

ESTUDO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO DE ENERGIA PARA CONEXÃO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE COM A REDE ELÉTRICA.

LUCAS BÚRIGO*, RODRIGO OLIVEIRA†, TELLES LAZZARIN*, RAFAEL ECKSTEIN*, IVO BARBI*

*UFSC - Campus Reitor João David Ferreira Lima
Rua Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n - Trindade
Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

†CEFET-MG Campus Timóteo
Rua Dezenove de Novembro, n. 121, Centro-Norte
Timóteo, Minas Gerais, Brasil

Emails: lrochaburigo@gmail.com, rgaiba@timoteo.cefetmg.br, tellesbl@gmail.com, eckstein.rafael@gmail.com, ivobarbi@gmail.com

Abstract— This paper proposes a power electronics architecture with a low number of active switches and without the use of electrolytic capacitors for the energy management of a small wind turbine connected to the grid. The structure is composed of an active rectifier, known in the literature as Switched Mode Rectifier, and a Push-Pull inverter. The operating steps and the analysis of the structures involved are held, as well as the design and implementation of a prototype, which processes energy produced by a 1 kW wind turbine.

Keywords— Grid tie inverter, robustness, small wind generator.

Resumo— Este trabalho propõe uma arquitetura de eletrônica de potência com baixo número de interruptores ativos e sem a utilização de capacitores eletrolíticos para processamento de energia de um aerogerador de pequeno porte conectado à rede elétrica. A estrutura é composta por um retificador ativo, denominado na literatura como Switched Mode Rectifier, e um inversor Push-Pull. São apresentadas as etapas de operação e a análise das estruturas envolvidas, assim como, o projeto e experimentação de um protótipo de laboratório para processamento da energia produzida por um aerogerador de 1 kW.

Palavras-chave— Inversor conectado a rede elétrica, robustez, aerogerador de baixa potência, micro geração.

1 Introdução

A crescente busca pela utilização de energias renováveis alavanca também um dos mais significantes campos de pesquisa na eletrônica de potência. O correto gerenciamento da energia proveniente destas fontes renováveis é de grande importância para a carga ou a rede elétrica ao qual está conectada. Atualmente, diversas fontes de energia elétrica e métodos de geração são utilizadas e estudadas, sendo que cada um deles possui diferentes características de custo, robustez, degradação ambiental, entre outras. As energias solar e dos ventos, por exemplo, já são amplamente utilizadas em alguns países e possuem um nível relativamente alto de desenvolvimento das tecnologias para captação e gerenciamento das energias envolvidas.

A ampliação do mercado da microgeração no cenário nacional depende do avanço da tecnologia em aspectos como a robustez do sistema, custo, limitações de cada estrutura, entre outros. Em sistemas de geração eólica, segundo (Qiao and Lu, 2015), as falhas mais frequentes ocorrem nos sistemas eletrônicos, representando cerca de 25% do total. Dentre estas falhas, os componentes mais vulneráveis são os capacitores eletrolíticos e os semicondutores (Song and Wang, 2013). Na Figura 1 é apresentado um gráfico com percentual de falhas por componente na eletrônica de potência.

O percentual de falhas em PCB's representa

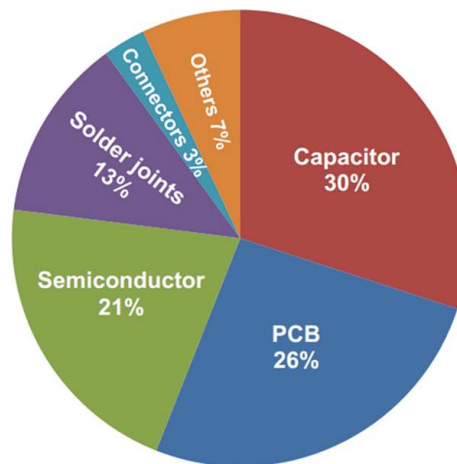


Figura 1: Percentual de falhas por componentes em conversores de potência. Fonte: (Qiao and Lu, 2015).

as falhas por corrosão ou rompimento de trilhas, componentes desalinhados, solda fria, entre outras.

