

Modelagem e Controle de um Retificador PWM Operando Sob Distúrbios de Qualidade de Energia em Redes Elétricas Rurais

Matheos C. Wermuth
Universidade Federal do Pampa
Alegrete, RS, Brasil, 97546-550
Email: wermuthmc@gmail.com

Richard G. Cornelius
Universidade Federal do Pampa
Alegrete, RS, Brasil, 97546-550
Email: richardcorneliusg@gmail.com

Guilherme Sebastião da Silva
Universidade Federal do Pampa
Alegrete, RS, Brasil, 97546-550
Email: guilhermesilva@unipampa.edu.br

Resumo—A irrigação eletromecânica é parte crucial da rizicultura sul-rio-grandense. Estes sistemas aumentam a demanda energética da região durante o período de irrigação, logo, a qualidade de energia elétrica das regiões rurais é de grande importância. No mercado local, estão disponíveis apenas sistemas com retificação passiva de tensão. Desta forma, em parceria com a empresa EGD, propõe-se a utilização do Retificador PWM para a retificação da tensão de entrada. Para isso, são apresentados os modelos matemáticos que definem o comportamento do retificador, junto ao projeto de seu sistema de controle e sincronização com a rede, por fim, seu desempenho é avaliado durante a partida e durante operação em redes com baixa qualidade de energia.

Palavras Chave – Fronteira Oeste, Qualidade de Energia, Retificador PWM

I. INTRODUÇÃO

O agronegócio representa uma considerável parcela do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, totalizando 21,4% em 2019 [1]. Dentro do agronegócio nacional, a produção de arroz da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul destaca-se por sua expressiva contribuição na safra de 2018/19, totalizando 1.168,8 mil hectares de área plantada e produzindo cerca de 8.622,2 mil toneladas de grãos [2].

Sendo a rizicultura irrigada a mais presente no estado do Rio Grande do Sul, assim, depende-se de sistemas de irrigação para a manutenção de lâminas d'água ao longo do crescimento da planta. A maioria das propriedades utilizam-se sistemas de irrigação eletromecânicos conectados a rede de em média 150 CV por unidade. Ocasionalmente assim, um aumento de 128,3MW de demanda energética em 2013 [3].

Com este aumento de demanda, problemas referentes a baixa qualidade de energia se intensificam, especialmente em redes rurais. Desta forma, surge o interesse em estudos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) visando adequar os sistemas utilizados aos locais de sua aplicação. A QEE tem por interesse analisar o comportamento das formas de onda de tensão e corrente e verificar desvios de seus comportamentos ideais. [4].

Para que sistemas de irrigação eletromecânicos sejam ligados a rede de alimentação, são necessários sistemas de acionamento de motores. Estes, devem suprir uma variedade

de requerimentos, como: ajuste de velocidade angular, torque, aceleração e posição linear, rápida eliminação de erros, alta confiabilidade e eficiência [5].

Os sistemas de acionamento mais difundidos pela região da Fronteira Oeste do RS, utilizam circuitos passivos para a retificação da tensão de entrada. Essas topologias, também conhecidas como retificadores a diodo, são utilizados devido a simplicidade de seu circuito e ausência de um circuito de controle. Entretanto, essas topologias introduzem diversos fenômenos que afetam a qualidade de energia na rede, como alto conteúdo harmônico das correntes de entrada, baixo fator de potência, distorção das tensões de entrada, entre outros [6].

Desta forma, topologias de retificação ativa se tornam cada vez mais atrativas, com vantagens como: baixa distorção harmônica das correntes de entrada, possibilidade de fluxo bidirecional de potência e fator de potência unitário na entrada [7]. Porém, há o ônus do aumento da complexidade do sistema, já que se torna necessário a utilização de um circuito de controle e sincronização com a rede elétrica.

