

# CONVERSOR CA-CC-CA HÍBRIDO PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA

NAYARA INGRID LISBOA SANTOS\*, LOUELSON AFRANIO LEUGIRDES DE AZEVEDO CAVALCANTI COSTA†, MAURÍCIO BELTRÃO DE ROSSITER CORRÊA‡, MONTIÊ ALVES VITORINO‡

\* *Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPgEE/UFCG*

† *Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPgEE/UFCG*

‡ *Departamento de Engenharia Elétrica, UFCG  
Campina Grande, Paraíba, Brasil*

nayara.santos@ee.ufcg.edu.br, louelson@gmail.com, mbrcorrea@dee.ufcg.edu.br,  
vitorino@ee.ufcg.edu.br

**Abstract**— This article presents a hybrid AC-DC-AC converter topology for use in wind energy conversion systems. The converter is composed of a generator-side voltage source converter and a grid-side current source converter. The used converters operate in different ways but, in general, they provide additional advantages to the system, canceling disadvantages that occur in the use of only one type of converter. In this way, this article shows an introductory study on the operational characteristics of the hybrid converter. The proposed converter has, as main characteristics, short circuit protection, easy integration with the grid, boost-boost operation and low total harmonic distortion. Results are presented in order to verify the operational characteristics of the converter.

**Keywords**— Voltage source converters, Current source converters, AC-DC-AC Converters, Hybrid converters, Wind power conversion systems.

**Resumo**— Este artigo apresenta uma topologia de conversor CA-CC-CA híbrido para ser aplicado em sistemas de conversão de energia eólica. O conversor é composto de um conversor fonte de tensão do lado do gerador e um conversor fonte de corrente do lado da rede. Os conversores utilizados operam de maneiras diferentes mas, em geral, proporcionam vantagens adicionais ao sistema, cancelando desvantagens que ocorrem na utilização de apenas um tipo de conversor. Dessa forma, este artigo mostra um estudo introdutório sobre as características operacionais do conversor híbrido. O conversor proposto tem, como características principais, proteção contra curto-circuito, fácil integração com a rede, operação *boost-boost* e baixa taxa de distorção harmônica. Resultados são apresentados de forma a verificar as características operacionais do conversor.

**Palavras-chave**— Conversores fonte de tensão, Conversores fonte de corrente, Conversores CA-CC-CA, Conversores híbridos, Sistemas de conversão de energia eólica.

## 1 Introdução

Em sistemas de conversão de energia eólica, os geradores são responsáveis por converter a energia mecânica, através das turbinas eólicas, em energia elétrica. Devido às variações de velocidade do vento, esses sistemas costumam utilizar geradores de velocidade variável que possuem suas tensões geradas com amplitude e frequência variável. A conexão do gerador à rede elétrica é feita através de conversores estáticos bidirecionais.

Os geradores de velocidade variável mais utilizados são as máquinas de indução de dupla alimentação DFIG (do inglês, *doubly fed induction generators*) e as máquina síncronas, em especial a máquina síncrona de ímã permanente PMSG (do inglês, *permanent magnet synchronous generator*). No entanto a PMSG tem vantagens em relação à DFIG, devido ao fato de que não necessita de corrente de excitação, possui alta densidade de potência e confiabilidade, baixa perdas rotóricas e alta eficiência (Yaramasu et al., 2017). Segundo (Yaramasu et al., 2017), as tendências indicam que o mercado está se descolando da DFIG para a PMSG.

Para os sistemas eólicos, a topologia mais utilizada para a conexão do gerador eólico à rede elétrica é o conversor *back-to-back* (B2B) fonte de tensão VSC de dois níveis. Esta topologia possui controle de potência ativa e reativa dos dois lados e baixa taxa de distorção harmônica THD (do inglês, *total harmonic distortion*). Porém, possui alto risco de curto-circuito, tem altas perdas de potência por chaveamento, menor confiabilidade e é utilizado desde kW até 3MW (de Freitas et al., 2016). Também é necessário, em alguns casos, o uso de transformadores para elevar a tensão ao conectar à rede ou o uso de um conversor CC-CC *boost*.

Contudo, devido à grande demanda de potência dos últimos anos, cada vez mais são necessários sistemas que comportem potência mais altas. Dessa forma, à medida que a potência aumenta, os conversores multiníveis tornam-se tendência, embora a utilização desses conversores possam ocasionar um aumento nas perdas, nos custos, complexidade de controle, redução da densidade de potência, entre outros problemas.

Alternativamente às topologias convencionais, os conversores fonte de corrente CSC (do inglês,

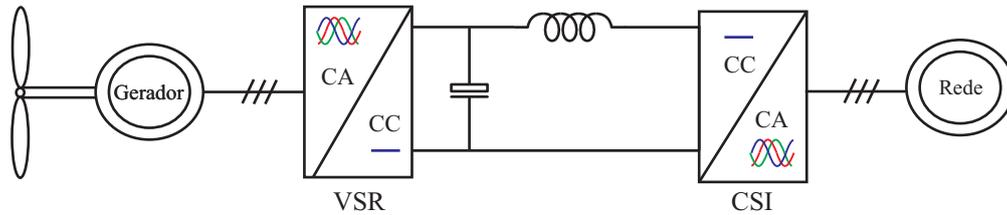


Figura 1: Conversor CA-CC-CA Híbrido.