O presente trabalho apresenta o estudo de uma estrutura para gerenciamento de energia de turbinas eólicas de pequeno porte conectadas à rede elétrica, tendo como foco a simplicidade do circuito, com o intuito de reduzir o número de semicondutores de potência e eliminar o uso de capacitores eletrolíticos no circuito de potência.

2 Descrição do Sistema Proposto

Ao considerar um gerador eólico de ímãs permanentes, o qual é o foco deste trabalho, as arquiteturas, em termos de eletrônica de potência, usualmente aplicadas a estes sistemas são de três tipos: a arquitetura retificador passivo mais um inversor, a arquitetura retificador passivo, conversor CC-CC e inversor e a arquitetura composta por dois retificadores bidirecionais (Kortabarria et al., 2010). A primeira apresenta uma estrutura simples porém de baixo rendimento. A segunda arquitetura é uma configuração mais usual para baixas potências, onde o conversor CC-CC é responsável por controlar a potência extraída do gerador. E a arquitetura composta por dois retificadores bidirecionais é mais empregada para potências elevadas por permitir o controle da corrente na saída do gerador e possuir um custo mais elevado.

A Figura 2 apresenta a estrutura do circuito de potência que será abordada neste trabalho.

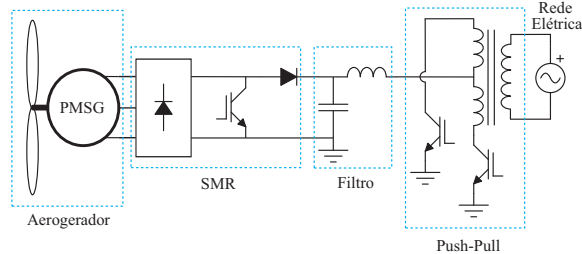


Figura 2: Arquitetura do sistema proposto para este trabalho.

A arquitetura proposta integra as topologias do conversor *Switched Mode Rectifier* (SMR) e do inversor Push-Pull. O conversor SMR é responsável por modular a corrente do gerador para que a mesma possua uma forma de onda senoidal retificada e pelo rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT).

Assim como em (Eckstein, 2014), o inversor Push-Pull projetado neste trabalho opera em baixa frequência (60 Hz). Este inversor é responsável por transformar a corrente contínua gerada na etapa CA-CC novamente em uma corrente alternada, porém, agora em fase com a tensão da fonte conectada na saída do sistema.

Devido à alta frequência gerada pela modulação PWM no conversor SMR, utiliza-se um filtro passa baixa com o intuito de minimizar as harmônicas de alta frequência enviadas para a rede de energia elétrica.

3 Análise e princípio de operação do sistema proposto em regime permanente

A análise das características dos conversores voltada para dimensionamento foi realizada em regime

permanente e em malha aberta. Em alguns casos, a estrutura foi analisada no período de comutação de S1, através do conceito de valor médio quase instantâneo, no qual a tensão sobre o capacitor de filtro (V_{Cf}) e a corrente no indutor de filtro (I_{Lf}) podem ser considerados constantes para um período de comutação.

3.1 Inversor Push-Pull

O inversor Push-Pull apresenta duas etapas de operação neste sistema. A primeira etapa de operação ocorre durante o semi-ciclo positivo da tensão da rede elétrica (V_{out}), e o circuito equivalente é representado na Figura 3. A segunda etapa de operação ocorre durante o semi-ciclo negativo de (V_{out}), e o circuito equivalente é representado na Figura 4. A fonte I_{Lf} representa a corrente gerada pelo conversor SMR após passar pelo filtro CL.

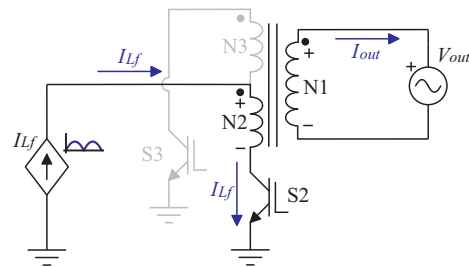


Figura 3: Circuito equivalente para o semiciclo positivo da rede elétrica.

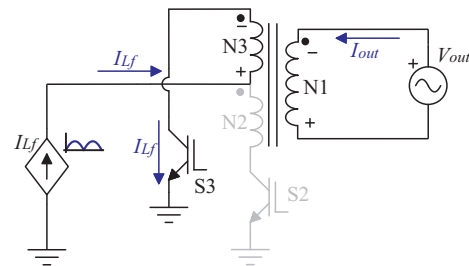


Figura 4: Circuito equivalente para o semiciclo negativo da rede elétrica.

