INVERSOR FLYBACK PARA SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTÁICA MONOFÁSICO INTERLIGADO A REDE

Fabio José Lima Freire – fabioifce@yahoo.com.br
Luan Carlos dos Santos Mazza – luanmazza@hotmail.com
Demercil de Souza Oliveira Júnior – demercil@dee.ufc.br
Paulo Peixoto Praça - paulopp@dee.ufc.br
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. *Este artigo apresenta um sistema geração fotovoltaica interligado a rede elétrica baseado no conversor flyback CC-CA, sendo o controle digital desenvolvido por um dispositivo FPGA. Apesar da baixa potência este estudo contribui para a busca de alternativas que visam suprir as exigências dotadas pela matriz energética brasileira. A base do sistema proposto está na geração de energia elétrica de forma descentralizada, não utilizando bancos de bateria conectados paralelamente a rede de energia próxima aos consumidores.*

Palavras-chaves: *Conversor Flyback, Controle FPGA, Geração de Energia, Matriz energética, Sistemas Fotovoltaicos.*

1. INTRODUÇÃO

Um sistema fotovoltaico conectado à rede, em inglês *on-grid* ou *grid-tie*, é um gerador de eletricidade que tem como combustível a energia solar, e que trabalha em conjunto com a rede elétrica da distribuidora de energia.

O painel fotovoltaico gera eletricidade em corrente contínua, e o inversor de frequência (aparelho que faz a interface entre os painéis fotovoltaicos e a rede elétrica) converte em corrente alternada e 'injeta' na rede elétrica. Antes de 'injetar' a energia, o inversor 'lê' os valores de voltagem e frequência da rede, para que não haja nenhuma 'modificação' na energia.

Os avanços da tecnologia, estimulando a produção em escala de semicondutores vem impulsionando diretamente para a redução de custos na produção de energia elétrica gerada pelos os painéis fotovoltaicos (PV). Para que se obtenha uma maior competitividade frente as demais formas de geração elétrica, os recursos fotovoltaicos, depende diretamente das tecnologias aplicadas ao desenvolvimento de células mais eficientes e de estudos sobre os conversores eletrônicos para obter-se o maior rendimento possível (Cepel – Cresesb, 2004).

Cada dia mais o mundo necessita de produção de energia elétrica. E no Brasil não seria diferente, hoje enormes são as demandas pelo consumo de energia exigidos pela humanidade. Tendo vista essa expansão, o Brasil tendem a ampliar o escopo de seus portfólios de energias renováveis em meio às desafiadoras condições do mercado global. Projetos de energia solar em escala comercial permanecem em alta a despeito das incertezas trazidas pelos empreendimentos de energia eólica que foram afetados, especialmente diante da perspectiva da pressão sobre o preço do gás nos Estados Unidos afetando diretamente na produção de etanol. Outra característica desse crescimento está na participação de renováveis na matriz energética brasileira mantendo-se entre as mais elevadas do mundo, devido à menor oferta de energia hidráulica (Brasil, 2012). Além dos incentivos, como o Programa de incentivo as fontes alternativas de energia elétrica - PROINFA (Abinee, 2013).

Devido sua grande flexibilidade, esses tipos de sistemas admitem variadas aplicações: alimentação de ar condicionado, produção de potência para os elementos de sinais de trânsito e radares eletrônicos, aquecimento de líquidos, ou até mesmo para à inserção de potência na rede de distribuição da concessionária. Neste último a medição da energia fotovoltaica pode ser feita sobre o excedente de energia gerada com relação à demanda interna do consumidor injetado na rede ou sobre o total produzido, sendo que toda energia gerada (e não somente o excesso com relação ao consumo) é vendido para a concessionária a uma tarifa superior à cobrança por esta (Abinee, 2013).

Os sistemas fotovoltaicos, principalmente aqueles integrados as edificações urbanas, residenciais ou interligados ao sistema de distribuição, oferecem diversas vantagens para os sistemas elétricos. Entre eles, os relacionadas a custos evitados: redução de perdas por transmissão e distribuição de energia, já que a eletricidade é consumida onde é produzida; redução de investimentos em linhas de transmissão e distribuição; edifícios com tecnologia fotovoltaica integrada não exigem área física dedicada; edifícios solares fotovoltaicos fornecem os maiores volumes de eletricidade nos momentos de maior demanda (o uso de ar-condicionado é maior ao meio-dia no Brasil, quando há uma maior incidência solar); quando distribuídos estrategicamente, os geradores fotovoltaicos oferecem mínima capacidade ociosa de geração: por sua grande modularidade e custos prazos de instalação, podem ser considerados como um *Just-in-time* de adição de capacidade de geração (Burger e Rüther, 2004).

É notável que no Brasil, a participação desta forma de geração ainda seja praticamente inexistente, porém está se tornando cada vez mais clara, a necessidade de exploração dos parques solares na matriz energética brasileira. Não somente por causa dos índices de irradiação solar, que sem dúvidas é importante (sendo o Brasil é um dos maiores do mundo), mas também pelo aumento da eficiência e queda dos custos dos módulos e sistemas fotovoltaicos em nível mundial (Epia – Market Report 2011). Cada vez mais o país dependerá dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede (on

grid) e dos sistemas fotovoltaicos autônomos (off grid) para diversificar sua matriz de energia, e assim, se tornar uma das matrizes, auto suficiente, mais limpa do mundo.