*current source inverter*) vem se tornando tendências. Comparado com o conversor VSC, o conversor CSC provê uma topologia simples e excelente integração com a rede, com a corrente próxima à senoidal e controle do fator de potência. O barramento CC indutivo provê uma proteção natural contra falta de curto-circuito (Dai et al., 2009).

Este artigo tem como propósito investigar a ação *boost-boost* oferecida pelo conversor CA-CC-CA híbrido apresentado na Figura 1. O conversor une as características do VSC e do CSC, que combina recursos de proteção contra sobrecorrente, juntamente com o alto desempenho associado de um VSC do lado do gerador.

## 2 Configuração do sistema proposto

A configuração do sistema híbrido CA-CC-CA proposto para a utilização em sistemas de conversão de energia eólica é mostrado na Figura 1.

No geral, o sistema consiste de um estágio retificador fonte de tensão VSR (do inglês, *voltage source rectifier*), conectado a um inversor fonte de corrente CSI (do inglês, *current source inverter*), através de um barramento CC capacitivo do lado do retificador e indutivo do lado do inversor. Para a conexão dos conversores ao gerador e a rede, são utilizados os filtros CA.

Os VSCs são mais difundidos e utilizados que os CSCs, por possuírem uma maior densidade de potência e apresentarem menores perdas por condução. Por outro lado, os CSCs possuem menores perdas por chaveamento e proteção natural contra curto-circuito (de Azevedo Cavalcanti Costa, 2016).

Ambos VSR e CSI utilizam dispositivo IGBT (do inglês, *insulate gate bipolar transistor*). Nos VSCs, utiliza-se um diodo em anti-paralelo conectado ao IGBT, resultando uma chave bidirecional em corrente e unidirecional em tensão. A conexão do diodo em anti-paralelo se faz necessário para que a corrente do filtro CA sempre tenha um caminho para seguir. Já nos CSCs, utiliza-se um diodo em série com o IGBT, resultando uma chave bidirecional em tensão e unidirecional em corrente. A conexão do diodo em série se faz necessária para que não haja um curto-circuito sobre o capacitor do lado CA.

O VSR é responsável por realizar o controle da potência ativa e reativa do lado do gerador,

enquanto que o CSI controla a tensão de barramento CC, mantendo o índice de modulação fixo da corrente de barramento CC.

Para a conexão do lado do gerador, são mais utilizados os VSCs devido à característica indutiva das máquinas, que permite que os VSCs possam ser conectados diretamente sem a necessidade do uso de um filtro CA. Já para a conexão com a rede, os CSCs são uma melhor solução do que os VSCs, pois para a conexão do VSI com a rede é necessário o uso de um filtro LCL e a implementação do controle do barramento CC é mais complexa, visto que é necessária a utilização do controle indireto das correntes (ver seção 4.2). Para o CSI, o controle é feito de forma direta e há a necessidade apenas de um filtro CL, o que eliminaria a utilização de três componentes.

Os CSCs possuem vantagem também de possuir uma proteção natural contra curto-circuito, já que, durante uma falta de curto-circuito, o crescimento abrupto da corrente é limitado pelo indutor CC.

Os filtros CA foram projetados de acordo com (Gomes et al., 2018). Os filtros CA são dimensionados com o objetivo de não permitir que os harmônicos de alta frequência provenientes do chaveamento dos semicondutores se propaguem pela rede, atenuando assim as componentes harmônicas de forma que o THD seja inferior a 5%.

## 3 Conversor do lado do gerador (VSR)

A Figura 2 mostra o diagrama do conversor trifásico fonte de tensão no estágio retificador. O conversor é composto de seis chaves IGBTs com diodos em antiparalelo. A partir do chaveamento das chaves  $S_{1-6}$ , o conversor converte o sinal alternado em sinal contínuo, para o barramento CC que absorve a potência.

Os conversores são acompanhados de filtros passivos para a redução da distorção harmônica das curvas de corrente e/ou tensão. Nos conversores fonte de tensão, normalmente é utilizado o filtro LCL, pois para altas frequências apresenta maior atenuação e são necessárias indutâncias menores que no filtro L para obter a mesma atenuação em altas frequências (Caracas et al., 2013).

Os conversores fonte de tensão são divididos em retificadores fonte de tensão (VSR) e inver-

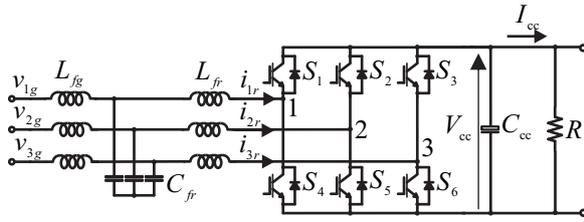


Figura 2: Retificador fonte de tensão conectado a uma carga monofásica.

sores fonte de tensão (VSI). Nos VSRs a tensão CC deve ser maior ou igual ao valor máximo da tensão de linha CA, possuindo assim uma ação *boost* em tensão ( $V_{cc} > \sqrt{2}V_{12}$ ) e *buck* em corrente ( $I_{cc} < \sqrt{2}I_1$ ). Já os inversores possuem o efeito contrário, *buck* em tensão ( $V_{cc} > \sqrt{2}V_{12}$ ) e *boost* em corrente ( $I_{cc} < \sqrt{2}I_1$ ), sendo  $V_{cc}$  a tensão do barramento CC,  $V_{12}$  a tensão de linha rms CA e  $I_1$  a corrente de fase rms CA.

