

Análise do microinversor baseado no conversor \acute{c} uk para sistemas fotovoltaicos

Analys of a microinverter based on \acute{c} uk converter for photovoltaic systems

RESUMO

Israel José dos Santos Barbosa
barbosa.israel@icloud.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Leonardo Poltronieri Sampaio
sampaio@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

OBJETIVO: Este trabalho tem como objetivo geral, estudar, projetar e implementar via simulação computacional um microinversor baseado no conversor CC-CC \acute{c} uk. **MÉTODOS:** Este trabalho apresenta o estudo e análise do emprego do conversor \acute{c} uk em sistemas fotovoltaicos conectados rede elétrica monofásica. Neste sentido, o conversor \acute{c} uk é controlado de forma realizar o seguimento do ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico, bem como produzir uma corrente senoidal retificada no indutor de saída. **RESULTADOS:** Através de simulação em ambiente computacional o microinversor é avaliado empregando o modelo matemático que representa um arranjo fotovoltaico, bem como a modelagem do conversor considerando a injeção de corrente na rede elétrica. **CONCLUSÃO:** Por meio de resultados de simulação, o estudo teórico e equacionamento do conversor são avaliados, bem como a viabilidade e funcionamento do conversor são demonstradas.

PALAVRAS-CHAVE: Conversor. \acute{c} uk, Sistemas. Fotovoltaicos. Microinversor.

ABSTRACT

OBJECTIVE: This work, to study, design and implement by means of computational simulation a microinverter based on the DC-DC \acute{c} uk converter. **METHODS:** This work presents the study and analysis of the use of the \acute{c} uk converter in photovoltaic systems connected to a single-phase utility grid. Therefore, the \acute{c} uk converter is controlled in order to perform the maximum power point tracking of the photovoltaic array, as well as to produce a rectified sinusoidal current in the output inductor. **RESULTS:** by means of simulation results, the microinverter is evaluated employing the mathematical model of the photovoltaic array, as well as the converter modeling including the active grid-current injection. **CONCLUSION:** By simulation results, the theoretical study and the converter modeling are both validated, as was as the feasibility and operation of the converter are demonstrated.

KEYWORDS: \acute{c} uk. Converter. Photovoltaic. Systems. Microinverter.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

Diante da crescente demanda energética, aliada a questões de redução de impactos ambientais, segundo estudo realizado pela British Petroleum (2019, p. 2), se verificou um aumento na procura por fontes alternativas de energia elétrica nos últimos anos. Desta forma, se faz necessário aumentar a procura de fontes alternativas de energia, bem como, estudos para garantir maiores eficiências dos conversores de fontes alternativas de energia elétrica.

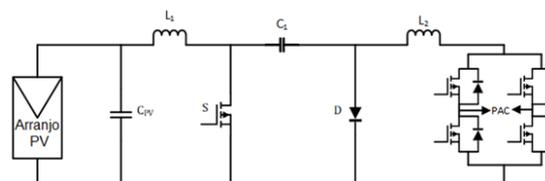
Para garantir o fornecimento da energia CC gerada pelo arranjo PV ao sistema elétrico, é necessário condicionar e converter em energia de Corrente Alternada (CA), dentro dos indicadores de Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Dependendo do caso estudado, existem algumas configurações para o processamento da energia PV, utilizando diferentes topologias de conversores estáticos operando em baixa ou alta frequência. Essas topologias de conversores são divididas em: único estágio ou duplo estágio (RODRIGUES *et al.*, 2003, p. 1).

Neste trabalho será adotada a topologia de duplo estágio. Normalmente, no primeiro estágio, CC-CC, são empregados conversores do tipo Boost ou Buck-Boost. O conversor CC-CC utilizado será o conversor Ćuk. Esta topologia permite controlar as correntes de entrada e saída do conversor. Alguns problemas apresentados nos conversores convencionais como pulsação nas correntes de entrada e saída não são observados neste conversor. Além do mais, foi concebido para propiciar altos rendimentos, pouca interferência eletromagnética, excelente resposta dinâmica, tamanho e peso reduzidos (JAIN *et al.*, 2007, p. 893).

