

PROPOSTA DE UMA ESTRUTURA CC-CC COM REDUNDÂNCIA INTERNA DE MÓDULOS CONVERSORES PARA APLICAÇÕES EM TRANSFORMADORES DE ESTADO SÓLIDO

Henrique R. Mamede¹, Vinicius Netto Trucco¹, Daniel Tobias¹, Lucas Brighenti¹, Walbermark M. dos Santos², Roberto F. Coelho¹, Denizar C. Martins¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Instituto de Eletrônica de Potência, Florianópolis – SC, Brasil

²Universidade Federal do Espírito Santo, Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico, Vitória – ES, Brasil
e-mail: henrique@inep.ufsc.br, vinicius_trucco@hotmail.com, danielkobias.sb@gmail.com, lucasbrighenti@gmail.com, roberto@inep.ufsc.br, walbermark.santos@ufes.br, denizar.martins@gmail.com

Resumo – Várias arquiteturas de *link cc* para transformadores de estado sólido têm sido sugeridas na literatura. No entanto, algumas são unidirecionais, não modulares, não possibilitam a divisão dos esforços de tensão e de corrente sobre os semicondutores ou não possuem redundância de conversores. Neste artigo apresenta-se uma proposta de arquitetura que utiliza conversores *DAB* visando a aplicação em transformadores de estado sólido. O sistema é concebido de maneira a propiciar características como: ajuste dos níveis de tensão, isolamento galvânico, bidirecionalidade, controle ativo do fluxo de potência e divisão da potência processada entre os módulos, reduzindo os esforços de tensão e de corrente nos interruptores e permitindo maior facilidade de expansão, concepção e controle. Além das características citadas, a arquitetura proposta apresenta modularidade e introduz o conceito de célula e redundância. Esta técnica favorece a retirada de alguns conversores da estrutura sem que os outros sejam submetidos às tensões maiores, a tensão na carga e na fonte de entrada não são alteradas e o fornecimento de potência à carga pode ser mantido, o que aumenta a confiabilidade no fornecimento de energia. A utilização do conversor *DAB*, chamado de Módulo *DAB* neste artigo, propicia alto rendimento, pois este conversor executa comutação suave natural para uma determinada faixa de carga. O princípio de operação da estrutura, seus mecanismos da divisão de potência processada e o conceito de redundância, são descritos e experimentalmente validados.

Palavras-Chave – Conversor *Dual Active Bridge*, Modularidade, Redundância, Transformador de Estado Sólido.

PROPOSAL OF A DC-DC STRUCTURE WITH INTERNAL REDUNDANCY OF CONVERTER MODULES FOR APPLICATIONS IN SOLID STATE TRANSFORMERS

Artigo submetido em 25/02/2017. Primeira revisão em 25/04/2017. Aceito para publicação em 21/06/2017 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

Abstract – Various topologies of DC link for solid-state transformers have been suggested in the literature. However, some of them are unidirectional or non-modular topologies, or are unable to share the current and voltage stress among the semiconductors or do not have converter redundancy. Thus, this paper presents a topology that uses *DAB* converters in solid-state transformer applications. The designed system present the following features: voltage levels adaptation, galvanic isolation, bidirectional power flow, active control of the power flow and division of the power processed by the modules, implying reduction of the current and voltage stress in the switches and ease of expansion, design and control. Moreover, the proposed topology presents modularity and introduces the concept of cell and redundancy. These techniques allow that some converters may be removed from the structure without others converters are subjected to higher voltages, the voltage at the load and at the input source are not changed and the power supply to the load can be maintained, which increases the reliability of the power supply. The use of *DAB* converter, named *DAB* Module in this paper, favors high performance, since it has natural soft switching for a determined load range. The operation principle of this structure, its mechanism for power division and the concept of redundancy are described and evaluated by experimental results.

Keywords – Dual Active Bridge Converter, Modularity, Redundancy, Solid State Transformer.

NOMENCLATURA

a	Relação de transformação do transformador do Módulo <i>DAB</i> : $v_s'/v_s = 1/a$.
C_2	Capacitância da Porta 2 do Módulo <i>DAB</i> .
<i>DAB</i>	<i>Dual Active Bridge</i> .
I_1, I_2	Valores médios das correntes nas Portas 1 e 2 do Módulo <i>DAB</i> .
I_{BTcel}, I_{ATcel}	Valores médios das correntes de uma célula do lado de Baixa e Alta Tensão.
k	Número total de módulos da estrutura.
l	Número de módulos de cada célula que pode ser retirado.
L	Indutância de transmissão do conversor <i>DAB</i> .
m	Número de células conversoras.

n	Número de módulos de cada célula.
n_{ef}	Número de módulos ativos em cada célula.
P_{cel}	Potência processada por cada célula.
P_{crit}	Potência crítica processada pela estrutura.
P_{DAB}	Potência processada por um Módulo <i>DAB</i> .
P_e	Potência total de entrada.
P_{e1}, P_{e2}	Potência processada pelos módulos 1 e 2.
P_s	Potência total de saída.
P_{s1}, P_{s2}	Potência de saída dos módulos 1 e 2.
P_{max}	Potência máxima da estrutura completa.
R_2	Resistência de carga na porta 2 do Módulo <i>DAB</i> .
V_1, V_2	Tensões nas portas 1 e 2 do Módulo <i>DAB</i> .
V_{BT}, V_{AT}	Tensões da estrutura nos lados de Baixa e Alta Tensão.
V_{BTCel}, V_{ATCel}	Tensões da célula nos lados de Baixa e Alta Tensão.
η_1, η_2	Rendimento dos módulos que compõem a estrutura.
φ	Ângulo de defasagem entre as tensões das portas do Módulo <i>DAB</i> .
φ_0	Ponto de operação do ângulo de defasagem do Módulo <i>DAB</i> .

I. INTRODUÇÃO

Nos sistemas elétricos atuais, e principalmente nos futuros, a adequada seleção dos níveis de tensão em pontos estratégicos da rede de distribuição é de extrema importância para elevar o rendimento e aumentar a segurança da instalação [1]. Neste contexto, os transformadores de estado sólido (*Solid-State Transformer-SST*) tornam-se elementos indispensáveis, pois permitem a transferência de energia entre diferentes níveis de potencial e promovem o controle ativo do fluxo de potência [2]. Além disso, os *SSTs* apresentam peso e volume reduzidos em relação aos transformadores convencionais, uma vez que operam em média ou alta frequência [3], e sendo dispositivos controláveis, permitem a incorporação de conceitos de proteção inteligente [1].

Os transformadores de estado sólido encontram aplicações em microrredes [4], [5], estações de carregamento para veículos elétricos [6] e centrais de processamento de dados [7], [8], para citar alguns exemplos. Na Figura 1 são apresentadas dois tipos de configurações para interligar fontes e cargas à rede elétrica: (a) configuração empregando um transformador convencional e (b) configuração utilizando um *SST*.

Com a solução convencional, Figura 1(a), questões como qualidade de energia, compensação de energia reativa, filtragem ativa, isolamento de faltas e controle de frequência não são facilmente atendidas, haja vista que tais atribuições são distribuídas entre diversos conversores que devem ter seus controles precisamente coordenados [1]. Todavia, a configuração apresentada na Figura 1 (b), que incorpora um estágio central de retificação/inversão e um conversor cc-cc isolado, representa uma solução mais atrativa dada sua maior densidade de potência e o fato de a distribuição de energia ser realizada em um barramento cc de baixa tensão [9], [10].