Sabendo que a potência de entrada deve ser igual a potência de saída e desconsiderando as perdas, podemos observar nas Equações (3) e (4) o efeito *boost* da tensão e *buck* da corrente, para valores médio de tensão e corrente.

$$P_{cc} = V_{cc}I_{cc} = \sqrt{3}V_{12}I_1, \quad (1)$$

$$m_v V_{cc} = \sqrt{2}V_{12} = \sqrt{2}\sqrt{3}V_1. \quad (2)$$

Assim, a tensão CC do barramento pode ser determinada pela Equação 3.

$$V_{cc} = \frac{\sqrt{6}V_{1g}}{m_v}, \text{ para } 0 < m_v \leq 1, \quad (3)$$

onde o  $m_v$  é o índice de modulação da tensão e  $V_{1g}$  a tensão de fase rms do gerador.

Substituindo a Equação (3) em (1), obtém-se a expressão da corrente CC.

$$I_{cc} = \frac{I_{1g}m_v}{\sqrt{2}}. \quad (4)$$

### 3.1 Modulação PWM

Dentre as estratégias de modulação PWM existentes (seno-triângulo, escalar, vetorial, etc.), será utilizada a modulação seno-triângulo, devido a sua eficiência e simplicidade na implementação (Wu et al., 2011). Na Figura 3, é apresentada a sequência de chaveamento para um período de chaveamento ( $T_{ch}$ ), o chaveamento é aplicado à situação em que  $v_{1r}^* > 0$ ,  $v_{2r}^* < 0$  e  $v_{3r}^* > 0$ , com o pulso centrado.

Utilizou-se o DSP F28335 para a geração do PWM VSC a ser implementado no VSR. Durante a comutação das chaves, é inserido um tempo morto que atrasa o ligamento da chave durante um pequeno intervalo de tempo. Na Figura 4, é mostrada a mesma sequência de chaveamento para o braço 1 ( $S_1$  e  $S_4$ ) e para o braço 2 ( $S_2$  e  $S_5$ ).

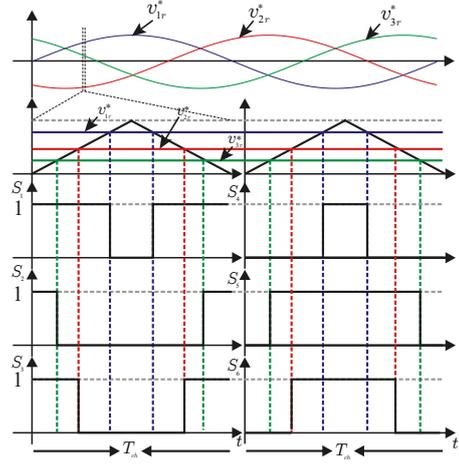


Figura 3: Sequência de chaveamento do PWM VSC para  $v_{1r}^* > 0$ ,  $v_{2r}^* < 0$  e  $v_{3r}^* > 0$ .



Figura 4: Resultado experimental da sequência de chaveamento das chaves ( $S_1$ ,  $S_4$ ,  $S_2$  e  $S_5$ ) para  $v_{1r}^* > 0$ ,  $v_{2r}^* < 0$  e  $v_{3r}^* > 0$ .

### 3.2 Estratégia de controle

O conversor conectado ao gerador pode ser controlado de várias formas, uma delas é o controle vetorial da corrente (Wu et al., 2011), como mostra a Figura 5.

Este controle tem como objetivo manter controladas as correntes nos eixos  $d$  e  $q$ , que correspondem às potências ativa e reativa, respectivamente. Para a realização desse controle, define-se que a componente  $q$  da tensão é nula. A base deste controle é o desacoplamento entre as variáveis que estão sendo controladas, utilizando transformação do sistema  $abc$  estacionário para o referencial síncrono  $dq$ . O referencial síncrono é utilizado, pois, como as variáveis são contínuas pode-se utilizar o controlador proporcional integral PI.

## 4 Conversor do lado da rede (CSI)

O CSI é mostrado na Figura 6, e é composto por seis IGBTs em série com seis diodos. O conversor requer uma corrente constante e produz uma saída de corrente alternada. Os CSCs possuem modulação em corrente, o que leva a derivadas na corrente, logo, faz-se necessária a utilização de capacitores trifásicos conectado em paralelo com a saída do conversor (de Azevedo Ca-

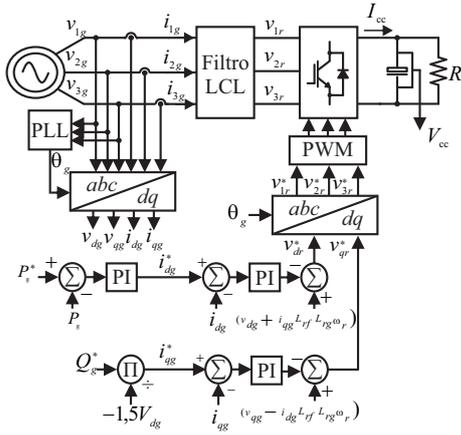


Figura 5: Controle vetorial da corrente para o VSR.

valcanti Costa, 2016). Assim, no CSI é utilizado o filtro CL para obter um baixo THD e melhorar a eficiência do sistema.