Em vista disso, juntamente com a empresa EGD, propõe-se uma topologia de retificador ativo em redes rurais, sincronizada com a alimentação, utilizando um retificador PWM, devido a sua simplicidade dentre as topologias chaveadas. Inicialmente serão realizadas modelagens matemáticas para a obtenção de funções de transferência para o retificador em questão. Baseando-se nestes resultados, o sistema de controle é projetado e exposto, juntamente com o método escolhido de sincronização com a rede, o Duplo Integrador Generalizado de Segunda Ordem, do inglês *DSOGI-PLL*. Por fim, buscase avaliar o desempenho do retificador PWM juntamente com seu sistema de pré-carga, controle e sincronização utilizando simulações no software *MATLAB/Simulink*, para avaliá-lo durante sua partida, operação nominal e também seu desempenho frente a transitórios esperados em redes rurais da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul.

II. METODOLOGIA

Para a topologia do retificador, escolheu-se o Retificador PWM, devido a sua simplicidade e adequação ao sincronismo com a rede. Este retificador opera similarmente ao *2L-VSI*,

porém, entrega potência de sua entrada CA, para cargas conectadas ao seu barramento CC, neste caso, futuramente um inversor de frequência e uma máquina elétrica. O sistema de pré-carga da capacitância do barramento CC, juntamente com os elementos passivos do Retificador PWM foram projetados de acordo com os anexos expostos em [8]. A topologia do Retificador PWM pode ser visto na Fig. 1 a seguir.

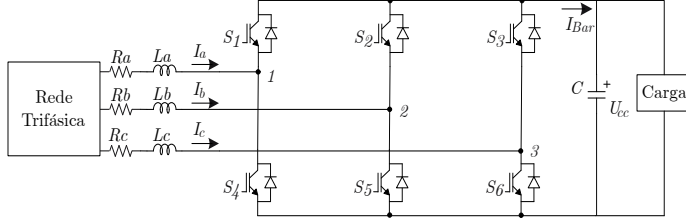


Figura 1: Retificador PWM

A. Modelagem do Retificador PWM visto a partir da entrada (CA)

Para o controle das correntes de entrada do retificador, se faz necessária uma equação que relacione as correntes de entrada com a razão cíclica de cada braço do conversor, desta forma utilizando o método descrito por [9], obteve-se as equações de estado da planta do retificador para o lado CA. Primeiramente, obteve-se o circuito equivalente para o retificador PWM, visto na Fig. 2, considerando a rede trifásica equilibrada e sem distorções.

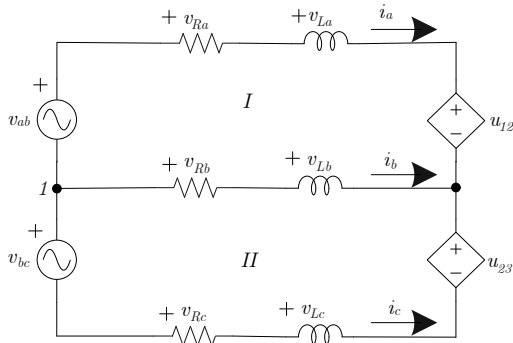


Figura 2: Circuito equivalente do Retificador PWM

Onde u_{12} e u_{23} são as diferenças de potencial entre os pontos 1 e 2 e, 2 e 3 respectivamente. Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões nas malhas I e II da Fig. 2 e transformando os valores de linha para fase, obtêm-se :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = \frac{R}{L} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} +$$

$$+ \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde R é a resistência e L a indutância do filtro L de entrada, que é igual para as três fases.

Pode-se reescrever (1) como:

$$\dot{X}(t) = A_{abc}X(t) + B_{abc}U(t) + F_{abc}W(t) \quad (2)$$

Onde, $X(t)$ é o vetor de estados do sistema, representado pelas correntes em cada fase, $U(t)$ é o vetor de controle do sistema, representado pelas tensões produzidas pelo retificador em cada braço, e $W(t)$ são os distúrbios constantes do sistema, no caso, as tensões de fase equilibradas da rede.