Em virtude de suas características, transformadores de estado sólido têm recebido crescente destaque no contexto das futuras redes de distribuição, sendo considerados como uma das dez tecnologias emergentes de maior importância [11]. Entretanto, apesar dos atrativos, o nível de tensão de operação dos *SSTs*, que pode chegar a dezenas de quilovolts, é um desafio a ser ultrapassado. Logicamente, como a tecnologia atual de semicondutores não provê dispositivos para tal aplicação, a utilização de arquiteturas conversoras modulares tem despertado o interesse dos pesquisadores.

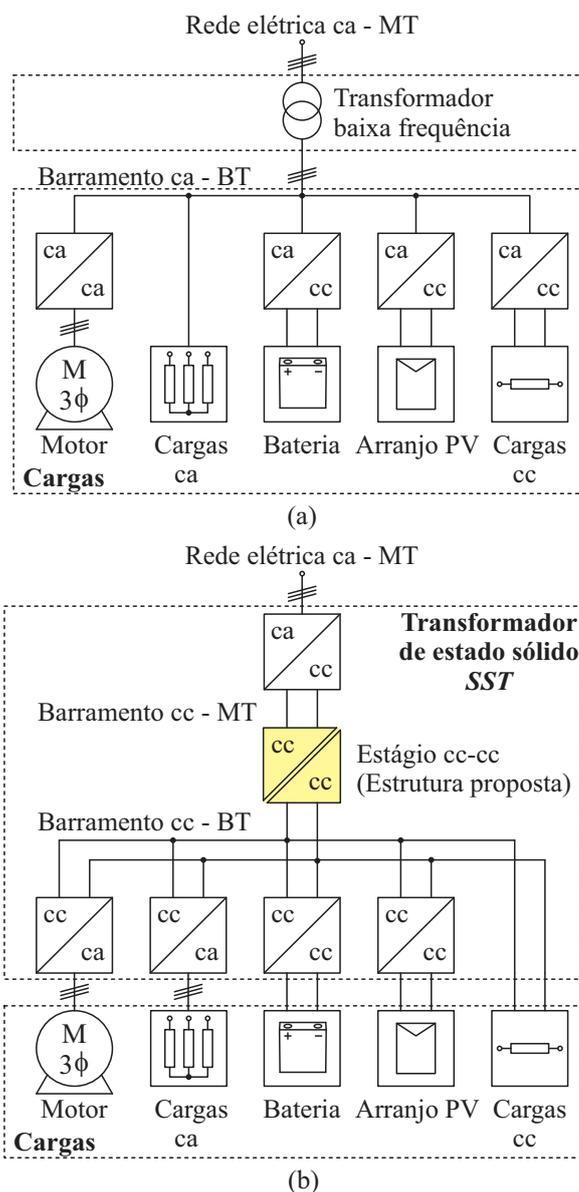


Fig. 1. Microrredes interligadas à rede elétrica principal. (a) com transformador convencional; (b) com *SST* [1].

Conversores modulares surgem com o potencial de apresentar menor custo, dados os preceitos da economia de escala. Ademais, têm manutenção facilitada, uma vez que os módulos em falha podem ser substituídos sem comprometer toda a estrutura e, também, permitem a ampliação da capacidade de processamento de potência pela simples adição de mais módulos. Tais fatores, inevitavelmente, garantem redundância e maior confiabilidade [12], [13].

Em se tratando de estruturas modulares para *SST*, merece destaque [14]-[16]. Em [14] é utilizado o conceito de submódulos. Cada submódulo possui conversores *DAB* com ligação paralelo na entrada e série na saída. Os submódulos estão ligados da forma série na entrada e paralelo na saída. Nesta situação, se um dos submódulos perder um conversor, a tensão nos restantes terá de ser elevada para manter a tensão na saída inalterada. Assim, ou o projeto é feito visando essa situação (fato que a referência não comenta) ou os submódulos não podem perder conversor, e caso percam, a tensão na carga pode ser sacrificada.

Em [15] é mostrada uma estrutura modular formada também por submódulos, onde em cada submódulo, os conversores são interligados em série na entrada e série-paralelo na saída. Da mesma forma que da referência [14], esta estrutura não suporta a retirada de um conversor mantendo o mesmo nível da tensão de entrada, salvo se o conversor for dimensionado para isso, o que a referência não aborda. Apesar de a mesma comentar que alguma redundância pode ser incluída, não mostra onde nem como.

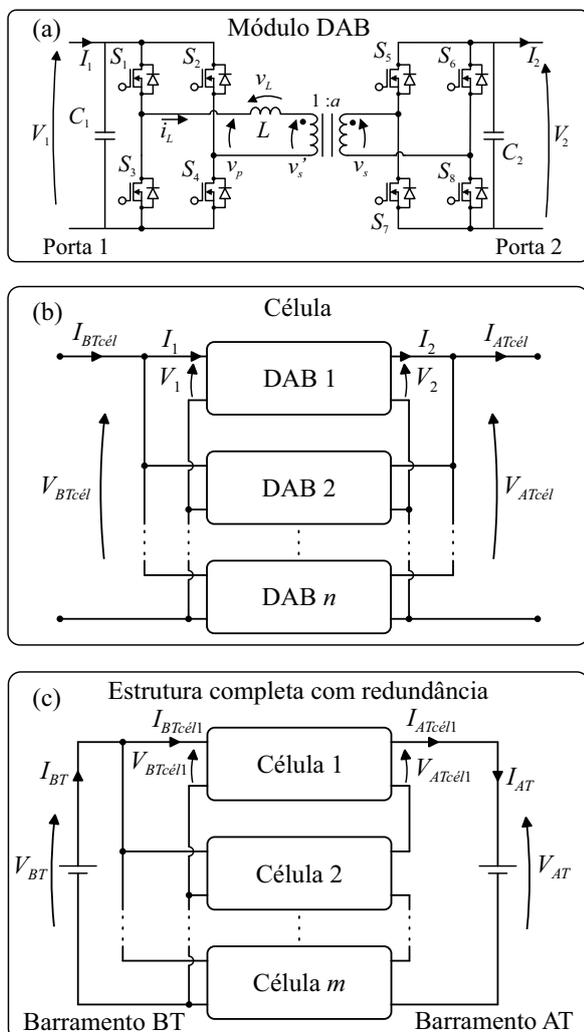


Fig. 2. (a) Conversor *DAB*, chamado aqui de Módulo *DAB*; (b) Interligação dos Módulos *DAB* formando as células; (c) interligação de células formando a estrutura proposta.

A referência [16], apesar de também utilizar o conversor *DAB*, apresenta uma estrutura ligeiramente diferente da

proposta neste artigo. A ligação série na entrada é feita no lado ac, e a ligação paralela na saída no lado cc. No entanto, ela tem o mesmo problema das anteriores. Nenhum dos conversores pode ser retirado de operação sem comprometer o nível de tensão sobre as chaves dos conversores de entrada, salvo se o nível de tensão de entrada for diminuído ou os conversores forem projetados prevendo essa situação, fato que a referência não comenta.

Mediante o exposto, este artigo propõe uma nova arquitetura modular de *SST*, apresentada na Figura 2. Tal arquitetura emprega o conversor *DAB* como módulo base formando células.

As células são formadas por n Módulos *DAB* ligados em paralelo na entrada e paralelo na saída. Assim a tensão de entrada e saída de uma célula é a mesma da de um Módulo *DAB*.

No lado de baixa tensão cc as interligações das células são em paralelo, e no lado de alta tensão cc as interligações são feitas em série. Assim, a divisão de tensão do barramento de alta tensão cc é feita entre células e não entre os Módulos *DAB*.

Desta forma, pode-se retirar até $n-l$ (n - número de Módulos *DAB* de uma célula, l - quantidade de Módulos *DAB* de cada célula que pode ser retirado de operação) e manter uma potência crítica de processamento da estrutura, sem submeter os módulos restantes a tensões maiores.

