

Comparação de Desempenho de Controladores de Potência Sem Fio para Aerogeradores de Indução Conectados em Redes Inteligentes

Jaqueline Gomes Cardoso
CECS
Federal University of ABC,
UFABC
Santo André, Brazil
jaqueline.gcardoso@hotmail.com

Alfeu J. Sguarezi Filho
CECS
Federal University of ABC,
UFABC
Santo André, Brazil
alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br

André L. L. F. Murari
CECS
Federal University of ABC,
UFABC
Santo André, Brazil
andre.murari@ufabc.edu.br

Ivan Roberto Santana
Casella
CECS
Federal University of ABC,
UFABC
Santo André, Brazil
ivan.casella@ufabc.edu.br

Carlos Eduardo Capovilla
CECS
Federal University of ABC,
UFABC
Santo André, Brazil
carlos.capovilla@ufabc.edu.br

Resumo — Nos últimos anos, as plantas eólicas passaram por mudanças devido às novas tecnologias desenvolvidas para as *Smart Grids* (SG). As novas turbinas eólicas devem ser capazes de se comunicar e compartilhar dados e medidas. Nesse contexto, sistemas de conversão de energia eólica estão utilizando arquiteturas de comunicação mais desenvolvidas para fazendas eólicas inteligentes. Este estudo propõe o uso de um sistema de comunicação sem fio robusto para o controle de um gerador de indução gaiola de esquilo (GIGE) conectado à rede elétrica. O sistema de comunicação sem fio é usado para enviar as potências de referência para o controlador do GIGE com confiabilidade necessária para garantir a qualidade da energia fornecida pelo aerogerador. O desempenho do sistema é avaliado através de diversos testes e simulações.

Palavras-Chave — Conversores Eletrônicos de Potência, Energia Eólica, Gerador de Indução Gaiola de Esquilo, Smart Grid, Comunicação Sem Fio

I. INTRODUÇÃO

As Smart Grids (SG) podem ser consideradas como uma evolução do modelo energético atual. Elas são fundamentalmente compostas por uma infraestrutura moderna de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia que utilizam novas tecnologias de informação e comunicação para monitoramento e controle da rede energética de modo a obter um aumento significativo da eficiência, confiabilidade e segurança do fornecimento e uso de energia elétrica [1,2].

As SGs seguem a evolução do setor energético incorporando uma maior participação de fontes de energia renováveis. Dentre essas fontes de energia, a eólica se destaca como uma fonte de energia limpa que não emite gases de efeito estufa. No Brasil, encontra-se em operação fazendas eólicas de grande escala e outras estão em fase de construção. A energia eólica é atualmente uma das fontes de energia renovável com maior taxa de crescimento no país [3,4,5].

Os tipos de geradores mais utilizados em sistemas eólicos são os geradores síncronos (GS), geradores de dupla

alimentação (GIDA) e geradores de indução gaiola de esquilo (GIGE). Os GIGEs apresentam características bastante interessantes como baixo custo, tamanho reduzido, instalação simples, robustez e fácil manutenção. Em fazendas eólicas, eles são utilizados desde suas primeiras aplicações e, apesar de tradicionalmente atuarem com velocidade fixa, há atualmente um grande interesse científico de se estudar novas arquiteturas para possibilitar seu uso em velocidade variável [6,7,8].

Nos novos sistemas eólicos inteligentes, os geradores eólicos devem ser capazes de se comunicar e compartilhar dados e medidas para maximizar a disponibilidade de serviço e tempo de vida útil dos equipamentos. Para tal objetivo, os sistemas de comunicação sem fio aparecem como uma excelente opção em função de sua flexibilidade em operar tanto como sistemas principais como secundários, facilidade de instalação e manutenção, custos operacionais e área de cobertura, quando comparados aos sistemas tradicionais de comunicações cabeados (e.g. fibra óptica) [10,11].

Deste modo, torna-se necessário o uso de uma rede de comunicação confiável para garantir a correta supervisão e controle de todos os parâmetros de interesse do sistema. Este problema intrínseco pode ser contornado através do uso de técnicas de correção de erros direta (FEC – *Forward Error Correction*). A FEC é uma técnica de codificação de canal empregada nos modernos sistemas de comunicações sem fio, essencial para assegurar a integridade da informação, reduzindo significativamente a taxa de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) e a latência global do sistema pela adição de redundância aos dados transmitidos [12]. Entre as técnicas de FEC, a Codificação Convolutacional (CONV) se destaca como uma técnica bem estabelecida, que possui excelente compromisso entre complexidade e desempenho [13,14].

