

Raul Henrique Santana

**Estudo Comparativo de Topologias de
Microinversores Para Painéis Fotovoltaicos
Conectados à Rede Elétrica**

Belo Horizonte

2018

Raul Henrique Santana

Estudo Comparativo de Topologias de Microinversores Para Painéis Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Pedro Francisco Donoso-Garcia

Belo Horizonte

2018

Sumário

1	INTRODUÇÃO	5
1.1	Motivação	5
1.2	Objetivo	7
1.3	Estrutura Geral do Trabalho	7
2	ESTADO DA ARTE	9
2.1	Modelo do PV	9
2.2	Conversores Estáticos CC/CC	10
2.2.1	Conversor Ćuk Convencional	10
2.2.2	Conversor Ćuk Entrelaçado	11
2.3	Conversores CC/CA - Inversores tipo fonte de tensão (VSI)	13
2.3.1	Inversor em Ponte Completa	13
2.3.2	Inversor em Meia Ponte	13
2.4	Conversor Integrado (CC/CA)	14
2.4.1	Conversor Ćuk Integrado	14
2.5	Rastreamento de máxima potência (MPPT)	14
2.6	Modulação PWM	14
2.7	PLL E FILTRO???????	14
3	METODOLOGIA	15
4	RESULTADOS	17
5	CONCLUSÃO	19
	REFERÊNCIAS	21

1 Introdução

1.1 Motivação

A geração de energia elétrica no Brasil é fortemente caracterizada por um modelo geração centralizada e faz uso do conceito de economias de escala ([MACHADO; SOUSA; HEWINGS, 2016](#)). Nesse modelo, plantas de grande porte geram toda a energia, que é transmitida e distribuída aos consumidores, ou seja, a energia é gerada de forma centralizada e posteriormente entregue ao destino final. Contudo, além dos riscos e danos ambientais ocasionados por tais centrais geradoras, com foco no cenário brasileiro para a área alagada pelas usinas hidrelétricas, principal fonte de energia do país, está associada à esta estrutura a necessidade de altos investimentos relacionados à distribuição da energia gerada, tanto no condicionamento com a construção e manutenção de subestações quanto na transmissão.

Nesse cenário, a geração distribuída de energia elétrica vem se mostrando cada vez mais uma alternativa viável. Uma rede de geração distribuída pode ser definida como um conjunto de fontes de energia conectadas diretamente à rede de distribuição ou ao cliente ([ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001](#)).

Segundo a **ANEEL** (Agência Nacional de Energia Elétrica), desde 2012, com a vigência da solução normativa [Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012](#), é permitido ao consumidor brasileiro gerar sua própria energia elétrica, se esta for proveniente de fontes renováveis ou cogeração qualificada. Uma maior adesão da população à GD tem como impactos esperados, além da diversificação da matriz energética nacional, a redução do carregamento e das perdas nas redes, o adiamento de investimentos em expansão e distribuição e a redução do impacto ambiental ([ANEEL, 2018](#)).

A principal vantagem na adesão ao sistema distribuído para o consumidor final é a capacidade de fornecer seu excedente de produção à rede local, de modo a obter uma redução ainda maior do valor pago à concessionária de energia no fim de cada mês.

No conjunto de fontes renováveis, destaca-se a energia fotovoltaica, que converte a energia de raios solares em eletricidade através de painéis fotovoltaicos (PV). Além de utilizar recurso abundante e não poluir durante a geração, sistemas geradores fotovoltaicos necessitam de pouca manutenção e utilizam pouco espaço, podendo ser instalados nos tetos dos imóveis. Apesar disso, o custo de instalação destes geradores ainda é elevado e, portanto, é necessário maximizar a eficiência do sistema.

Um painel fotovoltaico apresenta uma resposta não linear à incidência solar sobre sua área e, para que seja extraído deste a máxima potência possível devem ser utiliza-

dos algoritmos de rastreamento de ponto de máxima potência (MPPT). Aliados a estes algoritmos também se fazem necessários inversores de alto rendimento, responsáveis por condicionar a tensão contínua fornecida pelos painéis em tensão alternada que pode ser injetada diretamente na rede elétrica.

Por serem o elo de ligação entre o painel fotovoltaico e o sistema elétrico residencial e da concessionária, em sistemas *on-grid* além de representarem uma parcela considerável do custo total da implantação do gerador os inversores apresentam grande impacto na eficiência final do sistema de geração e, portanto, faz-se pertinente uma análise comparativa de custo e eficiência destes.