Então, aplica-se a transformada de coordenadas abc para $dq0$ e considera-se que para sistemas trifásicos a três fios a componente zero pode ser desprezada, já que será sempre nula, assim, obtêm-se o seguinte espaço de estados em coordenadas dq :

$$\dot{X}_{dq}(t) = A_{dq}X_{dq}(t) + B_{dq}U_{dq}(t) + F_{dq}W_{dq}(t) \quad (3)$$

Onde:

$$X_{dq}(t) = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}; U_{dq}(t) = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}; W_{dq}(t) = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A_{dq} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}; B_{dq} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F_{dq} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde u_d e u_q são as tensões produzidas no interior do retificador, que são compostas pela razão cíclica de cada eixo, d_d e d_q , multiplicada pela tensão do barramento CC. Desta forma, aplica-se perturbações nestas razões cíclicas, que resultarão em perturbações nas correntes de entrada para que, utilizando a transformada de Laplace, seja possível obter o modelo do retificador PWM visto na Fig. 3.

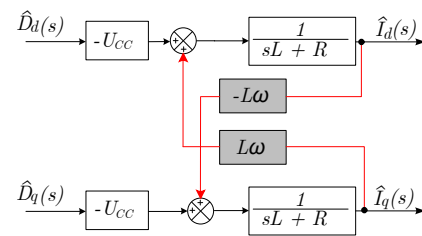


Figura 3: Modelo CA do Retificador PWM

A partir do modelo visto na Fig.3, pode-se obter a função de transferência vista pelo lado CA. O acoplamento entre os eixos d e q , destacado em vermelho na Fig. 3, pode ser ignorado, já que será compensado na malha de controle de corrente. Assim, a seguinte função de transferência é obtida:

$$G_c(s) = \frac{I_{dq}(s)}{D_{dq}(s)} = -\frac{U_{CC}}{sL + R} \quad (7)$$

B. Modelagem do Retificador PWM visto a partir da saída (CC)

Para o controle da tensão do barramento, se faz necessário uma equação que relacione a tensão do barramento CC, U_{CC} , com a corrente entregue a ele I_{Bar} . Porém, a corrente entregue ao barramento não é diretamente controlada, desta forma, é preciso relacionar a corrente entregue ao barramento aos elementos que são controlados no sistema. Utilizando a análise feita por [10], pode-se afirmar que o valor médio da corrente entregue ao barramento CC é:

$$i_{Bar}(t) = i_a(t)d_a(t) + i_b(t)d_b(t) + i_c(t)d_c(t) \quad (8)$$

Onde i_i e d_i correspondem a corrente de fase na entrada do retificador e a razão cíclica respectivamente, para $i = (a, b, c)$, os quais são valores diretamente controlados pelo sistema.

Logo, aplica-se a transformada de abc para dq em (8) e então busca-se os valores nominais de operação de I_d , I_q , D_d e D_q . Para isso, considera-se que o sistema está em regime permanente e que o eixo d está alinhado com a referência das tensões de entrada. Desta forma, obtêm-se a equação referente a perturbação da corrente que flui para o barramento CC em função das perturbações das correntes em quadratura:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{Bar}(s) = & - \left[(sL + 2R) \frac{Q_{in}}{U_{CC}V_p} \sqrt{\frac{2}{3}} \right] \hat{I}_q(s) + \\ & + \left[\frac{V_p}{U_{CC}} \sqrt{\frac{2}{3}} - (sL + 2R) \frac{P_{out}}{\eta U_{CC}V_p} \sqrt{\frac{2}{3}} \right] \hat{I}_d(s) \end{aligned} \quad (9)$$

Onde V_p corresponde a tensão de pico de fase. Deseja-se fator de potência unitário na entrada do retificador, para isso, a potência reativa de entrada deve ser nula, então:

$$\hat{I}_{Bar} = \hat{I}_d \left[\frac{V_p}{U_{CC}} \sqrt{\frac{2}{3}} - (sL + 2R) \frac{P_{out}}{\eta U_{CC}V_p} \sqrt{\frac{2}{3}} \right] \quad (10)$$

Para obter a relação entre a tensão do barramento CC e a corrente entregue a ele faz-se uso do circuito a seguir mostrado na Fig. 4. Onde a entrada do retificador, juntamente com suas chaves, foram modelados por uma fonte de corrente controlada, conectada ao barramento.

