




Received February 19, 2024; accepted April 11, 2024; Date of publication April 22, 2024. 
The review of this paper was arranged by Associate Editor Montie Vitorino  and Editor-in-Chief Heverton Pereira .

Digital Object Identifier <http://doi.org/10.18618/REP.2024.1.0003>

Metodologia para derivação de conversores cc-cc elevadores de alto ganho baseados em conexões diferenciais

Jéssika Melo de Andrade ¹, Marcos Antonio Salvador ², Roberto Francisco Coelho ³,
Telles Brunelli Lazzarin ³

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharias da Mobilidade, Joinville – SC, Brasil.

²Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul, Rau – SC, Brasil.

³Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Florianópolis – SC, Brasil.

e-mail: melo.jessika@ufsc.br, msal.salvador@gmail.com, roberto.coelho@ufsc.br, telles.bl@ufsc.br

RESUMO Este artigo apresenta uma metodologia para síntese de topologias de alto ganho a partir da conexão diferencial entre conversores cc-cc básicos. Tais conversores básicos podem ser iguais ou diferentes, mas devem compartilhar referência comum entre entrada e saída e tensões de saída de mesma polaridade. Além da metodologia e da análise de alguns dos conversores sintetizados em modo de condução contínua, o artigo discute sobre processamento parcial de potência, redução de componentes, adição de células de ganho, modelagem e estratégias de controle. A metodologia proposta é verificada por meio de dez protótipos derivados da conexão diferencial entre conversores básicos, considerando tensão de entrada de 20 V, razão cíclica de 0,75 e potência nominal de 100 W. Três novos conversores cc-cc de ultra alto ganho também são sintetizados a partir da inserção de células de ganho nos conversores diferenciais propostos, sendo dois deles avaliados experimentalmente, apresentando rendimentos máximos próximo de 97%.

PALAVRAS-CHAVE Células de Ganho, Conexão Diferencial, Conversores cc-cc Elevadores de Alto Ganho, Processamento Parcial de Potência.

Methodology for deriving high gain dc-dc converters based on differential connections

ABSTRACT This paper presents a methodology for synthesizing high-gain topologies from the differential connection between basic DC-DC converters. These basic converters can be either identical or different, but they must share a common reference between input and output and have output voltages of the same polarity. In addition to the methodology and analysis of some of the synthesized converters in continuous conduction mode, the article discusses partial power processing, component reduction, addition of gain cells, modeling, and control strategies. The proposed methodology is verified through ten prototypes derived from the differential connection between basic converters, considering an input voltage of 20 V, a duty cycle of 0.75, and a nominal power of 100 W. Three new ultra-high-gain DC-DC converters are also synthesized by inserting gain cells into the proposed differential converters, two of which are experimentally evaluated, achieving maximum efficiencies close to 97%.

KEYWORDS Differential Connection, Gain Cells, High Gain Step-Up DC-DC Converters, Partial Power Processing.

I. INTRODUÇÃO

A utilização de fontes renováveis tem sido incentivada em tempos atuais, devido às políticas de descarbonização do planeta [1]. Dentre tais fontes, a fotovoltaica e a eólica são as que têm apresentado maior penetração no sistema elétrico de potência. Para conectá-las à rede elétrica por meio de inversores, pode ser necessário um estágio de elevação de tensão, principalmente em aplicações fotovoltaicas com strings reduzidas, uma vez, que normalmente o nível de tensão resultante é inferior ao da rede elétrica [2].

Neste cenário, o desenvolvimento de topologias eficientes para fornecer altas tensões de saída a partir de fontes de entrada de baixa tensão é um processo essencial para a integração da energia fotovoltaica e eólica à rede

elétrica [3]. Para tanto, a literatura apresenta diversas técnicas para derivar conversores cc-cc elevadores de alto ganho, classificados como estruturas isoladas ou não isoladas.

Em topologias isoladas, o ganho de tensão pode ser facilmente incrementado pelo aumento da relação de espiras do transformador, porém, os interruptores de potência destas estruturas podem estar sujeitos a picos de tensão causados pelas indutâncias de dispersão. Para mitigar esta desvantagem, circuitos de grampeamento passivos ou ativos são inseridos em tais conversores [4], o que pode deteriorar o rendimento e aumentar a complexidade.

Por sua vez, as topologias não isoladas são comumente

derivadas da utilização de diferentes técnicas aplicadas para aumentar o ganho estático de conversores básicos (boost, buck-boost, Ćuk, zeta, SEPIC) [5] - [7]. Tais técnicas incluem a utilização de indutores chaveados (SL) [8], capacitores chaveados (SC) [6], indutores acoplados (CL) [9], conexões em cascata e empilhadas [10] ou uma combinação deles [11].

Quando comparadas, todas as técnicas citadas apresentam vantagens e desvantagens. Por exemplo, enquanto os interruptores dos conversores baseados em indutores chaveados ou indutores acoplados podem estar sujeitos a picos de tensão (assim como nas topologias isoladas), os interruptores dos conversores a capacitores chaveados, que requerem grande número de elementos de armazenamento, têm que ser superdimensionados devido aos altos picos de corrente. Além disso, a eficiência de conversores em cascata ou empilhados pode ser degradada pela maior quantidade de componentes (incluindo interruptores de potência) no caminho da corrente [12].

Em [5], os autores classificaram os conversores cc-cc de acordo com o princípio aplicado para prover alto ganho estático, fornecendo ao leitor insights importantes sobre as técnicas de elevação de tensão. No entanto, [5] não menciona a possibilidade de conectar diferencialmente conversores cc-cc básicos como forma de sintetizar conversores cc-cc elevadores de alto ganho, tópico aqui explorado.

A utilização da conexão diferencial entre conversores para gerar novas topologias tem sido estudada na literatura ao longo do tempo. O inversor fonte de tensão (VSI), por exemplo, pode ser entendido como a conexão diferencial de dois conversores buck cc-cc [13]. Quando suas tensões são subtraídas devido à conexão diferencial, as componentes cc são canceladas, assim, uma componente ca senoidal pura é fornecida à saída do inversor [14]. Outro exemplo, agora abordando conversores cc-cc, é o conversor duplo dual boost (DDB) [15], que pode ser derivado da conexão diferencial entre um conversor boost e sua versão com terminal comum positivo [16].

Como será demonstrado, a metodologia proposta pode ser classificada como uma nova técnica de elevação de tensão, capaz de ser aplicada a qualquer grupo de dois conversores com a mesma polaridade da tensão de saída (positiva ou negativa) e com referência comum entre entrada e saída. Este método pode ser empregado para sintetizar novos conversores elevadores cc-cc de alto ganho, e validar alguns já existentes na literatura.

Diante do exposto, em termos gerais, este artigo traz as seguintes contribuições:

- Apresentação de uma metodologia para sintetizar novos conversores cc-cc elevadores de alto ganho;
- Análise detalhada da distribuição de potência entre os elementos da conexão diferencial e do processamento parcial de potência;
- Proposição de uma técnica de modelagem simplificada e de estratégias de controle;
- Validação experimental de todas as análises teóricas.

Além desta seção introdutória, a seção II descreve a metodologia proposta. A seção III apresenta a análise da potência processada e do rendimento dos conversores

diferenciais. A seção IV aborda a modelagem simplificada e estratégias de controle. A seção V discute tópicos como redução de componentes e integração de células de ganho, além de apresentar um novo ponto de vista sobre algumas topologias da literatura. A seção VI dá ênfase às principais topologias derivadas da metodologia proposta. Resultados experimentais são avaliados na seção VII e as principais conclusões são expostas na seção VIII.

II. METODOLOGIA PARA DERIVAÇÃO DE CONVERSORES CC-CC

Para formalizar a metodologia que permite derivar conversores cc-cc elevadores a partir de conexões diferenciais, é necessário classificar as topologias de acordo com a polaridade da tensão de saída em relação à tensão de entrada. Esta classificação resulta em dois grupos de conversores: o grupo positivo, que inclui os conversores cujas tensões de entrada e saída apresentam a mesma polaridade (por exemplo, buck, boost, SEPIC e zeta) e o grupo negativo, que inclui os conversores cujas tensões de entrada e saída têm polaridades opostas (por exemplo, buck-boost e Ćuk).

As premissas para implementação da metodologia proposta requerem: (i) seleção de dois conversores do mesmo grupo; (ii) garantia de que os conversores selecionados apresentem referência comum entre entrada e saída; (iii) representação de um dos conversores em sua forma convencional, com terminal comum negativo (TCN), conforme exemplificado na Figura 1.a; (iv) representação do outro conversor em sua forma espelhada, com terminal comum positivo (TCP), conforme exemplificado na

Figura 1.b; (v) conexão da carga em modo diferencial, entre as saídas dos conversores selecionados, conforme detalhado na Figura 2; (vi) garantia de que ambos os conversores são alimentados pela mesma tensão de entrada (V_m), como ilustrado na Figura 2. Embora a Figura 2 exemplifique a conexão diferencial entre um conversor boost TCN e um conversor boost TCP, uma representação generalizada, considerando quaisquer outras topologias, é vista na Figura 3.

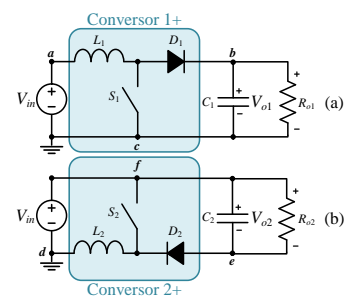


FIGURA 1. Exemplo de conversores do mesmo grupo: (a) conversor boost TCN; (b) conversor boost TCP.

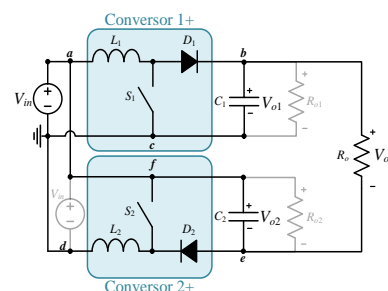


FIGURA 2. Exemplo de conexão diferencial entre o conversor boost TCN e o conversor boost TCP.

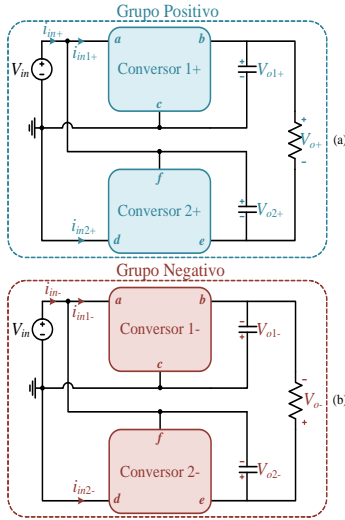


FIGURA 3. Generalização das conexões diferenciais: (a) grupo positivo; (b) grupo negativo.

É válido destacar que os conversores do mesmo grupo podem ser iguais (por exemplo: dois *boost*) ou diferentes (por exemplo: um *boost* TCN e um *SEPIC* TCP). Por conveniência, neste artigo, o conversor desenhado em sua forma convencional (TCN) é denominado de Conversor 1, e sua versão TCP, de Conversor 2.