2. SISTEMA PROPOSTO

Neste tipo de sistema o objetivo é permitir que parte ou toda energia convertida pelos painéis fotovoltaicos seja injetada na rede em corrente alternada (CA) aumentando a oferta de energia elétrica. Além da redução dos custos, outros fatores responsáveis pelo crescente interesse nas aplicações comerciais dos sistemas de geração baseados em painéis PV conectados à rede elétrica são: (i) baixas perdas por transmissão, já que os sistemas de geração PV podem ser instalados próximos aos centros de cargas; (ii) baixa necessidade de manutenção, devido a robustez dos painéis PV e ausência de partes mecânicas giratórias e (iii) o fato dos painéis PV gerarem uma energia limpa, sem a emissão de gases ou poluição sonora.

A concessionária remunera a energia entregue pelo produtor fotovoltaico ao mesmo preço que este compra da concessionária. Um medidor, que registrará a entrada ou saída de energia elétrica. No fim de certo período, lê-se o valor da diferença entre a energia entregue à rede e a consumida pelo o proprietário (Rosemback, 2004).

A Fig. 1, mostra o sistema fotovoltaico conectado à rede, convertendo a energia solar em eletricidade e injetando o potencial gerado diretamente à rede de distribuição. O sistema proposto é composto por cinco painéis fotovoltaicos e cinco inversores flyback. Sendo cada flyback terá que processar 220 W de potência e deverá entregar 200 W para a rede CA. Perfazendo 1000 W de potência sendo disponibilizada a rede elétrica.

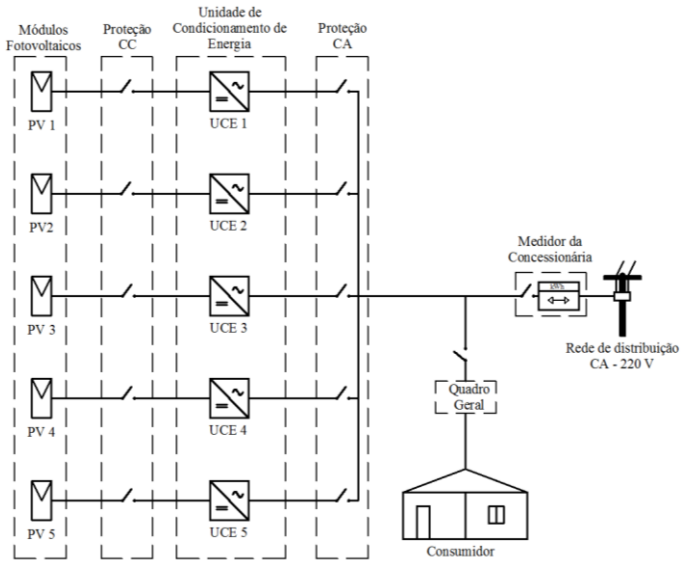


Figura 1 – Sistemas de conexões dos módulos fotovoltaicos proposto do conversor flyback CC-CA.
Fonte: (Cresesb 2014 - Adaptado)

Por, à natureza unidirecional (corrente contínua - CC) da energia elétrica gerada nos painéis solares fotovoltaicos é necessário o uso de conversores eletrônicos de potência (conversores estáticos) para condicionar a energia elétrica antes de esta ser disponibilizada para consumo na rede CA, alimentando cargas residenciais, comerciais e industriais. Os inversores para sistemas on-grid (grid-tie) são muito mais sofisticados que os inversores utilizados nos sistemas autônomos, pois são os mesmos que gerenciam todo o sistema. Os inversores grid-tie atuais, em sua grande maioria, possuem seguidor do ponto de máxima potência (MPPT), o qual permite aproveitar ao máximo a capacidade de geração do arranjo fotovoltaico ao qual está conectado. Outra característica desse sistema, está no fato de não necessitarem de sistemas de armazenamento (controladores de carga e baterias), a rede elétrica age como uma carga, absorvendo a energia elétrica gerada. A eficiência do sistema está intimamente ligada à eficiência dos inversores: quanto mais eficiente o inversor, maior será o potencial aproveitado e injetado na rede de distribuição. Pela as limitações de potências do conversor *flyback*, onde o mesmo, limita-se ao processamento de potências inferiores a 200 W, preferiu-se associar os inversores, de modo a obter 1000 W de potência a ser entregue a saída da rede elétrica.

Devido os sistemas on-grid serem conectados à rede de distribuição elétrica das concessionárias seu uso deve ser regulamentado pelos órgãos responsáveis, no caso do Brasil a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL que aprovou recentemente (abril de 2012) uma nova Resolução Normativa, criando a regulamentação necessária para que os consumidores de energia elétrica possam ser também geradores de energia. Essa nova regulamentação cria um novo horizonte e incentivo para a produção de energia elétrica alternativa (Brasil, 2012).

O embasamento legal para esta atividade encontra-se na Resolução 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

1 - Painel Fotovoltaico capta a luz do Sol e converte em energia elétrica (Corrente Continua)

2 – Inversor Inteligente inverte a corrente e equaliza a frequência, tensão e amperagem com a rede elétrica.
3 – Chave seccionadora funciona como dispositivo de segurança para isolar o sistema fotovoltaico da rede elétrica.
4 – A energia equalizada pelo inversor é distribuída para a empresa ou indústria.
5 – Consumo da energia gerada pelo sistema reduz a conta de luz.
6 – O excesso de energia gerada durante o dia vai para a rede elétrica, "girando o relógio de luz ao contrário", criando um crédito de energia para o proprietário do sistema. Esse crédito pode ser usado para abater o consumo durante a noite e/ou dos próximos meses.

3. PARÂMETROS DO PROJETO.

Os elementos principais que compõem o sistema proposto pelo estudo estão relacionados na Tab. 1.

Tabela 1 – Parâmetros usados no projeto.