A tensão disponibilizada por painéis fotovoltaicos é geralmente de baixa amplitude, sendo necessária uma etapa de amplificação entre o painel e a transformação do sinal contínuo em alternado. Esse estágio pode ser evitado em casos nos quais vários painéis são conectados em série de modo que a tensão de saída do conjunto seja maior que a tensão de pico da rede. Esta configuração é, entretanto, pouco usual em sistemas de baixa potência devido à necessidade de se garantir uma tensão mínima fornecida pelos painéis. Sendo assim, as topologias mais comuns de inversores para sistemas fotovoltaicos utilizam um estágio elevador de tensão e um estágio inversor conectados em série (Junior et al., 2011).

Com o intuito de reduzir o custo e o espaço ocupado por inversores responsáveis por lidar com a energia gerada por uma série de painéis fotovoltaicos, vem sendo estudada a utilização de microinversores (Bouzgunda et al., 2011), inversores de menor potência, montados atrás de cada painel, pelo qual são responsáveis pela otimização da geração e pelo condicionamento da energia gerada. A principal vantagem na utilização de microinversores está no fato de estes isolarem os efeitos de sombreamento entre painéis (Nezamuddin; Crespo; dos Santos, 2016).

Os microinversores também são compostos, em geral, por dois estágios. O primeiro responsável por elevar a tensão fornecida pelo painel, além de sua operação no ponto de máxima potência e o segundo responsável por gerar a corrente alternada de modo a assegurar a correta conexão com a rede elétrica (Nezamuddin; Crespo; dos Santos, 2016). Podem ser utilizadas, também, topologias integradas que buscam a simplificação e redução de componentes do circuito através da conexão direta entre os estágios (Luigi et al., 2010) (Junior et al., 2011).

É proposto nesse trabalho um estudo comparativo entre algumas topologias de microinversores para sistemas fotovoltaicos baseadas na estrutura CC-CC Ćuk. Serão estudados inversores com conversores Ćuk, Ćuk entrelaçado e Ćuk integrado com um inversor de onda completa, esse último proposto por (Luigi et al., 2010).

A utilização de conversores Ćuk se faz interessante devido ao fato de estes apre-

sentam comportamento de fonte de corrente (Junior et al., 2011), o que torna mais simples sua conexão à rede elétrica, que apresenta o comportamento de uma fonte de tensão, já que devem ser mantidos os níveis de tensão independentemente da corrente drenada. Isso elimina a necessidade de impedâncias em série entre o inversor e a rede elétrica, utilizadas para limitar a corrente de saída do inversor, as quais são necessárias quando este apresenta características de fonte de tensão. Além disso, o conversor Ćuk apresenta baixo ripple de corrente, o que resulta em baixas perdas e melhor eficiência na conversão (Shawky; Ahmed; Orabi, 2016).

A fonte de energia utilizada será um painel fotovoltaico com potência de aproximadamente 300W, será escolhido e implementado um algoritmo de MPPT e feita, também, uma análise da distorção harmônica injetada por cada implementação.

1.2 Objetivo

O objetivo principal deste TCC é o estudo, projeto, simulação e análise de um sistema de geração de energia elétrica composto por painel fotovoltaico e conversores CC-CC e CC-CA.

As topologias de conversores que serão analisadas estão listadas a seguir e enquanto os conversores representam a conversão CC-CC, os inversores representam o estágio de

- Conversor Ćuk convencional com Inversor em Ponte Completa
- Conversor Ćuk convencional com Inversor em Meia Ponte
- Conversor Ćuk Entrelaçado de 2 fases com Inversor em Ponte Completa
- Conversor Ćuk Entrelaçado de 2 fases com Inversor em Meia Ponte
- Conversor Ćuk integrado com Inversor em Ponte Completa
- Conversor Ćuk integrado com Inversor em Meia Ponte

1.3 Estrutura Geral do Trabalho

O capítulo 1 introduz o tema e o objeto de estudo, com uma breve explicação e contextualização do problema. No capítulo 2 é apresentado o estado da arte e apresentado o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada, sendo o capítulo 5 dedicado à exposição dos resultados obtidos através desta. O sexto e último capítulo é dedicado à discussão do resultado e às conclusões obtidas pelo estudo.