Para as topologias ilustradas na Figura 3, deve-se notar que a fonte de entrada é compartilhada entre os conversores conectados diferencialmente. No caso da Figura 3.a, como a conexão diferencial utiliza-se de conversores do grupo positivo, a tensão de saída é calculada por:

$$V_{o+} = V_{o1+} + V_{o2+} - V_{in}. \quad (1)$$

Por sua vez, a tensão de saída da topologia diferencial ilustrada na Figura 3.b, por utilizar-se de conversores do grupo negativo, pode ser escrita como:

$$V_{o-} = V_{o1-} + V_{o2-} + V_{in}. \quad (2)$$

Portanto, os ganhos estáticos para ambos os grupos são dados, respectivamente, por:

$$\frac{V_{o+}}{V_{in}} = G_{CCM+} = G_{CCM1+} + G_{CCM2+} - 1, \quad (3)$$

$$\frac{V_{o-}}{V_{in}} = G_{CCM-} = G_{CCM1-} + G_{CCM2-} + 1, \quad (4)$$

sendo que os ganhos estáticos (G_{CCM1+} , G_{CCM2+} , G_{CCM1-} e G_{CCM2-}) de cada um dos conversores associados podem ser calculados individualmente, da forma convencional.

Para ilustrar a metodologia apresentada, considera-se que o Conversor 1+ é um *boost* TCN, que o Conversor 2+ é um *SEPIC* TCP, que o Conversor 1- é um *Ćuk* TCN e que o Conversor 2- é um conversor *buck-boost* TCP, todos operando em modo de condução contínua (CCM). Assim, os respectivos ganhos estáticos dos conversores diferenciais, resultantes de (3) e (4), seriam definidos por:

$$G_{CCM+} = \frac{1}{1-D} + \frac{D}{1-D} - 1 = \frac{2D}{1-D}, \quad (5)$$

$$G_{CCM-} = \frac{D}{1-D} + \frac{D}{1-D} + 1 = \frac{1+D}{1-D}. \quad (6)$$

III. ANÁLISE DO PROCESSAMENTO PARCIAL DE POTÊNCIA E DO RENDIMENTO DOS CONVERSORES OBTIDOS VIA METODOLOGIA PROPOSTA

As conexões diferenciais apresentadas na Figura 3 podem ser analisadas de forma simplificada a partir dos

circuitos equivalentes mostrados na Figura 4. Diante desta representação, percebe-se que na conexão diferencial dos conversores do grupo positivo [Figura 4.a], a tensão de entrada (V_{in}) contribui para a redução da tensão diferencial de saída (V_{o+}), o que resulta na circulação de potência não ativa [17] através do conversor diferencial. Para compensar tal redução, os Conversores 1+ e 2+ precisam processar mais potência do que a carga necessita.

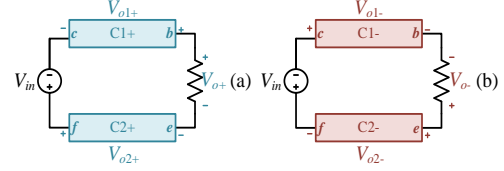


FIGURA 4. Circuitos equivalentes simplificados vistos das saídas dos conversores diferenciais: (a) grupo positivo; (b) grupo negativo.

Por outro lado, na conexão diferencial dos conversores do grupo negativo [Figura 4.b], a tensão de entrada (V_{in}) contribui para elevar a tensão diferencial de saída (V_{o-}). Como consequência, uma parcela da potência fornecida pela fonte é diretamente transferida para a carga, resultando em processamento parcial de potência (3P) pelos Conversores 1- e 2-, que precisam processar menos potência do que a carga demanda.

A porcentagem de potência processada pelos conversores da conexão diferencial do grupo negativo pode ser definida em termos de ganho estático, tal que:

$$P_{1-(\%)} = \frac{P_{1-}}{P_o} = \frac{V_{o1-} I_o}{V_o I_o} = \frac{G_{CCM1-}}{G_{CCM-}}, \quad (7)$$

$$P_{2-(\%)} = \frac{P_{2-}}{P_o} = \frac{V_{o2-} I_o}{V_o I_o} = \frac{G_{CCM2-}}{G_{CCM-}}. \quad (8)$$

$$P_{source-(\%)} = \frac{P_o - P_{1-} - P_{2-}}{P_o} = 1 - \left(\frac{G_{CCM1-} + G_{CCM2-}}{G_{CCM-}} \right). \quad (9)$$

em que $P_{1-(\%)}$ e $P_{2-(\%)}$ representam os percentuais de potência processada pelos Conversores 1- e 2-, respectivamente, enquanto $P_{source-(\%)}$ é o percentual de potência entregue à carga diretamente pela fonte de entrada.

As equações (7) e (8) também são válidas para descrever a conexão diferencial de conversores do grupo positivo, porém, neste caso, o percentual de potência processada pela fonte de entrada é dado por:

$$P_{source+(\%)} = -P_{source-(\%)} \quad (10)$$

A potência entregue à carga no grupo positivo é dada por:

$$P_{o(\%)} = P_{1+(\%)} + P_{2+(\%)} - P_{source+(\%)}, \quad (11)$$

enquanto, para o grupo negativo, é definida por:

$$P_{o(\%)} = P_{1-(\%)} + P_{2-(\%)} + P_{source-(\%)}. \quad (12)$$

De acordo com (7), (8), (9) e (10), é possível definir a quantidade de potência processada pelos conversores da conexão diferencial, conforme resumido na Tabela 1. Esta Tabela é montada considerando que os conversores são acionados com razões cíclicas iguais, ou seja, $D = D_1 = D_2$.

Os resultados descritos na Tabela 1 estão também apresentados graficamente na Figura 5, juntamente com os pontos experimentais adquiridos a partir dos ensaios descritos na Seção VII, por meio dos conversores destacados na Figura 6.

Todos os testes práticos foram realizados na potência nominal (100 W) sob tensão de entrada (V_{in}) de 20 V. As

TABELA 1. Distribuição da Potência em cada Conversor da Conexão Diferencial

Conversor 1	Conversor 2	G_{CCM1}	G_{CCM2}	G_{CCM}	$P_{1(\%)}$	$P_{2(\%)}$	$P_{source(\%)}$
Boost TCN	Boost TCP	$\frac{1}{1-D}$	$\frac{1}{1-D}$	$\frac{1+D}{1-D}$	$\frac{1}{D+1}$	$\frac{1}{D+1}$	$\frac{1-D}{D+1}$
Boost TCN	SEPIC TCP ou Zeta TCP	$\frac{1}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{2D}{1-D}$	$\frac{1}{2D}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1-D}{2D}$
SEPIC TCN ou Zeta TCN	Boost TCP	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{1}{1-D}$	$\frac{2D}{1-D}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2D}$	$\frac{1-D}{2D}$
SEPIC TCN ou Zeta TCN	SEPIC TCP ou Zeta TCP	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{3D-1}{1-D}$	$\frac{D}{3D-1}$	$\frac{D}{3D-1}$	$\frac{1-D}{3D-1}$
Ćuk TCN ou Buck-Boost TCN	Ćuk TCP ou Buck-Boost TCP	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{1+D}{1-D}$	$\frac{D}{1+D}$	$\frac{D}{1+D}$	$\frac{1-D}{1+D}$

Figuras 5.a, 5.b e 5.c mostram os resultados relacionados à conexão diferencial de conversores de grupo positivo, enquanto a Figura 5.d mostra os resultados relacionados à conexão diferencial de conversores de grupo negativo.

O comportamento da corrente de entrada é apresentado na Tabela 2. De modo geral, os conversores diferenciais terão corrente entrada (i_{in}) constante se ambos os conversores da conexão possuírem entrada do tipo corrente. Caso um dos destes conversores tenha entrada em tensão, a corrente de entrada será pulsada.

TABELA 2. Comportamento da Corrente de Entrada dos Conversores Diferenciais.

Conversor 1	Conversor 2	Corrente I_{in}
Boost	Boost	Contínua
Boost	SEPIC	Contínua
Boost	Zeta	Pulsada
SEPIC	Boost	Contínua
SEPIC	SEPIC	Contínua
SEPIC	Zeta	Pulsada
Zeta	Boost	Pulsada
Zeta	SEPIC	Pulsada
Zeta	Zeta	Pulsada
Ćuk	Ćuk	Contínua
Ćuk	Buck-Boost	Pulsada
Buck-Boost	Buck-Boost	Pulsada
Buck-Boost	Ćuk	Pulsada

A Figura 5.a apresenta as curvas teóricas e pontos experimentais para a conexão entre os conversores *boost* TCN e *boost* TCP. Em toda a faixa de razão cíclica, ambos os conversores processam a mesma quantidade de potência. Como se pode observar, a soma das potências processadas pelos conversores é superior à potência entregue à carga. Por exemplo, considerando $D_1 = D_2 = 0,7$, os conversores processam, cada um, 60% de P_o , enquanto a fonte de entrada diminui 20% de P_o (potência que circula e retorna para fonte de entrada, denominada neste trabalho de potência não ativa). Este resultado corrobora a análise teórica apresentada anteriormente, pois:

$$P_{o(\%)} = 60\% + 60\% - 20\% = 100\% . \quad (13)$$

As curvas teóricas e os pontos experimentais para a conexão entre os conversores *boost* TCN e *SEPIC* TCP estão apresentadas na Figura 5.b. Estas curvas também são válidas para as conexões entre os conversores *boost* TCN e *zeta* TCP e entre os conversores *SEPIC* ou *zeta* TCN e *boost*

TCP. Observa-se que o conversor *SEPIC* processa 50% de P_o independentemente do valor da razão cíclica e da sua posição na conexão diferencial (como Conversor 1 ou 2). Por outro lado, a potência processada pelo conversor *boost* (TCN ou TCP) varia de acordo com o valor da razão cíclica, conforme evidenciado na Tabela 1. Por exemplo, com $D = 0,7$, o conversor *boost* processa 75% de P_o , tendo em vista que a fonte de entrada diminui 25% de P_o .

A Figura 5.c apresenta as curvas da conexão entre os conversores *SEPIC* e *Zeta*. Ambos processam a mesma potência em toda a faixa de razão cíclica e como nas demais conexões do grupo positivo, a fonte de entrada atua reduzindo a potência de saída.

Para as conexões com conversores do tipo *SEPIC* ou *zeta* [Figuras 5.b e 5.c], a razão cíclica mínima é 0,5. Vale ressaltar que, nas conexões do grupo positivo, a influência da fonte de entrada sobre a tensão diferencial diminui à medida que a razão cíclica aumenta. Assim, as conexões de grupos positivos são mais atrativas para aplicações de alto ganho.

As curvas relacionadas aos conversores do grupo negativo estão representadas na Figura 5.d. Diferentemente dos conversores do grupo positivo, agora, a fonte de entrada incrementa à tensão de saída diferencial, assim os conversores processam menos potência do que a carga necessita. Por exemplo, para uma razão cíclica de 0,7, cada conversor processa 40% de P_o , enquanto a fonte de entrada contribui com os 20% restantes para alimentar a carga (a fonte transfere 20% da potência diretamente para a carga).