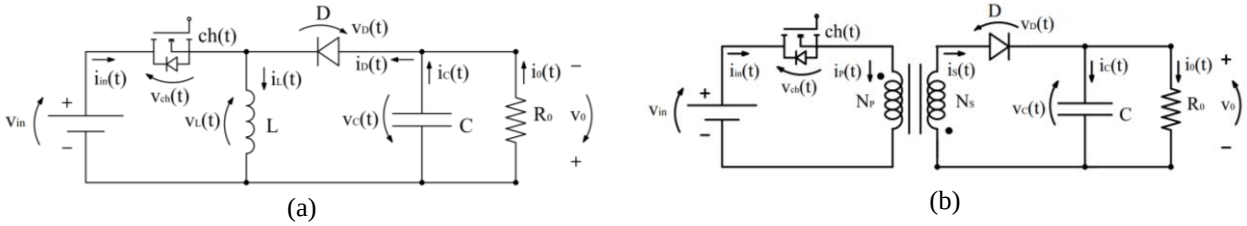
Características do módulo solar	
Fabricante	Bosch[1]
Designação	220
Potência Máxima (P_{MP})	220 W
Tensão no ponto de máxima potência (V_{MP})	30,25 V
Tensão de circuito aberto (V_{OC})	37,60 V
Corrente de curto circuito (I_{SC})	9,19 A
Resistência à corrente inversa [I_r]	25 A
Características Elétricas do Projeto	
Tensão de pico de saída (V_{AC})	311,1 V
Frequência da rede AC (f_0)	60 Hz
Tensão de entrada (V_{in})	24 V
Variação da tensão de entrada (ΔV_{in})	2 %
Potência de saída do conversor (P_0)	200 W
Razão cíclica (D_{max})	0,45
Frequência de chaveamento (f_s)	20 kHz
Rendimento estimado (η)	0,9
Clock externo do FPGA (clk)	7 MHz

[1] www.bosch-solarenergy.com.pt

O rendimento do conversor η está limitado as perdas nos transformadores de ferrite e nos semicondutores utilizadas no conversor. Para efeito de cálculos baseados em resultados experimentais e usado pela literatura para efeito de cálculos (Barbi, 2001), estima-se que o conversor proposto obtenha rendimento de 0,9.

4. O CONVERSOR FLYBACK

O conversor Flyback é um conversor abaixador-elevador de tensão isolado, Fig. 2 (a) e (b), derivado do conversor buck-boost, pela substituição do indutor de acumulação de energia pelo "transformador de isolamento" (Barbi, 2001). Sua característica de funcionamento está baseado no princípio de acumular energia num indutor durante o intervalo ligado do período de chaveamento e liberar essa energia para a carga durante o tempo desligado do mesmo período de chaveamento (Kasa e Chen, 2005).



(a) (b)

Figura 2 - (a) conversor *buck-boost*; (b) conversor *flyback*.
(Fonte: Adaptado, Hart, 2012).

No conversor flyback a corrente não flui pelo primário e pelo secundário ao mesmo tempo, logo o elemento magnético não se comporta como um transformador clássico. Sendo assim, o "transformador" do conversor flyback, além de sua função clássica de isolação e adaptação dos níveis de tensão primária e secundária, apresenta a função de indutor de acúmulo de energia através de sua indutância magnetizante (Hart, 2012).

5. ESCOLHA DA TOPOLOGIA FLYBACK

Este trabalho apresenta as etapas de projeto e simulação do conversor *Flyback* para condicionamento da energia gerada por uma unidade fotovoltaica instalada em na cidade de Limoeiro do Norte - CE. Além dessas características, a Tab. 2 mostra os motivos para utilização do conversor Flyback.

Tabela 2 - Características da escolha do conversor Flyback.

Com relação a custo	Com relação ao desempenho
• Facilidade de projeto do transformador para potências iguais ou inferiores a 200 W. • O conversor Flyback opera no primeiro quadrante da curva B vs. H. • Reduzida quantidade de componentes. • A não exigência de filtro indutivo na saída, o que faz com que o diodo retificador do secundário não necessite de bloquear altos valores de tensão.	• Múltiplas saídas podem ser obtidas utilizando-se um número mínimo de componentes extras: cada saída adicional requer somente um enrolamento secundário adicional, diodo e capacitor. • Aceitação de grande variação da resistência de carga. • Presença de isolamento galvânico entre a entrada e a saída. • Boa regulação cruzada.

Neste estudo, um inversor flyback monofásico com seis transistores para sistema fotovoltaico operando em modo de condução descontínua (DCM) é apresentado. Baseado na mesma técnica utilizada por (Marques, 2008) será feito um estudo para implementação de um conversor CC-CA controlado por um dispositivo lógico programável FPGA (*Field Programmable Gate Array*). Dos seis transistores, quatro operam em alta frequência e os outros dois operam na frequência da rede de fornecimento de energia. Para comprovação do estudo, futuramente será construído um protótipo do inversor e da placa de controle por FPGA em laboratório para aquisição de resultados experimentais.

6. PROJETO DO CONVERSOR FLYBACK PROPOSTO

Na Fig. 3 é apresentado o circuito do inversor *flyback* a quatro transistores em estudo e simulado na Fig. 4. O inversor consiste de quatro transistores de potência ligados ao primário do transformador, dois diodos rápidos de potência e quatro transformadores de alta frequência.

