

RETIFICADOR COM ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA

Ederson Zanchet, Roger Gules

Resumo—O estudo que se apresenta visa analisar o funcionamento e as propriedades do conversor CA-CC com elevado fator de potência com arranjo simples e sistema de controle necessário como mesma característica. O circuito na etapa de potência contará com duas chaves para realizar o ciclo de trabalho juntamente com o divisor capacitivo e os indutores projetados para operar com frequência de 30kHz, as chaves tem como característica necessária operação independente, ou seja, o ciclo de trabalho de 50% para evitar curto-círcuito no barramento. Com o arranjo busca-se minimizar as perdas produzidas pelo desfasamento de tensão e corrente de entrada garantindo assim um elevado fator de potência de forma que cause o mínimo de distorção nas formas de onda da corrente e tensão de entrada.

Index Terms—Fator de potência; retificador; energia

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento crescente pela demanda de energia e as limitações impostas para a geração de energia, além das prescrições normativas sobre qualidade da energia elétrica e também fatores ambientais, impedimentos tecnológicos e custos envolvidos nesse processo, surgem novas propostas de conversores para processamento eletrônico da energia com a finalidade de melhoria da qualidade da energia, ou seja, redução de perdas na etapa de tratamento do sistema de potência. Com a inclusão de técnicas de chaveamento no processamento eletrônico as características da energia elétrica passaram de um simples analise do desfasamento existente para verificação aprofundada da qualidade dessas formas de onda, em relação à taxa de distorção harmônica (THD), bem como as perdas produzidas no processo de conversão. O arranjo em questão compõe-se de um conversor CA-CC como elevado fator de potência utilizando-se de uma ponte de diodos para retificação. Duas chaves de potência com ciclos de trabalho de 50% em conjunto com indutores e capacitores para filtro da forma de onda de tensão. O circuito visa apresentar características de simplicidade no estágio de potência bem como na etapa destinada ao controle. [1]

II. CIRCUITO PROPOSTO

A estrutura apresentada na Figura 1 conta com um ponte de diodos rápidos, um conjunto de chaves que operam com frequência elevada em conjunto com um par de indutores (L1 e L2) assim como capacitores (C1 e C2) que formam um divisor de tensão.

A estrutura apresentada na Figura 1 apresenta as chaves S1 e S2 que operam de forma oposta conforme se demonstra através das etapas de funcionamento do conversor.

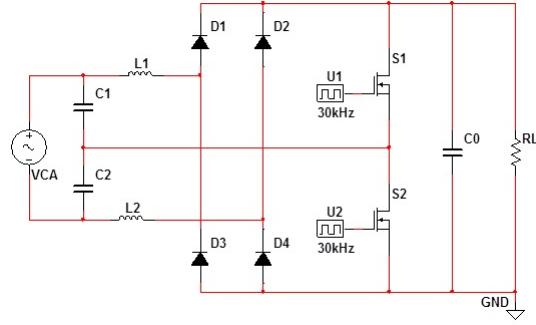


Figura 1. Circuito retificador com elevado fator de potência

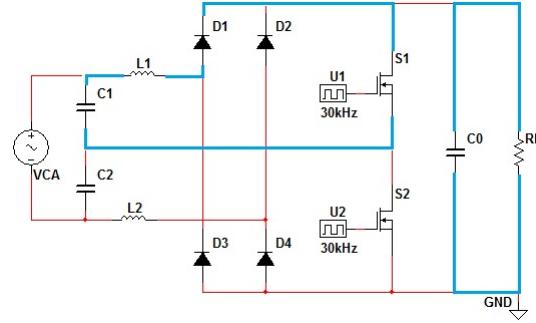


Figura 2. Estágio 1, chave S1 em condução semi-ciclo positivo da fonte VCA.