Nesse contexto, é proposta neste trabalho, a análise de desempenho de um GIGE conectado à rede elétrica através de um conversor bidirecional *Back-to-Back*, onde as referências de potência do sistema de controle são enviadas por meio de

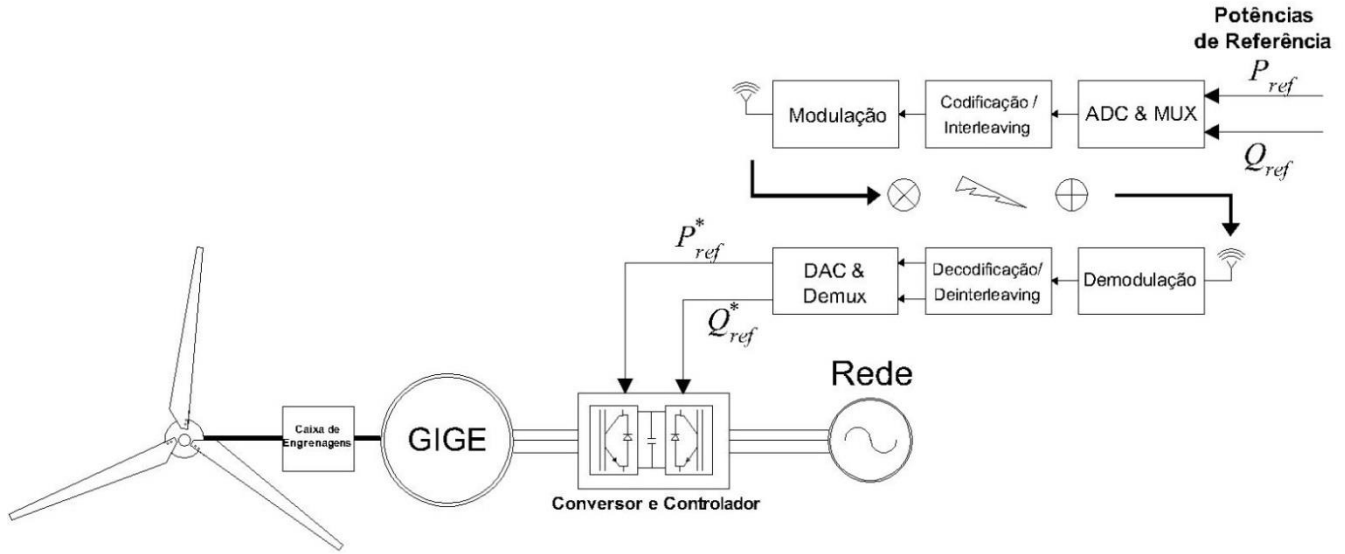


Fig. 1. Aerogerador com conversor eletrônico de potência e controle de potência sem fio.

um sistema de comunicação sem fio digital codificado, apresentado na Figura 1 [15,16]. Uma das contribuições deste trabalho é mostrar a viabilidade funcional do uso do controle sem fio para GIGE proposto, desde que sejam empregadas técnicas adequadas. Resultados de simulação são apresentados para validar a proposta apresentada.

II. MODELAGEM DO SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA

A. Modelo Dinâmico do Gerador Gaiola de Esquilo

O modelo do GIGE no referencial síncrono e a dinâmica da máquina são descritos a seguir:

$$\vec{v}_{dq1} = R_1 \vec{i}_{dq1} + p \vec{\lambda}_{dq1} + j \omega_1 \vec{\lambda}_{dq1} \quad (1)$$

$$R_2 \vec{i}_{dq2} + p \vec{\lambda}_{dq2} + j(\omega_1 - \omega_r) \vec{\lambda}_{dq2} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\lambda}_{dq1} = L_1 \vec{i}_{dq1} + L_m \vec{i}_{dq2} \quad (3)$$

$$\vec{\lambda}_{dq2} = L_2 \vec{i}_{dq2} + L_m \vec{i}_{dq1} \quad (4)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_m \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_r} \text{Im}(\vec{i}_{dq,1} \text{conj}\{\vec{\lambda}_{dq,2}\}) \quad (6)$$

Onde: os subíndices 1, 2 e m representam, respectivamente, estator, rotor e mútua, ω_1 é a velocidade síncrona, ω_r é a velocidade da máquina, R é a resistência dos enrolamentos por fase e L é a indutância dos enrolamentos, P é o número de pares de pólo da máquina, J é o momento de inércia, T_e é o torque eletromagnético e T_m é o torque mecânico.