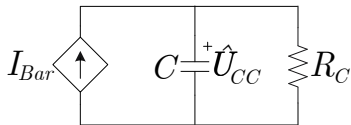


Figura 4: Circuito equivalente do Retificador PWM

Desta forma, para uma carga puramente resistiva:

$$G_v(s) = \frac{\hat{U}_{CC}(s)}{\hat{I}_{Bar}(s)} = \frac{R_C}{R_C C s + 1} \quad (11)$$

Assim, obtêm-se que a função de transferência da tensão do barramento CC, U_{CC} , e a corrente I_d :

$$G_v(s) = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{V_p}{U_{CC}} R_c \frac{\left[1 - (sL + 2R) \frac{2}{3} \frac{P_{out}}{\eta V_p^2} \right]}{R_C C s + 1} \quad (12)$$

C. Projeto do sistema de controle

O sistema de controle é baseado em um conjunto multi malhas, com uma malha interna de controle de corrente e uma malha externa de controle de tensão. A malha interna fornece um controle preciso das correntes de entrada na ordem de kHz , já a malha externa regula a tensão de saída do retificador na ordem de Hz . Esta diferença de velocidade de atuação promove o desacoplamento dinâmico entre as malhas, fazendo com que cada malha interprete a outra apenas como um ganho.

A malha de corrente será composta por dois controladores Proporcional-Integrais (PI), um para o eixo direto e outro para o eixo em quadratura, um bloco de desacoplamento dinâmico de variáveis e a planta do retificador, visto na Fig. 5.

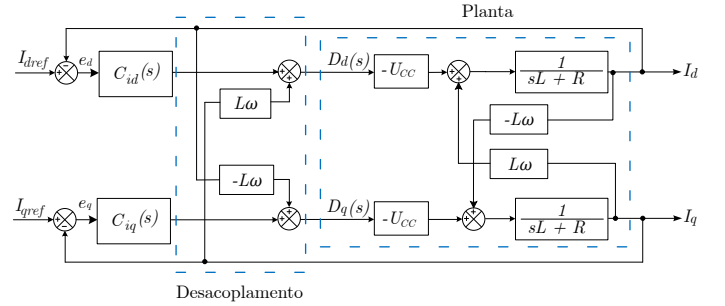


Figura 5: Malhas de controle de corrente

O bloco de desacoplamento objetiva eliminar os efeitos do acoplamento cruzado entre os eixos d e q em todos os instantes de tempo, desta forma permitindo que o projeto dos compensadores seja feito através de uma análise de malha do tipo $SISO$ [11]. Ao considerar os efeitos do bloco supracitado, as malhas de controle para as correntes I_d e I_q se tornam independentes, como visto na Fig. 6 e então seus controladores podem ser projetados independentemente.

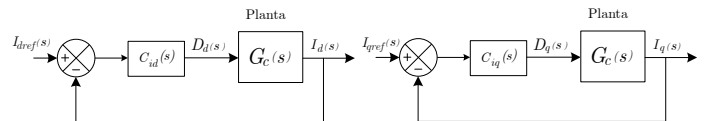


Figura 6: Malhas de controle de corrente desacopladas

Como exposto em (12), a magnitude da tensão do barramento CC depende diretamente da amplitude das correntes de entrada, assim, se faz necessário a malha de controle de tensão que irá enviar uma referência em eixo direto para a malha de controle de corrente. A função de transferência em malha fechada da malha de controle de corrente deve ser adicionada em série com o modelo do retificador para o lado CC, para que seu comportamento dinâmico seja representado, desta forma, a malha de controle de tensão pode ser vista na Fig. 7

Utilizando as malhas expostas anteriormente, juntamente com o critério do ganho definido pelo método do Lugar das Raízes, desenvolvido por [12], é possível determinar os seguintes valores para ganho integral (K_i), ganho proporcional (K_p), margem de fase (MF) e margem de ganho (MG) para os controladores PI que são expostos na Tabela I.

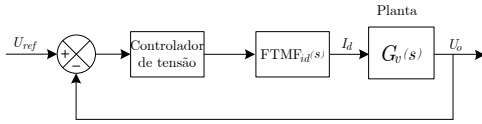


Figura 7: Malhada controle de tensão

Tabela I: Parâmetros dos controladores PI

Malhas	K_i	K_p	MF	MG
Corrente	576,97	0,1837	84, 5°	inf
Tensão	4,7536	0,3026	86, 5°	29, 4 dB

Por fim, para mitigar um fenômeno conhecido como *Startup Inrush Current*, foram implementados dois métodos, o primeiro é a utilização uma rampa de referência de tensão no lugar da comumente utilizada referência em degrau, desta forma, tornando gradual a elevação de tensão do barramento CC. A segunda estratégia, como demonstrado em [13], foi a utilização de um *feedforward* da tensão da rede em eixos síncronos na malha de corrente.