Substituindo esses valores em (12), encontra-se:

$$P_{o(\%)} = 40\% + 40\% + 20\% = 100\% . \quad (14)$$

As curvas traçadas na Figura 5.d foram verificadas experimentalmente, considerando a conexão entre os conversores *Ćuk* TCN e *Ćuk* TCP.

Dentre as conexões apresentadas na Tabela 1, as únicas topologias em que os Conversores 1 e 2 processam diferentes níveis de potência são aquelas compostas por conversores *SEPIC* e *boost* ou entre os conversores *boost* e *zeta*. É importante mencionar que estes conversores também podem processar os mesmos níveis de potência se os valores de razão cíclica utilizada para acioná-los forem diferentes e ajustados adequadamente para atingir este objetivo. Diante disso, para fornecer a potência balanceada entre os tais conversores, a razão cíclica D_2 aplicada ao Conversor 2 pode ser escrita em função da razão cíclica D_1 aplicada ao Conversor 1, como:

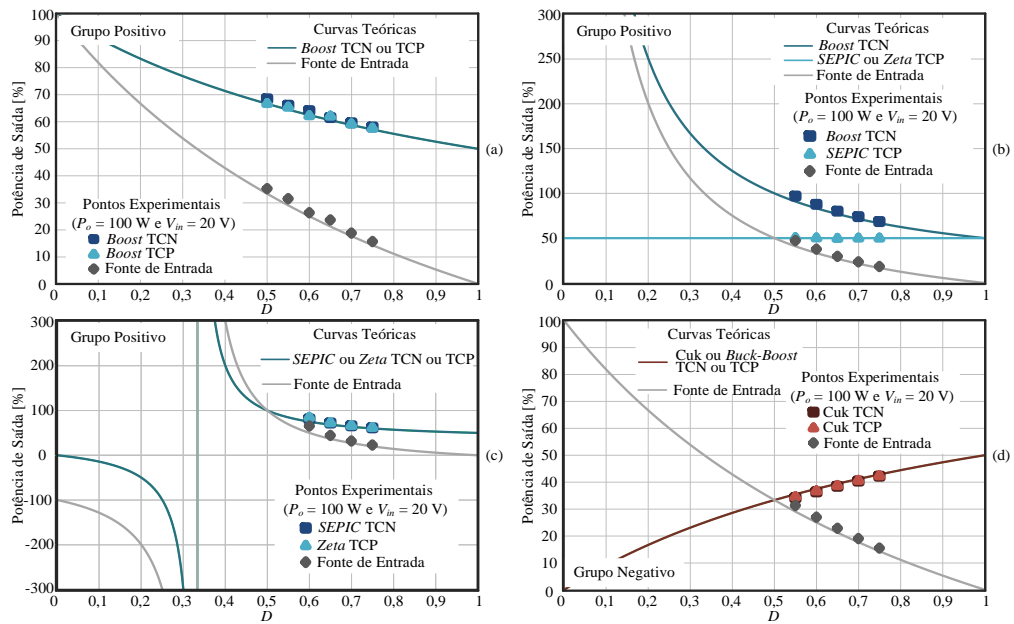


FIGURA 5. Curvas teóricas e pontos experimentais considerando $D = D1 = D2$, $P_o = 100\text{ W}$ e $V_{in} = 20\text{ V}$ para o grupo positivo: (a) conversores boost TCN e TCP (grupo positivo); (b) conversores boost TCN e SEPIC TCP (grupo positivo); (c) conversores SEPIC TCN e Zeta TCP (grupo positivo); (d) Conversores Cuk TCN e TCP.

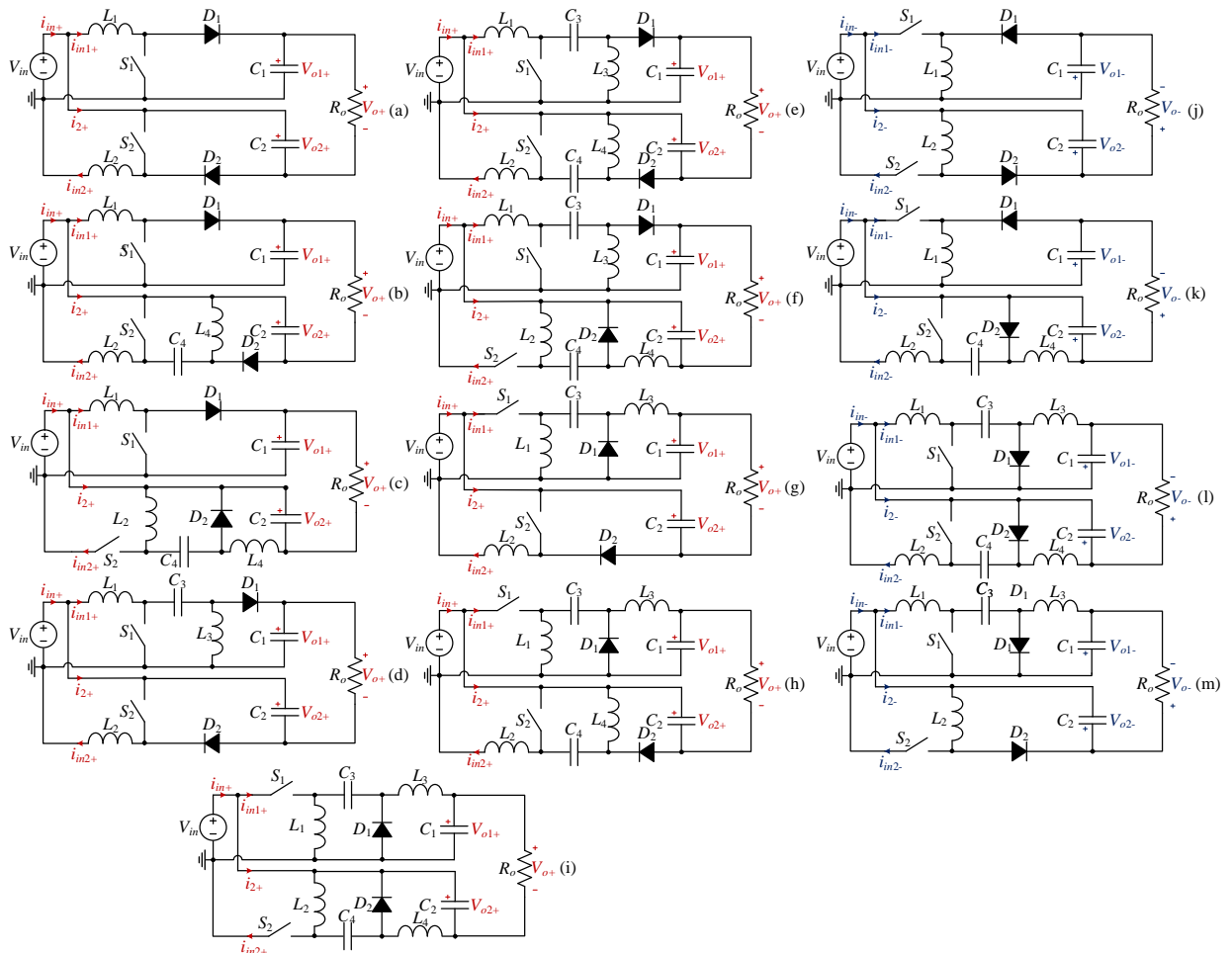


FIGURA 6. Conversores diferenciais do grupo positivo: (a) boost TCN com boost TCP; (b) boost TCN com SEPIC TCP; (c) boost TCN com zeta TCP; (d) SEPIC TCN com boost TCP; (e) SEPIC TCN com SEPIC TCP; (f) SEPIC TCN com zeta TCP; (g) zeta TCN com boost TCP; (h) zeta TCN com SEPIC TCP; (i) zeta TCN com zeta TCP. Conversores diferenciais de grupo negativo: (j) buck-boost TCN com buck-boost TCP; (k) buck-boost TCN com Cuk TCP; (l) Cuk TCN com Cuk TCP; (m) Cuk TCN com buck-boost TCP.

$$|G_{CCM1+}| = |G_{CCM2+}| \rightarrow \frac{1}{1-D_1} = \frac{D_2}{1-D_2} \rightarrow D_2 = \frac{1}{2-D_1}. \quad (15)$$

Portanto, para $D_1 \neq D_2$, o ganho estático e a potência processada por conversor são dados por:

$$G_{CCM+} = \frac{1+D_1}{1-D_1}, \quad (16)$$

$$P_{1+(\%)} = P_{2+(\%)} = \frac{1}{D_1+1}, \quad (17)$$

$$P_{source+(\%)} = \frac{1-D_1}{1+D_1}. \quad (18)$$

As equações (17) e (18) estão plotadas na Figura 7 juntamente com os pontos experimentais obtidos via protótipo do conversor diferencial *boost* TCN com *SEPIC* TCP. Deve-se verificar que estes resultados são semelhantes aos apresentados na Figura 5.a.

Ao avaliar os níveis de potência processados, verifica-se que os rendimentos dos conversores dos grupos positivo ($n_{+(\%)}$) e negativo ($n_{-(\%)}$) podem ser obtidos conforme:

$$n_{+(\%)} = P_{1+(\%)}n_{1+(\%)} + P_{2+(\%)}n_{2+(\%)} - P_{source+(\%)}, \quad (19)$$

$$n_{-(\%)} = P_{1-(\%)}n_{1-(\%)} + P_{2-(\%)}n_{2-(\%)} + P_{source-(\%)}, \quad (20)$$

em que, $n_{1+(\%)}$ e $n_{1-(\%)}$ são os rendimentos do Conversor 1+ e Conversor 1-, $n_{2+(\%)}$ e $n_{2-(\%)}$ são os rendimentos do Conversor 2+ e 2-, respectivamente.

IV. PROPOSTA DE MODELAGEM SIMPLIFICADA E ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Os conversores diferenciais vistos na Figura 6 possuem número expressivo de elementos passivos, assim, a modelagem considerando a topologia final como um conversor único pode ser complexa. Neste contexto, para facilitar a modelagem deste tipo de topologias, propõe-se um método simplificado, que se baseia em modelos dos conversores em sua versão TCN.

O método de modelagem proposto é baseado nas equações (1) e (2) e na função de transferência dos conversores convencionais (TCN). Adicionalmente, considera-se que os conversores da topologia diferencial são desacoplados dinamicamente, ou seja, a carga R_o tem alta valor, o que é verdadeiro para conversores elevadores com baixa potência de saída.

Considerando tais premissas, a função de transferência dos conversores diferenciais pode ser descrita por:

$$\frac{\tilde{v}_{o+}}{\tilde{d}} = G_{vo+} = G_{vo1+} + G_{vo2+} - V_{in}, \quad (21)$$

para os conversores do grupo positivo (G_{vo+}), e por:

$$\frac{\tilde{v}_{o-}}{\tilde{d}} = G_{vo-} = G_{vo1-} + G_{vo2-} + V_{in}, \quad (22)$$

para os conversores do grupo negativo (G_{vo-}).

Nestas equações, G_{vo1+} , G_{vo2+} , G_{vo1-} e G_{vo2-} são as funções de transferência dos conversores convencionais que compõem a conexão diferencial, conforme apresenta a Tabela 3.