A. ETAPAS DE FUNCIONAMENTO

O funcionamento do conversor é apresentado em oito estágios de funcionamento sendo que os quatro primeiros estágios referem-se ao semi-ciclo positivo da fonte senoidal VCA e os estágios de 5 a 8 apresentam o funcionamento para o semi-ciclo negativo da fonte senoidal. Estágio 1: Como a chave S1 em condução a corrente flui através do capacitor C1, indutor L1, diodo D1 e chave S1 (Figura 2). O capacitor C0 descarrega energia acumulada sobre a carga RL.

Estágio 2: (Figura 3) Com o bloqueio da chave S1 e chave S2 passando para modo de condução a energia acumulada em L1 e C1 são transferidas para a carga RL e o capacitor C0 através da chave S2 ao mesmo tempo a corrente flui através do capacitor C2, indutor L2 e diodo D4 através da chave S2.

Estágio 3: (Figura 4) Quando L1 descarregar-se o capacitor C0 irá manter a carga RL e o indutor L2 estará armazenando energia através da chave S2, conforme o fluxo de corrente que passa por C2, L2, diodo D4 e a chave S2.

Estágio 4: (Figura 5) com o bloqueio da chave S2 e a chave S1 passando para modo de condução a energia acumulada

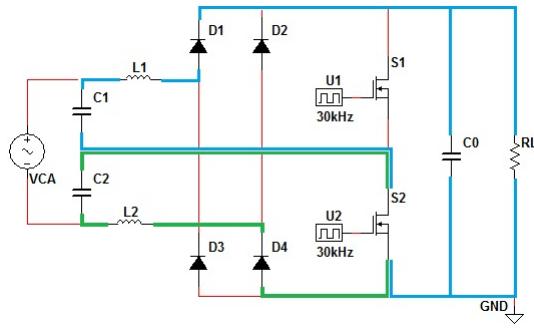


Figura 3. Estágio 2, chave S2 em condução no semi-ciclo positivo da fonte VCA.

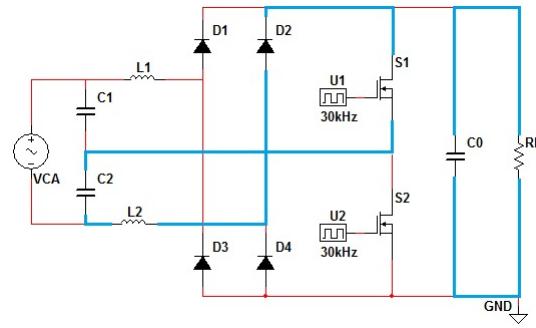


Figura 6. Estágio 5, Chave S1 em condução semi-ciclo negativo da fonte CA.

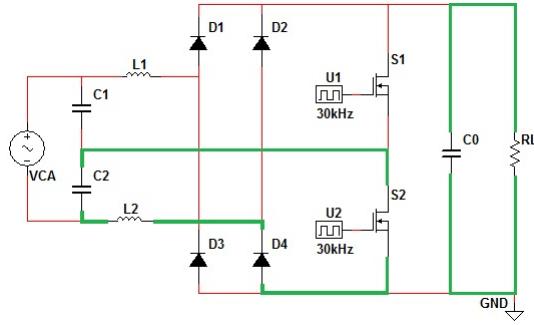


Figura 4. Estágio 3, Chave S2 em condução no semi-ciclo positivo da fonte VCA.

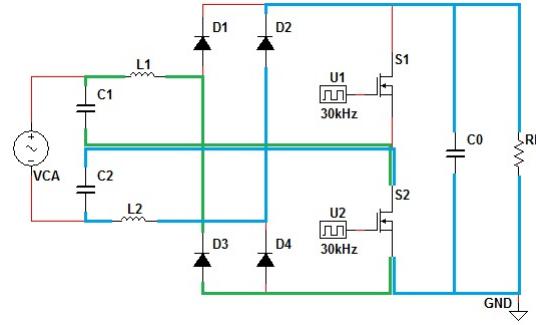


Figura 7. Estágio 6, Chave S2 em condução e chave S1 em bloqueio semi-ciclo negativo da fonte CA.

