



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/21  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – II**

**GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS- GPT**

**DESENVOLVIMENTO DE MICROINVERSORES PARA VIABILIZAR PLANTAS FOTOVOLTAICAS  
CONECTADAS NOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VISANDO A  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

**José Bione de Melo Filho(\*)  
CHESF**

**Andrea Sarmento Maia  
ESCOLA POLITÉCNICA – UPE**

**RESUMO**

Apresenta-se neste Informe Técnico (IT) a topologia de um microinversor monofásico a ser conectado à rede elétrica junto a sistemas fotovoltaicos de 270W até 330W. Este microinversor é composto por dois estágios de conversão: CC-CC e CC-CA. Para o estágio contínuo e alternado, implementou-se um conversor boost e uma ponte completa, respectivamente. Além disso, para dar mais robustez ao projeto, fez-se o controle do conversor CC-CC a partir da extração do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico e ao conversor CC-CA utilizou-se a modulação por largura de pulso senoidal. Detalhar-se-á, portanto, cada fase do projeto e as simulações resultantes.

**PALAVRAS-CHAVE**

Microinversor, Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica, Conversor CC-CC Boost, Conversor CC-CA Ponte Completa.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A capacidade instalada da matriz de energia elétrica brasileira é da ordem de 140 GW, tendo uma taxa de crescimento de 4% ao ano. Todavia, o sistema energético convencional não tem condições estruturais para atender esta demanda, tanto pela limitação dos recursos hídricos e fósseis, como pela rigorosa legislação ambiental. Há, portanto, a necessidade da inserção de novas fontes de energia elétrica. Dado ao grande potencial solar de irradiação do território brasileiro, os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica tornam-se uma alternativa atrativa economicamente. Além disso, a inclusão da geração distribuída no planejamento de expansão do setor energético possibilita aumentar progressivamente a oferta de energia elétrica e permite o acompanhamento de perto do crescimento da demanda energética.

Ademais, a geração distribuída poderá colaborar na viabilização de grandes empreendimentos energéticos, uma vez que estes necessitam de muitos anos para entrar em operação e, durante esse período, aumentos de demandas poderão ser supridos pela geração local de pequeno porte e de rápida instalação. Nos pequenos sistemas, tem-se menores impactos ambientais, há uma facilidade na obtenção das licenças ambientais de instalação e operação. É possível, ainda, usar geração distribuída em linhas de sobrecargas e com dificuldades de abastecimento de demandas adicionais. Além de que, minimiza perdas técnicas ao evitar o transporte de energia por extensas linhas de transmissão e distribuição. Com as redes inteligentes, será quebrado o paradigma do fornecimento de energia, poder-se-á consumir e, ao mesmo tempo, fornecer energia.

A implantação das redes inteligentes, por conseguinte, necessitará de diversas adaptações e inovações, uma destas será a inserção de um microinversor em cada painel fotovoltaico tanto em aplicações residenciais, como em usinas solares. Pois assim, o sistema de geração solar fotovoltaica será mais eficiente e independente do

(\*) Rua Delmiro Gouveia, n° 333 – sala C 234 - Bloco SEDE – CEP 50.761-901 Recife, PE, – Brasil  
Tel: (+55 81) 3229-2194 – Fax: (+55 81) 3229-3546 – Email: jbionef@chesf.gov.br

sombreamento. Já se tem diversos microinversores no mercado mundial, todavia nenhum combrindo as especificações da rede elétrica brasileira. Na Europa, América do Norte e Austrália tem-se uma boa aceitação do produto que está cada vez mais ascendente comercialmente.

Do projeto em estudo, um painel fotovoltaico de 300 W precisa ser conectado à rede elétrica monofásica de 220Vrms. Uma concepção de conversor de dois estágios é apresentada e suas principais formas de onda são obtidas através de simulação no software PSIM. Logo, tem-se como objetivo apresentar uma proposta de um conversor CC-CC e um conversor CC-CA para conectar o painel fotovoltaico de 300W à rede elétrica monofásica.