No estágio CC-CA será empregado o inversor unfolding (DE MORAIS, 2017, p. 29), onde estaria operando na frequência da rede elétrica, transformando a corrente senoidal retificada em uma forma de onda senoidal completa.

O microinversor baseado no conversor Ćuk, Figura 2, reúne todas as vantagens do conversor estudado, como indutores de menor porte. Apesar de acumular algumas vantagens, projetar o controle deste conversor utilizando técnicas clássicas de controle não é fácil, devido ser difícil determinar sua função de transferência, pois possui quatro elementos armazenadores de energia, implicando em um sistema de quarta ordem (KNIGHT *et al.*, 2006, p. 1107).

Figura 1 - Microinversor baseado no conversor Ćuk



Fonte: Autoria Própria (2020)

Alguns autores estudaram este conversor dentre eles Cabral (2016, p. 45) e Lohmann (2017, p. 21). Porém, com o microinversor que se propõe a análise e estudo nesse trabalho será executado algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), além disso, a corrente do indutor de saída será controlada em forma de seno retificado, invertida em uma onda senoidal completa e injetada na rede elétrica.

Diante disso, a topologia do microinversor baseado no conversor CC-CC Ćuk irá contribuir no campo de pesquisa da eletrônica de potência. Além disso, o conversor será modelado matematicamente, com isso poderão ser empregadas técnicas de controle clássico. Por possuir quatro elementos armazenadores de energia este conversor retorna quarta ordem, com isso, sua modelagem matemática é complexa, logo, os métodos empregados neste trabalho ajudarão na aplicabilidade de conversores análogos ao conversor Ćuk.

METODOLOGIA

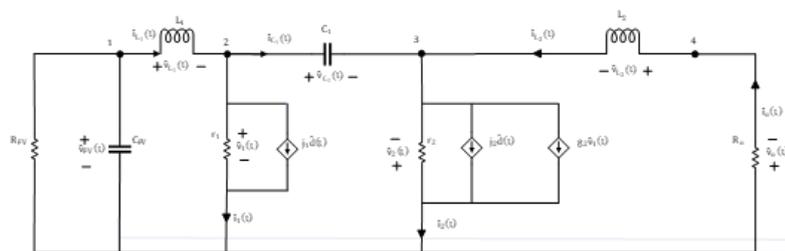
A análise do microinversor Ćuk é baseada no conversor CC-CC Ćuk, visto que, o inversor CC-CA *unfolding* servirá para inverter a forma de onda senoidal retificada em uma onda senoidal completa. Diante disso, a análise qualitativa, quantitativa resposta em frequência e modelo AC em pequenos sinais, será baseada no conversor Ćuk operando no Modo de Condução Descontínuo (MCD).

Toda análise qualitativa foi baseada em Cabral (2016, p. 45), onde se analisou as formas de ondas ideais, conhecendo-se assim, o funcionamento de cada elemento armazenador de energia e semicondutores.

Conhecendo-se o comportamento do conversor no MCD, em regime permanente, faz-se necessário estudar o conversor em regime transitório, caso contrário, o sistema poderia enfrentar instabilidade, para isso, será tomando Erickson *et al.* (2001, p. 409) como referencial, para determinação do modelo AC em pequenos sinais. O modelo escolhido para estudo foi o do resistor sem perdas.

A Figura 3, representa o modelo AC em pequenos sinais para o conversor Ćuk operando no MCD. Utilizando as leis Kirchhoff, o circuito é resolvido e cada malha é organizada em um sistema de equações. Sendo assim, possível determinar as Funções de Transferências (FT). (FEMIA *et al.*, 2009, p. 4473).