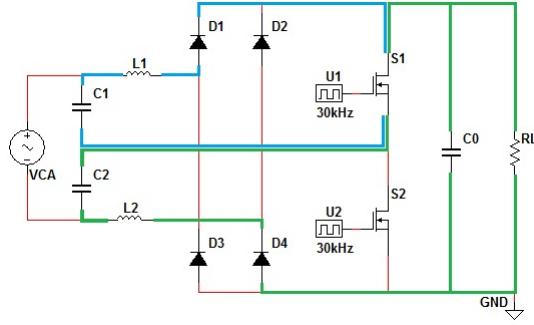


Figura 5. Estágio 4, Chave S1 em condução e chave S2 em bloqueio no semi-ciclo positivo fonte VCA.

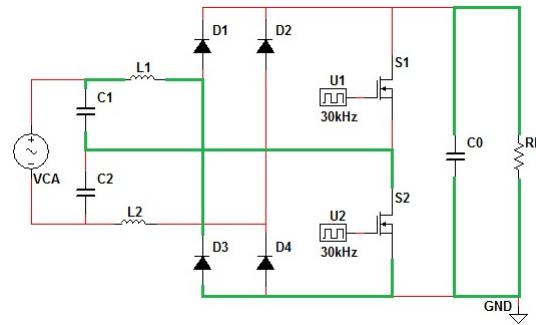


Figura 8. Estágio 7, Chave S2 em condução semi-ciclo negativo da fonte CA.

sobre L2 é transferida para a carga RL alimentador pelo capacitor C0 através da chave S1, juntamente ocorre fluxo de energia através de capacitor C1, indutor L1 e o diodo D1 até queesse a carga acumulada sobre o indutor L2 ficando a carga RL pelo capacitor C0.

Estágio 5: (Figura 6) com a inversão do fluxo da fonte VCA passando para o semi-ciclo negativo as polaridades dos capacitores C1 e C2 ficaram de forma inversa. Com a chave S1 em condução o indutor L2 armazenará energia através do capacitor C1, diodo D2 e a chave S1, a carga RL será mantida pelo capacitor C0.

Estágio 6: (Figura 7) com o bloqueio da chave S1 e a chave S2 passando para modo de condução a energia acumulada sobre o indutor L2 será transferida para a carga RL e o capacitor C0 e nesse mesmo intervalo o indutor L1 será carregado através da malha formada pela chave S2, capacitor

C1, indutor L1 e o diodo D3.

Estágio 7: (Figura 8) Com o cessar da energia do indutor L2 a carga RL ficará em condução através do capacitor C0, enquanto L1 é carregado pela malha formada por C1, L1, D3 e a chave S2.

Estágio 8: (Figura 9) A chave S2 passando para condição de bloqueio e a chave S1 entrando em condução a energia do indutor L1 é transferida para a carga RL e capacitor C0 e nesse período o indutor L2 armazena energia através da malha formada por L2, C2, D3 e a chave S1.

Com a fonte VCA passando para o semi-ciclo positivo o circuito volta para o estágio 1, repetindo a série de operações descritas. A corrente sobre os indutores crescem com relação linear VCA/2L1 apresentando formas de onda triangular conforme a Figura 10. A corrente sobre o indutor pode ser definida pela expressão (1), (2), (3) de acordo com o intervalo de tempo

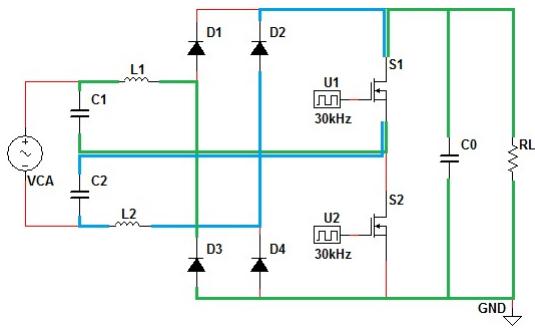


Figura 9. Estágio 8, Chave S1 em condução e chave S2 em bloqueio semi-ciclo negativo da fonte CA.