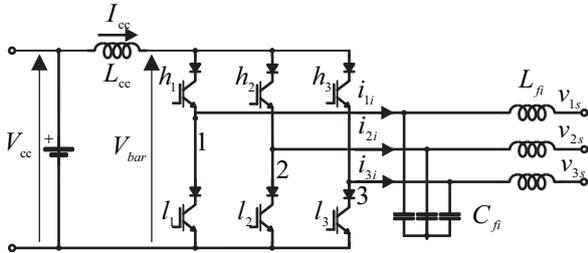


Figura 6: Inversor Fonte de Corrente Trifásico.

Os conversores fonte de corrente são divididos em retificadores fonte de corrente (CSR) e inversores fonte de corrente (CSI). Os retificadores possuem ação *boost* em corrente ( $I_{cc} > \sqrt{2}I_1$ ) e *buck* em tensão ( $V_{cc} < \sqrt{2}V_{12}$ ). Já os inversores possuem o efeito *buck* em corrente ( $I_{cc} > \sqrt{2}I_1$ ) e *boost* em tensão ( $V_{cc} < \sqrt{2}V_{12}$ ).

Sabendo que a potência de entrada deve ser igual à potência de saída, desconsiderando as perdas como mostra a Equação (1), pode-se observar o efeito *buck* da corrente e *boost* de tensão para o CSI.

$$m_i I_{cc} = \sqrt{2} I_{1s}. \quad (5)$$

onde o  $m_i$  é o índice de modulação da corrente e  $I_{1s}$  a tensão de fase rms da rede.

Substituindo a Equação (5) em (1), obtém-se a expressão da tensão CC.

$$V_{cc} = 3 \frac{V_{1s} m_i}{\sqrt{2}}, \text{ para } 0 < m_i \leq 1. \quad (6)$$

#### 4.1 Modulação PWM

O CSC é reverso (dual) do VSC, ou seja, no CSC o barramento é composto por um indutor que acumula energia na forma de corrente. Desta forma,

a estratégia de controle deve evitar que haja circuito aberto que bloqueie a passagem de corrente do indutor, ou um curto-circuito na tensão do lado CA. Assim, as chaves que compõem o CSC não podem ser acionadas independentemente, e possuem sua complementaridade de forma horizontal (Vitorino, 2012).

O PWM utilizado é o unipolar como mostra a Figura 7, tal modulação, além de reduzir o THD, confere uma variação de corrente menor a cada troca de estado. Durante a roda livre dos CSCs o indutor do barramento CC irá se carregar, enquanto que o capacitor e indutor do lado CA do conversor irão descarregar (de Azevedo Calvanti Costa, 2016).

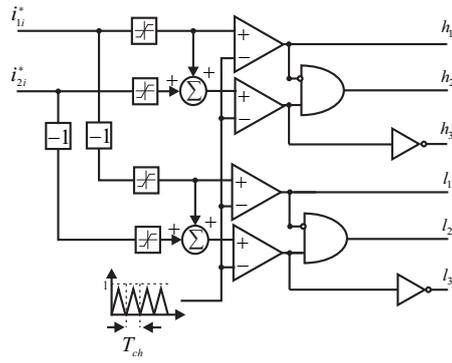


Figura 7: Estratégia de PWM para o CSI.

Na Figura 8, é mostrada a sequência de condução das chaves para o caso em que ( $i_{1i}^* > 0$ ,  $i_{2i}^* > 0$  e  $i_{3i}^* > i_{1i}^*$ ) do conversor, para o período  $T_{ch}$  de chaveamento com o pulso centrado.

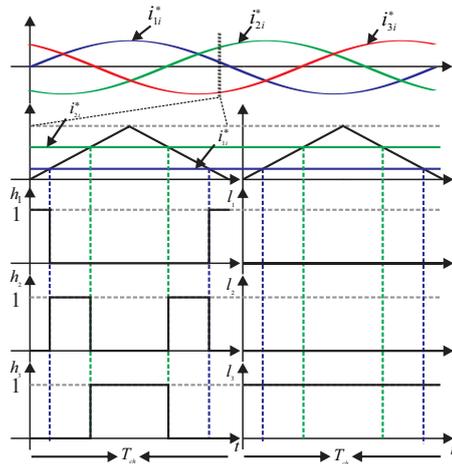
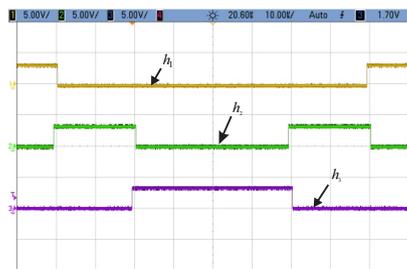


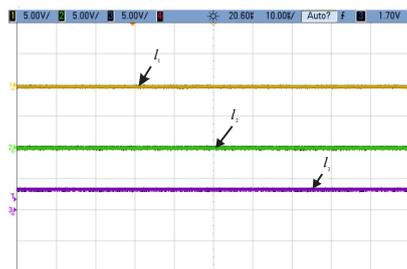
Figura 8: Sequência de chaveamento do PWM CSC para  $i_{1i}^* > 0$ ,  $i_{2i}^* > 0$  e  $i_{3i}^* > i_{1i}^*$ .