A título de exemplo, considerando a conexão representada na Figura 6.f e a equação (21), tem-se que a

função de transferência que modela o conversor diferencial pode ser expressa pela soma das funções de transferência do conversor *SEPIC* (quarta equação da Tabela 3) e do conversor *zeta* (última equação da Tabela 3), subtraindo-se a tensão de entrada. As funções de transferência dos conversores individuais podem ser obtidas por métodos tradicionais, conforme documentado na literatura.

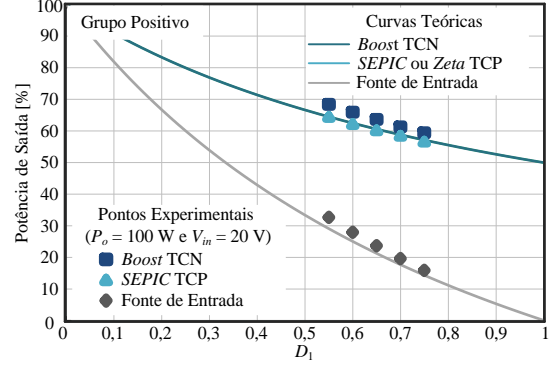


FIGURA 7. Curvas teóricas da potência processada pelos conversores boost TCN e SEPIC ou Zeta TCP na conexão diferencial, considerando $D_1 \neq D_2$. Pontos experimentais adquiridos sob $P_o = 100$ W e $V_{in} = 20$ V, diante da conexão entre os conversores boost TCN e SEPIC TCP.

Para validar as funções de transferência dadas pelas equações (21) e (22), simulações foram realizadas para comparar a resposta do modelo comutado do conversor ($V_{o_switched}$) com a resposta da função de transferência ($V_{o_average}$), tanto no domínio do tempo quanto da frequência, tal como ilustrado na Figura 8.

Os resultados de resposta em frequência foram obtidos em potência nominal (100% de P_o), enquanto os resultados no domínio do tempo, em 50%, 100% e 200% de P_o , para verificar o comportamento do modelo proposto sob diferentes cargas. Deve-se observar que, mesmo com a variação da potência de saída, a função de transferência apresentou comportamento satisfatório. Na resposta em frequência, o modelo descreveu o conversor até, aproximadamente, 1 kHz. Esta é uma limitação aceitável da função de transferência simplificada, uma vez que o controle de tensão geralmente é implementado por meio de uma malha lenta, com frequência de cruzamento bem inferior a 1 kHz (de 1 a 100 Hz, na maioria dos casos). Frequências de cruzamento baixas são escolhidas quando se utiliza controladores convencionais (como proporcional-integral) em plantas de ordem elevada, principalmente para garantir estabilidade.

A estratégia de controle proposta considerando ambos os conversores operando com a mesma razão cíclica ($D_1 = D_2$) ou com razões cíclicas diferentes ($D_1 \neq D_2$) é exposta na Figura 9. Os moduladores podem utilizar portadoras triangulares em fase ou defasadas de 180°. Detalhes adicionais em relação às estratégias de modulação podem ser encontradas em [13]. A estratégia de controle possui duas malhas, uma delas é empregada para controlar a tensão de saída do Conversor 1 (V_{o1}) e outra para controlar a tensão diferencial de saída (V_o). A tensão de saída do Conversor 2 (V_{o2}) é controlada indiretamente. Essa estratégia de controle é válida para os conversores dos grupos positivo e negativo.

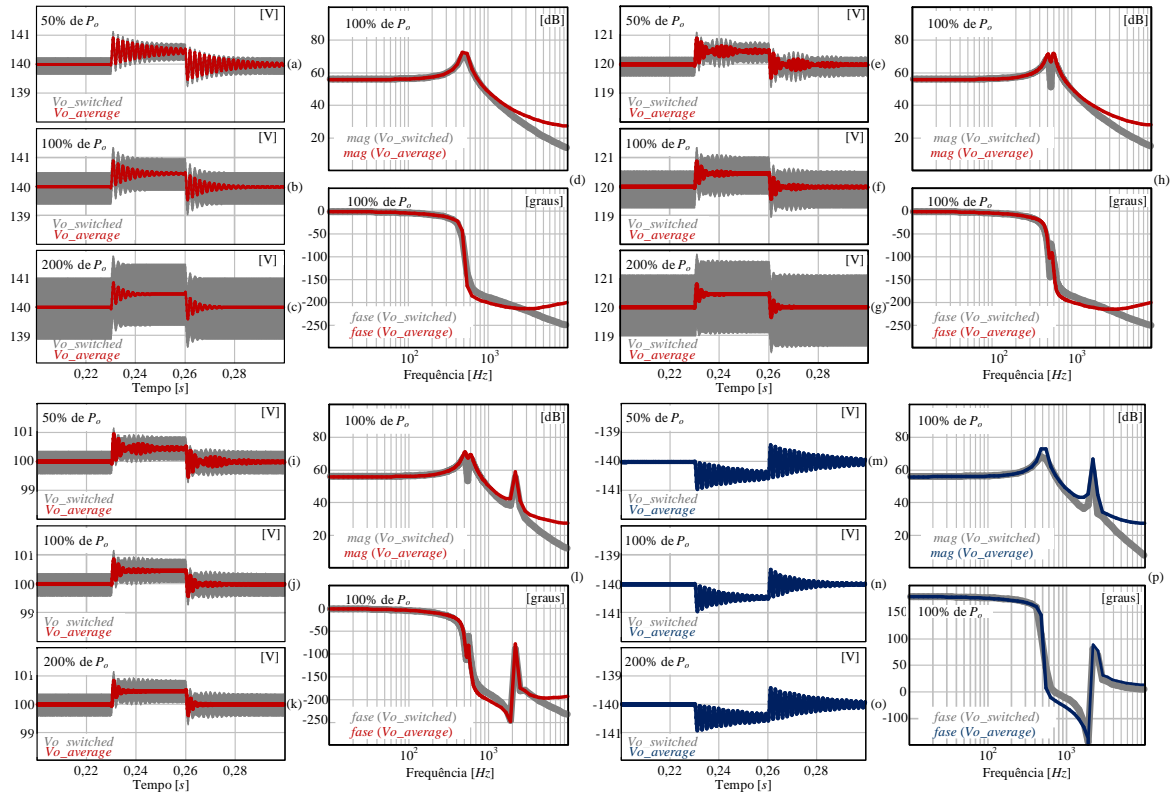


FIGURA 8. Validação da função de transferência no domínio do tempo e da frequência de: (a) – (d) boost TCN com boost TCP; (e) – (h) SEPIC TCN com boost TCP; (i) – (l) SEPIC TCN com zeta TCP e (n) – (p) Čuk TCN com Čuk TCP.

TABELA 3. Função de Transferência dos Conversores Convencionais

Conversores	Função de Transferência
Boost	$G_{w01,2+} = \frac{-\frac{R_o L_1 P_o}{V_{in}} s + R_o V_{in}}{R_o L_1 C_1 s^2 + L_1 s + R_o (1-D)^2}$
Buck-Boost	$G_{w01,2-} = \frac{\frac{R_o L_1 P_o}{DV_{in}} s - R_o V_{in}}{R_o L_1 C_1 s^2 + L_1 s + R_o (1-D)^2}$
Čuk	$G_{w01,2-} = \frac{-\frac{R_o L_1 C_3 V_{in}}{1-D} s^2 + \frac{R_o L_1 P_o}{V_{in}} s - R_o V_{in}}{R_o L_1 L_3 C_1 C_3 s^4 + L_1 L_3 C_3 s^3 + R_o [L_1 C_1 D^2 + L_3 C_1 (1-D)^2 + L_1 C_3] s^2 + [L_1 D^2 + L_3 (1-D)^2] s + R_o (1-D)^2}$
SEPIC	$G_{w01,2+} = \frac{-\frac{R_o L_1 L_3 C_3 P_o}{DV_{in}} s^3 + [R_o C_3 V_{in} (L_1 + L_3)] s^2 - \frac{R_o L_1 P_o}{V_{in}} s + R_o V_{in}}{R_o L_1 L_3 C_1 C_3 s^4 + L_1 L_3 C_3 s^3 + R_o [L_1 C_1 D^2 + (L_3 C_1 + L_3 C_3 + L_1 C_3) (1-D)^2] s^2 + [L_1 D^2 + L_3 (1-D)^2] s + R_o (1-D)^2}$
Zeta	$G_{w01,2+} = \frac{\frac{R_o L_1 C_3 V_{in}}{1-D} s^2 - \frac{R_o L_1 P_o}{V_{in}} s + R_o V_{in}}{R_o L_1 L_3 C_1 C_3 s^4 + L_1 L_3 C_3 s^3 + R_o [L_1 C_1 D^2 + L_3 C_1 (1-D)^2 + L_1 C_3] s^2 + [L_1 D^2 + L_3 (1-D)^2] s + R_o (1-D)^2}$

V. REDUÇÃO DE COMPONENTES, INTEGRAÇÃO COM CÉLULAS DE GANHO E NOVO PONTO DE VISTA DAS TOPOLOGIAS DA LITERATURA

A. Redução de componentes

Quando os conversores diferenciais são modulados considerando portadoras em fase, utilizam a mesma razão cíclica e possuem a mesma característica de saída (tipo Eletrônica de Potência, Rio de Janeiro, v. 29, e202409, 2024.

corrente ou tipo tensão), é possível eliminar componentes redundantes após a integração. A Figura 10 mostra a forma final dos conversores derivados da conexão diferencial entre um boost TCN com boost TCP e entre um Čuk TCN com Čuk TCP em sua versão reduzida.

B. Integração com células de ganho

Quando são necessários ganhos estáticos ultra altos, é possível integrar células de ganho aos conversores diferenciais para aumentar ainda mais a tensão de saída. A Figura 11.a ilustra uma conexão diferencial de um onversor *boost* TCN e um *boost* TCP, ambos integrados a uma célula de capacitor chaveado (*SC*), em sua versão reduzida ($D_1 = D_2$). Caso não fosse aplicada a redução, o circuito teria uma célula *SC* no Conversor 1 e outra célula *SC* no Conversor 2, o ganho estático resultante seria o mesmo da versão reduzida [Figura 11.a] e o conversor seria mais volumoso e teria maior quantidades de componentes.

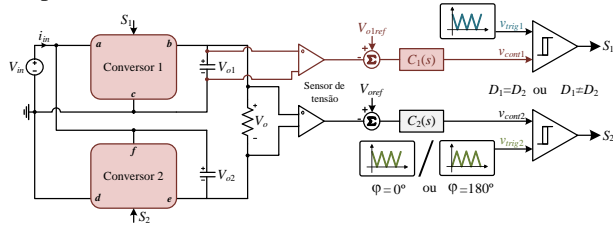


FIGURA 9. Estratégia proposta para controle da tensão de saída de conversores diferenciais.