e a operação das chaves S1 e S2, onde T1 representa o tempo da rampa de subida da corrente sobre os indutores, T2 o tempo de rampa de descida e T o o período da onda de corrente dos indutores.

$$i_{L1} = \frac{V_{ca}}{2L_1} \{0 < t < T_1\} \quad (1)$$

$$i_{L1} = I_m - \frac{1}{L_1} \left(V_{RL} - \frac{V_{ca}}{2} \right) (t - T_1) \{T_1 < t < T_1 + T_2\} \quad (2)$$

$$i_{L1} = 0 \{T_1 + T_2 < t < T\} \quad (3)$$

A corrente de pico dos indutores (I_m) pode ser expressa por:

$$I_m = \frac{V_{ca}}{2L_1} \cdot \frac{T}{2} = \frac{V_{ca} \cdot T}{4L_1} \quad (4)$$

O período T2 pode ser definido como:

$$T_2 = \frac{V_{ca}}{2V_{RL} - V_{ca}} \cdot \frac{T}{2} \quad (5)$$

A corrente de entrada pode ser obtida através:

$$i_{ca} = \frac{I_m}{2} = \frac{T \cdot V_m}{8L_1} \operatorname{sen}(wt) \quad (6)$$

A potência real de entrada pode ser determinada através do valor eficaz:

$$P_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v_i \cdot i_{ca} \cdot d(wt) = \frac{T \cdot (V_m)^2}{16L_1} \quad (7)$$

Assim o fator de potência pode ser expresso por:

$$PF = \frac{P_i}{V_{i_{rms}} \cdot i_{CArms}} = \frac{\frac{T \cdot (V_m)^2}{16L_1}}{\frac{V_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{T \cdot V_m}{8\sqrt{2} \cdot L_1}} = 1 \quad (8)$$

Levando em conta que não existe distorção nas forma de onda da corrente e tensão de entrada. Considerando que o valor dos indutores L1 e L2 sejam iguais o valor médio da corrente de entrada pode ser definido pela expressão (9).

$$I_S = \frac{T}{16L} \cdot V_{CA} \cdot \left(\frac{2 \cdot V_{RL}}{2 \cdot V_{RL} - V_{CA}} \right) = \frac{T}{16L} V_{CA} \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{V_{CA}}{2 \cdot V_{RL}}} \right) \quad (9)$$

Decompondo a equação (9) tem-se a expressão (10):

$$I_S = \frac{T}{16L} \cdot V_{CA} \cdot \left(1 + \frac{V_{CA}}{2 \cdot V_{RL}} + \left(\frac{V_{CA}}{2 \cdot V_{RL}} \right)^2 + \dots \right) \quad (10)$$

Conforme a equação (10) o primeiro termo é diretamente proporcional ao valor da tensão de entrada, os demais termos sofrem influência da proporção entre o valor de entrada e valor da tensão de saída, se assumirmos que o valor da tensão de saída $V_{RL} \gg V_{CA}$ então o valor da corrente I_S será praticamente senoidal. A corrente do indutor tem formato triangular e está dentro da região descontínua sendo que a condição crítica é atingida quando iguala-se a tensão de saída com a entrada e T_2 será o igual à $T/2$ de acordo com a equação (5). O funcionamento do circuito opera com meia ponte e as chaves de potência trabalham com ciclos alternados os indutores L1 e L2 são carregados e descarregados em intervalos diferenciados (Figura 10) assim o valor da corrente é equivalente da corrente dos indutores com mesma fase da tensão de entrada e amplitude proporcional a fonte de alimentação. A frequência de ondulação na entrada será o dobro da frequência de comutação, sendo menor que a componente de ondulação sobre os indutores L1 e L2. [2]. O parâmetro alfa é definido através da relação da tensão de saída (V_{RL}) e VCA (Pico) e através dessa relação pode-se determinar algumas características do arranjo e relação a distorção harmônica, bem como a região de operação dos indutores.

$$\alpha = \frac{V_{RL}}{V_{CA(pico)}} \quad (11)$$

Se alfa foi igual a 1 então a tensão de saída é igual a tensão de entrada e os indutores L1 e L2 estão operando na região crítica e segundo [2] região que apresenta maior distorção harmônica para o arranjo, o que pode ser verificado pela equação (10), porém a medida que o valor do parâmetro alfa é ampliado o valor das componentes harmônicas é minimizado.

B. FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO

Realizado verificação do circuito em ambiente virtual, para verificação do comportamento e principais formas de onda através do software Orcad® Pspice 9.1 versão estudante. As formas de ondas nos indutores L1 e L2 observam-se na figura 11:

Detalhe da corrente sobre os indutores Figura 12.

As formas de onda de tensão sobre a carga e fonte VCA pode-se averiguar na Figura 13:

A forma de onda da corrente de entrada pode ser verificada na Figura 14.

A figura 15 apresenta a comportamento da tensão e corrente de entrada:

Através da figura 15 observa-se que não existe defasagem entre corrente e tensão de entrada.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O desenvolvimento do circuito exposto na figura 1 tem como parâmetros os componentes: Os indutores $L1=L2 =$

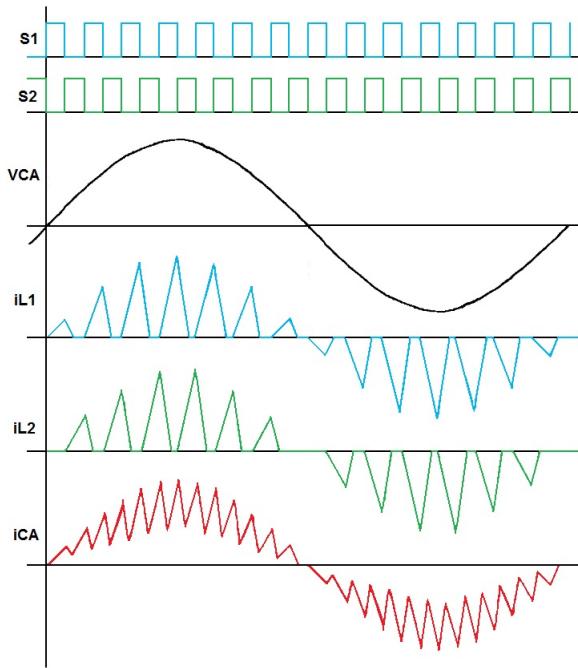


Figura 10. Principais formas de onda de tensão e corrente do conversor

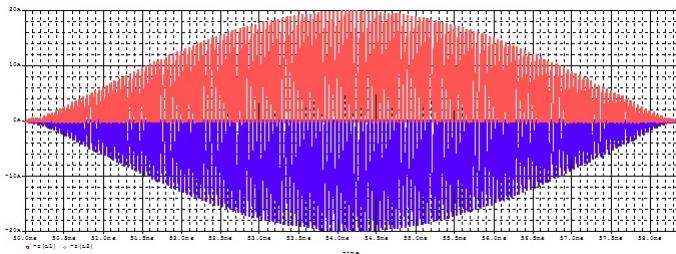


Figura 11. Formas de onda sobre os indutores L1 e L2.

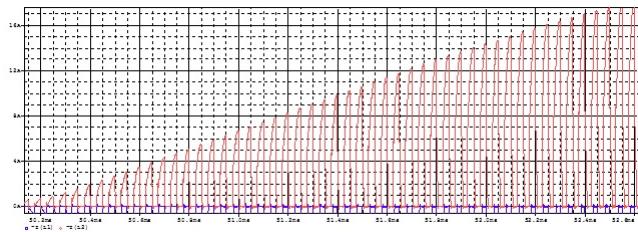


Figura 12. Formas de onda da corrente sobre o indutor L1.