Para a geração dos sinais PWM para o CSC, utilizou-se o DSP F28335. Durante a comutação das chaves é inserido um tempo morto que atrasa o desligamento da chave durante um pequeno intervalo de tempo. Na Figura 9, é mostrada a sequência de chaveamento para para  $i_{1i}^* > 0$ ,  $i_{2i}^* > 0$  e

$i_{2i}^* > i_{ii}^*$ , obtida experimentalmente.



(a) Chaves  $h_1$ ,  $h_2$  e  $h_3$ .



(b) Chaves  $l_1$ ,  $l_2$  e  $l_3$ .

Figura 9: Resultado experimental da sequência de chaveamento do PWM CSC para  $i_{1i}^* > 0$ ,  $i_{2i}^* > 0$  e  $i_{2i}^* > i_{1i}^*$ .

#### 4.2 Estratégia de controle

O controle da tensão de barramento CC, mostrado na Figura 10, ajusta a defasagem  $\delta$  entre a rede e a saída do CSI, de modo a obter a máxima potência transferida do gerador para a rede. Assim, o ângulo  $\delta$  representa o ângulo de potência entre a rede e o conversor e é subtraído ao ângulo  $\theta_g$ , que é calculado pelo PLL (do inglês, *phase locked loop*), e o ângulo resultante é usado para controle do PWM do CSI. Este controle também define o índice de modulação da corrente fixo, de preferência unitário para se ter a menor corrente de barramento, a fim de diminuir as perdas por condução existentes.

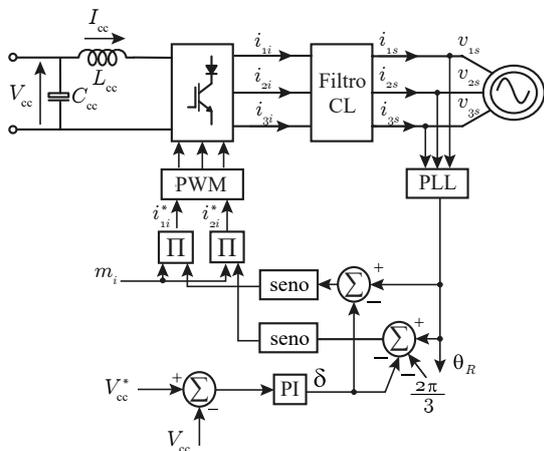


Figura 10: Diagrama de controle para o CSI.

Ao contrário do CSC, o VSC ao utilizar o controle direto para controlar a tensão de barramento CC, semelhante ao apresentado na Figura 10, constatou-se ser inviável, visto que o controle não permite que as potências sejam controladas de forma conjunta, gerando um baixo fator de potência (Borges, 2010). Dessa forma, ao utilizar o VSI, utiliza-se o controle vetorial da corrente que permite que as potências ativas e reativas sejam controladas de forma desacopladas uma da outra.

Assim, ao comparar ambos os controles para o CSI e para o VSI, nota-se que o controle para o CSI pode ser implementado de forma direta, e é mais simples de ser utilizado. Já para o VSI, é necessário aplicar o controle vetorial da corrente, tornando-o mais complexo, visto que há a necessidade de se ter duas malhas a mais de controle, tornando-o também mais lento.

## 5 Análise das Simulações

Para analisar a operação do conversor CA-CC-CA híbrido, é simulado o sistema composto pelo VSR e pelo CSI, conectado a uma fonte do lado do retificador que simula o gerador e a fonte do lado do inversor para simular a rede elétrica, sendo necessário assim o uso de filtros CA. No entanto, ao substituir a fonte ideal por uma máquina elétrica não é necessário a utilização do filtro CA. O conversor proposto é comparado com o conversor B2B VSC para análise de limites de operação e ganho. A Tabela 1 lista os parâmetros utilizados.

Tabela 1: Parâmetros dos conversores.

Parâmetros	Valor
$V_1$	220 V
$P_{3\phi}$	3kW
$f_{ch}$	10kHz
$C_{cc}$	300 $\mu$ F
$C_{fr}$	20 $\mu$ F
$L_{fr}$	3mH
$L_{cc}$	20mH
$C_{fi}$	10 $\mu$ F
$L_{fi}$	3mH

#### 5.1 Análise do Ganho de Tensão

O ganho de tensão máximo permitido associado à ação de *boost* do conversor é dependente do índice de modulação da tensão e do índice de modulação da corrente, no entanto deve-se haver um limitador de tensão para os ganhos em questão.

A partir das Equações (1), (3) e (6), é possível obter expressões que relacionam os ganhos de tensão dos conversores (tensão de saída/tensão de entrada). Para tal, foi considerado o valor de pico da tensão de linha rms CA ( $\sqrt{2}V_{12}$ ) e o valor da tensão de barramento CC ( $V_{cc}$ ).