2 Estado da Arte

2.1 Modelo do PV

O circuito equivalente de células fotovoltaicas pode ser representado por uma fonte de corrente, como pode ser visto na figura 1. Este modelo é amplamente aceito e utilizado em trabalhos relacionados a energia fotovoltaica e seu comportamento do é descrito pelas equações 2.1 a 2.6, nas quais i_{pv} é a corrente e V a tensão de saída da célula solar, respectivamente. I_{ph} é a fotocorrente e I_r a corrente reversa de saturação da célula, R_s e R_p são as resistências série e shunt, q é a carga do elétron η é o fator de idealidade da junção p-n. k é a constante de Boltzmann, T representa a temperatura ambiente, em Kelvins e G representa a densidade de potência da irradiação solar. T_r é a temperatura nominal, em Kelvins (298K), I_{sc} é a corrente de curto circuito em condições padrão de teste (STC) ($T_r = 25^\circ C$ e $G = 1kW/m^2$), α é o coeficiente de temperatura, I_{rr} é a corrente de saturação reversa em STC e E_g é o *gap* de energia entre as bandas (1.1eV). V_{oc} é a tensão de circuito aberto das células, N_s é o número de células por painel e M_s é o número de painéis conectados em série (de Oliveira et al., 2016).

$$i_{pv} = I_{ph} - I_r \left[e^{q((V+i_{pv}R_s)/\eta kT)} - 1 \right] - \frac{V + i_{pv}R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

$$I_{ph} = [I_{SC} + \alpha (T - T_r)] \frac{G}{1000} \quad (2.2)$$

$$I_r = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 e^{[(qE_g/\eta k)((1/T_r) - (1/T))]} \quad (2.3)$$

$$I_{rr} = \frac{I_{SC} - (V_{oc}/R_p)}{e^{(qV_{oc}/\eta kT_r)} - 1} \quad (2.4)$$

$$V_{pv} = V N_s M_s \quad (2.5)$$

$$V_{ocPV} = V_{oc} N_s M_s \quad (2.6)$$

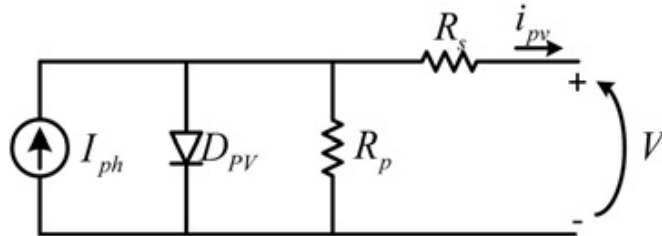


Figura 1 – Circuito Equivalente de uma Célula Fotovoltaica (de Oliveira et al., 2016)

A partir das equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 é possível inferir a existência das relações entre a corrente de saída do painel fotovoltaico, sua temperatura e a irradiação solar.

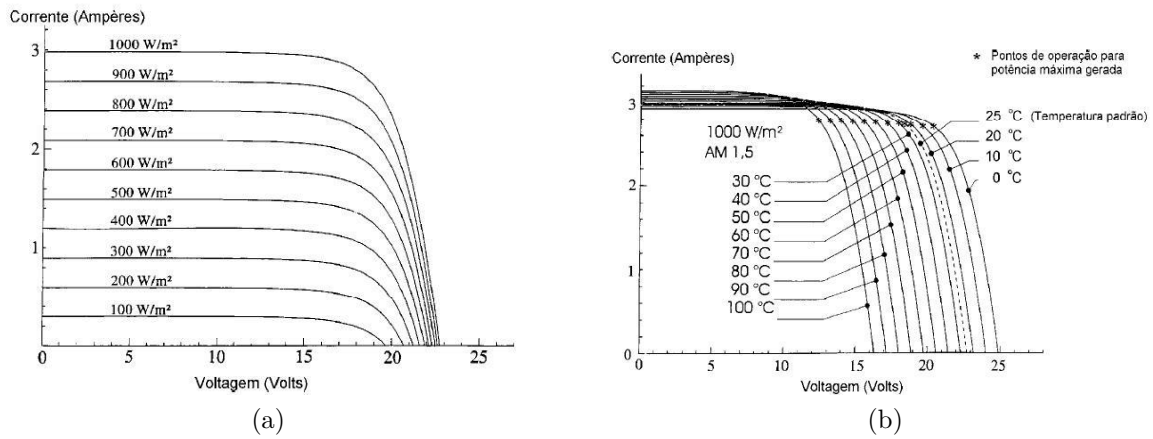


Figura 2 – Curvas IxV de painel fotovoltaico para diferentes (a) irradiâncias e (b) temperaturas

De fato, quanto maior a temperatura da célula, menor sua tensão de circuito aberto e, portanto, mais rápida sua variação de corrente. Já em relação à irradiação solar, quanto menor a magnitude desta, menor a corrente máxima da célula, relação clara ao analisar a equação 2.2.