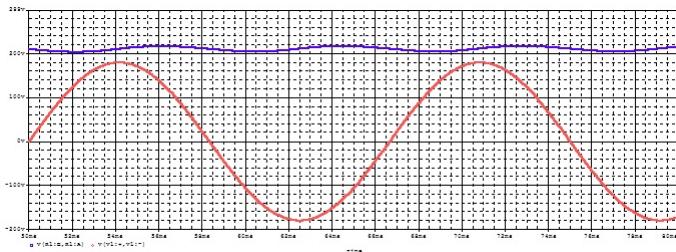


Figura 13. Comparativo tensão de entrada e saída

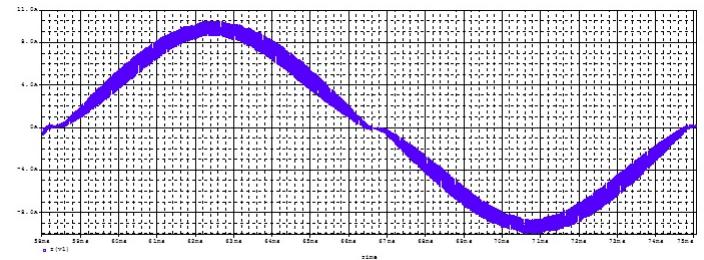


Figura 14. Detalhe do comportamento da corrente de entrada ICA.

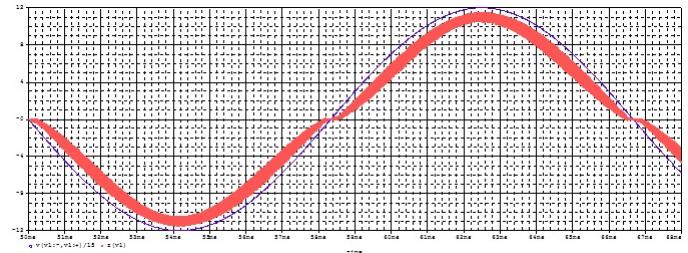


Figura 15. Formas de onda da tensão de entrada pela corrente de entrada.

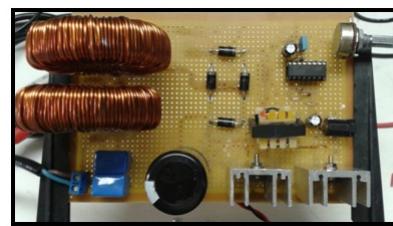


Figura 16. Protótipo utilizado nos testes.

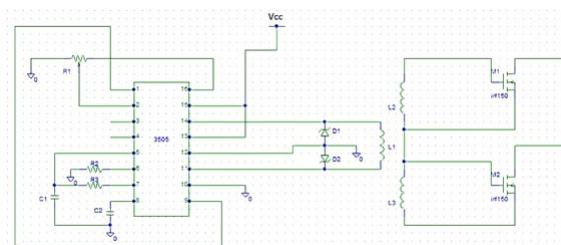


Figura 17. Arranjo utilizado para controle das chaves S1 e S2.

0.2mH; capacitors of the divisor being $C1=C2=1\mu F$; the filter capacitor $C0=330\mu F$; and the ultra-fast diodes $D1 \text{ à } D4 = \text{UF5408}$; and the power switches $S1=S2 = \text{IRF740}$ (POWER MOSFET). The circuit used for testing can be verified through Figure 16.

The control circuit (Figure 17) operates with a frequency of 30kHz with a duty-cycle of 0.5. The control arrangement includes the SG2535 integrated circuit and an RC circuit to generate a control signal for the switches S1 and S2. The signal is inverted with a 0.5 cycle work interval between actuations to ensure that the switches do not operate simultaneously and avoid short-circuiting the bus.



Figura 18. Sinal de disparo do transformador de acoplamento.