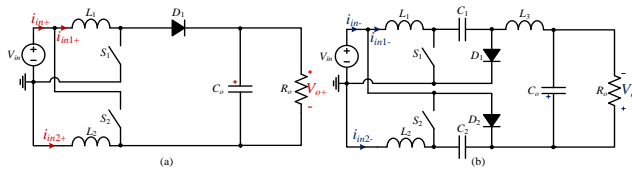


FIGURA 10. Conversores diferenciais: (a) boost TCN com boost TCP e (b) Ćuk TCN com Ćuk TCP em suas versões com redução de componentes.

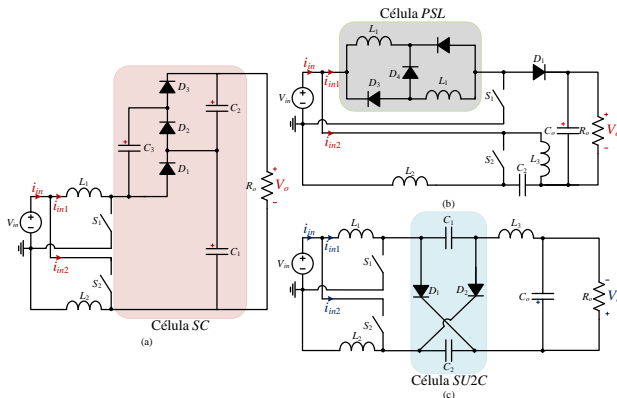


FIGURA 11. Conversores diferenciais com células de ganho: (a) boost TCN com boost TCP e célula SC, (b) boost TCN com SEPIC TCP com célula PSL e (c) Ćuk TCN com Ćuk TCP e célula SU2C.

A Figura 11.b mostra a integração da célula passiva de indutor chaveado (*PSL*) [7] a um conversor diferencial na forma reduzida, baseado em um *boost* e um *SEPIC*. A célula *PSL* também pode ser inserida em outros ou em todos os indutores do conversor. A Figura 11.c mostra uma célula *step-up* 2 de capacitor chaveado (*S2UC*) integrada a conexão diferencial de conversores Ćuk [11].

Vale destacar que a Figura 11 apenas apresenta alguns exemplos de integração das células de ganho, mas outras células poderiam ser utilizadas, desde que respeitem as premissas da conexão diferencial.

C. Novo ponto de vista para as topologias da literatura

Com base nos tópicos apresentados anteriormente, diversas topologias da literatura podem ser interpretadas como uma conexão diferencial entre dois conversores conhecidos [15]-[26]. Uma dessas topologias é o tradicional conversor duplo dual *boost* [15], que pode ser derivado da conexão diferencial entre um conversor *boost* TCN e sua versão TCP [ver Figura 6.a].

Além disso, outros exemplos de topologias que podem ser entendidas como conversores diferenciais são as propostas em [20] (Figura 12). O Conversor I [Figura 12.a], conforme [20], é composto por uma célula ativa de indutor chaveado (*ASL*) e um estágio de saída. Este conversor é equivalente ao apresentado na Figura 10.a (conversor *boost* TCN com *boost* TCP com redução de componentes). Como os interruptores de potência do Conversor I estão sujeitos a picos de tensão, os autores de [30] propuseram os conversores II e III, mostrados nas Figuras 12.b e 12.c, respectivamente, integrando a célula de elevação elementar (*EL*) [5], a fim de aumentar o ganho estático e fixar a tensão dos interruptores. Porém, estes conversores também podem ser derivados da conexão diferencial de um conversor *boost* TCN e sua versão TCP, na qual é inserida uma célula de ganho *EL*.

Os autores de [21] adicionaram uma célula *SC* no Conversor I, o que resultou em um conversor denominado conversor de rede ativa baseado em capacitor chaveado (*SC-ANC*). Este conversor é equivalente ao apresentado na Figura 11.a, e pode ser analisado como um conversor *boost* diferencial com célula *SC*.

Posteriormente, os autores de [22] propuseram a inserção de uma célula *PSL* na célula *ASL* de um conversor *SC-ANC*, resultando na estrutura denominada *SL/SC-ANC*. O conversor obtido é semelhante ao da conexão diferencial entre conversores *boost* com células *SC* e *PSL*.

O conversor proposto em [11] é semelhante à topologia ilustrada na Figura 12.c, na qual os diodos são invertidos para fornecer uma tensão de saída positiva.

Deve-se observar que toda conexão diferencial entre conversores com entrada em corrente resulta em uma célula *ASL*. Este ponto de vista é seguido por uma questão interessante: a célula *ASL* é originada de uma conexão diferencial entre dois conversores com entrada em corrente? De acordo com o que foi apresentado aqui, a resposta é sim.

Outros conversores encontrados na literatura também podem ser entendidos como conexões diferenciais de dois conversores. Por exemplo, em [15]-[26], os conversores não foram abordados como topologias diferenciais, no entanto, isso seria possível, uma vez que poderiam ser gerados por meio da conexão diferencial entre dois conversores conhecidos, com adição de células de ganho e aplicação da redução de componentes redundantes. Diante desta perspectiva, define-se que este trabalho propõe uma metodologia para geração de conversores de alto ganho.

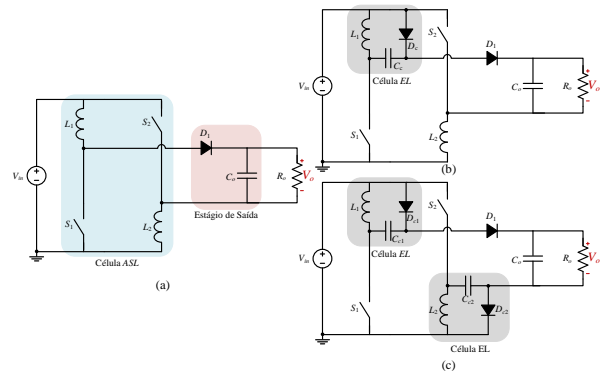


FIGURA 12. Conversores propostos em [20]: (a) Conversor I, (b) Conversor II e (c) Conversor III.

VI. PRINCIPAIS TOPOLOGIAS DERIVADAS

Algumas das novas topologias derivadas da metodologia proposta são apresentadas na Figura 13. A conexão diferencial entre um conversor *boost* TCN e um *boost* TCP com células *MASL* (indutor chaveado ativo modificado) e uma célula *SC* (*BB-MASL-SC*) é representada em Figura 13 (a). A célula *MASL* é uma combinação entre células *PSL* [7] e *ASL* [20].

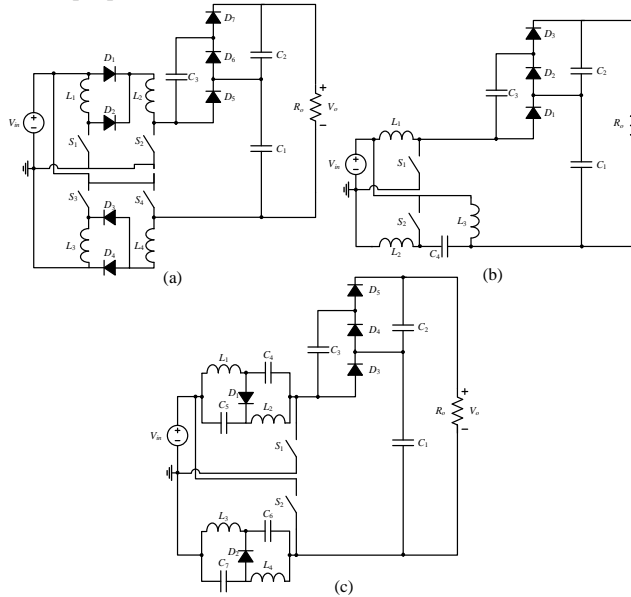


FIGURA 13. Conversores sintetizados a partir da conexão diferencial: (a) BB-MASL-SC, (b) BS-SC e (c) BB-qZS-SC.

A topologia derivada da conexão entre os conversores *boost* TCN e *SEPIC* TCP com uma célula *SC* (*BS-SC*) é ilustrada na Figura 13.b. Dois conversores *boost* conectados diferencialmente com uma célula *qZS* [27] e uma célula *SC* (*BB-qZS-SC*) são mostrados na Figura 14.c. Detalhes sobre as topologias apresentadas na Figura 13 podem ser encontradas em [28], [29] e [30].

VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para verificar a análise teórica, foram desenvolvidos dez protótipos (*boost*, *SEPIC*, *zeta*, *Ćuk*, *buck-boost* em suas versões TCN e TCP), conforme mostra a Figura 14.a para o grupo positivo, e a Figura 14.b para o grupo negativo. Além disso, foi desenvolvido um protótipo para realizar as conexões diferenciais, conforme mostra a Figura 14.c. As especificações e componentes dos protótipos estão apresentados na Tabela IV.

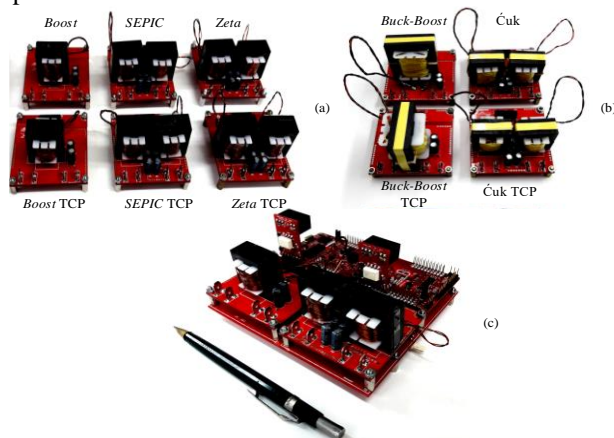


FIGURA 14. Fig. 14 Protótipos dos Conversores 1 e 2: (a) grupo positivo; (b) grupo negativo. Dimensões: 65 mm x 65 mm x 49 mm (conversores buck-boost), 65 mm x 65 mm x 35 mm (demais conversores). (c) Protótipo para montagem da conexão diferencial. Dimensões: 136 mm x 120 mm x 45 mm.

TABELA 4. Especificações de Projeto e Componentes dos Protótipos.

Tensão de entrada (V_{in})	20 V
Razão cíclica (D_1)	0,75
Potência de saída (P_1 e P_2)	100 W
Frequência de comutação (f_s)	50 kHz
Primeiro indutor do <i>boost</i> , <i>SEPIC</i> , <i>zeta</i> e <i>Ćuk</i> em suas versões TCN e TCP	300 μ H; E30/14; 46 espiras; 3 x AWG22
Segundo indutor do <i>SEPIC</i> , <i>zeta</i> e <i>Ćuk</i>	900 μ H; E30/14; 55 espiras 2 x AWG22
Indutor do <i>buck-boost</i> TCN e TCP	340 μ H; E42/15; 46 espiras 4 x AWG22
Capacitores de saída	2 x 10 μ F / 100 V
Segundo capacitor do <i>SEPIC</i> , <i>zeta</i> e <i>Ćuk</i> em suas versões TCN e TCP	2 x 3.3 μ F / 100 V
Interruptores	FDD86250; 150 V / 50 A
Diodos	TSP15H150; 150 V / 15 A
Gate Driver	Meia ponte + FOD3180
Processador Digital de Sinais	TMS320F28069

As Figuras 15.a e 15.b mostram os resultados relacionados à conexão entre os conversores *boost*. Verifica-se a tensão de entrada (≈ 20 V), as tensões de saída dos Conversores 1 e 2 (≈ 80 V cada) e a tensão diferencial de saída (≈ 140 V). As formas de onda das correntes estão exibidas na Figura 15.b. A forma de onda do canal matemático (M_3) mostra que $i_{in} = i_{in1} + i_{in2} - i_o$.