Na figura 2 são apresentadas curvas I-V para diferentes valores de irradiação solar e temperatura de painel, para servirem de demonstração da influência dessas variáveis no comportamento do painel.

2.2 Conversores Estáticos CC/CC

2.2.1 Conversor Ćuk Convencional

Um conversor Ćuk é um conversor CC-CC baseado na transferência de energia capacitiva que é capaz de fornecer tensão maior ou menor que sua tensão de entrada, com polaridade invertida. Seu circuito pode ser visto na figura 3.

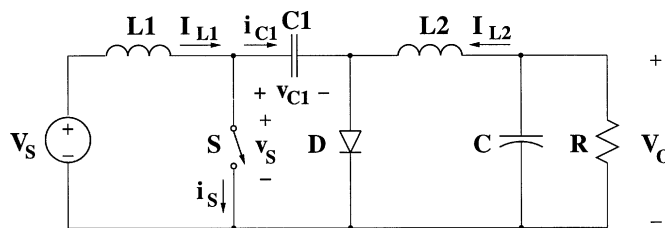


Figura 3 – Conversor Ćuk convencional (CZARKOWSKI, 2001)

Quando a chave S está fechada (ON), os indutores $L1$ e $L2$ são carregados pela tensão de entrada e capacitor $C1$, respectivamente. O capacitor $C1$ polariza reversamente o diodo D e descarrega fornecendo energia para a carga R , o capacitor de filtro C e o

indutor de filtro $L2$. Com o transistor representado pela chave S em estado aberto (OFF), o indutor de entrada $L1$ carrega o capacitor de transferência de energia $C1$. O diodo D conduz as correntes de ambos $L1$ e $L2$ e, portanto, o indutor $L2$ descarrega fornecendo energia à carga (CZARKOWSKI, 2001) (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015).

A função de transferência CC desse conversor é dada pela equação 2.7, na qual d é o ciclo de trabalho (*duty cycle*), V_s a tensão de entrada e V_o a tensão de saída (CZARKOWSKI, 2001) (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2018).

$$M_v = \frac{V_o}{V_s} = -\frac{d}{1-d} \quad (2.7)$$

O conversor Ćuk opera em modo de condução contínua para $L1 > L_{b1}$ e $L2 > L_{b2}$ pelas equações 2.8 e 2.9.

O capacitor de filtro C mínimo para uma certa tensão de ripple V_r pode ser encontrado utilizando a equação 2.10. Já a tensão de ripple no capacitor $C1$ pode ser estimada pela equação 2.11.

$$L_{b1} = \frac{(1-d)R}{2df} \quad (2.8)$$

$$L_{b2} = \frac{(1-d)R}{2f} \quad (2.9)$$

$$C_{min} = \frac{(1-d)V_o}{8V_r L_2 f^2} \quad (2.10)$$

$$V_{rC1} = \frac{dV_o}{C_1 R f} \quad (2.11)$$

Nas equações 2.8 a 2.10 f é a frequência de chaveamento do transistor S .

2.2.2 Conversor Ćuk Entrelaçado

Um conversor cuk entrelaçado consiste de um capacitor, dois indutores, um transistor e um diodo para cada fase, além do capacitor de filtro que pode ser comum entre todas as fases. A figura 4 apresenta o circuito de um conversor cuk entrelaçado de 2 fases.

Segundo Joseph, Daniel e Unnikrishnan (2015), essa topologia tem o intuito de reduzir o ripple de corrente na entrada e reduzir o stress de chaveamento, sem sacrificar sua eficiência. Para tal, os transistores são ligados um por vez, por um período de $T_{on}/2$, e somente após passado um período $T_{off}/2$ do desligamento do transistor anterior. Isso é feito utilizando-se a técnica de modulação por largura de pulso com desvio de fase, *PSPWM*, do inglês *Phase Shifted Pulse Width Modulation*.

O funcionamento do conversor cuk entrelaçado de 2 fases pode ser descrito em 3 modos (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015):

- Modo 1 (t_0 - t_1): S_1 ligado e S_2 desligado;

- Modo 2 (t_1-t_2 e t_3-t_4): S_1 e S_2 desligados;
- Modo 3 (t_2-t_3): S_1 desligado e S_2 ligado.