B. Controle Direto de Torque

Para o controle do GIGE foi utilizada a estratégia de Controle Direto de Torque (CDT). Nesse método é feito um controle direto e independente do torque eletromagnético e do

fluxo do estator aplicando uma tensão vetorial nos terminais do estator, a qual dá uma rápida resposta de torque com fluxo constante. Essa técnica é conhecida por sua simplicidade, bom desempenho, rápida resposta e robustez [17,18].

O diagrama de blocos do CDT pode ser visto na Figura 2. As componentes dos vetores de tensão referenciados no estator são:

$$v_{d1}^* = \left(k_{pd} + \frac{k_d}{s}\right)(\lambda_1^* - \lambda_1) \quad (7)$$

$$v_{q1}^* = \left(k_{pq} + \frac{k_q}{s}\right)(T_e^* - T_e) + \omega_1 \lambda_1 \quad (8)$$

Onde: k_{pd} , k_d , k_{pq} e k_q são os ganhos do controlador PI (Proportional Integral), λ_1^* é a magnitude de fluxo de referência e T_e^* é o torque de referência.

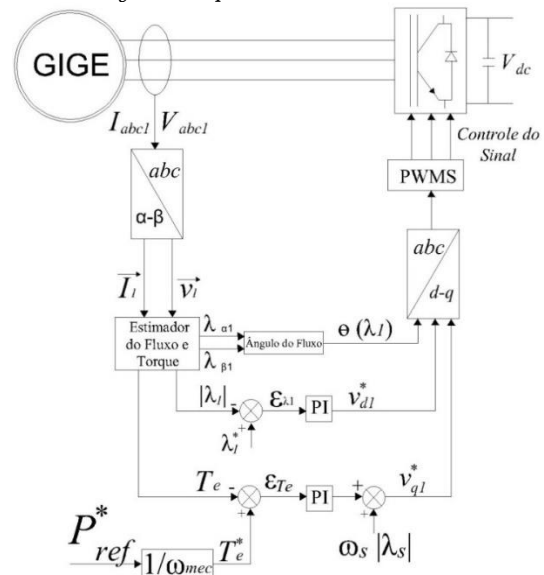


Figura 2. Diagrama do CDT.

C. Controle Orientado pela Tensão

O Conversor do lado da rede é responsável pelo controle do elo CC e do conversor conectado à rede. Neste trabalho, é utilizado o controlador orientado pela tensão (COT). No referencial síncrono, com emprego da posição do vetor de tensão da rede, os componentes tornam-se $v_{dg} = v_g$ e $v_{qg} = 0$ e as equações para a potência ativa e reativa injetada na rede podem ser descritas por (13) e (14) [19].

$$P_g = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg}) \quad (13)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (-v_{dg} i_{qg}) \quad (14)$$

Observa-se que a potência ativa e reativa estão relacionadas às correntes i_{dg} e i_{qg} , respectivamente. O diagrama de blocos do controle do conversor do lado da rede é mostrado na Figura 3. Para se realizar a sincronização de um conversor à rede elétrica foi utilizado um PLL (Phase Lock Loop).