A tensão sobre os interruptores do inversor Push-Pull (S2 e S3) é igual ao dobro da tensão na entrada do inversor, que neste caso é imposta pela tensão de saída com o devido ganho do transformador e a ondulação de tensão do capacitor C_f .

S2 e S3 conduzem corrente somente durante meio ciclo da tensão da rede elétrica cada, deste modo a corrente eficaz máxima em cada interruptor Push-Pull pode ser escrita em função da corrente de pico na saída I_{op} e da relação de transformação (a) do transformador do inversor Push-Pull, conforme a equação (1).

$$I_{S2e} = \frac{I_{op} \cdot a}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

3.2 Conversor Switched-Mode Rectifier

A tensão na saída do filtro CL é imposta pela tensão da rede elétrica (V_{out}) e pela relação de transformação (a), conforme a equação (2). Para descrever as etapas de funcionamento do conversor SMR uma fonte de tensão com forma de onda senoidal retificada (V_{CL}) foi alocada na saída do filtro.

$$V_{CL} = \frac{V_{out}}{a} \quad (2)$$

O conjunto gerador eólico e retificador foi representado por uma fonte de corrente (I_{in}) devido as características de alta indutância da máquina.

O estágio SMR também apresenta duas etapas de operação, porém, ao contrário do inversor Push-Pull, que opera na frequência da tensão da rede elétrica, o conversor SMR opera com uma frequência mais elevada (50 kHz). A Figura 5 mostra o circuito equivalente para a primeira etapa de operação, onde o interruptor S1 está conduzindo.

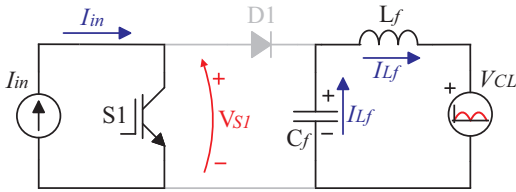


Figura 5: Circuito equivalente com o interruptor S1 conduzindo

O diodo D1 encontra-se reversamente polarizado, impedindo o fluxo de corrente da entrada para o filtro, enquanto o filtro é responsável por manter o fluxo de corrente na entrada do inversor Push-Pull, o que evita a descontinuidade de corrente e atenua a alta frequência.

Na segunda etapa de operação o interruptor S1 é bloqueado e o diodo D1 é diretamente polarizado. O circuito equivalente desta etapa de operação é apresentado na Figura 6. A corrente da entrada passa a fluir pelo diodo D1 e, posteriormente, se divide entre o capacitor C_f e o indutor L_f .

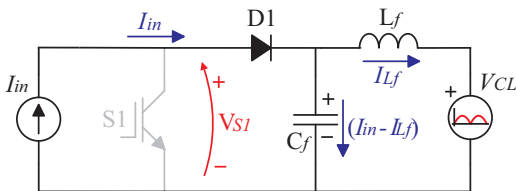


Figura 6: Circuito equivalente com o interruptor S1 bloqueado

O comando adequado de S1 impõe uma corrente no diodo D1 com uma componente fundamental de formato senoidal retificado em fase com a tensão V_{out} , como é apresentado nas formas de onda da Figura 7.

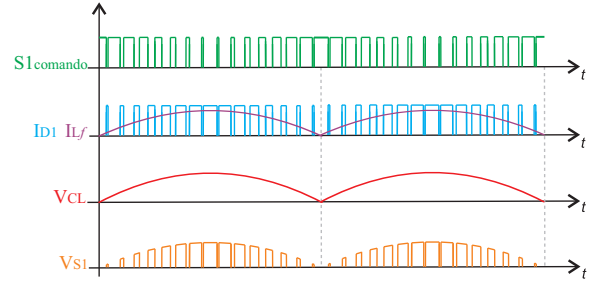


Figura 7: Formas de onda do comando de S1, corrente no diodo D1, corrente no indutor de filtro, a tensão na saída do filtro e de tensão sobre os terminais do interruptor S1 respectivamente.