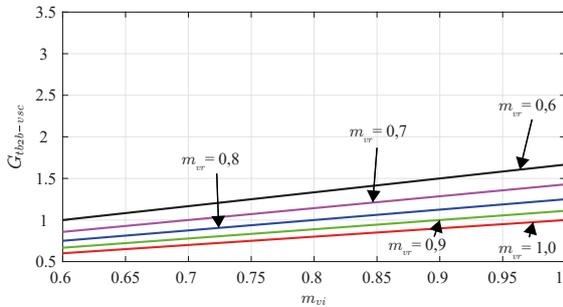
A Equação (7) mostra a expressão para o ganho da tensão ( $V_{12s}/V_{12g}$ ) para o B2B VSC.

$$G_{b2b-vsc} = \frac{V_{12s}}{V_{12g}} = \frac{m_{vi}}{m_{vr}}, \quad (7)$$

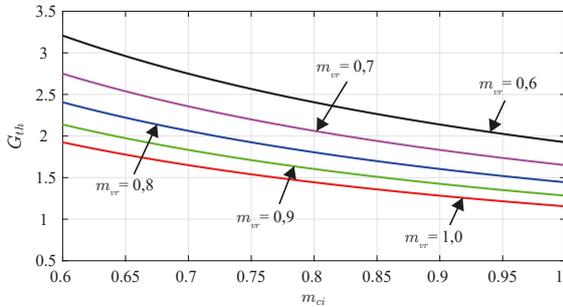
onde,  $m_{vi}$  é o índice de modulação do lado do inversor (saída) e  $m_{vr}$  é o índice de modulação do lado do retificador (entrada). Na Figura 11(a), é mostrado o gráfico para o ganho da tensão ( $G_{b2b-vsc}$ ) em função do  $m_{vi}$ , variando  $m_{vr}$  de 0,6 a 1.

Para a topologia proposta, a relação de ganho é apresentada na Equação (8), e é obtida a partir das Equações (3) e (6). Na Figura 11(b), é apresentado o gráfico para o ganho da tensão ( $G_h$ ) em função do  $m_i$ , mantendo  $m_v$  de 0,6 a 1.

$$G_h = \frac{V_{12s}}{V_{12g}} = \frac{2}{\sqrt{3}m_v m_i}, \quad (8)$$



(a) B2B VSC.



(b) Conversor Híbrido.

Figura 11: Relação de ganho de tensão para o B2B VSC e para o Híbrido.

Observa-se que para o B2B VSC, a tensão de saída pode ser igual a tensão de entrada, maior ou menor. Seus limites operacionais, considerando o índice de modulação mínimo de 0,6 e máximo de 1 são: quanto maior  $m_{vi}$  e quanto menor  $m_{vr}$  menor o ganho; para  $m_{vr} = m_{vi}$  o ganho é unitário; e o ganho máximo é de duas vezes obtido quando  $m_{vi} = 1$  e  $m_{vr} = 0,6$ ; e o mínimo ganho é de 0,5 quando  $m_{vi} = 0,6$  e  $m_{vr} = 1$ . De forma sucinta, quanto menor  $m_{vr}$  maior a ação *buck* e quanto menor  $m_{vi}$  maior a ação *boost*.

Para o conversor híbrido, há apenas a ação *boost* em tensão. Quanto menor o  $m_v$  e  $m_i$ , maior será o ganho de tensão. O valor máximo obtido é de 4,619 para  $m_v = 0,6$  e  $m_i = 0,6$ , já o ganho mínimo é de 1,155 para  $m_v = 1$  e  $m_i = 1$ .

Para fins comparativos, serão utilizados alguns pontos de operação para a simulação do conversor B2B VSC e do conversor híbrido. Na Tabela 2, são apresentados os valores utilizados e os índices de modulação correspondente: índice de modulação no estágio retificador ( $m_r$ ) e no estágio inversor ( $m_i$ ). Para que se possa comparar pontos de operação comuns a ambas topologias sem ocorrer instabilidade, foram escolhidos como valor mínimo de ganho 20% e máximo 50%, utilizando os valores de índice de modulação mais próximos do unitário possível.

Tabela 2: Pontos de operação.

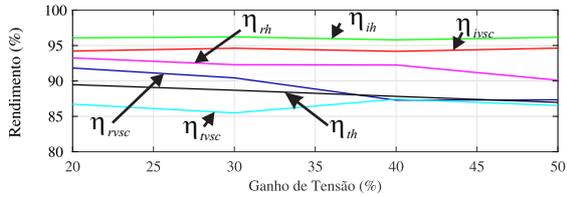
Ganho de tensão	$m_v$	$m_i$	$m_{vr}$	$m_{vi}$
50%	0,8	0,96	0,6	0,98
40%	0,9	0,91	0,7	0,91
30%	0,9	0,98	0,8	0,96
20%	1	0,96	0,8	0,96

Na Figura 12(a), é mostrada a relação entre o rendimento (potência de saída/potência de entrada) no estágio retificador ( $\eta_r$ ), inversor ( $\eta_i$ ) e no conversor total ( $\eta_t$ ) para o conversor B2B VSC e para o conversor híbrido. A Figura 12(b) mostra a relação do THD da corrente do gerador ( $THD_r$ ) e o THD da corrente da rede ( $THD_i$ ), para o conversor B2B VSC e para o conversor híbrido. Para ambos os casos, a tensão da rede é fixada em 220 V por fase e a tensão do gerador é variada.