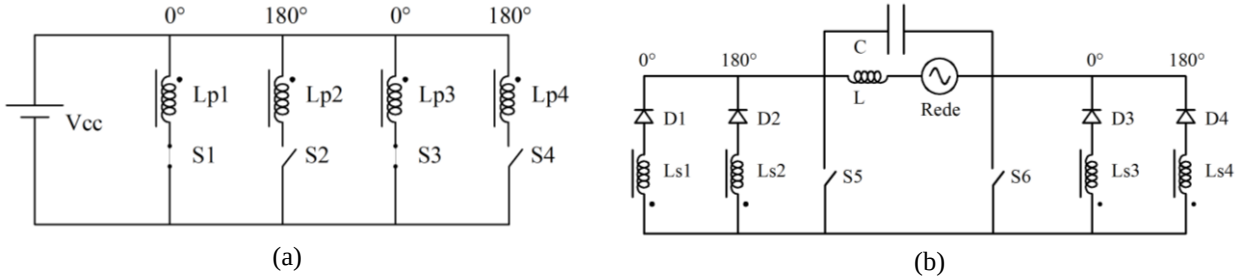


Figura 3 – Topologia do inversor *flyback* em estudo; (a) Ligação do primário; (b) Ligação do Secundário.

Os transistores S_1, S_2, S_3 e S_4 operam em alta frequência em função do sinal de corrente modulado em PWM pelo dispositivo FPGA. Os transistores S_5 e S_6 operam na frequência da rede CA. Os diodos D_2 e D_4 atuam como bloqueadores de potências que porventura possam circular no sentido contrário ao fluxo de potência do conversor. A Tab. 3 mostra os comportamentos das chaves para o conversor *flyback* proposto.

Tabela 3 – Comportamento das chaves nas etapas de funcionamento.

Etapas de funcionamento 1 e 2				Etapas de funcionamento 3 e 4		
Chaves	Situação	Defas.	Freq. modulação	Situação	Defas.	Freq. de modulação
S1	Modulando	0°	20 kHz	Aberto	-	-
S2	Modulando	180°	20 kHz	Aberto	-	-
S3	Aberto	-	-	Modulando	0°	20 kHz
S4	Aberto	-	-	Modulando	180°	20 kHz
S5	Aberto	-	-	Fechado	-	60 Hz
S6	Fechado	-	60 Hz	Aberto	-	-

A sequência de funcionamento do inversor esta apresentada na Fig. 4. As chaves S_1 e S_2 possuem chaveamentos em altas frequências sendo defasados de 180°, entre si. As chaves S_3 e S_4 possuem chaveamentos em altas frequências sendo defasados de 180°, entre si.

7. MODOS DE OPERAÇÃO DO INVERSOR FLYBACK PROPOSTO.

Primeira Etapa [0, D.Ts]: O transistor S_1 está fechado carregando L_{p1}, acumulando energia no primário 1. Sendo que o diodo D_1 está aberto e o diodo D_2 entra em condução, fazendo L_{s2} abastecer a rede CA e carregar o capacitor.

Segunda Etapa [(DTs, (1 - D.Ts)]: O transistor S_2 está fechado carregando L_{p2}, acumulando energia no primário 2. Sendo que o diodo D_2 está aberto e o diodo D_1 entra em condução, fazendo L_{s1} abastecer a rede CA e carregar o capacitor. Nesses dois modos de funcionamento o transistor S_5 encontra-se aberto e o transistor S_6 está fechado, sendo chaveado na frequência de modulação da rede. Os modos de funcionamento do semiciclo positivo são vistos na Fig. 4 (a) e (b).

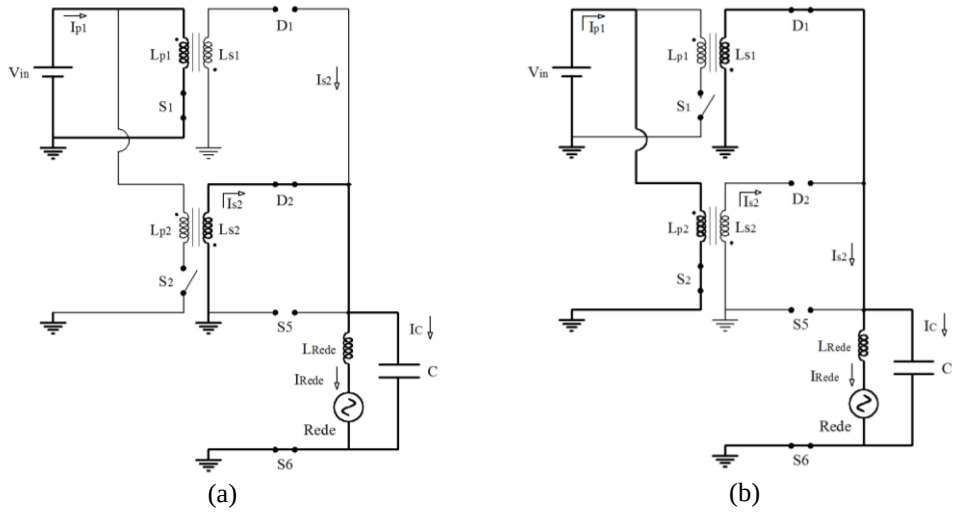


Figura 4 – Modo de funcionamento do *flyback* em DCM no semiciclo positivo. (a) Modo 1; (b) Modo 2.

Terceira Etapa [0, D.Ts]: O transistor S_3 está fechado carregando L_{p3}, acumulando energia no primário 3. Sendo que o diodo D_3 está aberto e o diodo D_4 entra em condução, fazendo L_{s4} abastecer a rede CA e carregar o capacitor.

Quarta Etapa [(DTs, (1 - D.Ts)]: O transistor S_4 está fechado carregando L_{p4}, acumulando energia no primário 4. Sendo que o diodo D_4 está aberto e o diodo D_3 entra em condução, fazendo L_{s3} abastecer a rede CA e carregar o capacitor. Nesses dois modos de funcionamento o transistor S_5 encontra-se fechado e o transistor S_6 está aberto, sendo chaveado na frequência de modulação da rede. Os modos de funcionamento do semiciclo negativo são mostrados na Fig. 5 (a) e (b).