## 2.0 - METODOLOGIA

O sistema em estudo é o Módulo AC cuja composição é o painel fotovoltaico, o microinversor e o sistema de controle para rastreamento de máxima potência. Na FIGURA1, observa-se o diagrama de blocos do Módulo AC conectado à rede elétrica.

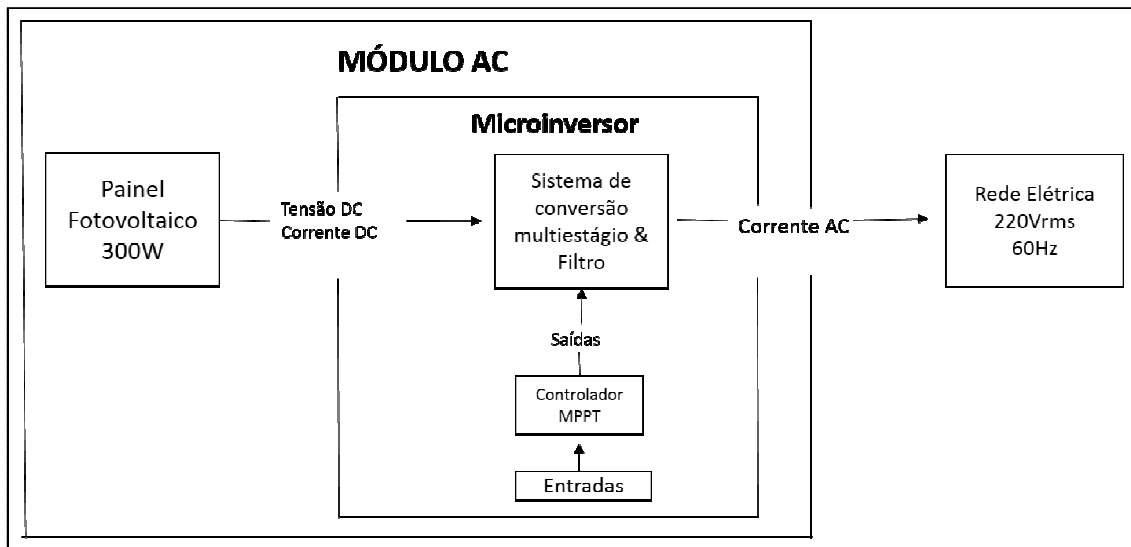


FIGURA1 – Diagrama de blocos do Módulo AC [1].

Na FIGURA 2, tem-se a topologia geral de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica com dois estágios de conversão. Essa estrutura permite que o conversor CC-CC realize o MPPT, enquanto o conversor CC-CA realiza as funções de inversão e conexão com a rede, cada conversor possui chaves adequadas para os níveis de tensão e de corrente elétrica de cada estágio. Já o filtro, é o responsável por mitigar as altas frequências e sintetizar uma corrente senoidal [2].

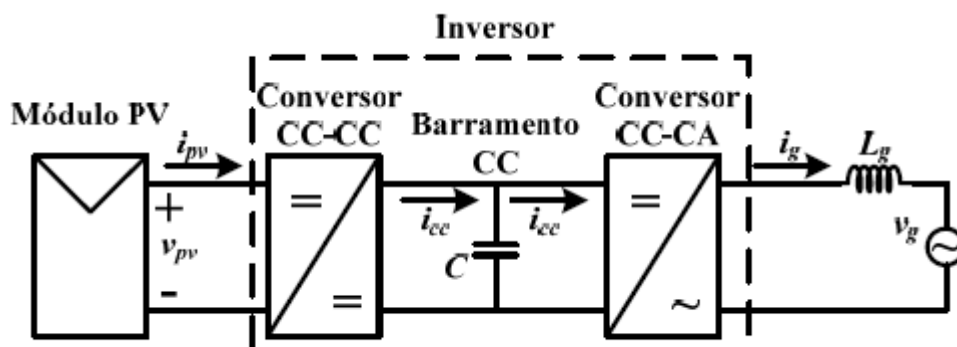


FIGURA 2 – Topologia geral de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica com dois estágios de conversão [2].

## 2.1 Conversor CC-CC Boost

Por ser a topologia mais utilizada e de implementação mais simples, escolheu-se a estrutura não isolada do tipo elevador para o conversor CC-CC do microinversor. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pode-se observar o conversor elevador.