Com a razão cíclica (D) definida com o tempo que o interruptor S1 permanece conduzindo (tc) sobre o período total de operação deste interruptor (T), o ganho estático desta etapa para valores médios quase instantâneos é dado por (3).

$$G = \frac{V_{Cf}}{V_{S1}} = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$

Para que a corrente na saída do conversor SMR tenha a característica desejada (forma de onda senoidal retificada), a razão cíclica sobre o interruptor S1 para θ variando de 0 a π em malha aberta deve obedecer a equação apresentada em (4).

$$D(\theta) = 1 - \alpha \cdot \sin(\theta) \quad (4)$$

Onde α foi definido como a relação entre a corrente de pico no indutor L_f (I_{Lf_p}) e a corrente de entrada (I_{in}).

Durante a primeira etapa de operação do conversor SMR, o interruptor está conduzindo e fazendo com que o diodo D1 fique em antiparalelo com o capacitor C_f . Na segunda etapa o diodo D1 está conduzindo e o interruptor S1 em paralelo com o capacitor C_f . Portanto o esforço de tensão sobre o interruptor S1 (V_{S1p}) e sobre o diodo D1 são iguais ao pico da tensão na entrada do inversor Push-Pull, conforme (5).

$$V_{S1p} = \frac{V_{op}}{a} + \Delta V_{Cf} \quad (5)$$

Onde V_{op} é igual ao pico da tensão de saída e ΔV_{Cf} igual a ondulação de tensão sobre o capacitor de filtro.

A corrente eficaz no interruptor S1 (I_{S1er}) é dada por (6).

$$I_{S1er} = \sqrt{\frac{I_{in}^2 \cdot (\pi - 2 \cdot \alpha)}{\pi}} \quad (6)$$

A corrente média em D1 (I_{D1mr}) é dada por (7).

$$I_{D1mr} = \frac{2 \cdot I_{in} \cdot \alpha}{\pi} \quad (7)$$

3.3 Análise do comportamento do filtro CL

O filtro CL tem como objetivo atenuar as componentes de alta frequência geradas pela comutação do interruptor S1. Deste modo, analisa-se a máxima ondulação, em alta frequência, da tensão no capacitor (ΔV_{Cf}) e da corrente no indutor (ΔI_{Lf}).

O valor de ΔV_{Cf} durante um semiciclo de V_{out} é dado por (8).

$$\Delta V_{Cf}(\theta) = \frac{I_{in} \cdot (\alpha \cdot \sin(\theta) - \alpha \cdot \sin(\theta)^2)}{C_f \cdot f_s} \quad (8)$$

Enquanto ΔI_{Lf} durante um semiciclo de V_{out} é dado por (9).

$$\Delta I_{Lf}(\theta) = \frac{8 \cdot I_{in} \cdot (\alpha \cdot \sin(\theta) - \alpha \cdot \sin(\theta)^2)}{2 \cdot \pi^3 \cdot f_s^2 \cdot C_f \cdot L_f} \quad (9)$$

3.4 Indutância auxiliar

Para reduzir a ondulação da corrente na saída do retificador I_{ret} , proveniente da modulação sobre S1, da tensão senoidal retificada na saída do SMR e da corrente retificada do gerador, foi adicionada uma indutância entre o retificador e o interruptor S1 conforme apresentado na Figura 8.

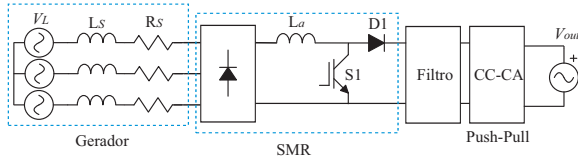


Figura 8: Estrutura proposta com indutância auxiliar na saída do retificador

4 Controle e MPPT

Em um sistema de geração de energia eólica conectado à rede de energia elétrica, é de grande interesse que a máxima potência elétrica seja extraída do gerador. Para isso são empregados os métodos de MPPT (sigla do inglês para: *Maximum Power Point Tracker*). Segundo (Mirecki et al., 2007), estes métodos podem ser divididos em dois grandes grupos, os que exigem conhecimento das características do aerogerador e os que não exigem. O método de MPPT apresentado neste trabalho controla o fluxo de potência extraída do gerador impondo uma tensão média fixa sobre o interruptor S1. Esta tensão foi escolhida com base na curva característica do gerador de potência versus tensão (PxV) média na saída do retificador, conforme apresentado na Figura 9. A curva de MPPT utilizada (em vermelho) não cruza a curva PxV para baixas rotações, portanto o sistema só opera normalmente a partir de uma mínima velocidade de rotação do gerador.