Assim, a estrutura proposta apresenta como características a divisão dos esforços de tensão e de corrente nos semicondutores, maior confiabilidade, e como grande diferencial a redundância.

II. O CONVERSOR *DAB*

O conversor *DAB* mostrado na Figura 2(a) foi proposto em [17] como um conversor para aplicações em altas potências, e bastante explorado em [13], [18], [19], possui comutação suave em carga pesada, elevada densidade de potência, isolamento galvânico em alta ou média frequência e facilidade de interligação em blocos, características que o tornam adequado para ser empregado como elemento principal da arquitetura proposta.

Há na literatura diversas sugestões de modulação para o conversor *DAB*. No entanto neste trabalho é utilizado a modulação *Phase-Shift* (*PSM*) de dois níveis, em que a razão cíclica dos interruptores é fixa em 50% e a transferência de potência é dada pela defasagem entre os pulsos de acionamento dos interruptores da Porta 1 e Porta 2. Efetivamente, essa transferência ocorre no intervalo de tempo onde os interruptores S_1, S_4, S_6 e S_7 estão conduzindo simultaneamente, e no intervalo de tempo em que os interruptores S_2, S_3, S_5 e S_8 conduzem (etapas I e II vide Figura 3). Nestas condições, a tensão sobre indutor de transmissão L é equivalente à soma dos valores das tensões V_1 e V_2' , onde V_2' é a tensão V_2 referida ao primário do transformador e a corrente no indutor varia linearmente passando por zero e chegando até o novo patamar. As principais formas de onda do conversor *DAB* para essa modulação são apresentadas na Figura 3.

A partir das formas de ondas, pode-se determinar que a corrente média na porta 2 depende do nível de tensão na

porta 1, da defasagem angular entre as tensões das portas e da impedância de transmissão de potência, conforme apresentado em:

$$I_2 = \frac{V_1}{a\omega L} \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right). \quad (1)$$

Considerando o conversor ideal e multiplicando (1) por V_2 tem-se a potência transmitida entre as portas:

$$P_2 = P_{DAB} = \frac{V_1 V_2}{a\omega L} \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right). \quad (2)$$

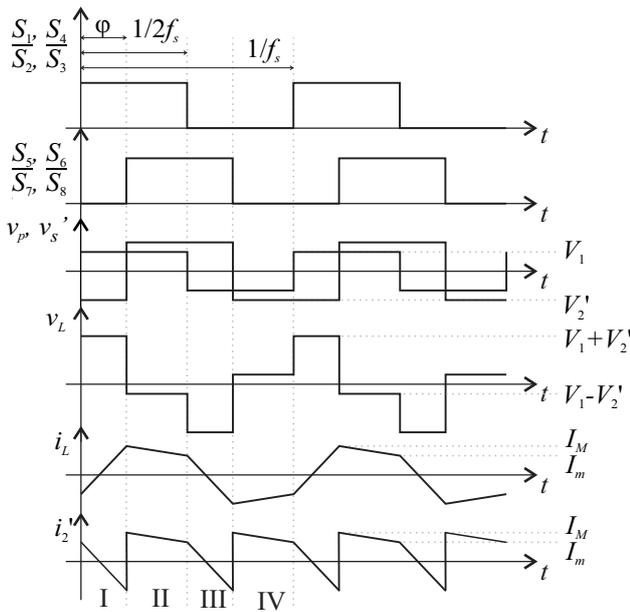


Fig. 3. Principais formas de onda do conversor DAB.

III. ESTUDO DA ARQUITETURA PROPOSTA

A arquitetura proposta consiste em m células conversoras, cada uma contendo n Módulos DAB. Definindo-se a potência ativa transmitida por cada Módulo DAB como P_{DAB} e, sendo $k = m.n$ o número total de módulos, tem-se que a potência processada pela estrutura é dada por:

$$P_{max} = k P_{DAB}. \quad (3)$$

Sendo a potência total igualmente dividida entre as m células, a potência processada individualmente por célula (P_{cel}) pode ser expressa por:

$$P_{cel} = \frac{P_{max}}{m} = n P_{DAB}. \quad (4)$$

Como a redundância é um dos objetivos almejados, considera-se que um número l de módulos de cada célula pode ser retirado de operação de modo que a carga continue sendo integralmente suprida com tensão nominal. Para que isto ocorra, torna-se necessário que ao menos um módulo em cada célula esteja ativo, de modo a atender a seguinte relação:

$$n_{ef} = n - l \geq 1. \quad (5)$$

Assim, define-se um valor de potência crítica (P_{crit}) que deverá ser entregue à carga considerando um critério de redundância interno às células, do tipo $n - l$. A potência crítica relaciona-se com a potência de cada Módulo DAB conforme:

$$P_{crit} = m(n - l) P_{DAB}. \quad (6)$$

A distribuição das tensões nas portas dos módulos de uma célula, em ambos os lados, é garantida pelas conexões físicas realizadas. Entretanto, uma divisão igualitária das correntes das portas dos módulos em relação às correntes das células depende do sistema de controle [20], [21]. Desde que o controle desempenhe tal atribuição, são válidas as seguintes relações:

$$I_1 = \frac{I_{BTcel}}{n_{ef}} \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{I_{ATcel}}{n_{ef}}. \quad (8)$$

Devido à maneira com que os módulos da estrutura são interligados, as correntes dos lados de baixa e alta tensão se relacionam com as correntes das células de acordo com:

$$I_{BTcel} = \frac{I_{BT}}{m} \quad (9)$$

$$I_{ATcel} = I_{AT}. \quad (10)$$

Assim, a partir de (7)-(10) obtêm-se:

$$I_1 = \frac{I_{BT}}{m \cdot n_{ef}} \quad (11)$$

$$I_2 = \frac{I_{AT}}{n_{ef}}. \quad (12)$$

As tensões na estrutura são determinadas por:

$$V_1 = V_{BTcel} = V_{BT} \quad (13)$$

$$V_2 = V_{ATcel} = \frac{V_{AT}}{m}. \quad (14)$$

A. Rendimento da Estrutura

Estando a estrutura em operação, a potência total da carga é processada pelas m células. Nesta situação para determinar o rendimento, pode-se representar o comportamento da estrutura por um sistema em paralelo, como o da Figura 4. Assim, para este sistema, o rendimento global é dado por:

$$\eta = \frac{\eta_1 P_{e_c1} + \eta_2 P_{e_c2} + \dots + \eta_m P_{e_cm}}{P_{e_c1} + P_{e_c2} + \dots + P_{e_cm}}. \quad (15)$$

De (15) verifica-se que caso os rendimentos das células sejam iguais ou muito próximos ($\eta_1 \approx \eta_2 \approx \eta_m$), o rendimento global do sistema será igual ao rendimento de uma só célula ($\eta \approx \eta_1 \approx \eta_2 \approx \eta_m$).

Estendendo o raciocínio para determinar o rendimento de cada célula, observa-se que a potência processada por estas é dividida entre os Módulos *DAB* que a compõem. Logo, a Figura 4 também serve para representar a potência processada por cada célula e (15) pode ser utilizada para calcular seu rendimento, apenas substituindo-se as variáveis.

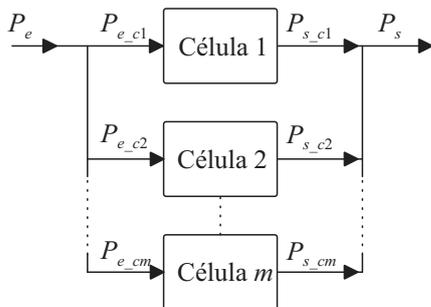


Fig. 4. Diagrama de blocos para avaliação do rendimento da estrutura proposta.

Assim, se os Módulos *DAB* de uma célula tiverem rendimentos iguais ou muito próximos, o rendimento desta célula será igual ao rendimento de um único Módulo *DAB*.