Figura 2 - Circuito equivalente em pequenos sinais conversor Ćuk com resistor R_{FV} e capacitor de desacoplamento C_{FV}



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Eq. (1) representa o sistema de equações que descreve o comportamento dos elementos do circuito mostrado na Figura 3 (BARBOSA, 2020, p. 49).

$$\begin{bmatrix} L_1 s + r_1 & 0 & -C_1 r_1 s & -1 \\ -g_2 r_2 r_1 & L_2 s + r_2 + R_o & C_1 r_2 (g_2 r_1 + 1) s & 0 \\ -r_1 (r_2 g_2 + 1) & r_2 & s C_1 (g_2 r_2 + r_1) + C_1 r_2 s + 1 & 0 \\ R_{FV} & 0 & 0 & C_{FV} R_{FV} s + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{L_1}(s) \\ \hat{I}_{L_2}(s) \\ \hat{V}_{C_1}(s) \\ \hat{V}_{C_{FV}}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 r_1 \\ r_2 (j_2 - g_2 j_1 r_1) \\ r_1 (-g_2 j_1 r_2 - j_1) + r_2 j_2 \\ 0 \end{bmatrix} \hat{D}(s) \quad (1)$$

Resolvendo o sistema de equações (1), obtém-se a FT que relaciona a corrente do indutor de saída L_2 com a razão cíclica $\hat{D}(s)$. A Eq. (2) representa a FT $G_{id} = \hat{I}_{L_2}(s)/\hat{D}(s)$.

$$G_{id} = \frac{\alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4}{\beta_1 s^4 + \beta_2 s^3 + \beta_3 s^2 + \beta_4 s + \beta_5} \quad (2)$$

Os Coeficientes dos polinômios da Eq. (2), são representados pela Eq. (3).

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= C_1 C_{FV} L_1 R_{FV} j_1 r_1 r_2 + C_1 C_{FV} L_1 R_0 j_2 r_1 r_2 \\ \alpha_2 &= C_1 L_1 j_1 r_1 r_2 + C_1 L_1 j_2 r_1 r_2 + C_{FV} L_1 R_{FV} j_2 r_2 - C_{FV} L_1 R_{FV} g_2 j_1 r_1 r_2 + 2 C_1 C_{FV} R_{FV} j_2 r_1^2 r_2 \\ \alpha_3 &= 2 C_1 j_2 r_1^2 r_2 + L_1 j_2 r_2 + C_1 R_{FV} j_2 r_1 r_2 + C_1 R_{FV} j_1 r_1 r_2 + C_{FV} R_{FV} j_2 r_1 r_2 - L_1 g_2 j_1 r_1 r_2 \\ \alpha_4 &= j_2 r_1 r_2 + R_{FV} j_2 r_2 \\ \beta_1 &= C_1 C_{FV} L_1 L_2 R_{FV} (g_2 r_1 r_2 + r_1 + r_2) \\ \beta_2 &= C_1 [2 R_{FV} L_2 C_{FV} (r_1^2 + r_2 g_2 r_1^2) + C_{FV} L_1 L_2 R_{FV} + \dots \\ &\quad r_1 [L_1 L_2 (g_2 r_2 + 1) + C_{FV} R_{FV} (L_1 R_0 + r_2 (L_1 R_0 g_2 + L_1 + L_2))] \\ \beta_3 &= C_1 \left[r_2 (L_1 R_0 + L_2 R_{FV}) + r_1 \left(\frac{L_1 R_0 + r_2 (L_1 R_0 g_2 + L_1 + L_2) + \dots}{R_{FV} (r_2 (L_2 g_2 + C_{FV} R_0) + L_2)} \right) \right] + \dots \\ \beta_4 &= C_1 [R_{FV} R_0 r_2 + r_1 (R_0 r_2 + R_{FV} (R_0 g_2 r_2 + R_0 + r_2) + r_1^2 (2 R_0 g_2 r_2 + 2 R_0 + 2 r_2))] + \dots \\ \beta_5 &= \frac{r_1 (C_{FV} R_{FV} (R_0 + r_2) + L_2) + L_1 (R_0 + r_2) + L_2 R_{FV}}{(R_0 + r_2) (R_{FV} + r_1)} \end{aligned} \quad (3)$$