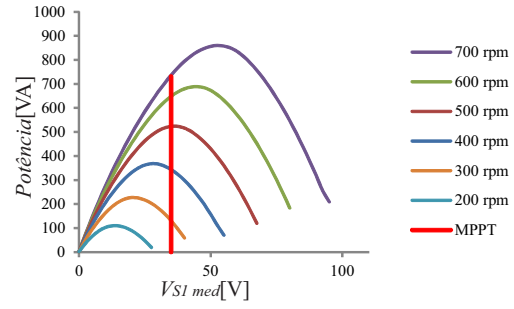


Figura 9: Curva de MPPT proposta com V_{S1med} constante (vermelho).

Para garantir que a tensão média sobre o interruptor siga a referência foi utilizada a malha de controle apresentada na Figura 10.

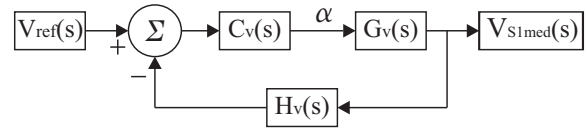


Figura 10: Malha de controle de tensão média sobre S1.

A Figura 11 apresenta o diagrama completo do sistema com controle e MPPT.

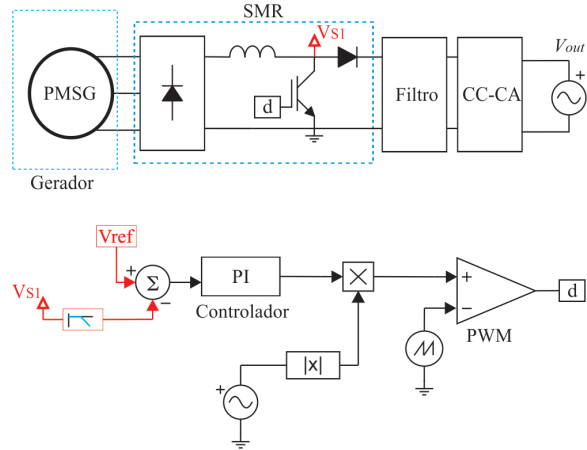


Figura 11: Diagrama de controle de MPPT com referência de tensão constante.

O sistema em malha aberta inclui a função de transferência da planta, representada por (10), e a função de transferência do sensor de medição de V_{S1med} ($H_v(s)$) representada por (11).

$$\frac{v_{S1med}}{\alpha} = \frac{V_{outpico}}{2} \quad (10)$$

$$H_v(s) = \frac{K \cdot \omega_0^2}{s^2 + s \cdot \left(\frac{\omega_0}{Q}\right) + \omega_0^2} \quad (11)$$

Deste modo, optou-se por utilizar um controlador PI com filtro por se tratar de um circuito simples e capaz de garantir o erro nulo em regime permanente para o sistema.

5 Protótipo de laboratório

5.1 Especificações e componentes do circuito de potência

As especificações utilizadas no projeto do protótipo de laboratório são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações de projeto.

Parâmetro	Valor
Potência nominal ($P_{nominal}$)	1 [kW]
Tensão eficaz de V_{out}	220 [V]
Corrente eficaz nominal de I_{out}	4,54 [A]
Frequência da rede elétrica (f_r)	60 [Hz]
Máxima ondulação de I_{out}	2 %
Frequência de comutação de S1	50 [kHz]
Modelo do gerador (PMSG)	P718s3
Indutância síncrona do gerador	3,5 [mH]

Para o MPPT foi adotada uma tensão de referência (V_{ref}) de 3,5 V, para que a tensão média sobre o interruptor S1 seja de 35 V. A curva de MPPT é a mesma apresentada na Figura 9.

A Tabela 2 apresenta os componentes do circuito de potência do protótipo de laboratório.