Desta maneira, se os Módulos *DAB* forem construídos com diferenças paramétricas mínimas, as células apresentarão características elétricas praticamente iguais e o rendimento global da estrutura será bem próximo do rendimento de um único Módulo *DAB*.

Portanto, para que a estrutura tenha rendimento elevado, os módulos devem ser projetados para operarem com alto rendimento em uma ampla faixa de carga (comportamento horizontal do inglês *flat*) e as diferenças paramétricas entre estes, devem ser minimizadas.

B. Controle da Estrutura

A estratégia de controle para a estrutura proposta, apresentada na Figura 5, consiste em comparar a amostra do valor da tensão do barramento de alta tensão de cada célula ($V_{ATcelmedido}$) com um valor de referência ($V_{ATcelref}$), gerando assim um sinal de erro ($erro_v$). Este sinal de erro passa por um controlador de tensão ($C_v(s)$), que por sua vez, gera um sinal referente ao ângulo de defasagem de cada Módulo *DAB*. O bloco $H_v(s)$ representa o ganho de toda a parte de sensoriamento e condicionamento do sinal lido da tensão V_{ATcel} . Esta estratégia de controle não compensa diferenças paramétricas entre os Módulos *DAB*, devido à conexão em paralelo, mas apesar desta simplificação, o controle apresentou um funcionamento adequado, regulando corretamente a tensão do barramento e dividindo as correntes nos módulos.

A planta $G_{v\varphi}$ é obtida considerando a queda de tensão no capacitor do barramento de alta tensão devido à corrente I_2 (1) de cada Módulo *DAB* (Figura 2(a)). A corrente I_2 é não linear perante variações do ângulo φ , mas considerando pequenas perturbações em torno de um ponto de operação φ_0 , esta corrente torna-se linear:

$$\frac{\tilde{i}_2}{\tilde{\varphi}} = \frac{V_1}{\omega L} \left(1 - \frac{2\varphi_0}{\pi} \right). \quad (16)$$

A função de transferência da queda de tensão de um par *RC* é representada por:

$$\frac{\tilde{v}_2(s)}{\tilde{i}_2(s)} = \frac{R_2}{sC_2R_2 + 1}. \quad (17)$$

Aplicando (16) em (17) obtém-se:

$$G_{v\varphi}(s) \frac{\tilde{v}_2(s)}{\tilde{\varphi}(s)} = \frac{V_1}{\omega L} \left(1 - \frac{2\varphi_0}{\pi} \right) \frac{R_2}{sC_2R_2 + 1}. \quad (18)$$

A resistência R_2 é referente a cada Módulo *DAB* e pode ser calculada pela potência processada pelo módulo.

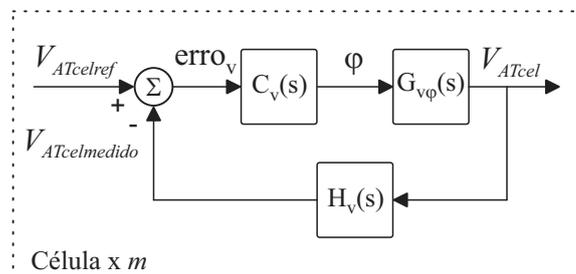


Fig. 5. Diagrama de blocos do sistema de controle utilizado para cada Módulo *DAB*.

Os parâmetros do conversor são apresentados na Tabela I. Cada Módulo *DAB* apresenta uma capacitância no filtro de saída de 20 μF e processa 1 kW. O controlador utilizado é do tipo proporcional integral (PI) para obter um erro nulo na comparação da referência com a realimentação, tendo seus parâmetros calculados para fazer a curva de ganho da resposta em frequência do sistema cruzar por zero na frequência de 300 Hz, garantindo assim, uma dinâmica adequada para a operação do conversor. O ponto de operação foi ajustado em $\varphi_0 = 45^\circ$, ângulo em que o conversor *DAB* apresenta boa estabilidade e bom funcionamento. Na implementação prática, utilizou-se o processador digital de sinais TMS320F28377S fabricado pela *Texas Instruments*® para realizar o controle, as leituras dos sinais de realimentação e modulação *Phase-Shift* de dois níveis, para todos os Módulos *DAB*.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Antes da realização dos testes com a estrutura completa, os Módulos *DAB* foram ensaiados com o intuito de obter as curvas de rendimento individuais. Na Tabela I listam-se os principais parâmetros dos Módulos *DAB* construídos.

A curva de rendimento obtida para um dos Módulos *DAB* é apresentada na Figura 6. A curva de rendimento do módulo pode ser representada pela linha de tendência quadrática, obtida por regressão polinomial:

$$y = -4,548 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,00697x + 91,82. \quad (19)$$

TABELA I
Parâmetros dos Módulos DAB

Parâmetro	Símbolo	Valor
Tensão da porta	V_1, V_2	400 V, 400 V
Potência nominal de cada DAB	P_{DAB}	1 kW
Frequência de comutação	f	50 kHz

Esta curva apresenta um R-quadrado de 0,9302, apresentando uma boa representação dos pontos no intervalo de 280 W a 1050 W, com rendimento máximo de 94,4% e mínimo de 93,2%.

A inclinação desta curva é dada por sua derivada:

$$y' = -9,096 \cdot 10^{-6} x + 0,00697. \quad (20)$$

Aplicando os valores de potência dentro do intervalo, obtém-se $y' = 0,0042$ como valor máximo no ponto $x = 280$ W, que corresponde a uma inclinação máxima neste intervalo de $0,24^\circ$. Como a máxima inclinação da curva para este intervalo é próximo a 0° , considera-se que a curva tem uma característica quase horizontal (característica *flat*).

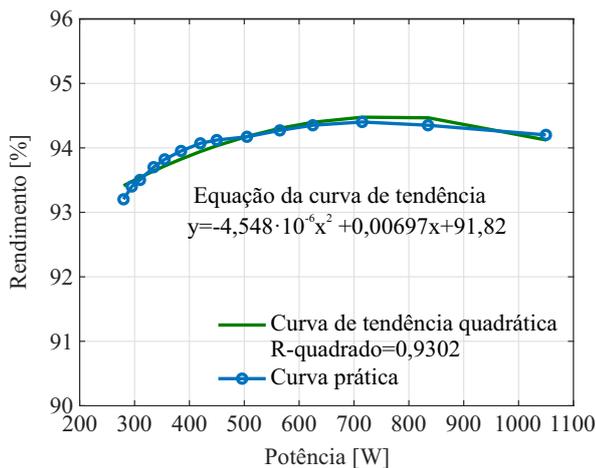


Fig. 6. Curva de rendimento de um dos Módulos DAB.

C. Teste da Estrutura Completa

Após o teste individual dos Módulos DAB, foi montada a estrutura apresentada na Figura 7, cujos principais parâmetros são listados na Tabela II.

TABELA II
Parâmetros da Estrutura Montada

Parâmetro	Símbolo	Valor
Número de Módulos DAB	k	4
Número de Módulos redundantes	l	1
Número de células	m	2
Número de DABs por célula	n	2
Potência de cada módulo	P_{DAB}	1 kW
Potência máxima	$P_{m\acute{a}x}$	4 kW
Potência crítica	$P_{cr\acute{i}t}$	2 kW
Tensão do barramento BT	V_{BT}	400 V
Tensão do barramento AT	V_{AT}	800 V

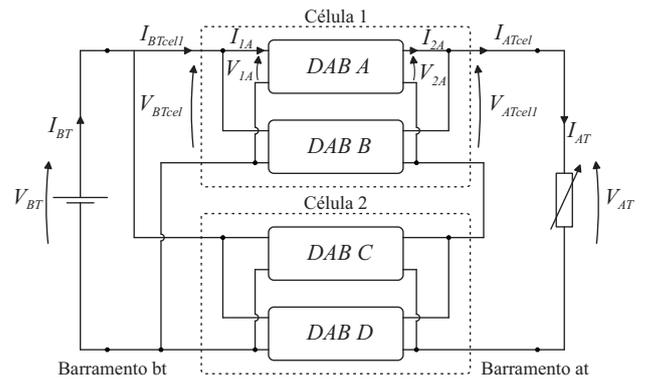


Fig. 7. Ilustração da montagem da estrutura construída e testada.