A FT que relaciona a tensão de entrada do capacitor C_{FV} com a corrente do indutor de saída L_2 . Para isto, em primeiro lugar, deve-se resolver Eq. (1) relacionando a tensão de entrada com a razão cíclica. A FT de interesse se obtém multiplicando $\widehat{V}_{C_{FV}}(s)/\widehat{D}(s)$ pela Eq. (2). Com isso, Eq. (4) representa a FT G_{vi} .

$$G_{vi} = \frac{Y_1 s^2 + Y_2 s + Y_3}{\alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4} \quad (4)$$

O denominador da Eq. (4) é igual ao numerador da Eq. (3). Os coeficientes do polinômio do numerador da Eq. (4) são dados pela Eq. (5).

$$\begin{aligned} Y_1 &= \frac{R_{FV} C_1 L_2 r_1 r_2 j_2 - 2 R_{FV} C_1 L_2 j_1 r_1 r_2 - \dots}{C_1 L_2 j_1 r_1 R_{FV} r_2 - 2 C_1 L_2 g_2 j_1 r_1^2 r_2 R_{FV}} \\ Y_2 &= \frac{R_{FV} C_1 R_0 j_2 r_1 r_2 - R_{FV} C_1 R_0 j_1 r_1 r_2 - 2 R_{FV} C_1 R_0 j_1 r_1^2 r_2 - \dots}{2 R_{FV} C_1 j_1 r_1^2 r_2 - 2 C_1 R_{FV} R_0 j_1 r_1^2 - R_{FV} L_2 r_1 r_1} \\ Y_3 &= -R_{FV} R_0 j_1 r_1 - R_{FV} j_1 r_1 r_2 \end{aligned} \quad (5)$$

RESULTADOS E SIMULAÇÕES

O sistema completo do microinversor \acute{C} uk, Figura 1, foi simulado em ambiente computacional *Simulink*[®]. Com isso, foi possível analisar a dinâmica do sistema, modelar, obter figuras e grandezas elétricas pertinentes à análise do sistema. Os parâmetros de projeto para o conversor \acute{C} uk, são mostrados na Tabela 1. Os elementos armazenadores foram determinados levando Cabral (2016, p. 58) em consideração. Para L_2 e C_1 se considerou 10% e 70% de ondulação.

Tabela 1 - Especificações de Projeto Conversor \acute{C} uk

Grandeza	Valor
Potência de saída: P_s	1[kW]
Tensão de Entrada: V_G	130[V]
Tensão Eficaz Rede Elétrica: V_{RMS}	127[V]
Frequência Rede Elétrica: f_R	60[Hz]
Frequência de Chaveamento: f_S	50[kHz]
Indutor de Entrada: L_1	41,36[μ H]
Indutor de Saída: L_2	1,60[mH]
Capacitor Intermediário: C_1	0,432[μ F]
Capacitor de Desacoplamento: C_{FV}	3[mF]
Resistor Fotovoltaico: R_{FV}	15,5[Ω]

Fonte: Autoria Própria (2020)

Com isso, os parâmetros do modelo do resistor sem perdas podem ser determinados, levando em consideração as equações demonstradas Erickson *et al.* (2001, p. 422). A indutância (L_{eq}) e resistência (R_{eq}) equivalente, foram iguais a 19,76[μ H] e 8,07[Ω], respectivamente. Os parâmetros do modelo resistor sem perdas são: $j_1 = 65,10$; $j_2 = 33,24$; $r_1 = 8,07[\Omega]$; $r_2 = 16,20[\Omega]$; $g_2 = 0,127$.