D. Método de sincronização

O DSOGI-PLL, do inglês *Dual Second Order Generalized Integrator Phase Locked Loop*, proposto por [14], tem como objetivo a extração da sequência positiva das tensões trifásicas da rede V_{abc} a partir da representação do sistema em eixos estacionários $\alpha\beta$.

Utilizam-se dois Integradores Generalizados de Segunda Ordem (DSOGI) para a obtenção da tensão direta filtrada V'_α e V'_β e da tensão em quadratura (90° atrasada) em relação ao sinal original qV'_α e qV'_β , onde k se relaciona diretamente ao fator de amortecimento do sistema de sincronização e ω' é a frequência de ressonância deste sistema que deve ser idêntica a frequência da rede ω [7]. O esquemático do SOGI-QSG do inglês *Second Order Generalized Integrator Quadrature-Signal Generator* pode ser visto na Figura 8.

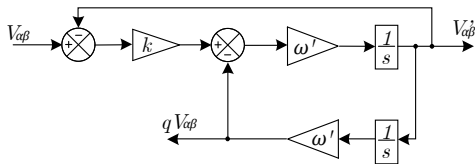


Figura 8: SOGI-QSG.

Então, os sinais filtrados gerados passam por um calculador de sequência positiva (PSC), o qual estende o método das componentes simétricas de Fortescue para o domínio $\alpha\beta$, como visto na Figura 9.

Por fim, o ângulo de sincronização com a rede é obtido a partir de um laço PLL de eixo de referência síncrona (SRF-PLL), a tensão em quadratura v_q passa por um controlador PI que tem o objetivo de torná-la nula. Assim, a projeção do vetor tensão sobre o eixo d coincide com o seu módulo quando $v_q = 0$, e a posição angular (θ) calculada na saída do SRF-PLL corresponde ao ângulo de fase do vetor de tensão da rede.

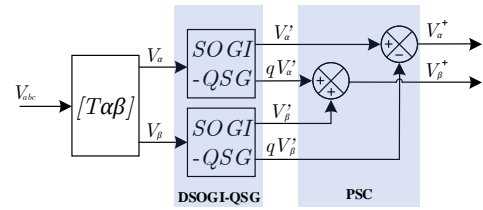


Figura 9: SOGI-QSG e PSC.

O SRF-PLL torna este método de sincronização adaptativo a variações de frequência na rede, já que este fornece a frequência de ressonância ω' por retroação aos SOGI-QSG [14]. O sistema completo de sincronização (DSOGI-PLL) pode ser visto na Figura 10. Onde, os parâmetros para o controlador PI foram escolhidos de acordo com [7].

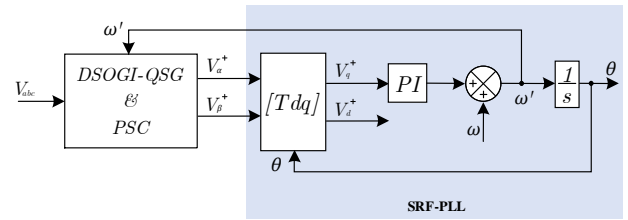


Figura 10: DSOGI-PLL.

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O sistema completo foi implementado no *software* MATLAB/Simulink, onde foram realizados testes referentes a partida do sistema, com a etapa de pré-carga da capacitância do barramento CC, seguida da partida do sistema de controle. Em seguida, são testados casos de perturbação da rede de alimentação. Os parâmetros principais do circuito simulado estão expostos na Tabela II a seguir.