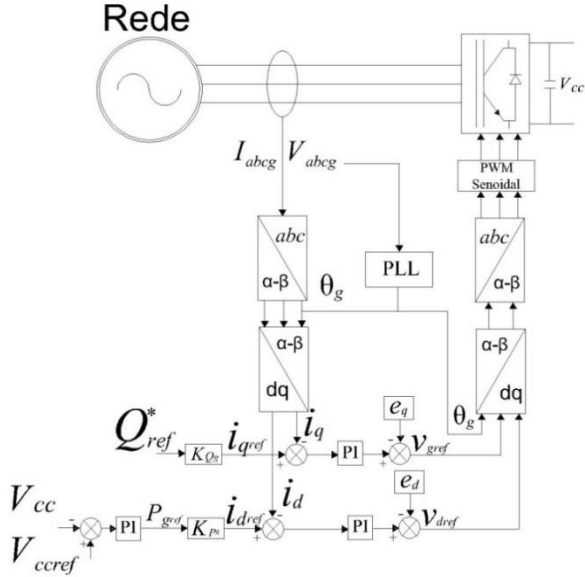


Figura 3. Diagrama do Controle do Conversor do Lado da Rede.

D. Sistema de Comunicação Sem Fio

O sistema de comunicação sem fio adotado é responsável pelo envio das informações das potências de referência do centro de controle ao aerogerador. Ele opera em 2,4 GHz a uma taxa de bit de 80 kbps e o diagrama do sistema é mostrado na Fig. 4.

A técnica de modulação QPSK é uma das mais utilizadas nos sistemas de comunicação sem fio modernos (e.g. redes celulares e redes locais sem fio). Esta técnica apresenta uma excelente eficiência de potência e de banda, necessitando a mesma relação E_b/N_0 (Relação entre Energia de Bit e Densidade Espectral de Potência de Ruído) para um dado BER e ocupando a mesma largura de faixa de frequência que seu equivalente binário, mas oferecendo o dobro da taxa de bits [21]. Da mesma forma, a técnica de CONV é amplamente utilizada em diferentes sistemas de comunicação sem fio (e.g.

redes celulares, redes locais sem fio, sistemas de comunicação espacial). Sua escolha se deve à excelente relação entre sua capacidade de correção de erros e sua complexidade de codificação e decodificação e latência, mesmo que eventualmente sejam necessárias retransmissões da informação para eliminação completa dos erros [12].

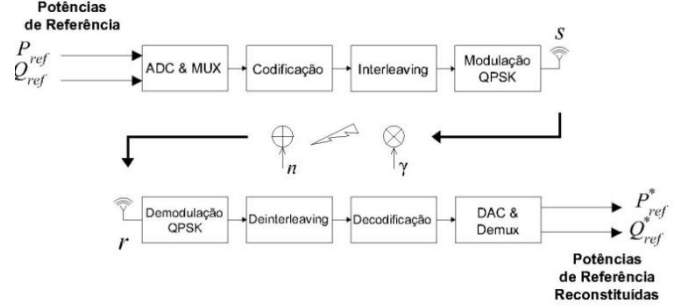


Figura 4. Diagrama do Sistema de Comunicação.

O canal considerado neste trabalho apresenta um desvanecimento plano em frequência do tipo Rayleigh com espalhamento Doppler e ruído Gaussiano aditivo branco (AWGN – Additive White Gaussian Noise).

O efeito deste tipo de desvanecimento pode ser modelado como uma sequência de variáveis aleatórias Gaussianas complexas de média zero e função de autocorrelação, decorrente da hipótese de dispersão isotrópica, dada por [21]:

$$R_h(\tau) = J_0(2\pi f_D T_s) \quad (19)$$

Onde: $J_0()$ é a função de Bessel de ordem zero, T_s é o tempo de símbolo e f_D é o espalhamento Doppler.

Dessa maneira, o sinal complexo em banda base recebido pelo receptor localizado no aerogerador pode ser representado por:

$$r = \gamma \cdot s + n \quad (20)$$

Onde: r é o sinal recebido, γ é o ganho complexo do canal, s é o símbolo transmitido, obtido após os processos de entrelaçamento, CONV e mapeamento QPSK e n é o AWGN.

III. TESTES E RESULTADOS

O desempenho do Sistema foi analisado através de um modelo computacional desenvolvido com a ferramenta SimuLink do software MatLab. Os parâmetros da máquina, utilizados nas análises apresentadas nesta seção, estão listados nas Tabelas II e III, localizadas no apêndice.

O sistema proposto foi testado sob as diferentes condições de variação de potência ativa (P_{ref}) e fator de potência (FP) apresentados na Tabela I.