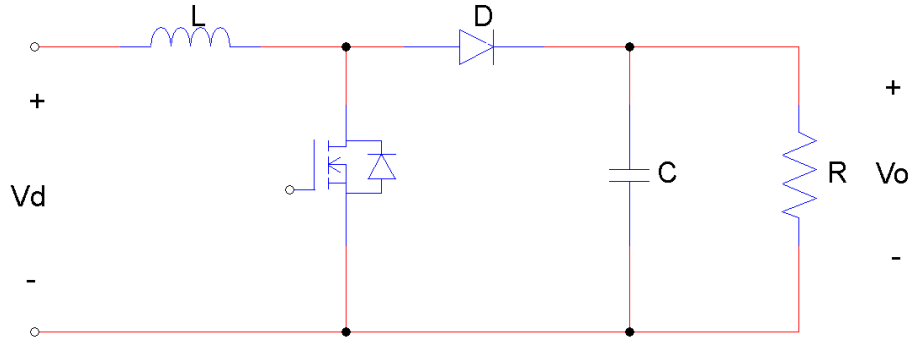


FIGURA 3 – Conversor CC-CC boost [3].

Quando a chave está fechada, aplica-se uma tensão positiva aos terminais do indutor, que acumula energia na forma de corrente. Quando a chave é aberta, a tensão em seus terminais se torna negativa e a energia armazenada é descarregada na carga [4].

Uma vez que no modo estacionário a integral da tensão em relação ao tempo ao longo de um período deve ser nula,

$$V_d t_{on} + (V_d - V_o) t_{off} = 0 \quad (1)$$

Dividindo ambos os membros por  $T_s$ , onde  $T_s = t_{on} + t_{off}$ :

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1 - D} \quad (2)$$

Em que  $D$  é a razão de trabalho de chaveamento em estado estacionário,  $V_o$  é a tensão de saída e  $V_d$  é a tensão de entrada do conversor *boost*.

A indutância e a capacitância a serem utilizadas estão definidas pelas Equações (3) e (4), respectivamente:

$$L = \frac{V_d D}{f_s (\Delta I_L \times I_L)} \quad (3)$$

$$C = \frac{I_o D}{f_s (\Delta V_o \times V_o)} \quad (4)$$

O modo de operação descontínuo ocorre quando o valor da corrente de carga é menor ou igual a zero no final de um dado período de comutação, portanto calcula-se o limite de operação, Equação 5 e 6.

$$I_{LB} = \frac{1}{2} I_L(\text{pico}) = \frac{V_o T_s}{2L} D(1 - D) \quad (5)$$

$$L_{\text{critico}} = L = \frac{V_o T_s}{2 I_{LB}} D(1 - D) = \frac{D V_d}{2 f_s I_{LB}} \quad (6)$$

A Tabela 1 mostra as especificações iniciais do conversor CC-CC elevador.

Tabela 1 – Especificações do Projeto do Conversor CC-CC elevador

Tensão de Entrada	$V_d = 36.7V$
Tensão de Saída	$V_o = 360V$
Frequência de Comutação	$f_s = 5KHz$
Ondulação da Corrente no Indutor	$\Delta I_L = 5\%$
Ondulação da Tensão de Saída	$\Delta V_o = 0,2\%$

Com os valores da Tabela 1 e utilizando as equações de (2) a (4), pôde-se encontrar os valores da indutância e capacitância do conversor CC-CC elevador. Na Tabela 2, portanto, pode-se verificar estes valores de projeto.

Tabela 2 – Valores teóricos do Conversor CC-CC elevador

Tensão de Entrada	$V_d = 36.7V$
Tensão de Saída	$V_o = 360V$
Frequência de Comutação	$f_s = 5KHz$
<i>DutyCycle</i>	$D = 0,89$
Indutância do conversor <i>Boost</i>	$L = 3.7mH$
Capacitância do conversor <i>Boost</i>	$C = 890\mu F$

## 2.2 Conversor CC-CA Ponte Completa

Para realizar a conversão da tensão contínua proveniente do painel fotovoltaico e adaptada pelo conversor CC-CC elevador de tensão será preciso acoplar-se um novo conversor estático à jusante, o conversor CC-CA ou inversor de tensão [5]-[10]. A topologia escolhida para o conversor CC-CA foi a estrutura em ponte completa com filtro, modulada senoidalmente, FIGURA 4.