A tensão V_{BT} é uma fonte de tensão externa controlada com tensão variável entre 0-400V. Os Módulos DAB A e DAB B são interligados do modo paralelo na entrada e paralelo na saída formando a Célula 1, assim como os Módulos DAB C e DAB D que compõe a Célula 2.

As Células 1 e 2 são interligadas na configuração paralela na entrada e série na saída, formando os barramentos de Baixa Tensão (BT) e Alta tensão (AT) respectivamente. Como carga foi utilizado um banco de resistores variáveis.

Na Figura 8 mostra-se a foto da montagem física dos Módulos DABs interligados, formando a estrutura proposta.

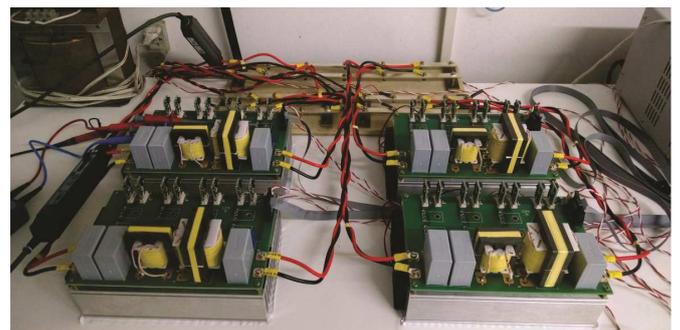


Fig. 8. Foto dos Módulos DAB interligados formando a estrutura proposta.

Inicialmente, as cargas foram configuradas para demandarem uma potência total de 4 kW. Nesta situação, obtiveram-se as formas de onda da tensão e corrente na fonte e na carga, expostas na Figura 9, a partir da qual se observa a correta operação da estrutura.

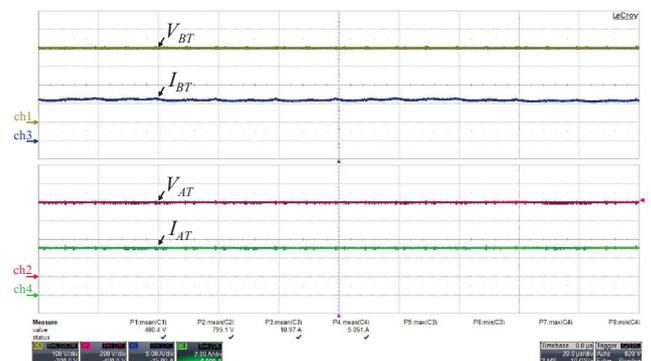


Fig. 9. Tensão na fonte (V_{BT}) (ch1: 100 V/div), corrente na fonte (I_{BT}) (ch3: 5 A/div), tensão no carga (V_{AT}) (ch2: 200 V/div), corrente na carga (I_{AT}) (ch4: 1 A/div) (escala de tempo: 20 μ s/div).

A fim de verificar o comportamento dinâmico do sistema, tendo em vista a estratégia de controle adotada, inicialmente variou-se a carga de 4 kW para 3,35 kW (degrau negativo) e, consecutivamente, retornou-se para 4 kW (degrau positivo). Nestas condições, mensuraram-se algumas variáveis do sistema, conforme exibem as Figuras 10 a 12.

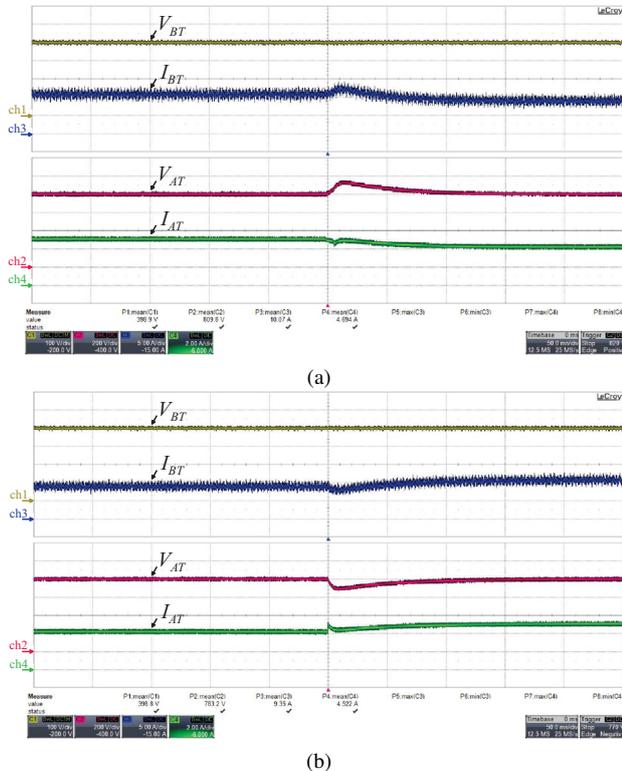


Fig. 10. Tensão na fonte (V_{BT}) (ch1: 100 V/div), corrente na fonte (I_{BT}) (ch3: 5 A/div), tensão na carga (V_{AT}) (ch2: 200 V/div), corrente na carga (I_{AT}) (ch4: 1 A/div) (escala de tempo: 50 ms/div): (a) degrau negativo de 16,25% na carga, (b) degrau positivo de 16,25% na carga.

Em ambos os degraus a tensão V_{AT} sofre transitórios, tendo uma variação de 200 V, mas retornando ao valor inicial em 50 ms. As tensões nas saídas das células V_{2A} e V_{2C} também apresentam o mesmo comportamento, com variação de $\Delta V_{AT}/2$. Como V_{BT} é imposta pela fonte de alimentação, não sofreu interferência.

Similarmente, a corrente I_{AT} respondeu suavemente aos degraus de carga, incrementando ou decrementando seu valor até os patamares correntes às novas potências demandadas. A corrente I_{BT} por sua vez, tem um transitório um pouco mais acentuado, inversamente proporcional à variação da resistência da carga. Todavia, também assume seu valor final persistente à potência demandada em torno de 50 ms.

As correntes I_{IA} e I_{IC} seguem o mesmo comportamento de I_{BT} , sendo $I_{IA} = I_{IC} = I_{BT}/4$, devido ao arranjo da estrutura.