A corrente de entrada de ambos os conversores é a mesma ($i_{in1} \approx i_{in2} \approx 2,9$ A), resultando em uma corrente de entrada do conversor diferencial (i_{in}) em torno de 5 A, com uma corrente de saída (i_o) de aproximadamente 784 mA.

Resultados experimentais para a conexão diferencial entre os conversores *boost* TCN e *SEPIC* TCP considerando $D = D_1 = D_2 = 0,75$, são mostrados nas Figuras 15.c e 15.d, e considerando razões cíclicas diferentes ($D_1 = 0,7142$ e $D_2 = 0,777$) na Figura 16.

A tensão de saída (V_o) é a mesma em ambos os casos, porém, as tensões parciais (V_{o1} e V_{o2}) são diferentes. No primeiro caso ($D_1 = D_2$), V_{o1} está em torno de 80 V e V_{o2} está em 60 V, enquanto no segundo caso ($D_1 \neq D_2$), V_{o1} e V_{o2} estão em 70 V.

Esta última condição garante que os conversores processem a mesma potência. As correntes de entrada de cada um dos conversores no primeiro caso [Figura 15.d] são diferentes ($i_{in1} \approx 3,35$ A e $i_{in2} \approx 2,57$ A) e, no segundo caso [Figura 16.b], são iguais ($i_{in1} \approx i_{in2} \approx 2,9$ A). Isso significa que as razões cíclicas podem ser ajustadas para equilibrar a potência processada pelos conversores.

As Figuras 15.e e 15.f mostram os resultados experimentais para a conexão diferencial entre os conversores *Ćuk* considerando $D = D_1 = D_2$. A tensão de entrada (≈ 20 V), as tensões de saída dos Conversores 1 e 2 (≈ 60 V) e a tensão diferencial de saída (≈ 140 V) são mostradas na Figura 15.e. A corrente de entrada da topologia diferencial (i_{in}) está em torno de 5 A, enquanto as correntes de entrada de ambos os conversores são iguais ($i_{in1} \approx i_{in2} \approx 2,16$ A) e a corrente de saída é de 727 mA. A soma da corrente de cada conversor básico ($i_{in1} + i_{in2} \approx 4,32$ A) é menor que a corrente de entrada (5 A), o que reforça a ideia de que a fonte de entrada fornece uma parcela da potência diretamente para a carga.

A. Análise da potência processada e rendimento

A porcentagem experimental da potência processada por conversor que compõe o conversor diferencial está exposta na Tabela V.

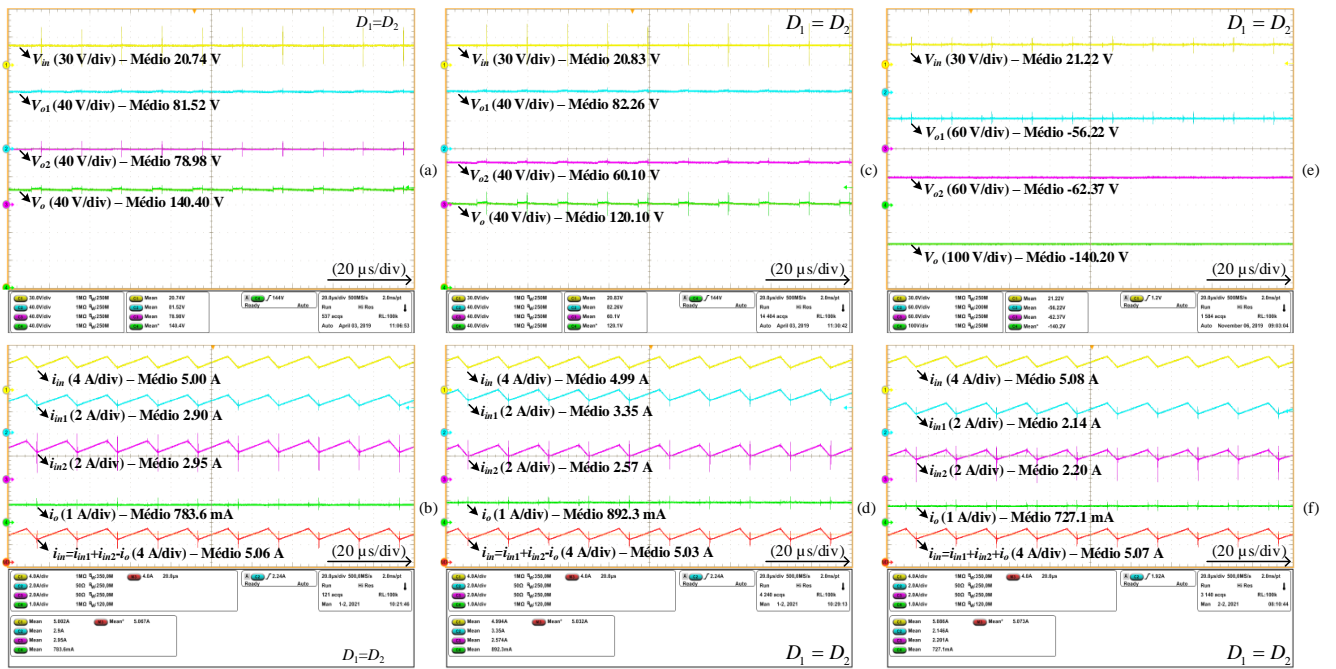


FIGURA 15. Resultados experimentais ($D = D_1 = D_2$): (a) e (b) do conversor boost TCN com boost TCP, (c) e (d) conversor boost TCN com SEPIC TCP e (f) e (g) do conversor Ćuk TCN com Ćuk TCP.

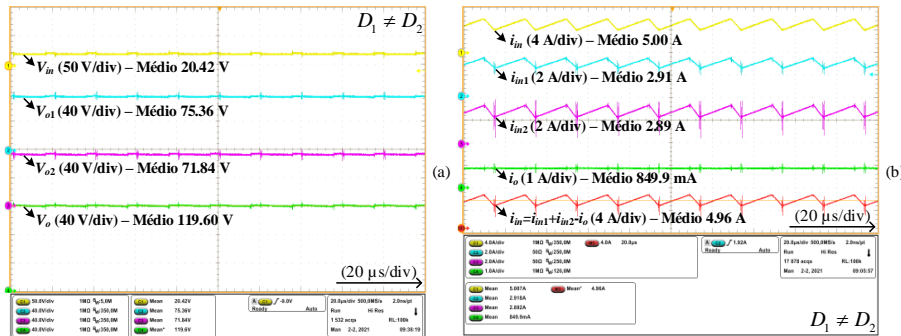


FIGURA 16. Resultados experimentais ($D_1 \neq D_2$) do conversor boost TCN com SEPIC TCP.

TABELA V. Porcentagem Experimental da Potência Processada por Conversor e pela Fonte de Entrada da Conexão Diferencial e Comparação entre Rendimento Teórico e Experimental em 100 W.

Conv. 1 (TCN)	Conv. 2 (TCP)	Resultados Experimentais					$n_3(\%)$	$n(\%)$ teórico Equações (19) e (20)	Erro %
		$P_1(\%)$	$P_2(\%)$	$P_{source}(\%)$	$n_1(\%)$	$n_2(\%)$			
$D = D_1 = D_2$									
Boost	Boost	58,06%	57,55%	15,61%	96,46%	95,29%	95,31%	95,23%	0,07%
Boost	SEPIC	68,51%	49,82%	18,33%	96,05%	94,03%	94,40%	94,32%	0,08%
Boost	Zeta	67,24%	49,83%	17,08%	96,57%	94,50%	94,88%	94,96%	0,08%
SEPIC	Boost	49,93%	67,24%	17,17%	93,92%	95,51%	94,05%	93,94%	0,11%
SEPIC	SEPIC	60,50%	59,85%	20,35%	93,77%	93,25%	92,17%	92,19%	0,02%
SEPIC	Zeta	61,27%	61,67%	22,94%	94,17%	94,33%	93,00%	92,93%	0,07%
Zeta	Boost	50,15%	66,92%	17,07%	94,94%	95,93%	94,69%	94,74%	0,05%
Zeta	SEPIC	60,61%	60,16%	20,77%	94,26%	93,52%	92,66%	92,63%	0,03%
Zeta	Zeta	60,66%	59,68%	20,35%	94,63%	93,71%	92,98%	92,98%	0,00%
Ćuk	Ćuk	42,21%	42,34%	15,45%	95,51%	95,83%	96,37%	96,34%	0,02%
Ćuk	Buck-Boost	43,05%	42,46%	14,49%	95,39%	94,31%	95,52%	95,60%	0,08%
Buck-Boost	Buck-Boost	42,69%	42,46%	14,86%	95,04%	94,48%	95,46%	95,52%	0,07%
Buck-Boost	Ćuk	42,61%	42,88%	14,51%	95,11%	95,37/5	95,90%	95,93%	0,03%
$D_1 \neq D_2$									
Boost	SEPIC	60,17%	57,53%	17,70%	96,66%	93,60%	94,33%	94,31	0,01%

Os parâmetros construtivos podem afetar a potência processada por elemento, porém, a diferença entre os valores experimentais e os valores teóricos é pequena e não

invalida a metodologia desenvolvida. Os valores da Tabela V são semelhantes à análise teórica presente na Seção III e na Tabela I. Como se pode notar, no grupo positivo a fonte

de entrada reduz a potência total de saída, enquanto no grupo negativo, a eleva.

Adicionalmente, a Tabela V apresenta a comparação do rendimento entre os valores teóricos obtidos pelas equações (19) e (20) e os resultados experimentais. Em todos os casos avaliados, o erro entre os valores teóricos e as medidas é inferior a 0,15%, o que comprova a equação proposta.

A Figura 17 apresenta as curvas de rendimento experimentais em função da potência de saída para a conexão entre conversores *boost* (grupo positivo) e entre conversores *Ćuk* (grupo negativo). Ambas as curvas de rendimento são superiores a 95% em toda a faixa de potência de saída analisada. Ressalta-se que, mesmo com um maior número de componentes, o conversor *Ćuk* apresenta maior rendimento em cargas mais elevadas devido à potência transferida da fonte diretamente à carga, característica de 3P dos conversores do grupo negativo.

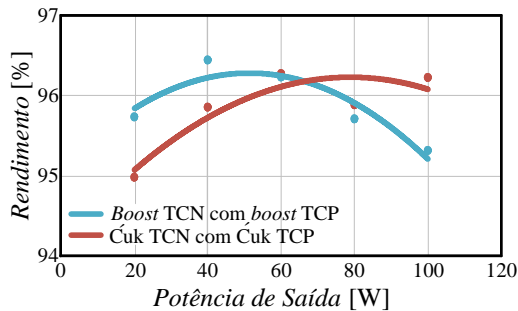


FIGURA 17. Curvas de rendimento experimental da conexão entre conversores *boost* e entre conversores *Ćuk*.