No modo 1, ocorre a carga do indutor L_{1a} e a descarga do indutor L_{1b} , que fornece energia ao capacitor C_2 . Enquanto isso, o capacitor C_1 para a carga.

Assumindo uma variação linear na corrente dos indutores, a corrente de ripple para os indutores nesse modo pode ser calculada com as equações 2.12 a 2.14, nas quais t_1 é o tempo em que o transistor S_1 está ligado, V_d a tensão de entrada e V_{C_1} e V_{C_2} a tensão nos capacitores C_1 e C_2 , respectivamente.

$$\Delta I_{L_{1a}} = \frac{t_1 V_d}{L_{1a}} \quad (2.12)$$

$$\Delta I_{L_{1b}} = \frac{t_1 (V_{C_2} - V_d)}{L_{1b}} \quad (2.13)$$

$$\Delta I_{L_2} = \frac{t_1 (V_{C_1} + V_o)}{L_2} \quad (2.14)$$

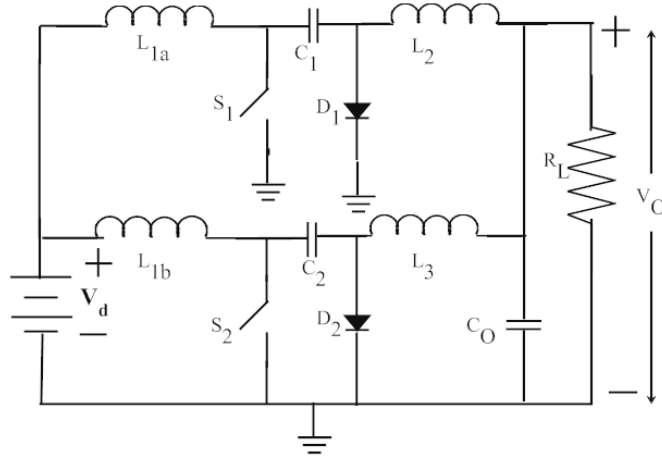


Figura 4 – Conversor Ćuk entrelaçado de 2 fases (Joseph; Daniel; Unnikrishnan, 2015)

Quando ambos os transistores estão desligados, ou seja, no modo 2, os indutores de entrada L_{1a} e L_{1b} são descarregados, fornecendo energia aos capacitores C_1 e C_2 , respectivamente, de forma que, entre t_1 e t_2 , C_1 carrega a energia que foi fornecida à carga no modo anterior, enquanto que entre t_3 e t_4 , C_2 o faz. Além disso, os indutores L_2 e L_3 fornecem energia à carga e, portanto são descarregados.

Os ripples de corrente para os indutores nesse modo são encontrados utilizando as equações 2.15 a 2.17

$$\Delta I_{L_{1a}} = \frac{t_2 (V_{C_1} - V_d)}{L_{1a}} \quad (2.15)$$

$$\Delta I_{L_{1b}} = \frac{t_2 (V_{C_2} - V_d)}{L_{1b}} \quad (2.16)$$

$$\Delta I_{L_2} = -\frac{t_2 V_o}{L_2} \quad (2.17)$$

No terceiro modo, com S_2 ligado, enquanto o indutor L_{1b} continua sendo carregado, o indutor L_{1a} é descarregado, fornecendo energia ao capacitor C_1 . Por sua vez, o capacitor C_2 fornece energia à carga e aos componentes L_3 , C_o .

Através das equações 2.12, 2.15, 2.14 e 2.17, tem-se a equação da tensão de saída (2.18), onde $d = T_{on}/T$.

$$V_o = -\frac{d \cdot V_d}{1 - d} \quad (2.18)$$

2.3 Conversores CC/CA - Inversores tipo fonte de tensão (VSI)

A configuração básica de um inversor tipo fonte de tensão, *VSI*, do inglês *Voltage Source Inverter* é apresentada na figura 5. Para a obtenção de um inversor monofásico a única alteração necessária é remover um dos braços do circuito trifásico.

Havendo tensão na entrada do inversor, quando um transistor das semipontes superior ou inferior, nunca ao mesmo tempo, estiver em condução, a tensão CC aparecerá entre um par de condutores na saída alternada (POMILIO, 2017).