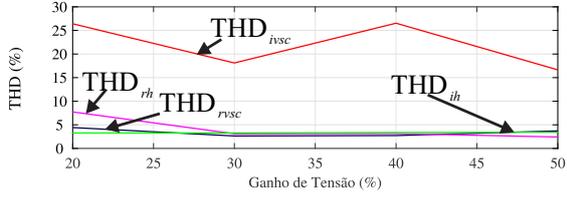
A partir dos gráficos apresentados na Figura 13, observaram-se os seguintes aspectos em relação ao rendimento dos conversores: no estágio retificador o rendimento do conversor B2B VSC ( $\eta_{rvsc}$ ) é menor que o rendimento do conversor híbrido e decai com o aumento do ganho, visto que a corrente é aumentada, logo ocorrem mais perdas por condução; no estágio inversor o rendimento do conversor B2B VSC ( $\eta_{rvsc}$ ) é menor que o rendimento do conversor híbrido ( $\eta_{rh}$ ) e se mantém aproximadamente constante, durante a variação do ganho.

No estágio inversor, o rendimento é maior do que no estágio retificador para ambas as topologias, visto que as correntes são menores nesse estágio. No geral, o conversor híbrido possui um rendimento ( $\eta_{th}$ ) maior que o B2B VSC ( $\eta_{tvsc}$ ), que decai com o aumento do ganho. Já o B2B VSC possui um rendimento ( $\eta_{tvsc}$ ) relativamente baixo para o ganho de tensão de 20% a 30% e para o ganho maior que 30% o rendimento aumenta.

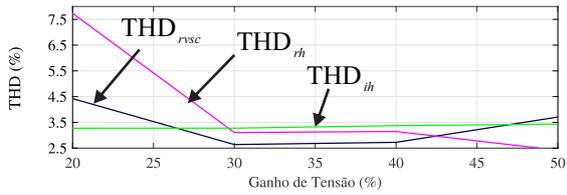
Em relação ao THD, constatou-se que o THD da corrente do lado da rede ( $THD_{ivsc}$ ) para o B2B VSC é muito alto, tornando inviável para ganhos



(a) Ganho de tensão em função do  $\eta_r$ ,  $\eta_i$  e  $\eta_t$ .



(b) Ganho de tensão em função do  $\text{THD}_r$  e  $\text{THD}_i$ .



(c) Ganho de tensão em função do  $\text{THD}_r$  e  $\text{THD}_i$  ampliada.

Figura 12: Comparação entre os rendimentos e os THD do conversor B2B VSC e do conversor híbrido.

acima de 20%. Já o THD da corrente do lado da rede para o conversor híbrido ( $\text{THD}_{ih}$ ) é relativamente baixo, em torno de 3% e se mantém durante toda a faixa de operação. Em relação ao THD da corrente do lado do gerador para o B2B VSC ( $\text{THD}_{rvsc}$ ), nota-se que é menor quando comparado com o conversor híbrido ( $\text{THD}_{ih}$ ) para o mesmo ganho de tensão.

Dessa forma, pode-se concluir que, devido ao fato da corrente do barramento CC do lado do inversor ser a mínima para o conversor híbrido, o conversor proposto possui menos perdas quando comparado com o B2B VSC. A conexão do lado da rede com o CSI se mostrou ser mais eficiente em termos de THD em comparação com VSI que possui o THD bastante elevado.

No geral, a corrente do lado do gerador tem um THD relativamente baixo para ambas topologias, no entanto para o híbrido é menor quando o ganho é superior de 40% e para o B2B VSC é menor quando está dentro da faixa de 30% a 40%. Já quando se compara em relação ao rendimento, o conversor híbrido se mostrou mais eficiente, obtendo seu melhor rendimento para o ganho de 20%. Logo a combinação do VSR e do CSI se mostrou eficiente e com uma taxa de distorção harmônica baixa, dentro dos limites especificados.

Em relação ao conversor B2B CSC, o conversor híbrido possuirá menores perdas por condução, e uma melhor conexão com a gerador elétrico,

visto que no CSC é necessário a adição de filtros capacitivos do lado do retificador. A relação de ganho do B2B CSC é similar ao do B2B VSC possuindo ação *boost* e *buck* em tensão, já o conversor híbrido possui apenas ação *boost*.

## 5.2 Resultados do Conversor Híbrido (VSR-CSI)

O sistema apresentado na Figura 1 é simulado e são verificadas as formas de onda das tensões e correntes CA e CC, mostradas na Figura 13. Para tal, considerou-se um ganho de tensão 50% ( $G_{hbrido} = 1,5$ ) e de 20% ( $G_{hbrido} = 1,2$ ).

Nas Figuras 13 (a) e (c), são observadas as curvas de tensões e corrente para o VSR, e nota-se o efeito *boost* das tensões e *buck* das correntes. Na Figura 13 (a) o índice de modulação do VSR é de 0,8 já na Figura 13 (c) o índice de modulação é unitário. Também nota-se que quanto maior o ganho, maior a corrente e menor o THD, visto que para obter um ganho maior fixando a tensão de saída e mantendo a potência constante, a corrente deverá aumentar já que a tensão de entrada será menor.

Nas Figuras 13 (b) e (d), nota-se que tanto para o ganho de 50% quanto para o ganho de 20%, as formas de onda permaneceram inalteradas, visto que a tensão para esses casos se manteve constante de 220 V. É observado também o ganho de tensão que se obtém do lado da rede em comparação com o lado do gerador.

