

---

# CONTROLE DEADBEAT CODIFICADO SEM FIO DE POTÊNCIAS PARA AEROGERADORES DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADOS VISANDO APLICAÇÕES EM REDES INTELIGENTES

A. J. Sguarezi Filho\*  
sguarezi@dsce.fee.unicamp.br

C. E. Capovilla†  
carlos.capovilla@ufabc.edu.br

Ivan R. S. Casella†  
ivan.casella@ufabc.edu.br

E. Ruppert \*  
ruppert@fee.unicamp.br

\*Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação  
Universidade Estadual de Campinas  
UNICAMP - Brasil

†Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas  
Universidade Federal do ABC  
UFABC - Brasil

---

## ABSTRACT

### Wireless Coding Deadbeat Power Control for Doubly-Fed Induction Aerogenerators in Smart Grid Applications

Smart grids comprise advanced communication infrastructure to provide balance supply, demand, and storage of energy over a region in a much more efficient manner than it is done today. However, in a smart grid, the utilization of wireless technologies for transmitting control information requires a powerful error protection to avoid any serious problems to the energetic plant. With this focus, the work is concerned with a wireless coding deadbeat power control system for a variable speed wind doubly-fed induction generator for smart grid applications.

**KEYWORDS:** DFIG, deadbeat control, wind energy, power control, wireless, LDPC.

## RESUMO

As redes inteligentes utilizam uma avançada infraestrutura de telecomunicações para promover o gerenciamento de toda a geração, transmissão e armazenagem de energia sobre uma região de maneira muito mais eficiente do que é feito hoje em dia. Entretanto, nas redes inteligentes, a utilização de tecnologias de comunicação sem fio para a transmissão de sinais de monitoramento e controle requerem uma eficiente proteção contra erros na transmissão dos dados, evitando assim sérios problemas à planta energética. Com esse foco, o trabalho trata do projeto de um sistema de controle *deadbeat* codificado sem fio de potências para um gerador de indução duplamente alimentado voltado à geração eólica para aplicações em redes inteligentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** GIDA, controle *deadbeat*, energia eólica, controle de potências, sistemas sem fio, LDPC.

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de energias renováveis têm atraído o interesse e inúmeros esforços de diversos governos em oposi-

---

Artigo submetido em 14/04/2011 (Id.: 1320)  
Revisado em 02/07/2011, 08/09/2011, 21/11/2011  
Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Francisco de Assis dos Santos Neves

ção a outras fontes energéticas que aumentam a emissão de CO<sub>2</sub> ou causam enormes impactos ambientais. Tais redes renováveis transportam energia elétrica gerada por fontes eólicas, solares e das marés. Recentemente, o conceito de redes inteligentes vem sendo largamente aplicado a essas plantas energéticas para viabilizar e otimizar esse desafio (Blau, 2010).

Aliado a isso, os trabalhos realizados para a consolidação e implementação do conceito de redes inteligentes empregando sistemas eólicos tem despertado grande interesse da comunidade e tem sido o foco de diversos estudos científicos recentes (Glinkowski et al., 2011; Wang et al., 2011; Xiwen et al., 2010). As redes inteligentes são uma evolução das redes de energia elétrica atuais e se baseiam no uso mais eficiente da infra-estrutura de geração, transmissão e distribuição, de forma a gerenciar a relação entre oferta e demanda evitando contingências no sistema elétrico (Ilic, 2007) e para tal é necessário um conjunto com forte interação formado por redes de comunicação, gerência de dados e aplicações de monitoramento em tempo real (Li et al., 2010).

A aplicação de um sistema de telecomunicações moderno para controle e monitoramento dessas redes requer uma complexa infra-estrutura para um funcionamento eficiente (Strzelecki e Benysek, 2008), sendo que sua implantação e operabilidade apresentam vários aspectos não triviais em função de envolver diferentes áreas de conhecimento e diversos aspectos de projeto. Nesse sentido, a transmissão sem fio se apresenta como uma solução interessante por oferecer uma série de benefícios como baixo custo de implantação, facilidade de expansão, possibilidade do uso das tecnologias atualmente empregadas nos sistemas de telefonia móvel, flexibilidade de utilização e gerenciamento distribuído.

Entretanto, a transmissão sem fio está sujeita a distorções e erros causados pelo canal de radiopropagação que podem ocasionar sérios problemas aos equipamentos controlados ou monitorados e, conseqüentemente, à planta energética como um todo. Essa preocupação é diferente das que normalmente acometem os sistemas de telecomunicações, nos quais normalmente se o processo de detecção e correção de erros não for perfeito, se inicia um pedido de retransmissão (o qual gera atrasos) ou mesmo, em alguns casos, se ignora os erros remanescentes sem causar nenhum impacto mais significativo ao sistema.