Tabela 2: Componentes do circuito de potência

Componente	Valor
Interruptores S1, S2 e S3	IXKH70N60
Diodo D1	DSEP 30-06BR
Ponte retificadora	36MT160
Indutor auxiliar	50 [mH]
Capacitor de filtro	9 [μ H]
Transformador	220:110:110 [V]

Destaca-se, entre os componentes do circuito de potência, a baixa capacitância do capacitor do filtro e a não utilização de um componente externo como indutor no filtro CL. Neste caso a própria indutância de dispersão do transformador do inversor Push-Pull foi utilizada.

5.2 Resultados Experimentais

A Figura 12 apresenta uma imagem do sistema completo construído para obtenção dos resultados experimentais. O sistema foi testado com um motor impondo a velocidade de rotação do gerador a imã permanente.

Os esforços de tensão resultantes sobre o diodo D1 (azul escuro) e o interruptor S1 (azul escuro) são apresentados na Figura 13. Na mesma figura é apresentada a tensão sobre o capacitor C_f (rosa). Observa-se que os esforços de tensão sobre os interruptores do conversor SMR, quando não estão conduzindo, são iguais à tensão no capacitor C_f .

A tensão sobre o capacitor C_f (rosa) e a corrente na entrada do inversor Push-Pull (azul claro),

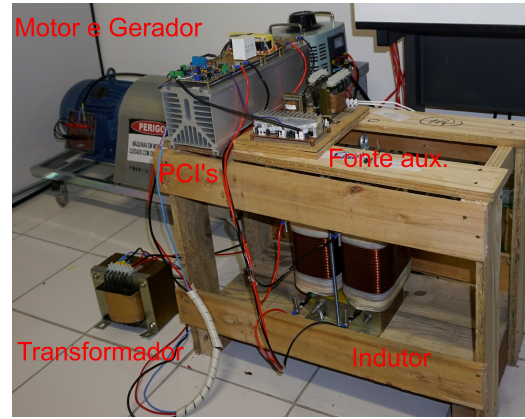


Figura 12: Setup de testes do sistema proposto.

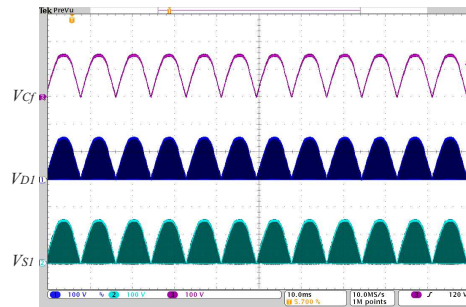


Figura 13: Tensão sobre o interruptor S1 (azul claro), sobre o diodo D1 (azul escuro) e sobre o capacitor de filtro.

que representa a corrente no indutor do filtro (I_{Lf}), são apresentados na Figura 14. Assim como as ondulações de V_{Cf} (rosa) e de I_{Lf} (azul claro) durante o pico da senóide. Os resultados obtidos para ΔV_{Cf} e de ΔI_{Lf} foram coerentes com o esperado quando eliminados os ruídos de medição.

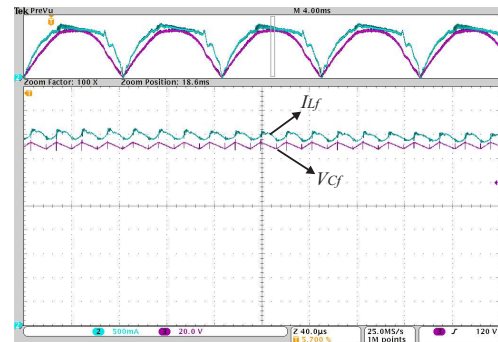


Figura 14: Corrente na entrada do inversor Push-Pull (azul claro) e Tensão no capacitor de filtro (rosa).

Os esforços de tensão sobre os interruptores S2 e S3 do inversor Push-Pull são apresentados na Figura 15 juntamente com a tensão do circuito grampeador. Pequenos picos de tensão podem ser observados durante a comutação dos interruptores S2 e S3. No entanto, esses picos não atingem níveis de tensão que possam ser destrutivos para

os componentes.