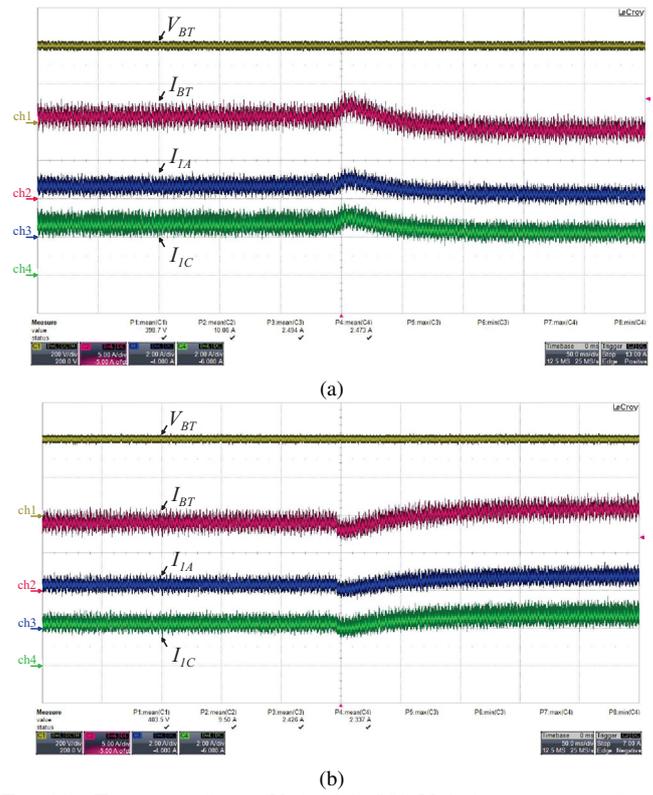


Fig. 11. Tensão na fonte (V_{BT}) (ch1: 200 V/div), corrente na fonte (I_{BT}) (ch2: 5 A/div), corrente na porta 1 do Módulo DAB A (I_{IA}) (ch3: 2 A/div), corrente na porta 1 do Módulo DAB C (I_{IC}) (ch4: 2 A/div) (escala de tempo: 50 ms/div): (a) degrau negativo de 16,25% na carga, (b) degrau positivo de 16,25% na carga.

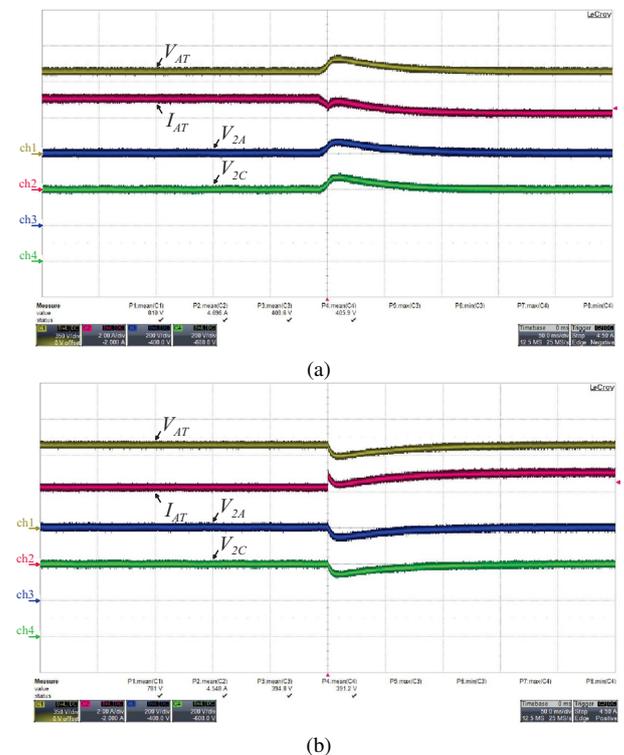


Fig. 12. Tensão na carga (V_{AT}) (ch1: 350 V/div), corrente na carga (I_{AT}) (ch2: 2 A/div), tensão na porta 2 do Módulo DAB A (V_{2A}) (ch3: 200 V/div), tensão na porta 2 do Módulo DAB C (V_{2C}) (ch4: 200 V/div) (escala de tempo: 50 ms/div): (a) degrau negativo de 16,25% na carga, (b) degrau positivo de 16,25% na carga.

D. Retirada de Operação de um Módulo DAB

Foi definido um critério de redundância do tipo $n - 1$, ou seja, um Módulo DAB de cada uma das células pode ser levado a não processar potência ativa, mas a carga deve permanecer alimentada com tensão nominal.

Para que esta situação fosse comprovada, ajustou-se a carga para o valor de potência crítica, assim, com a retirada de operação de um dos módulos, os módulos que permanecerem ativos na célula não sofrerão sobrecarga.

O processo de retirada de operação do módulo foi realizado decrementando, via comando por software, o ângulo de defasagem do módulo que iria sair de operação até um valor mínimo, a fim de que o valor médio de corrente que este módulo estivesse fornecendo se anulasse. Nas Figuras 13 a 15 são mostradas as principais correntes e tensões da estrutura durante a retirada de operação do Módulo B.

Como as células estão conectadas em série no lado AT, a corrente da célula é igual à corrente de carga, e estas são divididas entre os módulos ativos. Portanto, com os quatro módulos em operação, o valor médio da corrente na porta 2 de qualquer um dos DABs é igual à metade da corrente de barramento, como observado na Figura 13, antes da retirada do módulo B.

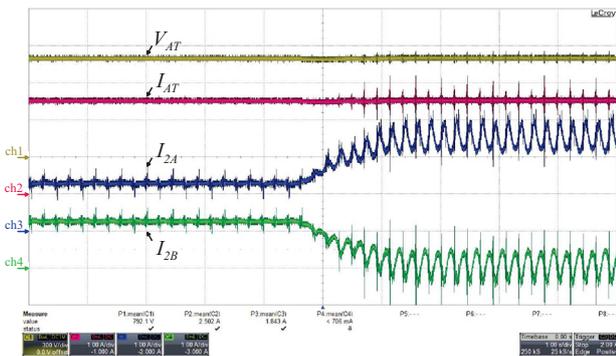


Fig. 13: Tensão na carga (V_{AT}) (ch1: 300 V/div), corrente na carga (I_{AT}) (ch2: 1 A/div), corrente na porta 2 do Módulo DAB A (I_{2A}) (ch3: 1 A/div), corrente na porta 2 do Módulo DAB B (I_{2B}) (ch4: 1 A/div) (escala de tempo: 20 μ s/div).

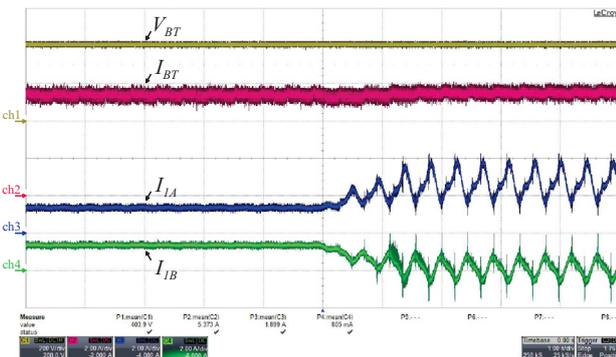


Fig. 14: Tensão no barramento de BT (V_{BT}) (ch1: 200 V/div), corrente no barramento de BT (I_{BT}) (ch2: 2 A/div), corrente na porta 1 do Módulo DAB A (I_{1A}) (ch3: 2 A/div) e corrente na porta 1 do Módulo DAB B (I_{1B}) (ch4: 2 A/div) (escala de tempo: 20 μ s/div).

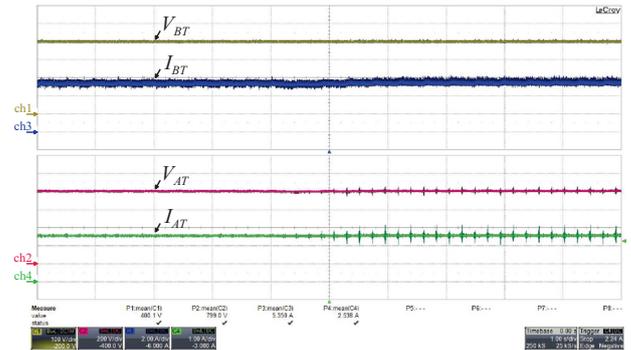


Fig. 15: Tensão no barramento de BT (V_{BT}) (ch1: 100 V/div), corrente no barramento de BT (I_{BT}) (ch3: 2 A/div), tensão no barramento AT (V_{AT}) (ch2: 200 V/div), corrente no barramento de AT (I_{AT}) (ch4: 1 A/div) (escala de tempo: 20 μ s/div).