Em contrapartida, uma das vantagens na utilização dos sistemas sem fio modernos é a possibilidade de melhorar a robustez do sistema através da utilização de técnicas de codificação e correção de erros direta (FEC - *Forward*

*Error Correction*) (Li, 2002). A codificação de FEC é uma técnica empregada em todos os sistemas sem fio atuais e essencial para garantir a integridade da informação, reduzindo significativamente a taxa de erros de *bit* (BER - *Bit Error Rate*) e o atraso do sistema através do acréscimo de redundância à informação transmitida (Proakis, 2001).

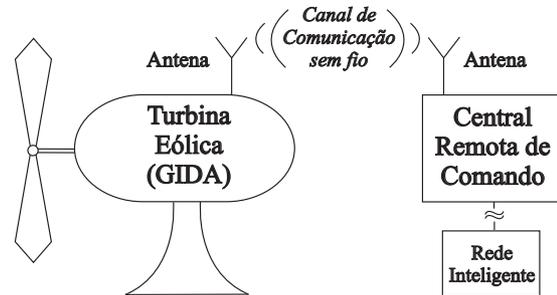


Figura 1: Diagrama do sistema de controle sem fio conectado a uma rede inteligente

Existem atualmente diversas técnicas diferentes de codificação de FEC sendo empregadas em sistemas comerciais sem fio como, por exemplo, a codificação *Reed Solomon* (RS) (Jiang e Narayanan, 2004), a Codificação Convolutiva (CONV) (Lin e Costello, 2004), a Codificação Turbo (TC - *Turbo Codification*) (Chen e Abedi, 2011) e mais recentemente a codificação *Low Density Parity Check* (LDPC) (Gallager, 1963; MacKay e Neal, 1996; Zhang et al., 2005; Dinoui et al., 2008). Dentre as técnicas citadas, a codificação LDPC é atualmente a técnica de estado da arte que apresenta o melhor desempenho, se aproximando dos limites estabelecidos pelo trabalho seminal de Shannon e apresentando um excelente compromisso entre complexidade de decodificação e desempenho (MacKay e Neal, 1996; Richardson et al., 2001). A codificação LDPC foi recentemente acrescentada ao padrão IEEE 802.16e, mais conhecido como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) para aplicações móveis (IEEE, 2004).

É importante ressaltar que existem alguns trabalhos na literatura científica referentes à aplicação da tecnologia sem fio no monitoramento de geradores eólicos baseados em redes de sensores (Adamowicz et al., 2010a; Adamowicz et al., 2010b), entretanto não existem estudos mais profundos relacionados a utilização da tecnologia sem fio para aplicações de controle nestes sistemas supracitados. Adicionalmente, nos trabalhos de Li et al. (2009), Anaya-Lara et al. (2006) e Wanzhi et al. (2009) são apresentados estudos e implementações de sistemas de comunicação sem fio para aplicações de controle e monitoramento em plantas eólicas referenciadas a uma central remota, demonstrando seu potencial de aplicabilidade em um futuro próximo.

Apesar destes trabalhos exemplificarem e evidenciarem as reais vantagens e funcionalidades oferecidas pelo uso dos canais de comunicação sem fio, nenhum deles propõe ou analisa técnicas que possam garantir a confiabilidade e segurança das informações de controle e monitoramento transmitidas quanto à robustez a erros de transmissão devido aos efeitos degradantes do canal de comunicação sem fio. Deste modo, esse trabalho pretende preencher uma lacuna na literatura ao demonstrar a viabilidade funcional do uso de sistemas sem fio para este tipo de aplicação desde que sejam empregadas técnicas de codificação adequadas.

No tocante aos geradores empregados em turbinas eólicas, o Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA) é amplamente empregado por apresentar algumas vantagens, em relação a outros geradores utilizados, como operação em velocidade variável e emprego de conversores que processam em torno de 30% da potência nominal do gerador (Simões e Farret, 2004; Datta e Rangathan, 2002). Neste tipo de gerador o controle das potências é realizado através de técnicas de controle por orientação de campo baseadas na posição espacial do vetor espacial tensão ou fluxo do estator, o que possibilita o desacoplamento das componentes do eixo direto e em quadratura, tornando possível o controle independente das potências ativa e reativa.

No trabalho de Tapia et al. (2003) foram realizadas algumas investigações para o controle das potências de um GIDA com a utilização de controladores do tipo *Proporcional-Integral* (PI), entretanto, esse tipo de controlador apresenta problemas relacionados ao projeto de seus ganhos devido às condições de operação do gerador. Nos trabalhos de Xin-fang et al. (2004), Morren e Haan (2005) e Guo et al. (2008) foram feitas investigações, respectivamente, quando empregado as técnicas de controle preditivo funcional e controle de modo interno. Apesar de ambos controladores apresentarem um desempenho satisfatório, eles são difíceis de serem implementados devido a suas formulações intrínsecas.