Tabela II: Parâmetros físicos do sistema simulado

Filtros de entrada	4, 7 mH; 0, 5Ω
apacitância do barramento CC	880 μF
Tensão de entrada	380 V _{ff} ; 30°; 60 Hz
Carga	100 Ω
Tensão nominal do barramento CC	800 V
Potência nominal de saída	6, 4 kW
Freq. de comutação	20 kHz

Primeiramente, o sistema está conectado a rede de alimentação com valor nominal de tensão de entrada, balanceada e em sequência direta. Inicialmente, o sistema de pré-carga eleva a tensão do barramento até aproximadamente a tensão de pico de linha, cerca de 530 V. Em 0,1 s o sistema de pré-carga é desligado e em 0,15 s o sistema de controle é iniciado, impondo uma rampa de referência de tensão, que elevará a tensão do barramento CC até 800 V. Posteriormente, em 0,4 s a carga nominal é conectada. Este comportamento pode ser visto na Fig. 11.

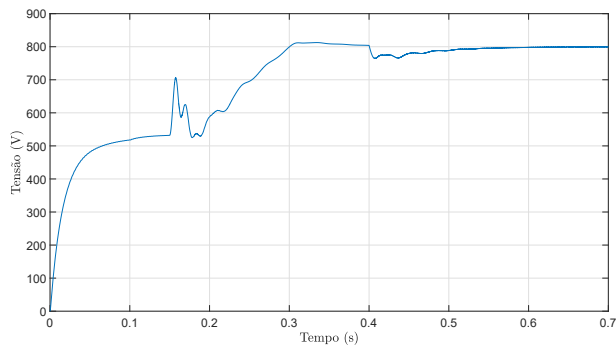


Figura 11: Tensão do barramento CC durante a partida do sistema

Novamente na Fig. 11, nota-se entre 0,15 s e 0,4 s quando o sistema de controle é partido surge um pico de 705,8 V, ocasionado pelo rápido crescimento do erro do controlador PI da malha de tensão, por fim, nota-se um sobressinal máximo de 12,3 V quando a tensão chega ao seu valor nominal. A partir do instante 0,4 s, a carga nominal é conectada, gerando um afundamento de 35,3 V que não é refletido para a rede de alimentação.

A seguir, têm-se as correntes de fase de entrada durante a partida, expostas na Fig. 12. Entre os instantes de 0 s e 0,1 s ocorre a pré-carga do barramento, onde a corrente apresenta um comportamento exponencial decrescente pulsado como esperado. Já no instante 0,15 s, nota-se o fenômeno de *Startup Inrush Current*, devido a rápida elevação do erro inicial do controlador PI da malha de tensão, ocasionando um pico de 53,05 A. Embora este pico de corrente seja em média 4 vezes a corrente de pico nominal, o seu período de ocorrência é pequeno, assim, não acionando as proteções da rede de distribuição.

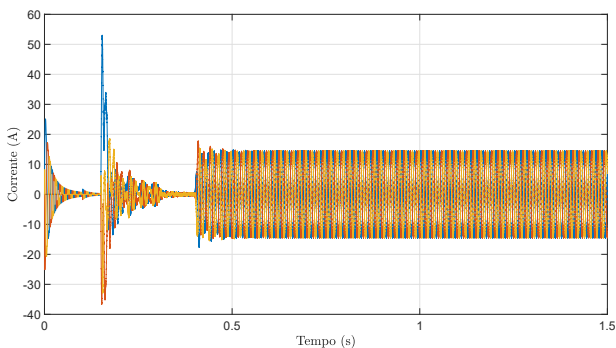


Figura 12: Correntes de fase de entrada durante a partida do sistema

Variações de tensão estão constantemente presentes na região rural da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, desta forma, realiza-se dois testes, o primeiro com a inserção de um degrau equilibrado nas tensões de entrada e o segundo utilizando um afundamento desequilibrado.