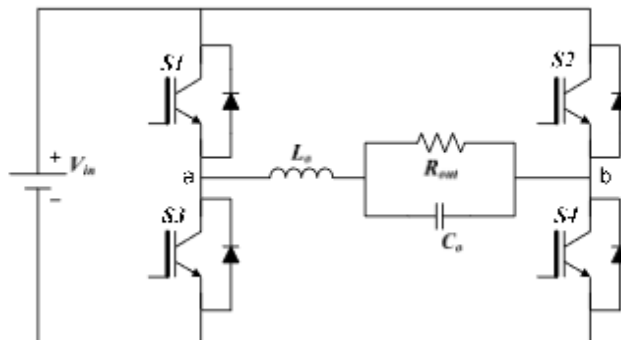


FIGURA 4 – Topologia do conversor CC-CA em Ponte Completa [8].

Este inversor de tensão, composto por quatro interruptores dispostos em forma de ponte e controlado por meio da variação senoidal da razão cíclica, tem a função de gerar, a partir do barramento de saída do conversor CC-CC, uma tensão senoidal com valor eficaz de 220V e frequência constante de 60Hz. Ao variar adequadamente a razão cíclica e fazer uso de um filtro adequadamente projetado, é possível impor à carga uma tensão senoidal de baixo conteúdo harmônico e amplitude controlada.

Na Tabela 3, tem-se as especificações a partir das quais será realizado o projeto do inversor em ponte completa. Na Tabela 4, pode-se verificar os valores de projeto.

Tabela 3: Especificações do Projeto do Conversor CC-CA em ponte completa.

Potência de Saída	$P_{out} = 300W$
Tensão de Entrada Nominal	$V_d = 360V$
Tensão de Saída Controlada	$V_o = 220V_{rms}$
Frequência da Senóide de Saída	$f_o = 60Hz$
Taxa de Distorção Harmônica	$THD = 5\%$
Ondulação Máxima de Corrente no Indutor	$\Delta I_{Lmax} = 0,5.I_o$
Frequência de Comutação	$f_s = 5KHz$
Estimativa de Rendimento	$\eta_{ca} = 90\%$

Tabela 4: Valores teóricos do Conversor CC-CA Ponte Completa.

	Valores Teóricos
Corrente Eficaz	$I_{out} = 1,36A$
Oscilação Máxima de corrente no indutor	$\Delta I_{Lmax} = 0,96A$
Corrente de pico no indutor	$I_{Lopk} = 2,34A$

### 2.3 Simulações do Microinversor

Para verificar a validade dos projetos, realizou-se simulações com o software PSIM. Iniciou-se, portanto, com o projeto do conversor CC-CC elevador. Na FIGURA 5, verifica-se o diagrama da simulação.