TABLE I. POTÊNCIA ATIVA E FATOR DE POTÊNCIA

Tempo (s)	0	0,25	0,25	0,5	0,5	0,75	0,75
Potência Ativa (kW)	-3,7	-3,7	-3,7	-2,7	-2,7	-1,7	-1,7
Fator de Potência	0,9	0,9	-0,9	-0,9	1	1	0,9

A potência reativa de referência é uma função que depende da potência ativa e do fator de potência, descrita por $Q_{ref} = \frac{P_{ref}\sqrt{1-FP^2}}{FP}$. A velocidade do GIGE nos testes é variável, começando em 188 rad/s, em 3,5s é alterada para 160 rad/s e em 3,75s atinge 140 rad/s.

Com o intuito de determinar qual a configuração mais adequada do esquema de CONV para o sistema de controle sem fio proposto para o GIGE, foram realizadas algumas análises de desempenho, baseadas na BER em função de E_b/N_0 , considerando as seguintes configurações:

- Configuração 1: CONV com taxa de codificação 1/2, comprimento de restrição 5 e polinômios geradores [31 33]
- Configuração 2: CONV com taxa de codificação 1/2, comprimento de restrição 7 e polinômios geradores [171 133]
- Configuração 3: CONV com taxa de codificação 1/3, comprimento de restrição 7 e polinômios geradores [155 117 123]

Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 15. Na figura, é apresentado adicionalmente, como referência, o desempenho de um sistema sem codificação.

Como esperado, o desempenho do sistema sem codificação é o pior dentre todos os avaliados. O sistema empregando o esquema de CONV com a configuração 3 foi o que apresentou o melhor desempenho. Em função dos resultados obtidos, as análises apresentadas a seguir serão realizadas considerando uma E_b/N_0 de 12 dB para duas situações distintas: a primeira, usada como referência de desempenho, o sistema de controle utiliza modulação QPSK e CONV, e a segunda, o sistema de controle emprega outro esquema de modulação, o GMSK, para comparação de desempenho.

Primeiramente foi analisada a resposta do sistema de controle com modulação QPSK e CONV. A resposta de torque do GIGE para as variações especificadas para as referências de potência e para a velocidade da máquina é apresentada na Fig. 6. Na Fig. 7 é apresentada a resposta da potência reativa entregue pelo conversor conectado à rede elétrica. A Fig. 8 apresenta o controle da tensão do elo CC e a Fig. 9 apresenta as formas de onda da corrente e tensão injetadas na rede de acordo com a referência de potência reativa. Pode-se observar que não há distorções em nenhuma das respostas, apresentando um bom desempenho do sistema proposto para essas condições.

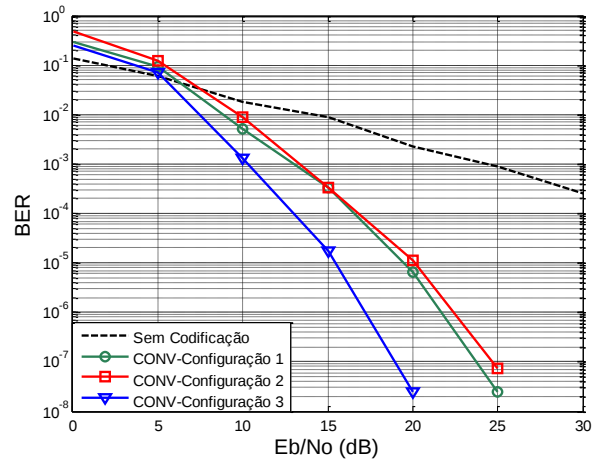


Figura 15. Comparação de Desempenho do Sistema de Controle Sem Fio para Diferentes Configurações.