Aplicando os valores para os parâmetros do modelo do resistor sem perdas, elementos armazenadores de energia, tem-se a Eq. (6), que representa a FT $\hat{I}_{L_2}(s)/\hat{D}(s)$.

$$\frac{\hat{I}_{L_2}(s)}{\hat{D}(s)} = \frac{4,997 \times 10^{-9} s^3 + 8,791 \times 10^{-4} s^2 + 195,8s - 3730}{2,596 \times 10^{-14} s^4 + 1,858 \times 10^{-8} s^3 + 8,32 \times 10^{-4} s^2 + 11,82s + 747,6} \quad (6)$$

De maneira análoga a Eq. (7) representa a FT $\hat{V}_{C_{PV}}(s)/\hat{I}_{L_2}(s)$.

$$\frac{\hat{V}_{C_{PV}}(s)}{\hat{I}_{L_2}(s)} = \frac{3,185 \times 10^{-4} s^2 + 16,95s + 2,554 \times 10^{-5}}{4,997 \times 10^{-9} s^3 + 8,791 \times 10^{-4} s^2 + 195,8s - 3730} \quad (7)$$

Com isso, pode-se determinar os controladores proporcionais integrais (PI) para cada malha de controle foi utilizando Angélico *et al.* (2014, p. 2648). Para malha de Corrente foram determinados os ganhos $\kappa_i = 497,64$ e $\kappa_p = 0,05$. Para malha de Tensão foram determinados os ganhos $\kappa_i = 3,49$ e $\kappa_p = 0,24$. Cada FT foi simulada via *MatLab*[®], aplicado o degrau unitário, mostrando que o controle é estável.

O sistema foi simulado operando com o arranjo fotovoltaico, capacitor de desacoplamento e a rede elétrica. Algumas grandezas foram aferidas via simulação. Para analisar a estabilidade do circuito, foi simulado um sombreamento parcial, via degrau de carga. Todos os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Grandezas elétricas aferidas via simulação. Teste Rede Elétrica

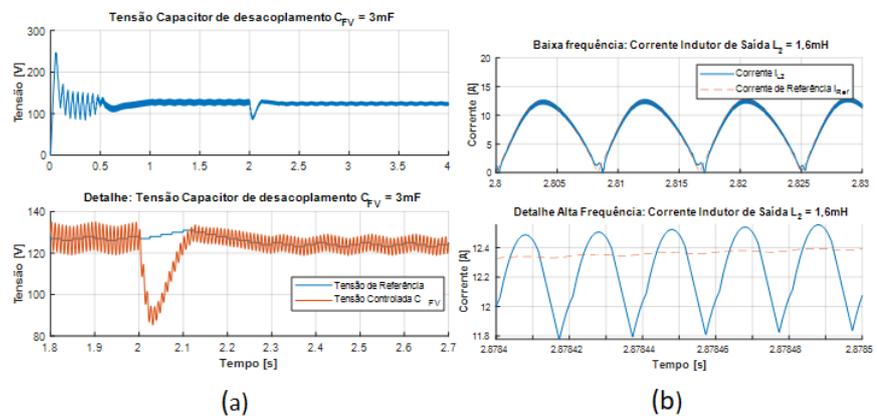
Grandeza	0 a 2[s]	2 a 4 [s]
V_{PV} [V]	127,10	123,60
I_{L_2} [A]	13,59	7,99
P_{IV} [kW]	1,98	1,15
I_{PV} [A]	15,55	9,31
I_{Rede} [A]	21,30	12,51

Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 3(a) mostra o comportamento do controle da tensão do capacitor de desacoplamento na entrada conversor. Uma queda na potência fornecida pelo sistema PV foi simulada por um degrau em $t = 2s$. Se observa que rapidamente o sistema entra em regime acompanhando a tensão de referência ($V_{ref} = 130[V]$).

A Figura 3(b) mostra o comportamento das correntes do indutor L_2 e de referência (I_{Ref}), podendo ser observado que ambas são similares e apresentam comportamento em baixa frequência formando um seno retificado. Analisando o espectro harmônico da corrente do indutor de saída, verificou-se que existe uma componente de 120[Hz], com amplitude de 5,28[A]. Esta componente harmônica distorce a forma de onda de corrente injetada na rede elétrica, contribuindo com o aumento de sua taxa de distorção harmônica. A malha de controle de tensão é responsável por esse comportamento, quanto menor for a frequência de cruzamento, menor será a amplitude dessa componente harmônica.