B. Validação da Modelagem e da Estratégia de Controle

Os controladores $C_1(s)$ e $C_2(s)$ são do tipo proporcional integral (PI) com frequência de cruzamento em 5 Hz e margem de fase em 90° . As funções de transferência foram obtidas pela metodologia proposta neste artigo e foram

utilizadas para projetar o controlador $C_2(s)$. As Figuras 18 e 19 mostram o comportamento em malha fechada das tensões de saída V_{o1} e V_{o2} , da tensão diferencial de saída V_o e da corrente de saída I_o ao aplicar um degrau de carga de 50%. Todos os resultados apresentados mostram-se satisfatórios e validam indiretamente a modelagem proposta. As tensões possuem tempo de acomodação em torno de 60 ms e sobressinal em torno de 2%. Após o intervalo transitório, os valores retornam à tensão de referência definida.

C. Principais Topologias Derivadas

As Figuras 20.a e 20.b mostram os resultados experimentais do conversor *BB-MASL-SC* com ganho estático de 20 e 30, respectivamente [estrutura vista na Figura 13.a]. Em ambos os casos foi considerada uma tensão de entrada de 20 V e uma potência nominal de 200 W. Para um ganho estático de 20 (20 V para 400 V), o pico do rendimento foi de 93,5%, enquanto para um ganho estático de 30 (20 V para 600 V), foi de 92,8%, como pode ser observado na Figura 20.c.

Os resultados experimentais do conversor *BS-SC* com ganho estático de 15 e 20 estão representados nas Figuras 21.a e 21.b, respectivamente [a estrutura *BS-SC* é mostrada na Figura 13.b]. A tensão de entrada é de 20 V e a potência nominal também é de 200 W. As curvas de rendimento experimental são exibidas na Figura 21.c para um ganho de 15, e o pico de rendimento foi de 95,6% e 93,2% na potência nominal. Para ganho de 20, o pico do rendimento foi de 95,4% e 93,9% na potência nominal.

Com base no rendimento experimental dos conversores *BB-MASL-SC* e *BS-SC*, pode-se afirmar que o *BB-MASL-SC* é recomendado quando o ganho estático requerido é maior que 20, e o *BS-SC* é uma escolha adequada para aplicações que requerem um ganho estático de até 20.

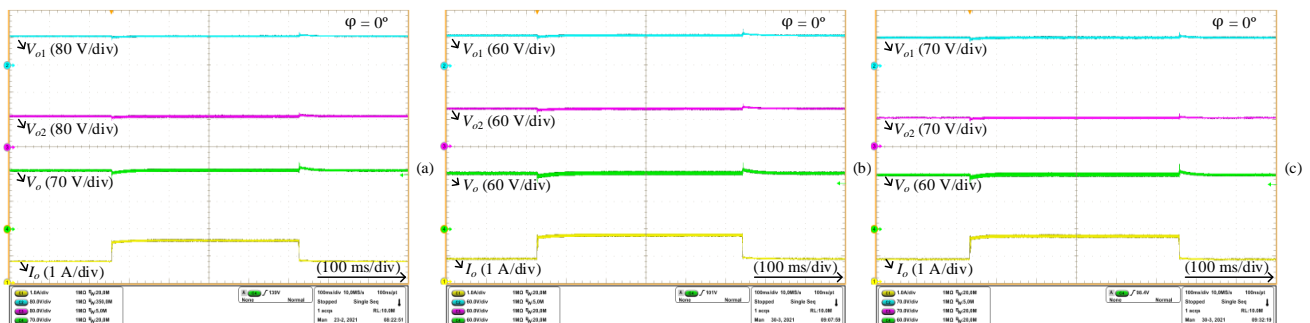


FIGURA 18. Resultados experimentais: (a) conversor *boost TCN* com *boost TCP* ($D = D1 = D2$); (b) conversor *SEPIC TCN* com *boost TCP* ($D = D1 = D2$); (c) conversor *SEPIC TCN* com *boost TCP* ($D1 \neq D2$).

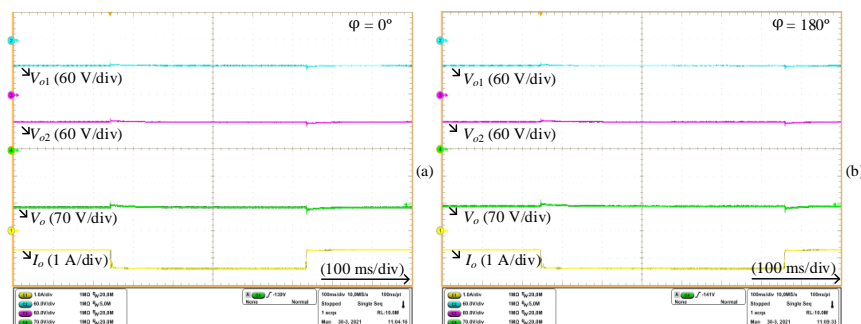


FIGURA 19. Resultados experimentais ($D = D1 = D2$) do conversor *Ćuk TCN* com *Ćuk TCP*: (a) modulação com portadoras em fase e (b) modulação com portadoras defasadas de 180° .

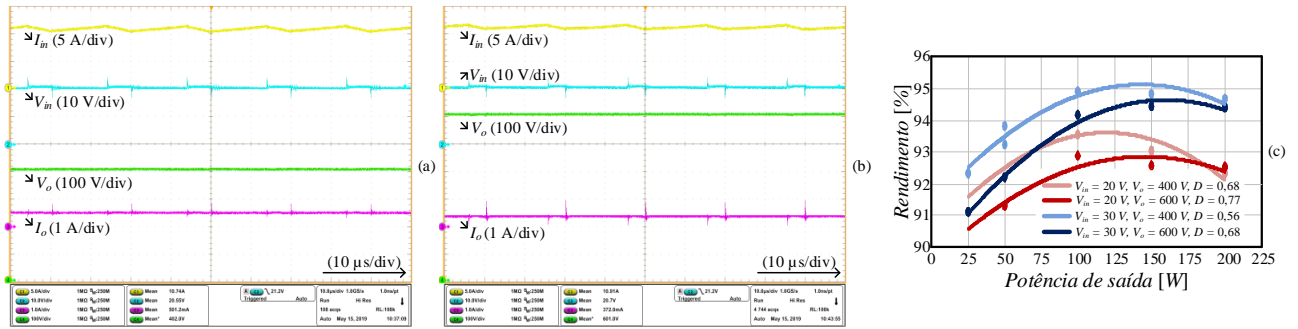


FIGURA 20. Resultados Experimentais para o conversor BB-MASL-SC: (a) ganho de 20 vezes (20 V para 400 V), (b) ganho de 30 vezes (20 V para 600 V) e (c) curvas experimentais do rendimento em função da potência de saída.

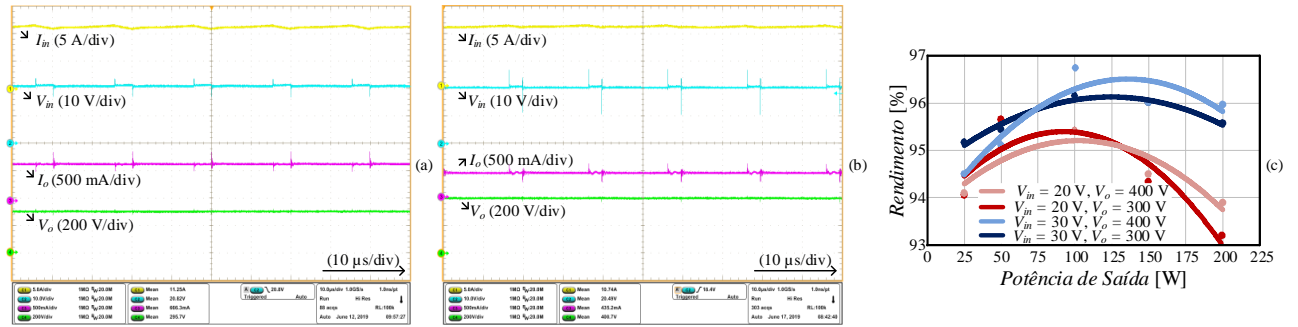


FIGURA 21. Resultados Experimentais para o conversor BS-SC: (a) ganho de 15 vezes (20 V para 300 V), (b) ganho de 20 vezes (20 V para 400 V) e (c) curvas experimentais do rendimento em função da potência de saída.

VIII. CONCLUSÕES

Este artigo propôs uma metodologia para derivação de conversores elevadores baseados na conexão diferencial entre conversores do mesmo grupo (positivo ou negativo). Verificou-se que os conversores diferenciais do grupo positivo são caracterizados pela circulação de potência não ativa, pois a soma das potências processadas pelos conversores individuais é superior à potência entregue à carga. Esta potência não ativa é menor quanto maior for a razão cíclica, portanto, a utilização de conversores do grupo positivo em conexões diferenciais é recomendada apenas para aplicações de alto ganho.

Para conversores diferenciais do grupo negativo, a fonte de entrada contribui positivamente com a tensão diferencial, assim, a soma da potência processada pelos conversores individuais é menor do que a potência entregue à carga, aumentando o rendimento total. Portanto, a utilização de conversores diferenciais do grupo negativo é recomendada para qualquer aplicação que necessite de conversores elevadores. De fato, os resultados experimentais permitem concluir que os conversores diferenciais do grupo negativo apresentaram melhor rendimento quando comparados aos do grupo positivo para os pontos de operação analisados.

O artigo também propôs uma modelagem simplificada e uma estratégia de controle, que foram validadas via experimentação. Além disso, mostrou um novo ponto de vista sobre algumas topologias da literatura e a possibilidade de integrar células de ganho aos conversores diferenciais.

Com a metodologia proposta, três novos conversores de alto ganho foram derivados, sendo que dois deles foram avaliados experimentalmente com ganhos de 15, 20 e 30 vezes.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pelo CNPq (processo 141513/2018-7 e processo 406978/2021-2).

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Metodologia, Desenvolvimento, implementação e teste de software, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição: DE ANDRADE, J.M.; Curadoria de dados, Análise de dados, Metodologia: SALVADOR, M.A.; Conceitualização, Curadoria de dados, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Redação - revisão e edição: COELHO, R.F.; Conceitualização, Curadoria de dados, Recebimento de financiamento, Metodologia, Administração do projeto, Disponibilização de ferramentas, Supervisão, Redação - revisão e edição: LAZZARIN, T.B.

PLÁGIO E SIMILARIDADE

O artigo foi submetido para verificação de similaridade no sistema Crossref Similarity Check (iThenticate).