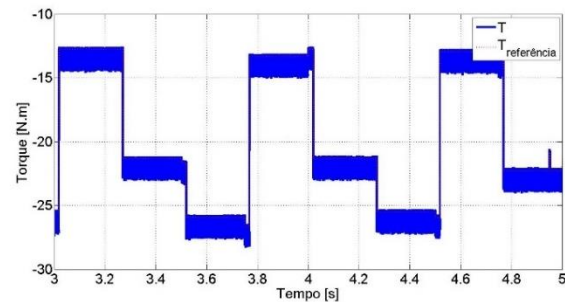


Figura 6. Resposta do Torque no GIGE – Modulação QPSK

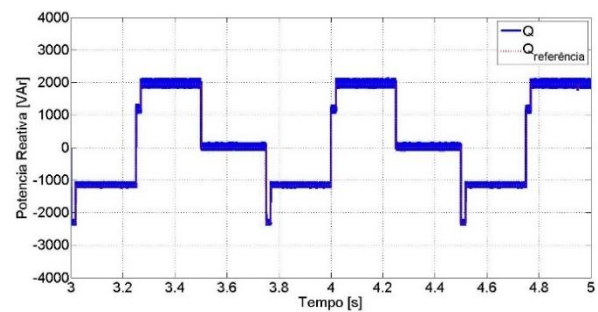


Figura 7. Potência Reativa Injetada na Rede Elétrica – Modulação QPSK

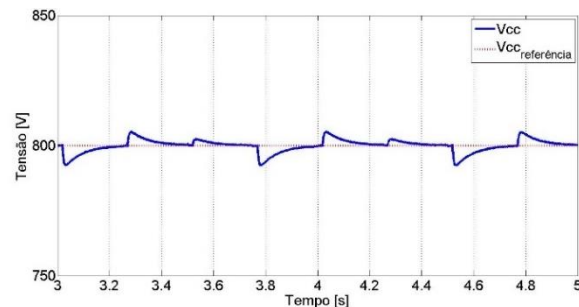


Figura 8. Tensão no Elo CC – Modulação QPSK

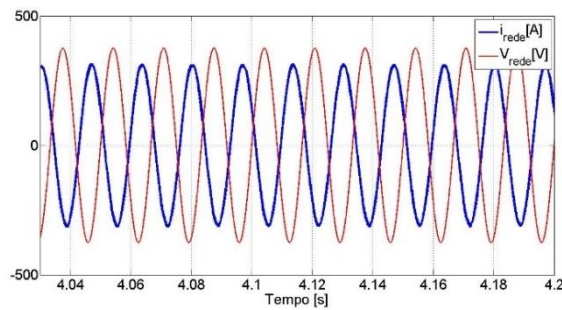


Figura 9. Tensão e Corrente de Fase da Rede Elétrica – Modulação QPSK

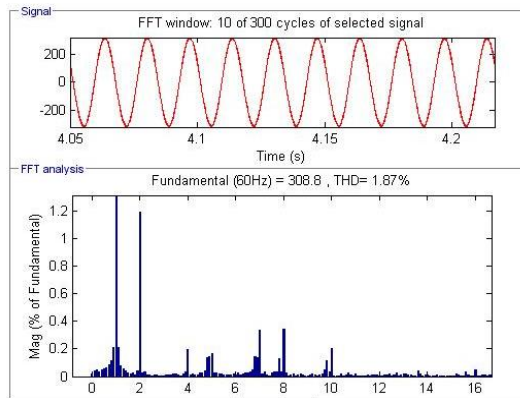


Figura 10. THD da Fase A da Corrente da Injetada na Rede Elétrica – Modulação QPSK

Por fim, a Fig. 10 apresenta a Distorção Harmônica Total (THD – Total Harmonic Distortion) obtida por meio da análise da Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transformer) do sinal de corrente de fase, realizada com auxílio da ferramenta Powergui do MATLAB. Pode-se verificar que o valor obtido de 9,75% é superior ao padrão estabelecido pelas normas ($THD \leq 5\%$) [19].

Os mesmos testes apresentados foram também realizados para o sistema de controle sem fio empregando modulação GMSK. Nas Fig. 11 e 12, são apresentadas as novas respostas de torque e potência reativa do sistema codificado. Pode-se verificar que existem instantes em que as referências não são seguidas corretamente devido aos erros causados pelo canal de comunicação, evidenciando a vulnerabilidade do sistema com a modulação GMSK. Note que esses erros podem causar danos às máquinas e comprometer a correta operação do sistema de conversão de energia eólica.

Na Fig. 13 é apresentado o controle da tensão do elo CC e na Fig. 14 são apresentadas as formas de onda da corrente e tensão injetadas na rede de acordo com a referência de potência reativa. Pode-se verificar que a corrente enviada à rede está distorcida devido aos erros causados pelo canal de comunicação que o sistema não consegue mitigar. Por fim, a THD da corrente do sinal de corrente de fase é apresentada na Fig.15. Pode-se verificar que a THD aumentou de 9,75% (Fig. 10) para 7,57%, não atendendo ao requisitos para conexão com a rede elétrica.