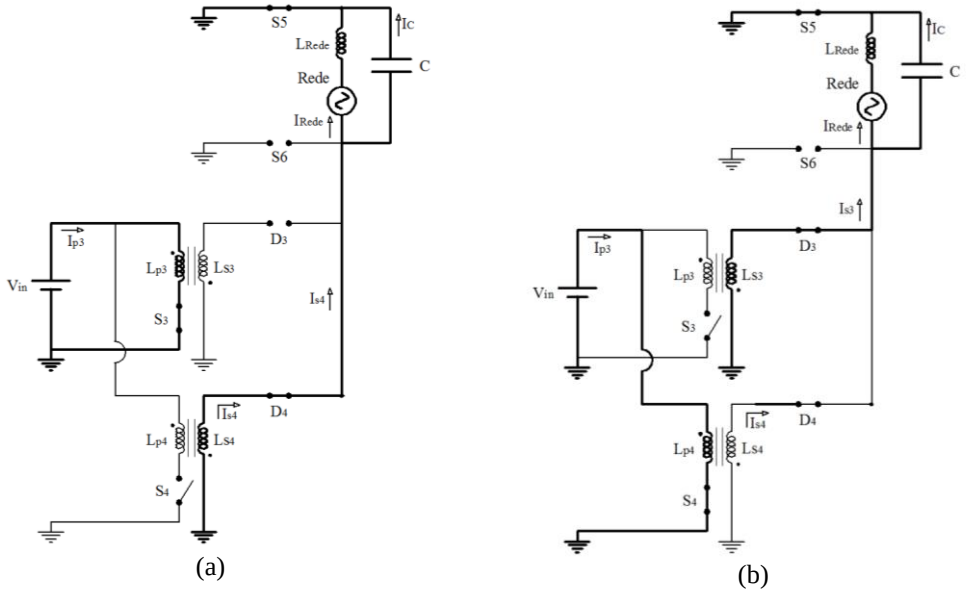


Figura 5 – Modo de funcionamento do *flyback* em DCM no semiciclo positivo. (a) Modo 3; (b) Modo 4.

As etapas de funcionamento 1 e 2 se assemelham as etapa 3 e 4, modificando-se apenas os elementos envolvidos e o semiciclo de atuação.

8. PROJETO DO FLYBACK PROPOSTO

Sabe-se que para a saída:

$$V_o(t) = V_0\ sen\ (\omega_0.t + \varphi_v) \tag{1}$$

$$I_o(t) = I_o\ sen\ (\omega_0.t + \varphi_i) \tag{2}$$

Onde:

V_o: Tensão de pico de saída;
I_o: Corrente de pico de saída;
f: frequência angular do sinal gerado pelo conversor.

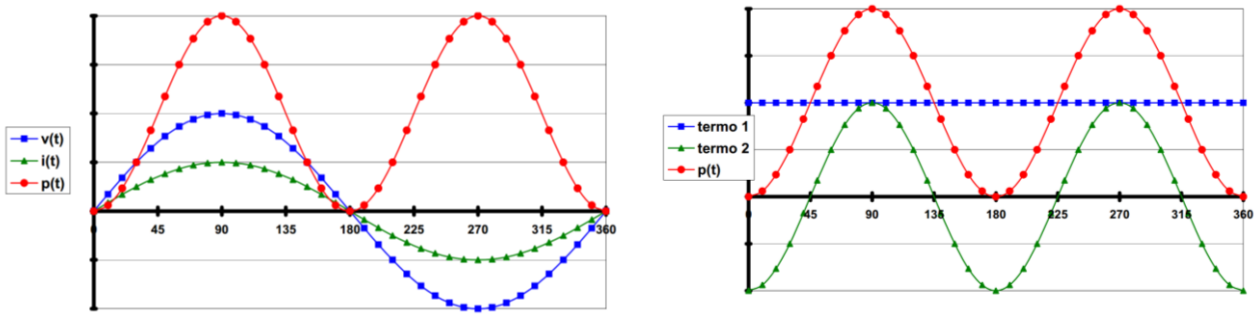
Sendo assim para a potência de saída do conversor tem-se:

$$p_o(t) = V_o(t).i_o(t) \tag{3}$$

Considerando o fator de potência unitário para os sinais de tensão e corrente gerados pelo inversor *flyback* e usando as Eq. (1), (2) e (3), assim tem-se:

$$p_o = \frac{1}{2} V_o.I_o.[1 - \cos(2\omega_0.t)] \tag{4}$$

A potência instantânea alimentada em corrente pode ser mostrada pela Fig. 6.



(a) (b)

Figura 6 – Valores de saída do conversor (a) Tensão, corrente e potência instantânea na saída do conversor; (b) Composição dos termos da potência instantânea. (Fonte: Mussoi, 2006).

A Eq. (4) está representada por dois termos: um constante e outro variável no tempo. O termo constante é uma reta e o termo variável uma curva senoidal com o dobro da frequência ω.

A potência média é dada por um termo constante onde a potência média é a metade da potência de pico, como mostra a Eq. (5).

$$P_{med} = \frac{1}{2} V_p.I_p \tag{5}$$

Para dimensionamentos de todos os componentes foram adotados o modo de condução descontínua considerando os valores máximos de tensão e corrente. Assim como será usado apenas um braço para dimensionamento sendo repetido pelos os outros três braços do conversor.