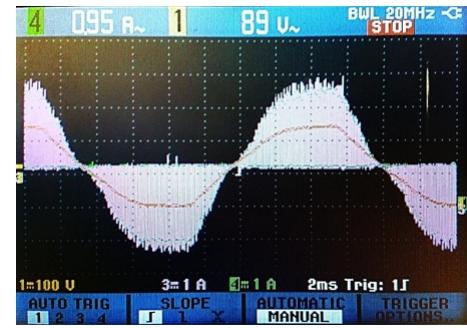


Figura 21. Comportamento da corrente sobre o indutor L1.

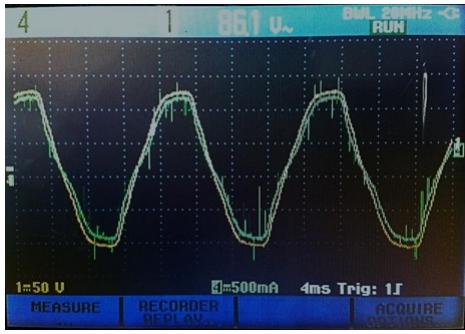


Figura 19. Tensão de Entrada e Corrente de entrada à 86,1Vrms.

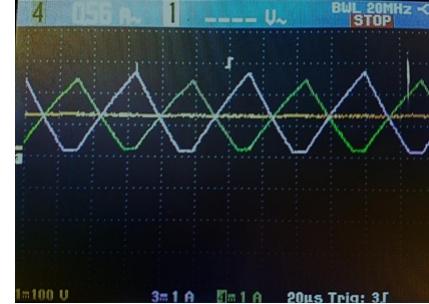


Figura 22. Detalhe da Corrente sobre os indutores L1 e L2.

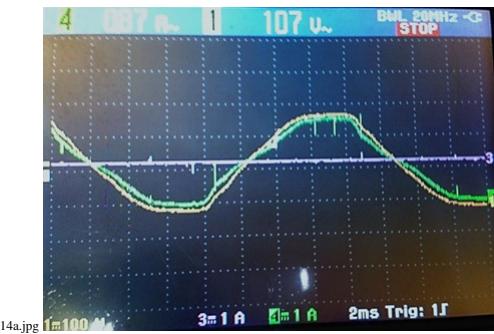


Figura 20. Tensão de Entrada e Corrente de entrada à 107,0Vrms.

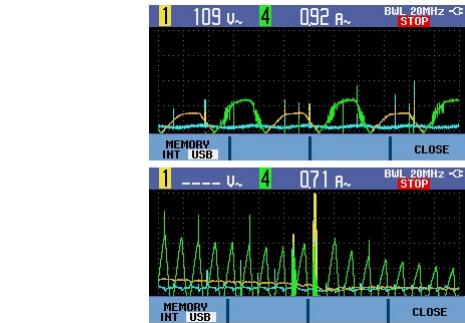


Figura 23. Detalhe das formas de onda com distorções.

Para os disparos das chaves de potência foi utilizado um transformador para realizar o acoplamento do circuito de controle a etapa de potência a Figura 18 demonstra o resultado do circuito de disparo levantado no ensaio prático.

Nos testes realizados, utilizou-se uma carga resistiva variável e analisou-se o comportamento da tensão e corrente de entrada (Figura 18), em busca de alterações significativas na forma de onda, e verifica-se que não existiu distorção na forma de onda e sim, apenas o ruído gerado (spike) pelas chaves de potência S1 e S2 utilizadas que operam com frequência elevada. Através das figuras 19 e 20 nota-se que as distorções ocorridas não impactam em deslocamento da forma de onda da tensão em relação a corrente.

As correntes sobre os indutores L1 e L2 são apresentadas na Figura 21.

Na figura 22 tem-se o detalhe da forma de onda da corrente dos indutores comprovando a característica com crescimento linear apresentando ainda uma região de descontinuidade. Detalhamento da forma de onda sobre indutores L1 e L2.

No período de ensaio o circuito apresentou algumas distorções próximas do valor de tensão em plena carga, com base nas medições realizadas (Figura 19) verifica-se tal efeito, que se supõe que seja proveniente de alguma falha no circuito de comando utilizado. A Figura 23 apresenta as distorções encontradas nos testes realizados.