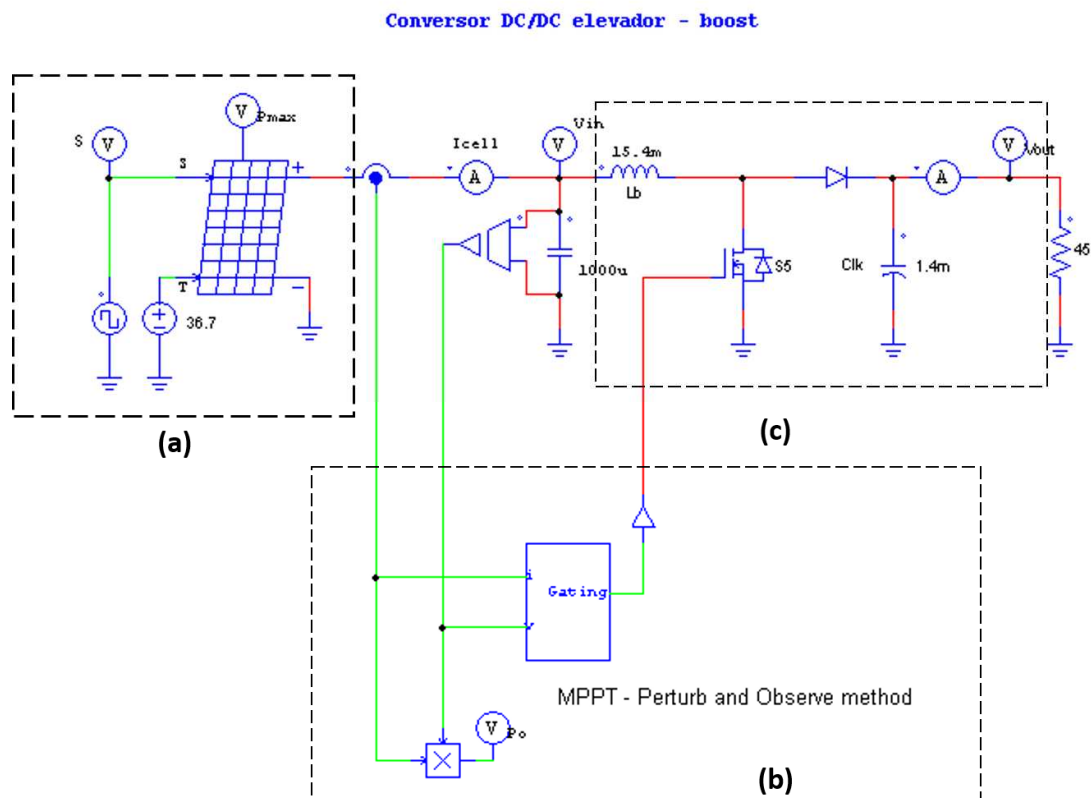


FIGURA 5 – Diagrama da simulação do Conversor CC-CC Elevador: (a) Modelo Físico do Painel Fotovoltaico YL300P-35b; (b) MPPT a partir do algoritmo P&O; (c) Conversor Boost Projetado

A partir do diagrama da FIGURA 5, fez-se uma simulação e pôde-se chegar a FIGURA6. Na Tabela 5, compara-se o valor projetado com o simulado do conversor elevador.

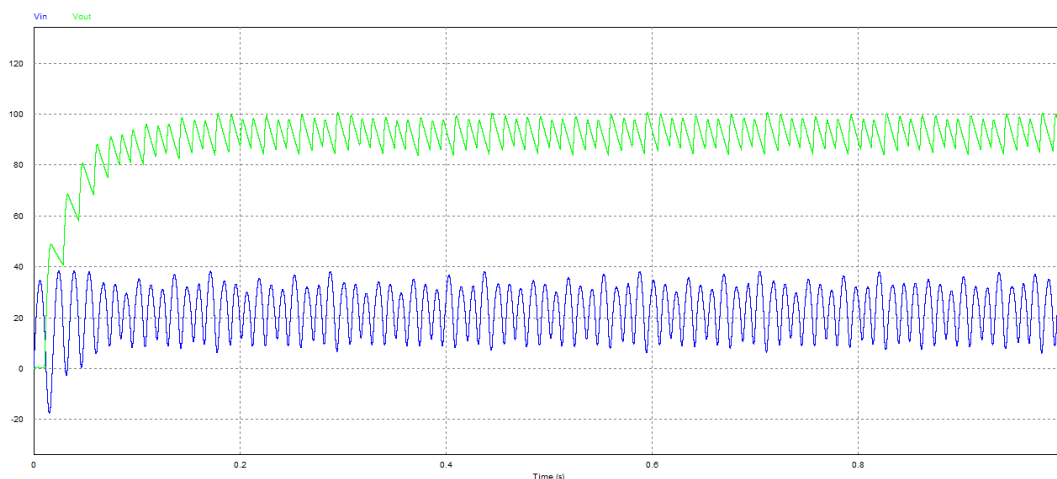


FIGURA6 – Simulação do Conversor CC-CC Elevador com software PSIM.

Tabela 5 – Comparativos entre os valores projetados e os valores simulados do Conversor CC-CC Elevador.