Inicialmente, inseriu-se um degrau na tensão de entrada

de 0,3 p.u entre 0,7 s e 1,1 s. O degrau eleva a tensão da rede de 311 V_p para aproximadamente 404 V_p de tensão de pico, como a potência de saída permanece constante, a malha de controle de corrente deve regular a amplitude da corrente de entrada para que o retificador consiga suprir a potência nominal, mesmo com a variação de 30% na tensão de entrada. A inserção deste degrau causa um aumento na tensão de entrada, desta forma a corrente de entrada deve decrescer, no instante $t = 0,7$ s percebe-se uma rápida variação na corrente de entrada, vista na Fig. 13, que causa um pico de 33,18 A, mostrando que o sistema de controle está tentando convergir para um novo valor de corrente, no instante $t = 1,1$ s nota-se o comportamento inverso. Imediatamente, nota-se que a

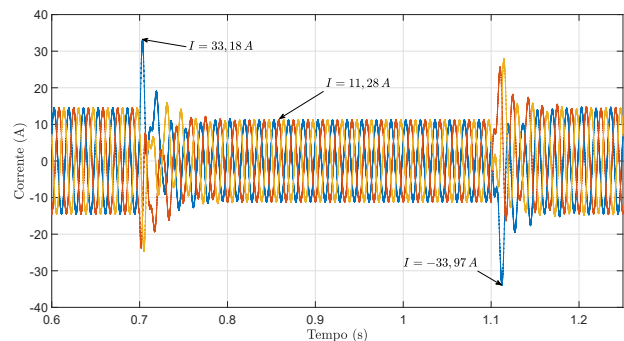


Figura 13: Correntes de fase de entrada com degrau na tensão de entrada

rápida variação nas correntes de entrada é refletida para a tensão do barramento CC. Na Fig. 14, nota-se um pico de 72 V, em $t = 0,7$ s. Ao retirar o degrau, o comportamento inverso ocorre, isto demonstra que a malha de controle de tensão atua rapidamente para retornar a tensão do barramento ao seu valor nominal e assim entregar a potência desejada à carga.

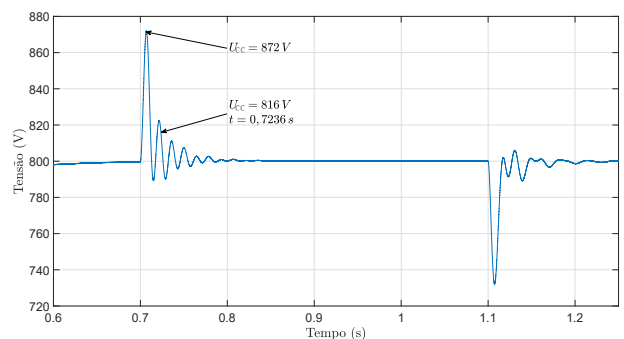


Figura 14: Tensão do barramento CC com degrau na tensão de entrada

Por fim, insere-se um degrau de -0,3 p.u nas fases B e C da tensão da rede, assim reduzindo o seu pico de aproximadamente 311 V para 217,7 V. Na Fig. 15a, nota-se que as correntes de entrada se tornam desequilibradas também, após um pico inicial de 33,27 A apenas a fase A das correntes