O circuito analisado como se observa pelas figuras 19 e 20 não apresentam distorções harmônicas de ordem 3, 5 e 9; este efeito se dá devido a inversão de fluxo dos indutores L1 e L2 no momento de carga e descarga sendo que no instante de descarga a energia acumulada tem polaridade oposta à fonte que a gerou com base na Lei de Lenz. Durante as simulações observa-se através da Transformada de Fourier (Figura 24) que no espectro de frequência existem pequenos valores após os 40 KHz.

IV. CONCLUSÃO

Para o circuito proposto verificou-se que este apresentou a resposta esperada em termos de tensão e corrente de saída

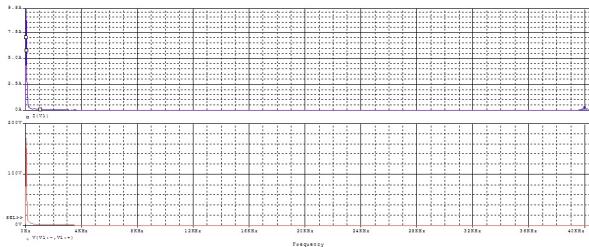


Figura 24. Espectro de frequência - Tensão e corrente de entrada.

confirmando os testes em ambiente virtual, também verificou o arranjo proposto não apresentou distorção harmônica de ordem 3, 5 e 9 conforme análise realizada através da transformada de Fourier. Conforme resultados verificados através das figuras 19 e 20 nota-se que não existe deslocamento entre as formas de onda de tensão e corrente de entrada mantendo o fator de potência de forma unitária. Próximo do valor de tensão de plena carga obteve-se um aumento do ruído sobre o sinal de tensão (spike) e acredita-se que possa ser de falhas provenientes do circuito de comando utilizado. Como característica o circuito apresenta etapa de potência simples que mesmo em caso parada do circuito de chaveamento o mesmo irá se comportar como retificador em ponte simples, já o circuito de controle também apresenta características de simplicidade já que as chaves de potência devem operar com duty-cycle de 0,5 de forma inversa e etapa de controle utilizada não usa recursos de controle em malha fechada ou outro sistema complexo, embora tal solução poderia ser empregada para solucionar problemas quando o sistema não apresenta carga conectada pois no atual arranjo essa condição elevaria os potências sobre as chaves causando a queima devido o acumulo de energia proveniente dos indutores L1 e L2. Este modelo de circuito se aplica principalmente para cargas constantes já que a variação de tensão de entrada e saída impactam diretamente na região de condução dos indutores e também na distorção harmônica da rede conforme mencionado através parâmetro alfa sendo que a região crítica é obtida quando alfa iguala-se a 1, ou seja a tensão de pico de entrada é igual a tensão de saída sobe a carga, ficando os indutores L1 e L2 na região crítica aumento o ruído e distorção na forma de onda. A principal vantagem é a simplicidade e baixo custo para desenvolvimento algumas aplicações utilizam os indutores acoplados [3] reduzindo o espaço físico necessário para o circuito. Com a inclusão de uma malha fechada de controle no circuito ocorreria melhora nos níveis de tensão e corrente, além de garantir o funcionamento mesmo em condições de variação de carga dentro dos limites de projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] J. A. G. MARAFÃO, “Retificador trifásico com alto fator de potência utilizando comutação em baixa frequência.” *Universidade Estadual De Campinas-UNICAMP*, 2002.
- [2] H. A. S. NABAE, A. NAKANO, “Novel sinusoidal converters with high power factor.” *Tokyo Institute of Polytechnics*, 1994.
- [3] B.-H. DO, Hyun-Lark. Kwon, “Single-stage line-coupled half-bridge ballast with unity power factor and ripple-free input current using a coupled inductor.” *transactions on industrial electronics*, vol. 50, 2003.