Sabe – se que a potência do conversor será máxima quando $[1 - \cos(2\omega_0.t)] = 2$, sendo assim:

$$p_o = V_o.I_o \tag{6}$$

Portanto, a potência de saída máxima é dada pela Eq. (7).

$$P_{0\,max} = V_{o\,max} . I_{o\,max} \tag{7}$$

O cálculo da indutância dos primários $L_{p1} = L_{p2} = L_{p3} = L_{p4}$ e a corrente de pico I_{p1max} estão em função da potência de saída P_{omax}, visto da Eq. (8).

$$L_{p1max} = \frac{(D_{max} . V_{e\,min})^2}{2 . fs . P_{0\,max}} \tag{8}$$

Onde: D_{max} representa a razão cíclica máxima de operação do conversor *flyback*; f_s a frequência de chaveamento e V_{emin} a tensão de entrada mínima fornecida pelos painéis fotovoltaicos.

É possível encontrar a corrente no indutor do primário usando a Eq. (9).

$$i_{L1\,maz} = \sqrt{\frac{2 . P_{0\,max}}{fs . L_{p1\,max}}} \tag{9}$$

Para o cálculo de $Ls_1 = Ls_2 = Ls_3 = Ls_4$ faz-se a relação de transformação da Eq. (10).

$$n = \frac{D_{max} . V_{e\,min}}{V_s . (1 - D_{max})} \tag{10}$$

A indutância do secundário, pode ser calculado pela Eq. (11).

$$L_{s1\,maz} = (\frac{1}{n})^2 . L_{p1\,max} \tag{11}$$

O cálculo do capacitor de saída é mostrado na Eq. (12).

$$C = \frac{I_0 . D_{max}}{f_s . \Delta V_C} \tag{12}$$

Onde ΔV_C representa a tensão de riplle da saída do conversor.

9. CONTROLE DIGITAL

Para controle do *flyback* usa-se os Dispositivos FPGA's que são dispositivos lógicos programáveis (PLDs) utilizados para programar funções lógicas extremamente complexas, como CPUs internas. Os dispositivos PLDs são programados via software especial fornecidos pelos próprios fabricantes desses produtos (Amore, 2005).

A disposição dos principais blocos de controle para o dispositivo FPGA, projetado para o inversor *flyback* a está apresentado na Fig. 7.

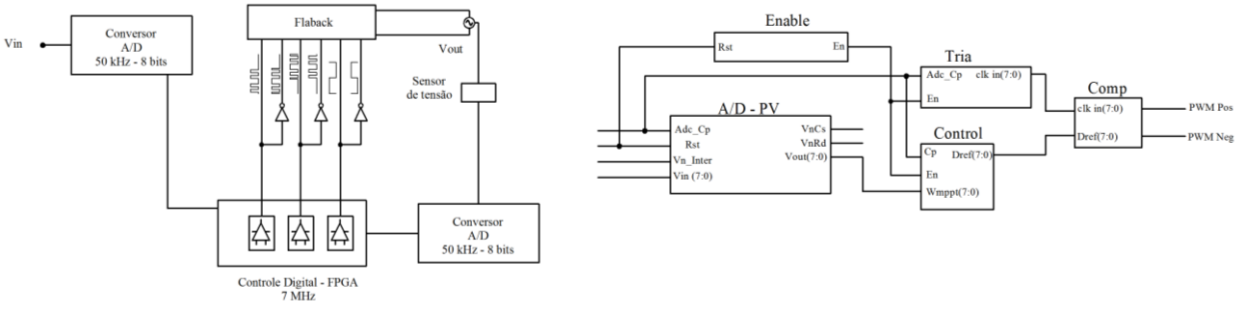


Figura 7 – Controle do conversor *flyback* CC-CA (a) Estratégia de controle do conversor; (b) Blocos lógicos implementados pelo FPGA para cada chave. (Fonte: Adaptado. Amore, 2005).

Nesta etapa de controle a grandeza c(k) calculada pelo PI é comparada ao valor gerado por um contador de 8 bits. Em dispositivos lógicos programáveis, todas suas funções são realizadas a partir de um clock externo. A forma adotada neste estudo na conversão de uma grandeza em largura de pulso, portanto tempo, foi comparar esta variável c(k) ao

contador de 8 bits, o que resulta em transistores S_1, S_2, S_3 e S_4 fechados para c(k) menor e aberto para c(k) maior que valor binário do contador. O comportamento do PI digital programado está representado na Eq. (13).

$$c_{(k)} = c_{(k+1)} + (k_p + k_i t)x\, e_{(k)} - k_p\, e_{(k-1)} \quad (13)$$

Onde:
$C_{(k)}$ – saída atual do PI;
$C_{(k-1)}$ – saída anterior do PI;
$e_{(k)}$ – erro atual;
$e_{(k-1)}$ – erro anterior;
$k_{(p)}$ – constante proporcional do PI;
$k_{(i)}$ – constante integral do PI;
t – tempo de amostragem.

Como mostra a Eq. (13), o valor c(k) representa a grandeza do ajuste necessário a ser feito para que no final a Tensão V_{out} seja ajustada ao valor de referência V_{ref} gerado pelo bloco de controle pela corrente média para operar em MPPT. Este valor irá incrementar ou decrementar a razão cíclica de trabalho dos pulsos aplicados a S_1, S_2, S_3 e S_4. E diferente dos conversores não isolados que dependem ou estão em função do liga ou desliga de seus transistores, conversores isolados requerem pulsos intermitentes. A ação de controle programada no dispositivo FPGA estabelece limites máximos e mínimos para o funcionamento do inversor *flyback* com o objetivo de evitar um ciclo de trabalho maior que o suportado pelo mesmo ou um valor mínimo que venha interferir no sinal gerado pelo inversor.

10. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A Fig. 8 mostra o comportamento das chaves no semiciclo positivo. Nesse semiciclo as chaves S_1 e S_2 estão modulando em alta frequência, na faixa de 20 kHz. Já a chave S_6 está em baixa frequência, na faixa de 60 Hz. As chaves S_3 e S_4 e S_5 permanecem abertas.

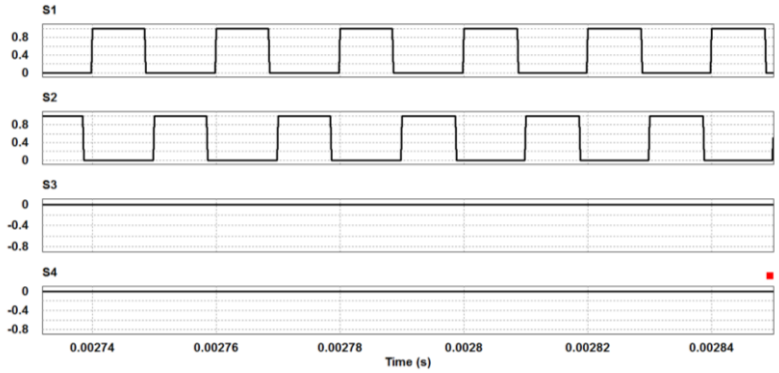


Figura 8 – Modulação das chaves em alta frequência no semiciclo positivo.

Como visto na Fig. 9 no semiciclo negativo o processo se repete, modificando-se apenas os elementos envolvidos, no caso as chaves. Sendo assim, as chaves S_3 e S_4 estão modulando em alta frequência. Já a chave S_5 está em baixa frequência. As chaves S_1 e S_2 e S_6 permanecem abertas.

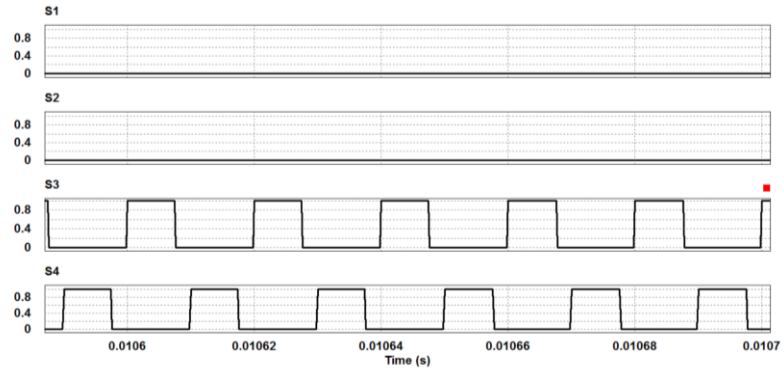


Figura 9 – Modulação das chaves em alta frequência no semiciclo negativo.

As chaves S_5 e S_6 atuam na frequência da rede, como visto na Fig. 10.

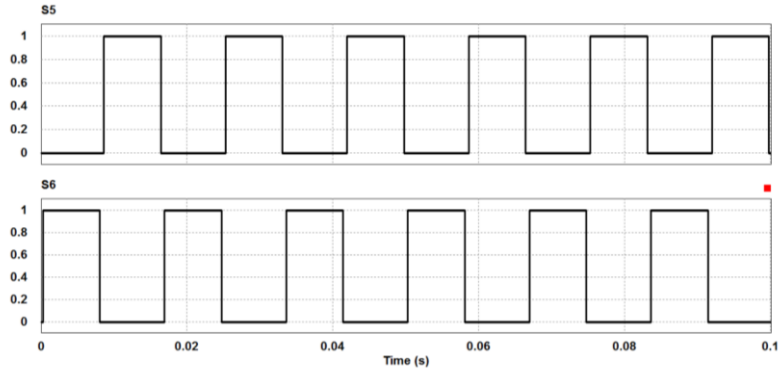


Figura 10 – Modulação das chaves em baixa frequência.

Todas as modulações para as chaves do *flyback* em questão, são gerados por PWM ("Pulse Width Modulation") que é uma técnica largamente utilizada para o controle de dispositivos e sinais, desde iluminação e acionamento de motores até áudio. Em sua forma mais simples, o PWM implica no chaveamento da entrada do circuito (alimentação ou sinal). Se a chave, no circuito mostrado, conduz durante um intervalo T_{on} (tempo de condução), a seguir bloqueia durante um intervalo T_{off} (tempo de não condução), e a soma destes intervalos corresponde a um período T de funcionamento do sistema.

A Tab. 4 mostra os valores encontrados pelo dimensionamento e inseridos na simulação do inversor *flyback* proposto.

Tabela 4 – Valores adotados para simulação.

Indutância de magnetização do primário (L_p)	14,5 µH
Indutância de magnetização do secundário (L_S)	1,47 mH
Número de espiras do primário (N_p)	8
Número de espiras do secundário (N_S)	85
Capacitor de saída (Cs)	1 µF

Na Fig. 11, são apresentados os valores instantâneos dos sinais de corrente (em azul), tensão (em marrom) e potência (em vermelho) para a saída do inversor. O fator de potência do inversor é aproximadamente unitário.