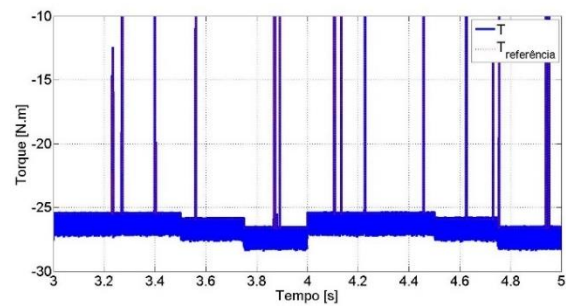


Figura 11. Resposta do Torque no GIGE – Modulação GMSK

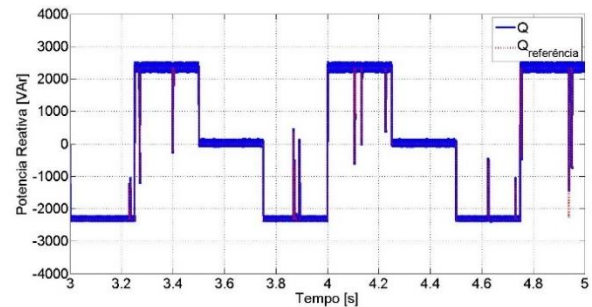


Figura 12. Potência Reativa Injetada na Rede Elétrica – Modulação GMSK

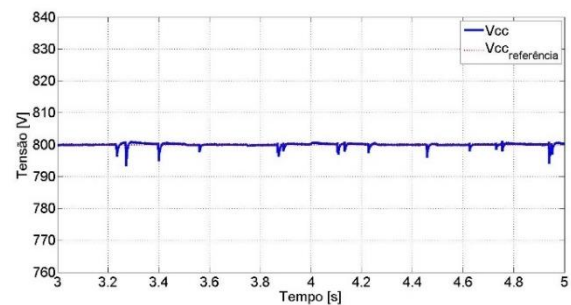


Figura 13. Tensão do Link CC – Modulação GMSK

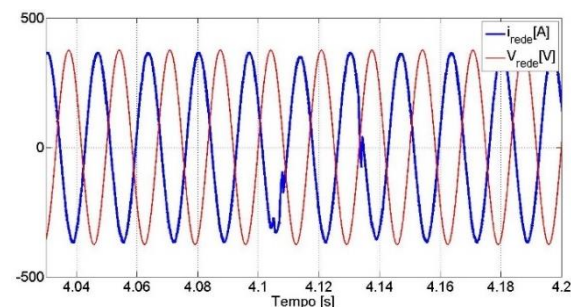


Figura 14. Tensão e Corrente de Fase da Rede Elétrica – Modulação GMSK

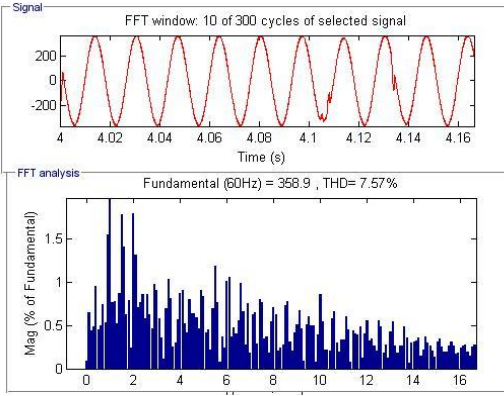


Figura 15. THD da Fase A da Corrente da Injetada na Rede Elétrica – Modulação GMSK

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma investigação sobre o envio de referências de potência com emprego de canal de comunicação sem fio para um GIGE que opera com velocidade variável. Foram comparados os resultados para um sistema com modulação QPSK e GMSK, ambos com codificação CONV. Com o uso da modulação QPSK, o sistema proposto apresentou ótimos resultados, garantindo a robustez do sistema proposto para um $E_b/N_0=12\text{dB}$. Para o sistema com modulação GMSK, observou-se que as referências de potências eram enviadas com erros, apresentando picos e mudanças abruptas.