Após a retirada do módulo B, tem-se, para a Célula 1, apenas um módulo processando toda a potência requerida, que é igual à metade da transmitida à carga. Sendo assim, após a corrente do Módulo DAB B assumir valor médio nulo o valor médio da corrente na porta 2 do Módulo DAB A será igual à corrente de barramento, como é visto na Figura 13.

Considerando o lado de baixa tensão, a Figura 14 apresenta a tensão do barramento BT (V_{BT}), a corrente no barramento BT (I_{BT}), a corrente na porta 1 do Módulo DAB A (I_{1A}) e a corrente na porta 1 do Módulo DAB B (I_{1B}). Observa-se que com os quatro módulos ativos, o valor médio da corrente na porta 1 de qualquer um dos DABs, é igual a um quarto do valor médio da corrente fornecida pela fonte.

Similarmente, para o lado de alta tensão, a retirada de operação de um módulo modifica a divisão da corrente de barramento entre os módulos no lado de baixa tensão. Verifica-se que após a retirada do módulo B, o valor médio da corrente na porta 1 deste módulo se anula, enquanto o Módulo DAB A assume toda a corrente processada pela Célula 1 que, deste lado, é igual a metade da corrente total fornecida pela fonte.

Quanto ao rendimento da estrutura completa (com 4 módulos ativos), o máximo valor obtido foi de 94,7% e o mínimo de 93,7%, como mostrado na Figura 16.

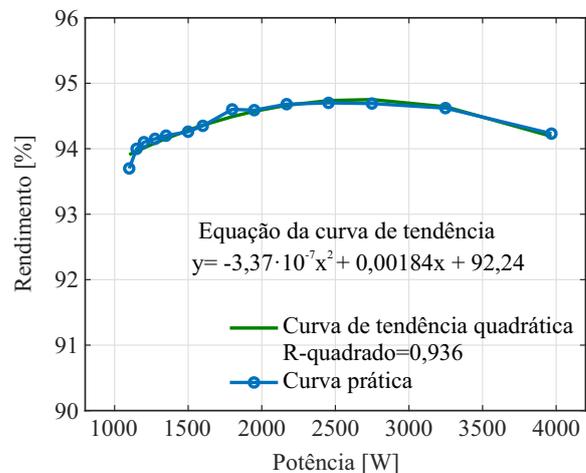


Fig. 16. Característica do rendimento da estrutura completa.

De forma similar ao caso anterior, esta curva pode ser representada pela curva de tendência quadrática :

$$y = -3,37 \cdot 10^{-7} x^2 + 0,00184x + 92,24 . \quad (21)$$

O valor do R-quadrado em (21) é igual a 0,936 para o intervalo de 1150 W a 4020 W. Derivando (21), obtém-se $y' = 0,00111$ como valor máximo de inclinação para $x=1150$ W. Este valor de y' corresponde a um ângulo máximo de $0,0636^\circ$, o que leva a afirmar que a curva também apresenta um comportamento quase horizontal.

Estando os quatro módulos ativos, a estrutura pode operar em sua potência máxima de 4 kW (como se observa na Figura 16). Todavia, a estrutura montada possui $m=2$ células, $n=2$ Módulos *DAB* por célula, cada um com potência de 1 kW e o número de módulos redundantes por célula (ou seja a quantidade de módulos que podem ser retirados da célula e mesma continuar operando) é $l=1$ (vide Tabela II). Assim, a potência crítica de operação da estrutura conforme (6) fica limitada à 2 kW.

Assim, para comparar o rendimento da estrutura quando a mesma opera com quatro módulos ativos e depois com três módulos ativos, a potência demandada da carga deve ser limitada à potência crítica, conforme se mostra na Figura 17.

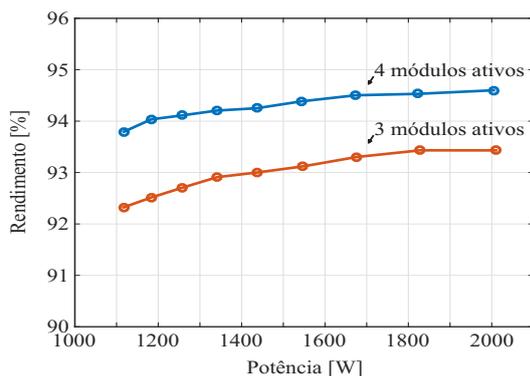


Fig.17. Comparação entre os rendimentos da estrutura para operação com três e quatro módulos ativos.

Verifica-se então pela Figura 17, que nos dois casos as curvas têm inclinações ascendentes similares; todavia, quando somente três módulos estão ativos, o rendimento em cada um dos pontos de operação foi menor em aproximadamente 1%, dada elevação dos valores de corrente nos módulos restantes após a retirada de um dos módulos.

V. CONCLUSÕES

Transformadores de estado sólido com *link* cc isolado estão dentre as topologias de *SST* mais atrativas. A utilização de um conversor cc-cc para formar o *link* cc isolado possibilita que os dois barramentos em corrente contínua possam ser aproveitados para comportarem sistemas acumuladores de energia, cargas ou servirem de derivação para fontes alternativas ou extensão para microrredes em corrente contínua.

Desta forma, além de trabalhar com um alto nível de tensão em um dos lados, o *link* cc deve possuir uma maior modularidade e alta confiabilidade, visto que podem estar

alimentando, além do estágio de saída do *SST*, outras ramificações da rede.

Dentro deste contexto, o presente artigo apresentou os resultados experimentais de uma estrutura de interligação utilizando conversores *DABs* (chamada no artigo de Módulos *DAB*) para servir como elo cc-cc em transformadores de estado sólido. O conversor *DAB*, utilizado como elemento principal da estrutura, foi escolhido por possuir fácil implementação, ser naturalmente isolado e possibilitar modularidade. Além disso, o fato de este conversor possuir comutação suave natural em cargas pesadas possibilita que estruturas montadas a partir dele possam alcançar elevados rendimentos, como foi verificado.

A técnica proposta para realização do controle da tensão, apesar de simplificada, não foi influenciada pelas diferenças paramétricas inerentes à construção dos Módulos *DAB*, e propiciou a divisão da potência processada e aplicação do conceito de redundância.

O ponto central da estrutura proposta é a interligação referenciada por célula. Este arranjo apresenta divisão da corrente em ambas às portas dos módulos e redundância, características que podem ser interessantes em aplicações como, por exemplo, veículos elétricos e centrais de processamento de dados. Aplicações automotivas fazem uso de elevadas potências em níveis relativamente baixos de tensão, apresentando, assim como os barramentos de BT dos *SSTs*, elevados valores de corrente. Para as centrais de processamento de dados, tem-se a necessidade de elevada confiabilidade quanto ao suprimento de energia às cargas, logo estruturas redundantes são de grande interesse.

Em uma situação real de carga baixa, situação comum aos sistemas de distribuição atuais no período da madrugada, pouca potência seria requerida, e manter todos os módulos ativos significaria que o nível de carregamento de cada um deles e, por consequência, seus rendimentos seriam baixos. Logo, a retirada de alguns módulos de operação levaria os restantes a um ponto de operação de rendimento maior, melhorando o desempenho global da estrutura.

Em suma, a arquitetura proposta apresenta a capacidade de flexibilizar o roteamento do fluxo de potência, possibilitando a busca por pontos ótimos de trabalho para transformadores de estado sólido.