## 6 Conclusões

Neste artigo, é proposto uma topologia híbrida de conversor CA-CC-CA para interligar fontes de energia, tais como geradores eólicos. A topologia proposta é composta de um conversor fonte de tensão do lado do gerador e de um conversor fonte de corrente do lado da rede. Para o controle do lado da rede, destaca-se o fato de que a manutenção da tensão do barramento CC, na medida em que a corrente do barramento CC diminui, foi possível, ajudando assim a diminuir as perdas por condução, nesse tipo de conversor.

O conversor CSI se mostrou mais eficiente para a conexão com a rede elétrica quando comparado ao VSI, visto que apresentou-se com um baixo THD para toda a faixa de operação, assim, não há necessidade de um filtro LCL, nem de um controle vetorial da corrente, podendo a corrente ser controlada de forma direta. O CSI também possui proteção contra curto-circuito e menores perdas por chaveamento.

Já do lado do gerador, o VSR é mais eficiente por possuir baixas perdas por condução e baixo THD. O VSR também possui maior facilidade de conexão quando conectado a máquinas elétricas, eliminando o uso de filtros CA.

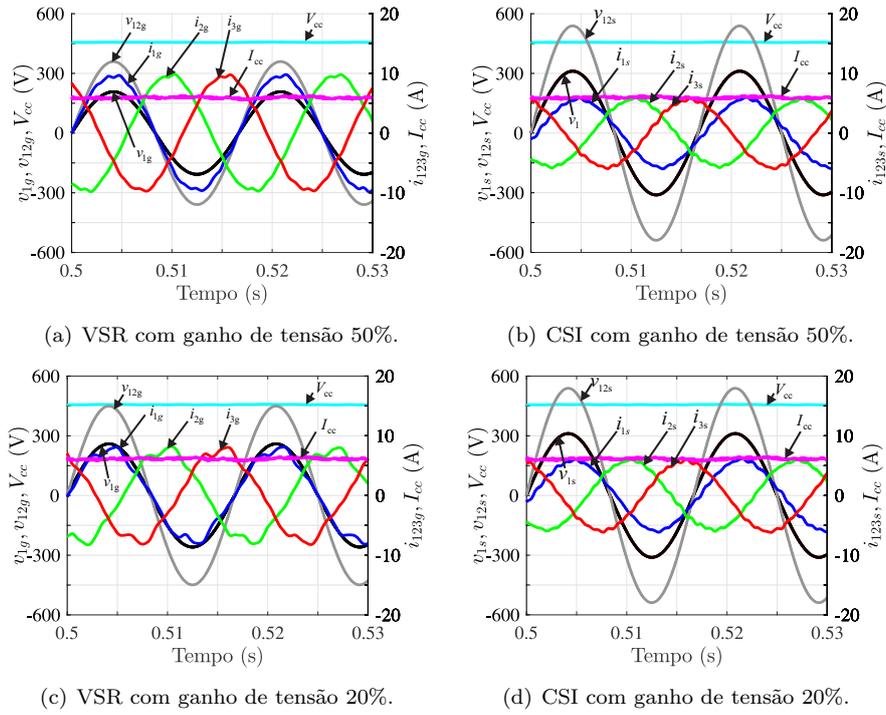


Figura 13: Curvas da tensão e corrente CA e CC para o conversor híbrido.

Dessa forma, o sistema proposto combina as vantagens do conversor fonte de tensão e do inversor fonte corrente, possuindo uma proteção contra curto-circuito, maior eficiência e menor taxa de distorção harmônica quando comparado com o B2B VSC, e um grau de liberdade maior para operação nas quais seja necessário ganho de tensão. Também constatou-se, através de resultados experimentais, a implementação do PWM do VSR e do CSI utilizando o mesmo DSP F28335 para a conexão do conversor híbrido.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da PPgEE-COPELE pelo suporte necessário durante este trabalho.

### Referências

Borges, C. (2010). Análise da operação do conversor fonte de tensão (vsc) em back-to-back para microrredes, *Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil: Dissertação de Mestrado, UFRJ*.

Caracas, J. V. M. et al. (2013). Avaliação das estratégias de controle e projeto de inversores para conexão de fontes fotovoltaicas à rede ca.

Dai, J., Xu, D. and Wu, B. (2009). A novel control scheme for current-source-converter-based pmsg wind energy conversion sys-

tems, *IEEE Transactions on Power Electronics* **24**(4): 963–972.

de Azevedo Cavalcanti Costa, L. A. L. (2016). Conversores fonte de corrente de múltiplas portas, *Campina Grande, Paraíba, Brasil: Dissertação de Mestrado, UFCG*.

de Freitas, T. R., Menegáz, P. J. and Simonetti, D. S. (2016). Rectifier topologies for permanent magnet synchronous generator on wind energy conversion systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **54**: 1334–1344.

Gomes, C. C., Cupertino, A. F. and Pereira, H. A. (2018). Damping techniques for grid-connected voltage source converters based on lcl filter: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **81**: 116–135.

Vitorino, M. A. (2012). Otimização do processamento da energia em sistemas de bombeamento fotovoltaico e conversão monofásica, *Campina Grande, Paraíba, Brasil: Tese de Doutorado, UFCG*.

Wu, B., Lang, Y., Zargari, N. and Kouro, S. (2011). *Power conversion and control of wind energy systems*, Vol. 76, John Wiley & Sons.

Yamasu, V., Dekka, A., Durán, M. J., Kouro, S. and Wu, B. (2017). Pmsg-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls, *IET Electric Power Applications*.