REFERÊNCIAS

- [1] G. R. Previero, S. A. O. da Silva, L. P. Sampaio, and D. H. Wollz, "Emulador Eletrônico de um Sistema de Geração Eólica Baseado no GISIP Interligado à Rede Elétrica Trifásica", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 28, no. 2, pp. 131–140, May 2023, doi:[10.18618/REP.2023.2.0007](https://doi.org/10.18618/REP.2023.2.0007)
- [2] C. Chan, S. H. Chincholkar and W. Jiang, "Adaptive Current-Mode Control of a High Step-Up DC–DC Converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 9, pp. 7297–7305, Sept. 2017, doi:[10.1109/TPEL.2016.2628780](https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2628780)
- [3] M. F. Guepfrüh, G. Waltrich, and T. B. Lazzarin, "Comparação Entre Três Conversores CC-CC Não-Isolados de Elevado Ganho Estático Derivados do Conversor Boost", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 28, no. 3, pp. 216–227, Jul. 2023, doi:[10.18618/REP.2023.3.0006](https://doi.org/10.18618/REP.2023.3.0006)
- [4] P. H. C. da S. B. Loureiro and A. M. S. S. Andrade, "Avaliação de Conversores Boost-Flyback Empilhados com Dois e Três Enrolamentos e Multiplicador de Tensão", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 28, no. 1, pp. 42–51, Feb. 2023, doi:[10.18618/REP.2023.1.0045](https://doi.org/10.18618/REP.2023.1.0045)

- [5] M. Forouzesh, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg and B. Lehman, "Step-Up DC-DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, Dec. 2017, doi:[10.1109/TPEL.2017.2652318](https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318)
- [6] N. C. D. Pont, M. D. Vecchia, and T. B. Lazzarin, "Célula Ladder de Capacitor Chaveado em Conexão Cascata", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 26, no. 4, pp. 409-419, Dec. 2021, doi:[10.18618/REP.2021.4.0029](https://doi.org/10.18618/REP.2021.4.0029)
- [7] B. Axelrod, Y. Berkovich and A. Ioinovici, "Switched-Capacitor/Switched-Inductor Structures for Getting Transformerless Hybrid DC-DC PWM Converters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 55, no. 2, pp. 687-696, March 2008, doi:[10.1109/TCSI.2008.916403](https://doi.org/10.1109/TCSI.2008.916403)
- [8] H. Liu and F. Li, "A Novel High Step-up Converter With a Quasi-active Switched-Inductor Structure for Renewable Energy Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 7, pp. 5030-5039, July 2016, doi:[10.1109/TPEL.2015.2480115](https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2480115)
- [9] P. H. C. da S. B. Loureiro, T. M. K. Faistel, A. Toebe, P. C. V. Luz, and A. M. S. S. Andrade, "Conversor Boost com Células a Capacitor Chaveado e Indutor Acoplado", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 26, no. 3, pp. 279-289, Sep. 2021, doi:[10.18618/REP.2021.3.0005](https://doi.org/10.18618/REP.2021.3.0005)
- [10] M. M. Haji-Esmaili, M. Naseri, H. Khoun-Jahan and M. Abapour, "Fault-Tolerant and Reliable Structure for a Cascaded Quasi-Z-Source DC-DC Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 8, pp. 6455-6467, Aug. 2017, doi:[10.1109/TPEL.2016.2621411](https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2621411)
- [11] M. A. Salvador, T. B. Lazzarin and R. F. Coelho, "High Step-Up DC-DC Converter With Active Switched-Inductor and Passive Switched-Capacitor Networks", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 7, pp. 5644-5654, July 2018, doi:[10.1109/TIE.2017.2782239](https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2782239)
- [12] J. M. de Andrade, R. F. Coelho and T. B. Lazzarin. Partial Power Processing and Efficiency Analysis of dc-dc Differential Converters. *Energies* 2022, 15, 1159. doi:[10.3390/en15031159](https://doi.org/10.3390/en15031159)
- [13] J. M. de Andrade, M. A. Salvador, R. F. Coelho and T. B. Lazzarin, "General Method for Synthesizing High Gain Step-Up DC-DC Converters Based on Differential Connections", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 12, pp. 13239-13254, Dec. 2020, doi:[10.1109/TPEL.2020.2996501](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2996501), doi:[10.1109/TPEL.2020.2996501](https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2996501)
- [14] S. Xu, R. Shao, L. Chang and M. Mao, "Single-Phase Differential Buck-Boost Inverter With Pulse Energy Modulation and Power Decoupling Control", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 4, pp. 2060-2072, Dec. 2018, doi:[10.1109/JESTPE.2018.2832213](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2832213)
- [15] K. Jyotheeswara Reddy and N. Sudhakar, "High Voltage Gain Interleaved Boost Converter With Neural Network Based MPPT Controller for Fuel Cell Based Electric Vehicle Applications", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3899-3908, 2018, doi:[10.1109/ACCESS.2017.2785832](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2785832)
- [16] S. Choi, V. G. Agelidis, J. Yang, D. Coutellier and P. Marabeas, "Analysis, design and experimental results of a floating-output interleaved-input boost-derived DC-DC high-gain transformer-less converter", *IET Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 168-180, January 2011, doi:[10.1049/iet-pel.2009.0339](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2009.0339)
- [17] J. R. R. Zientarski, M. L. d. S. Martins, J. R. Pinheiro and H. L. Hey, "Series-Connected Partial-Power Converters Applied to PV Systems: A Design Approach Based on Step-Up/Down Voltage Regulation Range", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 7622-7633, Sept. 2018, doi:[10.1109/TPEL.2017.2765928](https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2765928)
- [18] F. S. Garcia, J. A. Pomilio and G. Spiazzi, "Modeling and Control Design of the Interleaved Double Dual Boost Converter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 8, pp. 3283-3290, Aug. 2013, doi:[10.1109/TIE.2012.2203770](https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2203770)
- [19] D. Coutellier, V. G. Agelidis and S. Choi, "Experimental verification of floating-output interleaved-input DC-DC high-gain transformer-less converter topologies", in *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, 2008, pp. 562-568, doi:[10.1109/PESC.2008.4591989](https://doi.org/10.1109/PESC.2008.4591989)
- [20] L. Yang, T. Liang and J. Chen, "Transformerless DC-DC Converters With High Step-Up Voltage Gain", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 8, pp. 3144-3152, Aug. 2009, doi:[10.1109/TIE.2009.2022512](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2022512)
- [21] Y. Tang, T. Wang and Y. He, "A Switched-Capacitor-Based Active-Network Converter With High Voltage Gain", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2959-2968, June 2014, doi:[10.1109/TPEL.2013.2272639](https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2272639)
- [22] Y. Tang, T. Wang and D. Fu, "Multicell Switched-Inductor/Switched-Capacitor Combined Active-Network Converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 4, pp. 2063-2072, April 2015, doi:[10.1109/TPEL.2014.2325052](https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2325052)
- [23] M. Maalandish, S. H. Hosseini, S. Ghasemzadeh, E. Babaei and T. Jalilzadeh, "A Novel Multiphase High Step-Up DC/DC Boost Converter With Lower Losses on Semiconductors", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 1, pp. 541-554, March 2019, doi:[10.1109/JESTPE.2018.2830510](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2830510)
- [24] M. Maalandish, S. H. Hosseini and T. Jalilzadeh, "High step-up dc/dc converter using switch-capacitor techniques and lower losses for renewable energy applications", *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 10, pp. 1718-1729, 28 8 2018, doi:[10.1049/iet-pel.2017.0752](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0752)
- [25] Z. Saadatizadeh, P. C. Heris, E. Babaei and M. Sabahi, "A New Nonisolated Single-Input Three-Output High Voltage Gain Converter With Low Voltage Stresses on Switches and Diodes", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 6, pp. 4308-4318, June 2019, doi:[10.1109/TIE.2018.2864710](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2864710)
- [26] C. G. Zogogianni, E. C. Tatakis and V. Porobic, "Investigation of a Non-isolated Reduced Redundant Power Processing DC/DC Converter for High-Power High Step-Up Applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5229-5242, June 2019, doi:[10.1109/TPEL.2018.2868165](https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2868165)
- [27] H. Shen, B. Zhang and D. Qiu, "Hybrid Z-Source Boost DC-DC Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 310-319, Jan. 2017, doi:[10.1109/TIE.2016.2607688](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2607688)
- [28] J. M. de Andrade, R. F. Coelho, T. B. Lazzarin, "High step-up dc-dc converter based on modified active switched-inductor and switched-capacitor cells", *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 14, pp. 3127-3137, Nov. 2020, doi:[10.1049/iet-pel.2020.0064](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2020.0064)
- [29] J. M. de Andrade, R. F. Coelho, T. B. Lazzarin. "High step-up dc-dc converter based on the differential connection of basic converters and switched-capacitor cells", *Int J Circ Theor Appl*. 2021; 49: 2555-2577, doi:[10.1002/cta.3003](https://doi.org/10.1002/cta.3003)
- [30] J. M. de Andrade, R. Francisco Coelho and T. B. Lazzarin, "New High Step-up dc-dc Converter with Quasi-Z-Source Network and Switched-Capacitor Cell", in *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA, USA, 2020, pp. 2062-2066, doi:[10.1109/APEC39645.2020.9124305](https://doi.org/10.1109/APEC39645.2020.9124305)

DADOS BIográficos

Jéssika Melo de Andrade nasceu em Florianópolis, Brasil, em julho de 1994, se formou em Sistemas Eletrônicos no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) em Florianópolis, no ano de 2015. Recebeu o título de Mestre e Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Florianópolis, no ano de 2018 e 2022, respectivamente. Atualmente é professora no Departamento de Engenharias da Mobilidade na UFSC – Joinville e docente permanente no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEEL) da UFSC, além disso, atua como pesquisadora no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). Seus interesses incluem modelagem e controle aplicados a eletrônica de potência, conversores/inversores com células de ganho, energia renovável e áreas afins. A Prof^ª Jéssika é membro SOBRAEP.

Marcos Antonio Salvador nasceu em Blumenau, Brasil em 1985. Possui graduação (2012) e mestrado (2014) em engenharia elétrica pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB). Concluiu o doutorado (2020) na área de concentração de processamento de energia, pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Foi professor celetista na FURB (2014 - 2016), onde lecionou na graduação e atuou em pesquisas. Foi professor na Faculdade de tecnologia SENAI Blumenau de 2014 a 2017. Possui experiência profissional na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica. Atualmente é professor do Instituto Federal de Santa Catarina no Campus Jaraguá do Sul - Rau. Suas áreas de interesse incluem modelagem e controle de conversores estáticos, conversores cc-cc de alto ganho, armazenamento de energia, instrumentação eletrônica, eletrônica embarcada e programação aplicada a engenharia.

Roberto Francisco Coelho nasceu em Florianópolis, em agosto de 1982. Recebeu o título de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, em 2006, 2008 e 2013, respectivamente. Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da mesma instituição, onde desenvolve trabalhos relacionados

ao processamento de energia proveniente de fontes renováveis e ao controle e estabilidade de microrredes. Prof. Roberto é membro da SOBRAEP e do *IEEE*.

Telles Brunelli Lazzarin nasceu em Criciúma, Santa Catarina, Brasil, em 1979. Recebeu o grau de Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, em 2004, 2006 e 2010, respectivamente. Atualmente é professor no Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da UFSC. A área de concentração do Prof. Telles é em eletrônica de potência, com ênfase em energias renováveis (principalmente eólica de pequeno porte), inversores de tensão e conversores estáticos a capacitor chaveado. Prof. Telles é membro da SOBRAEP e do *IEEE*.