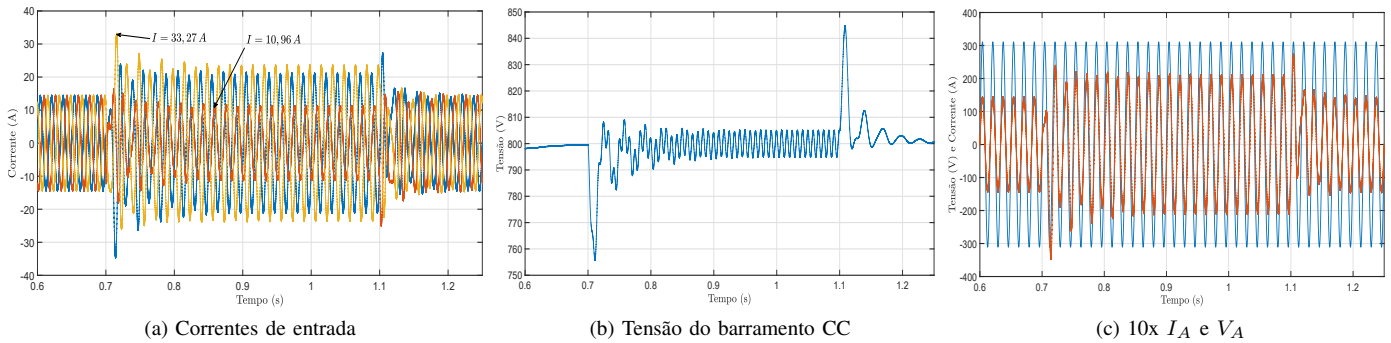


Figura 15: Afundamento desequilibrado de tensão

permanece em um valor próximo ao nominal. A Fig. 15b, demonstra que após o afundamento inicial de aproximadamente 44 V a tensão do barramento é pouco afetada, retornando rapidamente ao valor médio de 800 V com uma ondulação de 10 V pico à pico durante a permanência do afundamento de tensão. Por fim, a Fig. 15c, demonstra que o fator de potência é controlado e permanece próximo a unidade, já que mesmo distorcida a tensão e a corrente de entrada permanecem em fase.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho buscou apresentar a modelagem matemática de um retificador PWM, assim como um procedimento de projeto do sistema de controle e sincronização. Dentre as diversas topologias existentes para o acionamento de máquinas elétricas, escolheu-se o retificador PWM devido a sua simplicidade, fator de potência próximo ao unitário de entrada, baixa distorção harmônica das correntes e fornecimento de tensão CC de saída com baixa ondulação.

Os resultados de simulação obtidos demonstram o desempenho adequado do sistema. Durante a partida a tensão do barramento CC segue a rampa imposta pelo sistema de controle e converge para o seu valor nominal mesmo após a conexão de cargas, contornando também o aparecimento da *Startup Inrush Current*. Também nota-se o desempenho adequado do sistema frente a uma variação equilibrada nas tensões de entrada, um dos fenômenos mais proeminentes nas redes rurais da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. Por outro lado, este sistema apresenta distorção nas correntes de entrada quando exposto a afundamentos de tensão desequilibrados, sendo estes fenômenos detectados com menor frequência, entretanto, ainda mantém o fator de potência aproximadamente unitário em sua entrada.

REFERÊNCIAS

- [1] CNA; CEPEA. PIB do agronegócio: Brasil, 2019.
- [2] CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, 2019.
- [3] José W. M. Kaehler, D. B. Ramos, M. P. V. Poltozi, and R. L. Kuhn. Impacto da eficiência energética em sistemas de bombeamento de água utilizados para irrigação das lavouras de arroz do rio grande do sul: Uma abordagem demanda x oferta de energia. In *Proceedings of the 8th international Conference EEMODS' 2013 Energy Efficiency in Motor Driven Systems*, 2013.
- [4] Math H. J. Bollen. *Understanding power quality problems : Voltage Sags and Interruptions*. IEEE PRESS SERIES ON POWER ENGINEERING. JOHN WILEY & SONS, INC., IEEE PRESS, 2000.
- [5] M. P. Kazmierkowski, L. G. Franquelo, J. Rodríguez, M.A. Perez, and J. Leon. High-performance motor drives. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 5:21, 2011.
- [6] Deivis Borgonovo. *Análise, Modelagem e Controle de Retificadores PWM Trifásicos*. Doutorado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [7] José M. G. Neto. Técnicas de controle para retificadores trifásicos operando sob condições de faltas na rede elétrica. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, 2015.
- [8] Matheos C. Wermuth. *DESENVOLVIMENTO DE UM RETIFICADOR PWM PARA SISTEMAS DE ACIONAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO NA IRRIGAÇÃO DE LAVOURAS DE ARROZ*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2020.
- [9] Robinson Figueiredo De Camargo. *Método de sincronização aplicado a conversores pwm trifásicos*. Doutorado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- [10] D. Borgonovo. Modelagem e controle de retificadores pwm trifásicos empregando a transformação de park. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [11] B. Ogunaik and W. H. Ray. *Process Dynamics, Modeling, and Control*. Oxford University Press, 1994.
- [12] W. R. Evans. Control system synthesis by root locus method. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 69(1):66-69, 1950.
- [13] Q. Bo, H. Y. Xiao, and L. Z. Yu. A study of startup inrush current of three-phase voltage source pwm rectifier with pi controller. *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, 4(6), 2009.
- [14] P. Rodriguez, R. Teodorescu, I. Candela, A.v. Timbus, M. Liserre, and F. Blaabjerg. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In *Power Electronics Specialists Conference*, 2006.