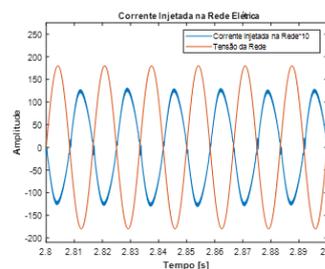
Figura 3 - (a) Tensão controlada capacitor de desacoplamento. (b) Corrente controlada, indutor de saída L_2 .



Fonte: Autoria Própria (2020)

A Figura 4 mostra o comportamento da corrente elétrica injetada na rede elétrica. Através desta forma de onda, comprova-se o que foi explicado a respeito da componente harmônica de 120[Hz], que distorceu o formato da corrente injetada na rede elétrica, contribuindo com o aumento da taxa de distorção harmônica $THD = 5,48\%$.

Figura 4 - Tensão e corrente injetada na rede elétrica



Fonte: Autoria Própria (2020)

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo e modelagem de um microinversor baseado no conversor $\dot{C}uk$ operando no MCD. A modelagem no MCD facilitou o procedimento de sintonização dos ganhos do controlador, bem como na reprodução de uma corrente senoidal retificada na saída do conversor, quando comparado com o MCC.

Por meio de resultados de simulação verificou-se que o conversor operou em conformidade com o estudo teórico realizado. A corrente injetada na rede elétrica possui baixas distorções harmônicas.

Este conversor se torna uma possibilidade de uso em substituição ao sistema tradicional duplo estágio, uma vez que o inversor de saída neste conversor opera em baixa frequência, apresentando menores perdas por comutação.

REFERÊNCIAS

ANGÉLICO, B. A.; CAMPANHOL, L. B. G.; SILVA, S. A. O. Proportional–integral/proportional–integral–derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. **IET Power Electronics**, v. 7, n. 10, p. 2647–2659, 2014.

BARBOSA, I. J. S. **Estudo e análise do microconversor cuk para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica monofásica**. 2020, 90 f, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2020.

BP Statistical Review of World Energy 2019. **Statistical analysis**, [S. l.], n. 68, p. 64, 13 jun. 2019. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>. Acesso em: 23 out. 2019.

CABRAL, H. G. **Estudo e desenvolvimento de um microinversor empregando o conversor cuk para microgeração fotovoltaica**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - PUCRS, Porto Alegre, 2016.

DE MORAIS, J. C. S. **Desenvolvimento de um microinversor conectado à rede baseado na integração do conversor cuk com uma estrutura de indutores chaveados**. 2017. 163 f. Dissertação - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIĆ, D. **Fundamentals of power electronics**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2001.

FEMIA, N.; PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M. A Technique for Improving P&O MPPT Performances of Double-Stage Grid Connected Photovoltaic Systems. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 56, n.11, p. 4473-4482, 2009.

JAIN, S.; AGARWAL, V. A single-stage grid connected inverter topology for solar pv systems with maximum power point tracking. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 22, n. 5, p. 1928-1940, 2007.

KNIGHT, J.; SHIRSAVAR, S.; HOLDERBAUM, W. An improved reliability cuk based solar inverter with sliding mode control. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 21, n. 4, p. 1107-1115, 2006.

LOHMANN, A. L.; TONIN, C. Z.; NAKAMURA, D. Y. **Microinversor Cuk de estágio único para aplicação ao em energias renováveis.** 68 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

RODRIGUES, M. C. B.; TEIXEIRA, E. C.; BRAGA, H. A. C. Uma Visão Topológica Sobre Sistemas Fotovoltaicos Monofásicos Conectados à Rede de Energia Elétrica. *In: V Congresso Latino Americano: Geração e Transmissão de Energia Elétrica*, 5., 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: CLAGTEE, 2003.