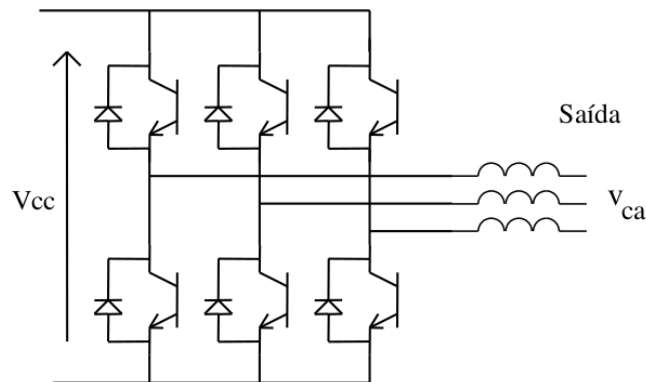


Figura 5 – Inversor VSI trifásico (POMILIO, 2017)

2.3.1 Inversor em Ponte Completa

APRESENTA MODELO, PRINCIPIOS E INTRO AO PROJETO E PWM

2.3.2 Inversor em Meia Ponte

APRESENTA MODELO, PRINCIPIOS E INTRO AO PROJETO, DIFERENÇAS AO PONTE COMPLETA E PWM

2.4 Conversor Integrado (CC/CA)

2.4.1 Conversor Ćuk Integrado

APRESENTA MODELO, PRINCIPIOS E INTRO AO PROJETO

2.5 Rastreamento de máxima potência (*MPPT*)

EXPLICA OQ É, PQ É NECESSÁRIO E SOBRE TECNICAS, PROVAVELMENTE SÓ UMA MESMO

2.6 Modulação PWM

FALAR SOBRE PWM SENOIDAL E PWM COM DESVIO DE fase

2.7 PLL E FILTRO???????

AVALIAR necessidade

3 Metodologia

4 Resultados

5 Conclusão

FALAR SOBRE STATE OF THE ART EM INVERSORES X MICRONIVERSORES \longleftrightarrow FALAR SOBRE TOPOLOGIAS DE INVERSORES DIFERENÇAS ENTRE MICRONIVERSORES E INVERSORES VANTAGENS MICRONIVERSORES MICRONIVERSORES NOS ULTIMOS anos

(microinversores e inversores topologias, pq cuk?) FALAR SOBRE TOPOLOGIA CUK (PQ ESCOLHER ESSA \rightarrow fonte de corrente?/ nova leva?)

FALAR SOBRE TWO PANEL MICROINVERTERS TOPOLOGY

Referências

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, v. 57, n. 3, p. 195 – 204, 2001. ISSN 0378-7796. Citado na página 5.

ANEEL. *Geração Distribuída*. 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Citado na página 5.

Bouzguenda, M. et al. Solar photovoltaic inverter requirements for smart grid applications. In: *2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5. Citado na página 6.

CZARKOWSKI, D. Cuk converter. In: _____. *Power Electronics Handbook*. [S.l.]: Academic Press, 2001. cap. 13, p. 218. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

de Oliveira, F. M. et al. Grid-tied photovoltaic system based on pso mppt technique with active power line conditioning. *IET Power Electronics*, v. 9, n. 6, p. 1180–1191, 2016. ISSN 1755-4535. Citado na página 9.

Joseph, K. D.; Daniel, A. E.; Unnikrishnan, A. Reduced ripple interleaved cuk converter with phase shifted pwm. In: *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

Joseph, K. D.; Daniel, A. E.; Unnikrishnan, A. Interleaved cuk converter with reduced switch current. In: *2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado na página 11.

Junior, L. G. et al. Evaluation of integrated inverter topologies for low power pv systems. In: *2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 35–39. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

Luigi, G. et al. Integrated inverter topologies for low power photovoltaic systems. In: *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado na página 6.

MACHADO, M. M.; SOUSA, M. C. S. de; HEWINGS, G. Economies of scale and technological progress in electric power production: The case of Brazilian utilities. *Energy Economics*, v. 59, n. C, p. 290–299, 2016. Citado na página 5.

Nezamuddin, O.; Crespo, J.; dos Santos, E. C. Design of a highly efficient microinverter. In: *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 3463–3468. Citado na página 6.

POMILIO, J. A. Conversores cc/ca - inversores. In: _____. *Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*. UNICAMP, 2017. cap. 5. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/cap5.pdf>>. Acesso em: 25 março 2019. Citado na página 13.

Shawky, A.; Ahmed, M. E.; Orabi, M. Performance analysis of isolated dc-dc converters utilized in three-phase differential inverter. In: *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 821–826. Citado na página [7](#).