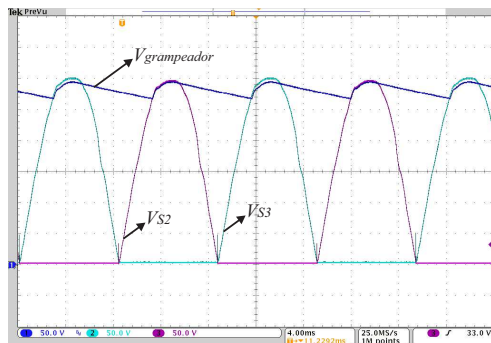


Figura 15: Esforços de tensão sobre os interruptores S2 (azul claro) e S3 (rosa) e tensão do circuito grampeador (azul escuro).

A Figura 16 apresenta as formas de onda de corrente na saída do retificador (azul claro) e tensão sobre o interruptor S1 (azul escuro) para a velocidade de rotação do gerador de 700 rpm.

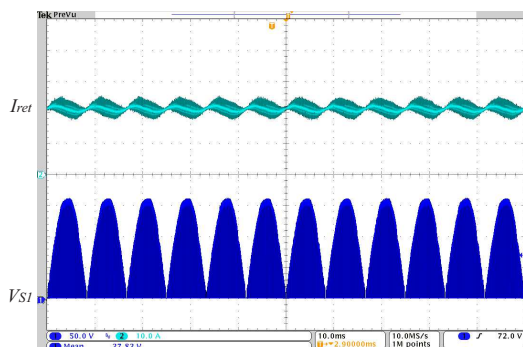


Figura 16: Tensão sobre o interruptor S1 e corrente na saída do retificador para velocidade de rotação do gerador de 700 rpm e MPPT 1.

A ondulação na corrente I_{ret} é proveniente da modulação empregada e da tensão imposta na saída do conversor SMR.

A potência extraída experimentalmente do conjunto gerador e retificador para esta velocidade de rotação foi de aproximadamente 737 W, sendo que o valor esperado para esta rotação é de aproximadamente 733 W. Diferenças entre as potências obtidas experimentalmente e as potências obtidas por simulação eram esperadas, devido a simplicidade do modelo do gerador empregado nas simulações e ao fato de que as perdas no retificador passivo e na indutância auxiliar L_a não foram consideradas.

Na Figura 17 são apresentadas as formas de tensão da rede e de corrente na saída do inversor para a velocidade de rotação 700 rpm no gerador. A potência entregue a rede elétrica foi de aproximadamente 608 W.

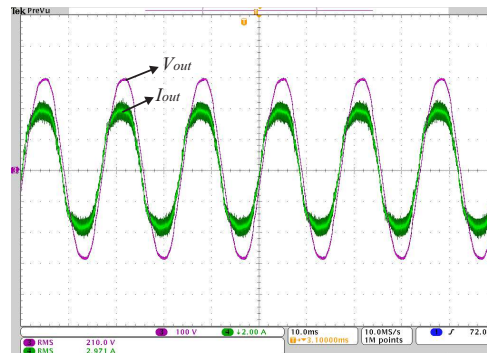


Figura 17: Tensão de saída e corrente na saída para velocidade de rotação do gerador de 700 rpm e MPPT 1.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou um sistema de conversão de energia para a conexão de aerogeradores de pequeno porte à rede elétrica. A topologia proposta é composta por um conversor Switched Mode Rectifier, um inversor Push-Pull com entrada em corrente e um filtro CL intermediário, não utilizando capacitores eletrolíticos no circuito de potência e empregando um baixo número de interruptores ativos.

Os resultados experimentais comprovaram o funcionamento da estrutura fornecendo potência a rede elétrica sem expor os interruptores do sistema a sobre tensões destrutivas.

Referências

- Eckstein, R. H. (2014). *Sistema para conexão de pequenos aerogeradores com a rede elétrica: Análise, projeto e experimentação*, Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Kortabarria, I., Ibarra, E., de Alegria, I. M., Andreu, J. and Ascarza, A. (2010). Power converters used in grid connected small wind turbines: Analysis of alternatives, *Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), 5th IET International Conference*.
- Mirecki, A., Roboam, X. and Richardeau, F. (2007). Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines, *Industrial Electronics, IEEE Transactions*.
- Qiao, W. and Lu, D. (2015). A survey on wind turbine condition monitoring and fault diagnosis - part i: Components and subsystems, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS* VOL. 62(NO. 10): 6536–6545.
- Song, Y. and Wang, B. (2013). Survey on reliability of power electronic systems, *Power Electronics, IEEE Transactions* 28: 591–604.