Com esses resultados, pode-se concluir que para a utilização de comunicação sem fio para envio de referências de potências para um conversor eólico, vários parâmetros devem ser verificados, para que a energia entregue à rede elétrica atenda aos requisitos de qualidade e confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] Fang, X., Misra, S., Xue, G., Yang, D. Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials. Volume 14, pages 944-980. October 2012.
- [2] Hashmi, M., Hanninen, S., Maki, K. Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide. IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), pages 1-7. Medellin, 2011.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Energia Eólica - [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-energia_eolica(3).pdf).
- [4] Global Wind Report – Annual Market Update 2014. Global Wind Energy Council, 2015.
- [5] Cortés, D. J. F.; Salles, M. B. C. Voltage Sags and Short Circuit Analysis in Power Systems with High Wind Power Penetration based on Doubly Fed Induction Generator. IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, 2013.
- [6] Trapp, J.G.; Farret, F.A.; Fernandes, F.T.; Correa, L.C.; Wechenfelder, C.M., "Variable speed wind turbine using the squirrel cage induction generator with reduced converter power rating for stand-alone energy

- systems," Industry Applications (INDUSCON), 2012 10th IEEE/IAS International Conference on, vol., no., pp.1,8, 5-7 Nov. 2012.
- [7] Dusonchet, L.; Telaretti, E.. "Effects of electrical and mechanical parameters on the transient voltage stability of a fixed speed wind turbine," Elect. Power Syst. Res., vol. 81, no. 7, pp. 1308–1316, Jul. 2011.
- [8] Ahmed, M. A., Kim, Y. Machine-to-machine communication infrastructure for smart wind power farms. IEEE International Workshop on Intelligent Energy Systems (IWIES), pages 137-142 Novembro. Vienna, 2013.
- [9] Yarali, A; Rashman S. Wireless Communication for Smart Grids. The Second International Conference on Advanced Collaborative Networks, Systems and Applications (COLLA). Pages 1-9. June, 2012.
- [10] S. Lin and D. J. Costello, Error control coding. Prentice Hall, 2004.
- [11] J. Lin, T. Pande, I-H. Kim, A. Batra and B. L. Evans, "Robust Transceiver to Combat Periodic Impulsive Noise in Narrowband Powerline Communications", IEEE Int. Conf. on Communications, June 8-12, 2015, London, UK.
- [12] G. Sebaali and B. L. Evans, "Design Tradeoffs in Joint Powerline and Wireless Transmission for Smart Grid Communications", IEEE Int. Sym. on Power Line Communications and Its Applications, Mar. 29-Apr. 1, 2015, Austin, TX USA.
- [13] I. Casella, C. Capovilla, A. S. Filho, R. Jacomini, and J. L. Azcue-Puma, "An anfis power control for wind energy generation in smart grid scenario using wireless coded ofdm-16-qam," Journal of Control, Automation and Electrical Systems, vol. 25, pp. 22–31, 2014.
- [14] Buja G.S., Kazmierkowski M.P.: 'Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors – a survey', IEEE Trans. Power Electron., 2004, 51, (4), pp. 744– 757
- [15] Vas, P.: 'Sensor less vector and direct torque control'. (Oxford University Press, Inc., New York, 1998).
- [16] G. Abad, J. López, M. A. Rodríguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation Application. Wiley-IEEE Press, 2011.
- [17] Kjaer, S.B.; Pedersen, J.K.; Blaabjerg, F., "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.41, no.5, pp.1292,1306, Sept.-Oct. 2005.
- [18] T. S. Rappaport, Wireless communication: Principles and Practice, 2 ed., Prentice Hall, 2009.

APÊNDICE

TABLE II. PARÂMETROS DO GIGE

Parâmetro	Valor
Potência Nominal (P_N)	3,7 kVA
Tensão Nominal (V_N)	460 V
Resistência do Estator (R_1)	1,115 Ω
Resistência do Rotor (R_2)	1,083 Ω
Indutância Mútua (L_m)	203,7 Mh
Indutância do Rotor e Estator (L_1, L_2)	5,9 mH
Pares de Pólos (P)	2

TABLE III. PARÂMETROS DO CONVERSOR

Parâmetro	Valor
Indutância do Filtro (L_f)	30 mH
Capacitância do Barramento (V_{CC})	1250 μF
Frequência da rede (f)	60 Hz