	Valores Projetados	Valores Simulados
Tensão de Entrada	$V_d = 36.7V$	$V'_d = 24,78V$
Tensão de Saída	$V_o = 100V$	$V'_o = 90,50V$
Frequência de Comutação	$f_s = 5KHz$	$f'_s = 5KHz$
<i>DutyCycle</i>	$D = 0,633$	$D' = 0,74$
Indutância do conversor <i>Boost</i>	$L = 15,4mH$	$L' = 15,4mH$
Capacitância do conversor <i>Boost</i>	$C = 1,4mF$	$C' = 1,4mF$

Analogamente, na FIGURA 7, tem-se o circuito do conversor CC-CA projetado. Na FIGURA 8, observa-se a curva da tensão de saída. E na Tabela 6, há o comparativo dos valores teóricos e simulados das correntes do inversor.

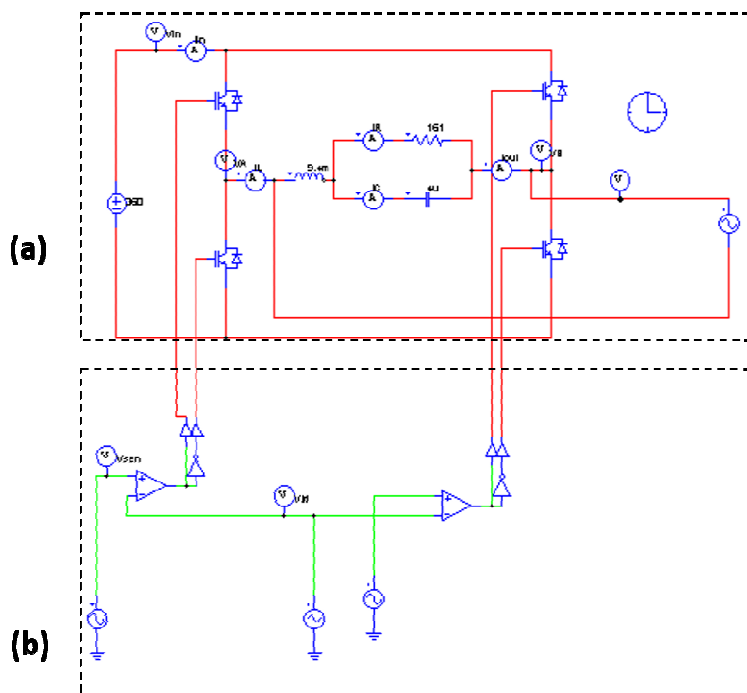


FIGURA 7 – (a) Conversor CC-CA Ponte Completa (b) Modulação modulação por largura de pulso senoidal (SPWM).

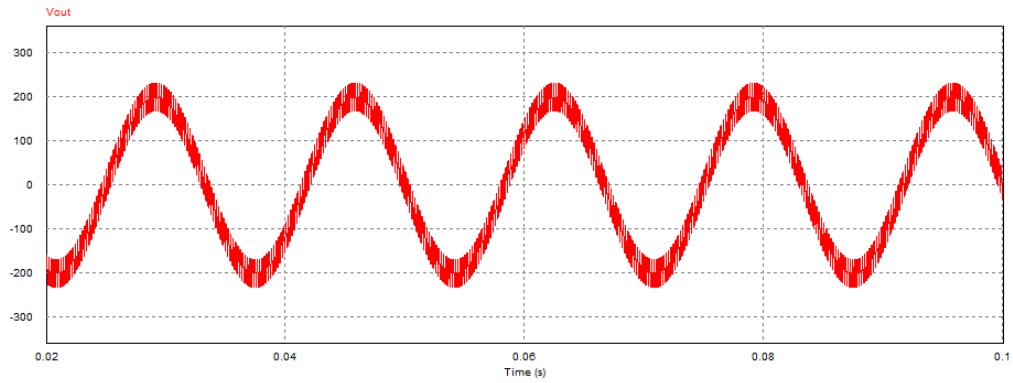


FIGURA 8 – Forma de onda da tensão de saída do Conversor CC-CA.