Nesse contexto, este trabalho apresenta um novo sistema de controle *deadbeat* codificado sem fio para um GIDA empregado na geração eólica para aplicações em redes inteligentes, conforme apresentado na Figura 1. O controlador *deadbeat* é baseado no modelo matemático dinâmico do gerador discretizado e possibilita o cálculo do vetor de tensão de rotor para que as referências das potências ativa e reativa sejam atendidas. O sistema de transmissão sem fio utiliza um esquema de codificação LDPC para melhorar a robustez do sistema de controle à ocorrência de erros no processo de transmissão sem fio e reduzir a latência do sistema. O desempenho do sis-

tema proposto é investigado para diferentes cenários de radiopropagação, possibilitando assim, um estudo mais profundo do impacto do uso da comunicação sem fio para a transmissão de sinais de referência em sistemas de potência. Ressaltamos que os erros gerados no processo de transmissão sem fio não podem ser eliminados facilmente sem o uso de técnicas avançadas de codificação de FEC.

Esse artigo é organizado em cinco seções. Além dessa introdutória, na próxima seção é apresentada a modelagem do controlador *deadbeat* utilizado na proposta, na seção três é apresentado o sistema de comunicação sem fio adotado, enquanto na seção quatro são apresentadas as respostas do sistema para duas estratégias diferentes de codificação. A seção cinco conclui o trabalho.

## 2 MODELAGEM E CONTROLE DE POTÊNCIA DO GIDA

Um GIDA no referencial síncrono pode ser representado (Novotny e Lipo, 1996) por:

$$\vec{v}_{1dq} = R_1 \vec{i}_{1dq} + \frac{d\vec{\lambda}_{1dq}}{dt} + j\omega_1 \vec{\lambda}_{1dq} \quad (1)$$

$$\vec{v}_{2dq} = R_2 \vec{i}_{2dq} + \frac{d\vec{\lambda}_{2dq}}{dt} + j(\omega_1 - B\omega_r) \vec{\lambda}_{2dq} \quad (2)$$

nas quais  $\vec{v}_{dq}$ ,  $\vec{i}_{dq}$ ,  $\vec{\lambda}_{dq}$  são, respectivamente, os vetores espaciais de tensão, corrente e fluxo no referencial síncrono  $dq$ ,  $R$  é a resistência do enrolamento,  $L$  é a indutância do enrolamento,  $B$  é o número de pares de polos,  $\omega_1$  é a velocidade síncrona,  $\omega_r$  é a velocidade de rotor e os subscritos 1 e 2 são, respectivamente, referências ao estator e ao rotor.

As potências ativa e reativa podem ser obtidas por:

$$P = \frac{3}{2} (v_{1d}i_{1d} + v_{1q}i_{1q}) \quad (3)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_{1q}i_{1d} - v_{1d}i_{1q}) \quad (4)$$

Utilizando a técnica de orientação pelo fluxo de estator, que desacopla as componentes  $d$  e  $q$ , as relações entre as correntes de estator e rotor se tornam:

$$i_{1d} = \frac{\lambda_1}{L_1} - \frac{L_M}{L_1} i_{2d} \quad (5)$$

e

$$i_{1q} = -\frac{L_M}{L_1} i_{2q} \quad (6)$$

nas quais  $v$  e  $i$  são, respectivamente, as amplitudes da tensão e corrente de sua respectiva componente,  $\lambda_1$  é a magnitude do vetor de fluxo de estator,  $|\vec{\lambda}_{1dq}| = \lambda_1$ , e  $L_M$  é a indutância mútua.

As potências ativa (3) e reativa (4) podem ser calculadas utilizando (5) e (6), sendo dadas por:

$$P = -\frac{3}{2}v_1 \frac{L_M}{L_1} i_{2q} \quad (7)$$

$$Q = \frac{3}{2}v_1 \left( \frac{\lambda_1}{L_1} - \frac{L_M}{L_1} i_{2d} \right) \quad (8)$$

nas quais  $|\vec{v}_{1dq}| = v_1$ .

As equações (7) e (8) mostram que o sistema pode prover controle das potências ativa e reativa de forma independente pela alteração da corrente de rotor. A proposta do controle de potências *deadbeat*, mostrada na Figura 2, considera justamente essa relação. Conseqüentemente, o controle das potências ativa e reativa de estator pode ser realizado por meio do controle da corrente de rotor do GIDA com o seu estator conectado diretamente a rede elétrica.