Observa-se nos resultados experimentais que durante a saída de um módulo *DAB* existe uma ondulação de corrente dos módulos, mesmo uma corrente estando com o valor médio nulo e a outra assumindo o valor suficiente para suprir a demanda da carga. Atribui-se essa ondulação à troca de potência reativa entre o capacitor do *DAB* que saiu de operação e os outros. Apesar deste fenômeno não ter sido investigado em profundidade, ressalta-se que em simulação computacional o mesmo desaparece quando o Módulo *DAB* que não está processando energia é desconectado fisicamente do circuito.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FINEP, ao CNPq e a Capes, pelo aporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] J. W. Kolar, G. Ortiz, "Solid-State-Transformers: Key Components of Future Traction and Smart Grid Systems", in *Proceedings of the International Power Electronics Conference (IPEC)*, pp. 1-15, 2014.
- [2] S. P. Engel, M. Stieneker, N. Soltan, S. Rabiee, H. Stage, R. W. De Doncker, "Comparison of the Modular Multilevel DC Converter and the Dual-Active Bridge Converter for Power Conversion in HVDC and MVDC Grids", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, n° 1, pp. 124-137, Janeiro 2015.
- [3] G. Ortiz, M. Leibl, J. W. Kolar, O. Apeldoorn, "Medium frequency transformers for solid-state-transformer applications - Design and experimental verification", in *Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pp. 1285-1290, 2013.
- [4] R. F. Coelho, *Concepção, Análise e Implementação de uma Microrrede Interligada à Rede Elétrica para Alimentação Ininterrupta de Cargas CC a Partir de Fontes Renováveis*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, 2013.
- [5] T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, D. Skrlac, "Advanced LVDC Electrical Power Architectures and Microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks", *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, n° 1, pp. 54-65, Março 2014.
- [6] D. Peoples, "The Next Big Thing? EPRI's Fast, Flexible (and Cheaper) EV Charging System", 2012. [Online]. Disponível: <http://www.smartgridnews.com>.
- [7] B. Hafez, H. S. Krishnamoorthy, P. Enjeti, S. Ahmed, I. J. Pitel, "Medium voltage power distribution architecture with medium frequency isolation transformer for data centers", in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 3485-3489, 2014.
- [8] D. J. Costinett, *Analysis and Design of High Efficiency, High Conversion Ratio, DC-DC Power Converters*. Ph. Tese de Doutorado, Department of Electrical, Computer, and Energy Engineering, University of Colorado Boulder, Boulder-CO, USA, 2013.
- [9] M. L. Heldwein, *Microrredes em Corrente Contínua: Qualidade de Fornecimento e Eficiência em Futuras Redes de Distribuição*. Departamento de Engenharia Elétrica, Monografia entregue ao concurso público 23080.012809/2009-83, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, 2009.
- [10] J. E. Huber, J. W. Kolar, "Volume/weight/cost comparison of a 1MVA 10 kV/400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer", in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 4545-4552, 2014.
- [11] Massachusetts Institute of Technology (MIT) "Technology Review - 10 Emerging Technologies", 2010. [Online]. Disponível: www.technologyreview.com/magazine/2010/05/.
- [12] M. Stieneker, R. W. De Doncker, "System efficiency estimation of redundant cascaded-cell converters in applications with high-power battery energy storage systems", in *Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 1-6, 2012.
- [13] H. R. Mamede, W. M. dos Santos, D. C. Martins, "A DAB-Based Solid-State Transformer with High Reliability as to the Power Supply", in *Proc. of COBEP*, pp. 1-6, 2015.
- [14] Tao Yang, C. O'Loughlin, R. Meere, T. O'Donnell, Ningning Wang, Z. Pavlovic, "Investigation of modularity in DC-DC converters for solid state transformers", in *5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, pp. 1-8, 2014.
- [15] R. Ayyanar, R. Giri, N. Mohan, "Active input-voltage and load-current sharing in input-series and output-parallel connected modular DC-DC converters using dynamic input-voltage reference scheme", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, n° 6, pp. 1462-1473, Novembro 2004.
- [16] T. Zhao, G. Wang, J. Zeng, S. Dutta, S. Bhattacharya, A. Q. Huang, "Voltage and Power balance control for a cascaded multilevel solid state transformer", in *25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 761-767, 2010.
- [17] R. W. A. A. De Doncker, D. M. Divan, M. H. Kheraluwala, "A three-phase soft-switched high-power-density DC/DC converter for high-power applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, n° 1, pp. 63-73, Janeiro/Fevereiro 1991.
- [18] A. J. B. Bottion, *Conexão Série-Série de Módulos CC-CC Isolados*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, 2015.
- [19] Z. Haihua, D. Tran, S. Siew Tuck, A. M. Khambadkone, "Interleaved bi-directional Dual Active Bridge DC-DC converter for interfacing ultracapacitor in micro-grid application", in *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 2229-2234, 2010.
- [20] H. R. Mamede, *Paralelismo de Conversores DAB (Dual Active Bridge) Utilizando a Teoria de Gyrotor*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, 2013.
- [21] W. Chen, X. Ruan, H. Yan, C. K. Tse, "DC/DC Conversion Systems Consisting of Multiple Converter Modules: Stability, Control, and Experimental Verifications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, n° 6, pp. 1463-1474, Junho 2009.

DADOS BIOGRÁFICOS

Henrique Rocha Mamede, nascido em Goiânia, Goiás, Brasil, é Engenheiro Eletricista (2013) e Mestre em Engenharia Elétrica na área de Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos (2016) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), atualmente é pesquisador de hardware de conversores para acionamento de compressores na Empresa Brasileira de Compressores (Embraco). Suas áreas de interesse incluem: eletrônica de potência, acionamento de máquinas elétricas, sistemas de controle, automação, microrredes e energias renováveis.

Vinicius Netto Trucco, nascido em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, é engenheiro eletricitista (2014) formado na Universidade Federal de Santa Catarina, atualmente cursa mestrado no Instituto de Eletrônica de potência (INEP) na Universidade Federal de Santa Catarina. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, microrredes, energias renováveis.

Daniel Tobias da Silva Borges, nascido em Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil, é Engenheiro Eletricista (2014) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Mestre em Engenharia Elétrica na área de Controle e Automação (2016) pela Universidade Federal de Uberlândia, atualmente cursa o doutorado no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP) na Universidade Federal de Santa Catarina. Suas áreas de interesse: eletrônica de potência, acionamentos de máquinas elétricas, sistemas de controle, automação, identificação de sistemas, microrredes, energias renováveis.

Lucas Lapoli Brighenti, possui graduação (2011) e mestrado (2014) em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) em Joinville-SC. Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em Florianópolis-SC. Suas áreas de interesse incluem Conversores Estáticos, Energias Renováveis, microrredes, transformadores de estado sólido (SST).

Walbermark Marques dos Santos, nasceu em São Luís, Maranhão, Brasil, é Engenheiro Eletricista (2003) pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Mestre (2011) e Doutor (2016) em Engenharia Elétrica na área de Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), tendo desenvolvido seus trabalhos no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito

Santo, desenvolvendo suas atividades no LEPAC (Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos). Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência e industrial, acionamentos de máquinas elétricas, energia solar e eólica, conversores multiportas, microrredes, transformadores de estado sólido (SST), link magnético de alta frequência, estabilidade de microrredes. É membro da SOBRAEP e da SBA.

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 do IEEE e da SOBRAEP.

Denizar Cruz Martins, nasceu em São Paulo, SC, Brasil, em 24 de abril de 1955. Recebeu o título de Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, em 1978 e 1981, respectivamente, e o título de Doutor em Engenharia Elétrica pelo Instituto Nacional Politécnico de Toulouse, Toulouse, França, em 1986. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da mesma instituição, onde desenvolve trabalhos nos seguintes temas: conversores estáticos cc-cc e cc-ca, correção de fator de potência, qualidade de energia, processamento eletrônico da energia solar fotovoltaica, redes ativas de distribuição, simulação de conversores estáticos e acionamento elétrico. É membro do IEEE, da SOBRAEP e da SBA.