Tabela 6: Comparativo entre os valores das corrente teóricos e simulados.

	Valores Teóricos	Valores Simulados
Corrente Eficaz	$I_{out} = 1,36A$	$I_{out} = 1,39A$
Oscilação Máxima de corrente no indutor	$\Delta I_{Lmax} = 0,96A$	$\Delta I_{Lmax} = 0,98A$
Corrente de pico no indutor	$I_{Lpk} = 2,34A$	$I_{Lpk} = 2,46A$

Por fim, fez-se a simulação do microinversor completo. Na FIGURA 9 e FIGURA 10, observa-se o digrama das simulações no software PSIM e as curvas da tensão de entrada e de saída do microinversor, respectivamente.

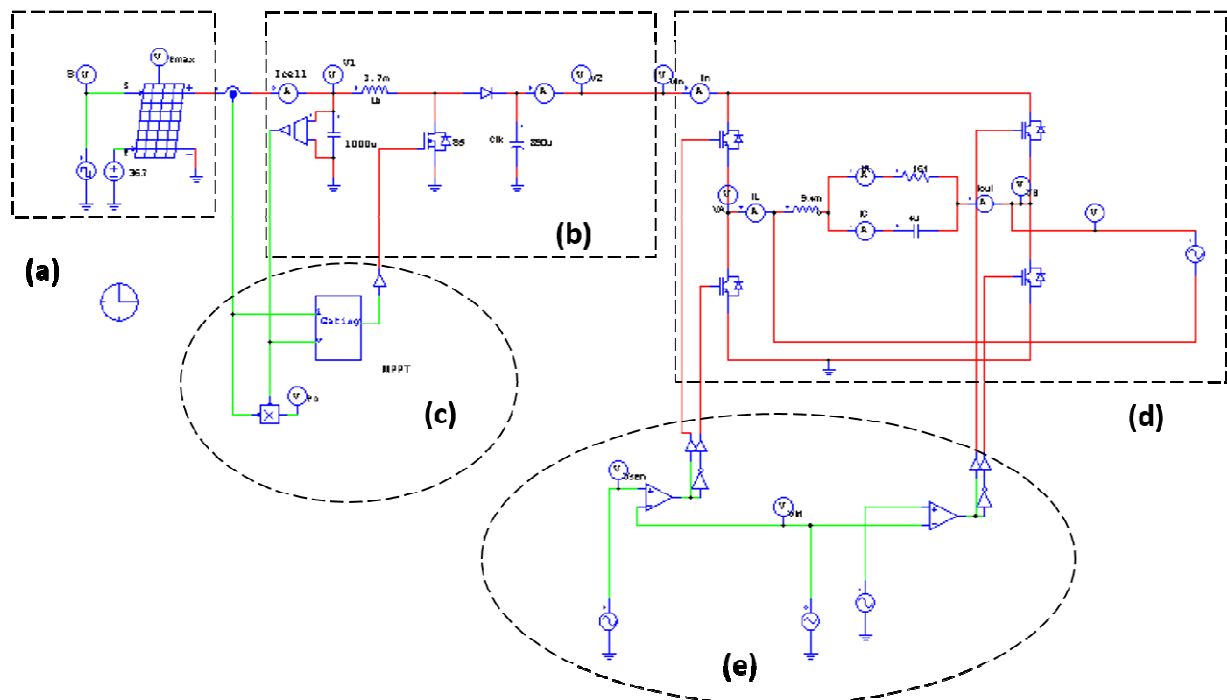


FIGURA 9 – Diagrama de simulação do microinversor: (a) PV; (b) Conversor CC-CC; (c) Controle do Ponto de Máxima Potência; (d) Conversor CC-CA; (e) Modulação por largura de pulso senoidal.