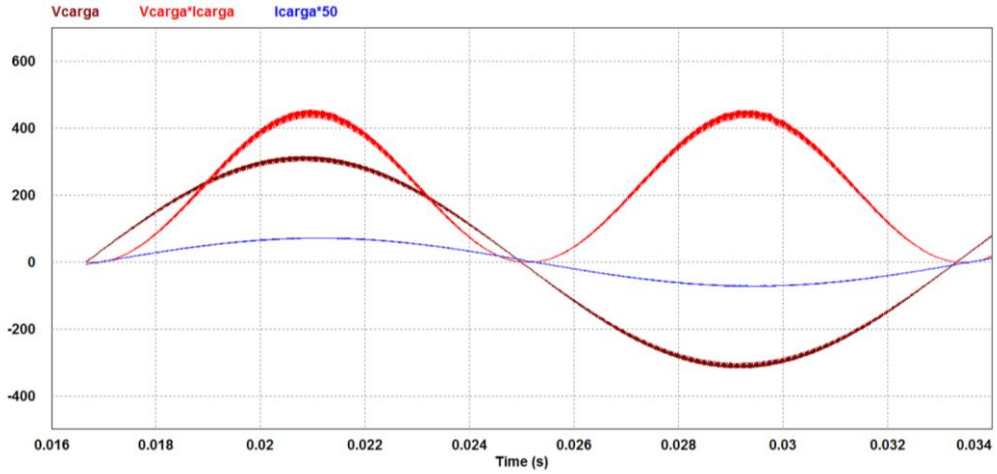


Figura 11 – Valores instantâneos para a tensão, corrente e potência na saída do conversor.
(Fonte: PSIM versão estudantil).

Pela Eq. (5) a potência média do conversor *flyback* será aproximadamente P_{med} = 200 W, para uma tensão de pico V_p = 311,1 V e corrente de pico I_p = 1,3 A,

O sinal de tensão que é amostrado com o sensor de tensão no capacitor de filtro de saída e a tensão de controle processado pelo dispositivo FPGA e enviado aos transistores S_1, S_2, S_3 e S_4. Este sinal de realimentação demonstra a capacidade que o inversor tem de gerar um sinal próximo ao sinal de referência senoidal amostrado da rede CA. Os resultados simulados no *flyback* em estudo são para um índice de insolação máximo sobre condições de máxima potência.

11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo, é apresentando uma nova topologia para um inversor *flyback* para sistemas fotovoltaicos interligados paralelamente aos grandes geradores da concessionária de energia de forma descentralizada e sem utilização de componentes para armazenamento (bancos de baterias). Adotando os índices de insolação máximo o inversor apresenta bons resultados simulados quanto ao nível de distorção harmônica e fator de potência. Para modulação do sinal de alta frequência é usado um transistor conectado ao primário de cada transformador. Os transistores S_1, S_2, S_3 e S_4, podem ser de baixo V_{DSS} em função da tensão de alimentação ser dividida por igual a cada transistor. Os diodos D_1, D_2, D_3 e D_4 oferecem proteção ao refluxo de potência da rede e atuam como bloqueadores de correntes.

O controle feito por dispositivo FPGA é promissor por apresentar certa facilidade em sua programação e por proporcionar um controle rápido ao inversor. Tais dispositivos estão se tornando ferramenta indispensável em processos de controle de automação alta complexidade de programação abrindo o acesso aos profissionais de nível técnico.

Este sistema foi desenvolvido de uma forma genérica, para que futuramente possa ser implantada na cidade de Limoeiro do Norte – CE. O ponto forte do trabalho está em auxiliar de forma direta aos consumidores interessados na área de pesquisa do presente trabalho. Observando os resultados obtidos, é possível afirmar que a arquitetura proposta neste trabalho mostra-se viável, tendo em vista seu baixo consumo de área e complexidade em relação a outros trabalhos nesta área.

REFERÊNCIAS

Abine - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira. São Paulo. 2012.

Amore, Roberto d'. VHDL: Descrição e Síntese de Circuitos Digitais. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

Barbi, I. Projetos de Fontes Chaveadas, 1. ed. Editora do Autor, 2001.

Bosch Solar Energy. Welcome to the pages of Bosch Solar Services, the new Service Organization for Bosch solar modules. [citado em 05 de dezembro 2013]. Disponível em: www.bosch-solarenergy.com.pt

Burger, B.; Rüther, R., 2006. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. Solar Energy, vol. 80, n. 1, pp. 32-45.

Brasil. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Balanço Energético Nacional 2012 – Ano base 2011: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2012.

Cresesb - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Edição especial. Rio de Janeiro. 2004.

Epia – European Photovoltaic Industry Association. Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016. maio de 2012.

Hart, Daniel W. Eletrônica de Potência: Análise e Projeto de Circuitos. Porto Alegre: McGrawHill, 2012.

Kasa, T.; Chen, L. "*Flyback* Inverter Controlled By Sensorless Current MPPTFor Photovoltaic Power System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 52, No. 4, August 2005.

Marques, F. N., Inversor Flyback a Quatro transistores controlado por um dispositivo FPGA para obter MPTT em sistemas fotovoltaicos. Dissertação de mestrado, Setor Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Uberlândia. Novembro 2008.

Rosemback, R. H., Conversor CC-CC Bidirecional BuckBoost Atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico. Dissertação de Mestrado, Setor de Tecnologia, Universidade Federal De Juiz De Fora, Novembro de 2004.

FLYBACK INVERTER FOR PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY SYSTEMS MONOPHASE CONNECTED ON GRID.

Abstract. This paper presents an interconnected photovoltaic generation system based to grid flyback DC-AC converter, and digital control developed by a FPGA device. Despite the low power this study contributes to search for alternatives in order to meet the requirements provided by the Brazilian energy matrix. The basis of the proposed system is the generation of electricity in a decentralized way, not using battery banks simultaneously connected to the network next to the consumers.

Key words: *FPGA, Digital Control, Flyback Converter, Power Generation, Energy Matrix, Photovoltaic Systems.*