversor *boost* com objetivo de correção do fator de potência usando a topologia estudada no tópico 2.3 deste trabalho.

Abaixo é mostrado *setup* do teste, utilizando o mesmo retificador, porém acrescentando o modulo do conversor *boost*.

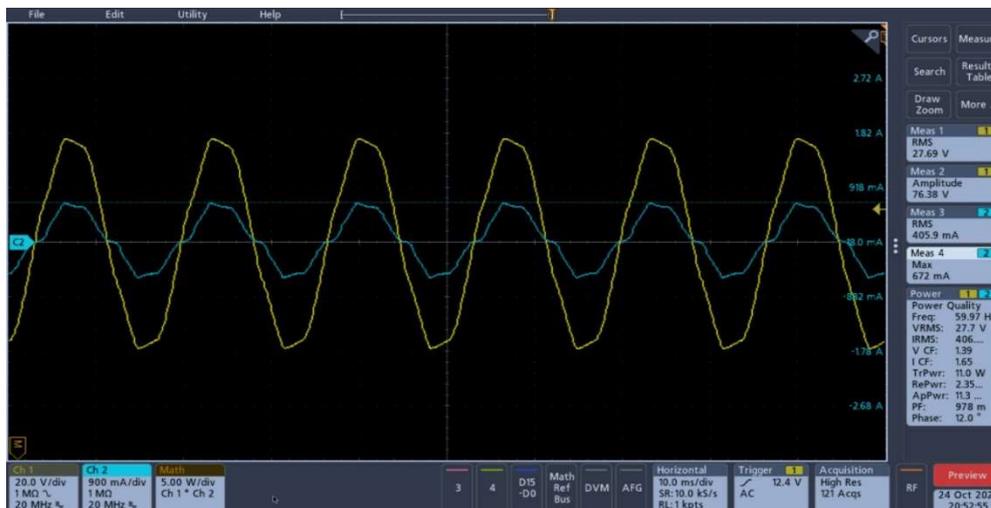
Figura 9 – Retificador e conversor *Boost*.



Fonte: Autor (2023)

Abaixo a medição feita no osciloscópio.

Figura 10 – Medição conversor *Boost*



Fonte: Autor (2023)

Como o conversor *Boost* foi implementado no modo de condução descontinua a corrente de entrada do retificador acompanha o formato da tensão AC de entrada, porém “envelopada”. Devido a isso na medição acima foi utilizado um filtro com o objetivo de mostrar a forma de onda da corrente de entrada, uma senoide praticamente perfeita acompanhando a tensão AC de entrada, após o acréscimo de um filtro real no circuito com o mesmo objetivo. Podemos verificar a medição do osciloscópio com o cálculo do fator de potência, atingindo praticamente valor unitário, 0.98.

5. Considerações Finais

Após estudar a teoria e aplicá-la na prática, observando os resultados obtidos percebemos que existem maneiras relativamente fáceis de se corrigir o fator de potência de qualquer tipo de carga conectada ao sistema.

Vimos que para o tipo de carga indutivo ou mesmo capacitivo a solução é bastante simples e já largamente utilizada, acrescentando capacitores ou indutores respectivamente a estas cargas. Com isso remove-se facilmente o atraso ou adianto da corrente com relação a tensão de entrada, corrigindo assim o fator de potência deste tipo de carga.

Para as cargas do tipo não linear a solução não é tão trivial assim já o simples emprego de capacitores ou filtros podem até mesmo piorar, levando a distorções ainda pior da forma de onda da corrente, obrigando a utilização de filtros ativos ou passivos para essa correção.

O filtro *Valley-Fill* apesar de ter conseguido atingir um fator de potência calculado relativamente alto, ainda possui certa distorção na forma de onda da corrente de entrada e ainda conta com um alto *ripple* da tensão de saída, intrínseco ao filtro.

Já o conversor *Boost* utilizado na topologia de PFC ativo, isto é, Correção do Fator de Potência consegue resultado ainda melhores para correção deste tipo de carga não linear, mantendo a qualidade da tensão de saída. A operação ideal é a do modo condução contínua do conversor *Boost*, porém exigindo um circuito de controle bem mais elaborado para obtenção de resultado satisfatório. Porém mesmo operando no modo de condução descontínua do mesmo é possível atingir ótimos resultados como foi demonstrado do protótipo montado. O modo de condução descontínua “molda” a corrente de entrada no formato da tensão AC de entrada através da carga do indutor, e com o emprego de um filtro com objetivo de filtrar os ruídos provenientes do chaveamento do conversor, tornando o formato da corrente de entrada linear alcançando um fator de potência praticamente unitário.

Referências

MARKUS, Otávio. Circuitos Elétricos. Corrente Contínua e Corrente Alternada. Teoria e Exercícios. 9. ed. São Paulo: Editora Érica. 2004.

KASSICK, E.V. Harmônicas em sistemas industriais de baixa tensão. Florianópolis, UFSC, 2008.

Brown A. Reactive Power in Electrical Systems. London: Wiley; 2012.

White B. Harmonic Distortion in Power Systems. Boston: Butterworth-Heinemann; 2014.

LOURO, Tiago Alexandre Lapa. Conversor AC-DC com corrente de entrada sinusoidal. 2017. Dissertação – Curso de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, 2017.

André, Anderson Soares. Apostila professor Anderson. 2010.

BARBI, Ivo. Retificadores monofásicos com correção de fator de potência empregando o conversor boost. 2015. Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.