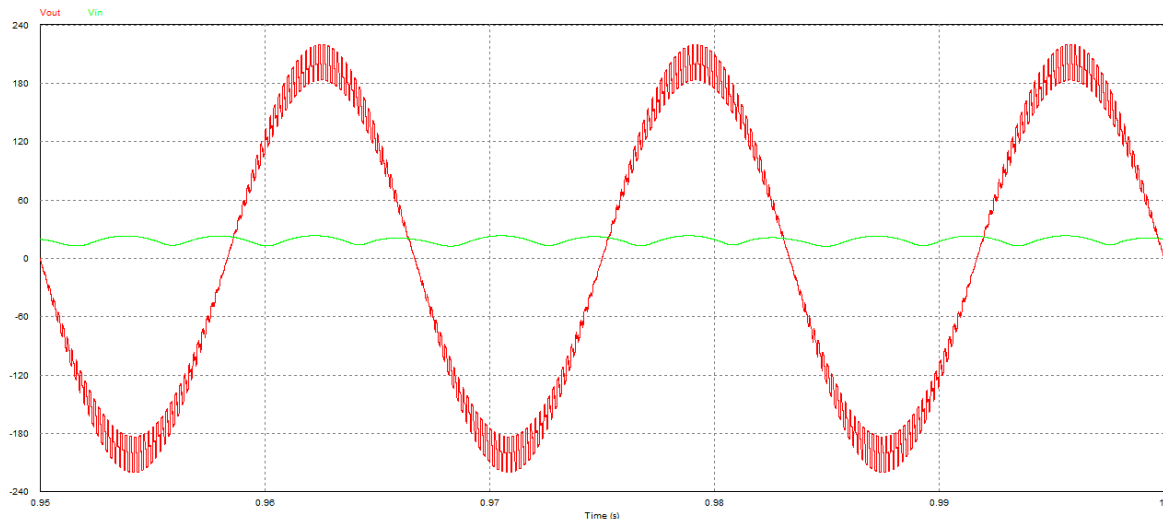


FIGURA10 – Curvas das Tensões de entrada (verde) e saída (vermelha) do microinversor.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresenta o projeto e a simulação de um microinversor de dois estágios com potência de 300 W e com controle do ponto de máxima potência. Ele, portanto, viabiliza plantas fotovoltaicas conectadas à rede elétrica, já que torna cada painel fotovoltaico independente e, por conseguinte, mais eficiente.

Com os microinversores, poder-se-á implantar sistemas auto-suficientes (casas, apartamentos, lojas) cujos objetivos são diminuir o gasto com energia (consumidor), com transmissão e distribuição (concessionárias) e, por fim, com aumento urgente de demanda. Há um estímulo à geração distribuída, aos sistemas de redes inteligentes.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SANTOS, H. A.; NETO, J. A. F.; ANTUNES, F. L. M. Projeto e Simulação de Conversor C.C. –C.A. Monofásico para Conexão de Geração Fotovoltaico à Rede Elétrica, Recife, 2014.
- [2] GAZOLI, J. R. et al. Micro-Inversor para Sistema Fotovoltaico. Energy Conference, 2013, Brasil.
- [3] KUO, M. T.; LU, S. D. A Study of DC-AC Inverter Optimization for Photovoltaic Power Generation System. IEEE, 2012.
- [4] KJAER, S. B.; BLAABJERG, F. Design Optimization of a Single Phase Inverter for Photovoltaic Applications. IEEE 2003; 1183-1190.
- [5] XUE, J.; YIN, Z.; SONG, Q. Analyse and Research of the inverter for Grid-connecting photovoltaic system, China, 2008.
- [6] KIM, E. S.; KIM, D.W. Performance Testing Grid-Connected Photovoltaic Inverter Based on an Integrated Electronic Protection Device. IEEE 2009.
- [7] MEKHILEF, S.; AHMED, M.E; YOUNIS, M. A. A. Performance of Grid Connected Photovoltaic Inverter with Maximum Power Point Tracker and Power Factor Control. IEEE 2008; 001129-001134.
- [8] HAIBO, W.; YANBO, C.; LIHUA, Z. Research and Development of Photovoltaic Grid-Connected Inverter Based on DSP. Universidade Tiajin, China.
- [9] CHIU, H. J. et al. A Module-Integrated Isolated Solar Microinverter. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 60, n. 2, Fevereiro 2013, p.781-788.
- [10] MOHAN, N. Eletrônica de Potência – Curso Introdutório. 1. Ed. Rio de Janeiro: LTC:2014.