As equações discretizadas das correntes de rotor no referencial síncrono operando com um tempo de amostragem  $T$ , considerando a posição do fluxo de estator no instante  $(k+1)T$  e as equações (2), (5) e (6), podem ser representadas (Filho e Ruppert, 2010) por:

$$\begin{bmatrix} i_{2d}(k+1) \\ i_{2q}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_2 T}{\sigma L_2} & \frac{\omega_{sl} T}{\sigma} \\ \frac{-\omega_{sl} T}{\sigma} & 1 - \frac{R_2 T}{\sigma L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2d}(k) \\ i_{2q}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{\sigma L_2} & 0 \\ 0 & \frac{T}{\sigma L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{2d}(k) \\ v_{2q}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_{sl} L_M T}{\sigma L_2} \\ \frac{-\omega_{sl} L_M T}{\sigma L_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d}(k) \\ i_{1q}(k) \end{bmatrix} \quad (9)$$

nas quais  $\omega_{sl} = \omega_1 - B\omega_r$  é a frequência de escorregamento e  $\sigma = 1 - L_M^2/(L_1 L_2)$  é o fator de dispersão global.

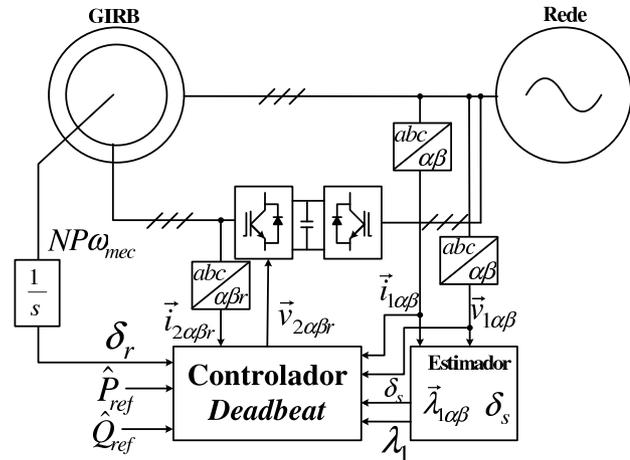


Figura 2: Esquemático do controlador de potências *Deadbeat*.

A tensão de rotor, que é calculada para garantir um erro de regime permanente nulo com o emprego da técnica de controle *deadbeat* (Franklin et al., 1994), é dada por:

$$v_{2d}(k) = \sigma L_2 \frac{i_{2d}(k+1) - i_{2d}(k)}{T} + R_2 i_{2d}(k) - L_2 \omega_{sl} i_{2q}(k) - L_M \omega_{sl} i_{1q}(k) \quad (10)$$

$$v_{2q}(k) = \sigma L_2 \frac{i_{2q}(k+1) - i_{2q}(k)}{T} + R_2 i_{2q}(k) + L_2 \omega_{sl} i_{2d}(k) + L_M \omega_{sl} i_{1d}(k) \quad (11)$$

Para o controle da potência ativa, a referência da corrente de rotor do eixo em quadratura  $i_{2q}$ , utilizando a equação (7), é dada por:

$$i_{2q}(k+1) = i_{2qref} = -\frac{2P_{ref}L_1}{3v_1L_M} \quad (12)$$

e para o controle da potência reativa, a referência da corrente de rotor do eixo direto  $i_{2d}$ , utilizando a equação (8), é dada por:

$$i_{2d}(k+1) = i_{2dref} = -\frac{2Q_{ref}L_1}{3v_1L_M} + \frac{\lambda_1}{L_M} \quad (13)$$

nas quais  $P_{ref}$  é a referência da potência ativa e  $Q_{ref}$  é a referência da potência reativa.

Assim, se as componentes  $d$  e  $q$  de tensão calculadas pelas equações (10) à (13) forem aplicadas ao rotor do gerador, então a convergência das potências ativa e reativa para seus respectivos valores de comando irão ocorrer em alguns intervalos de amostragem. A tensão de rotor desejada no referencial do rotor ( $\delta_s - \delta_r$ ) gera os sinais de chaveamento para conversor conectado ao rotor com emprego da modulação de vetores espaciais.

As correntes e tensões de estator, bem como as correntes e velocidade de rotor são medidas para a estimação da posição do fluxo de estator  $\delta_s$  e magnitude  $\lambda_1$ , frequência síncrona  $\omega_1$  e frequência de escorregamento  $\omega_{sl}$ .

## 2.1 Estimação do fluxo de estator

Para o controle *deadbeat*, como mostrado nas equações (10) e (11), é necessário calcular os valores das potências ativa e reativa, seus erros, a magnitude e posição do fluxo de estator, a velocidade de escorregamento e a frequência síncrona de operação.

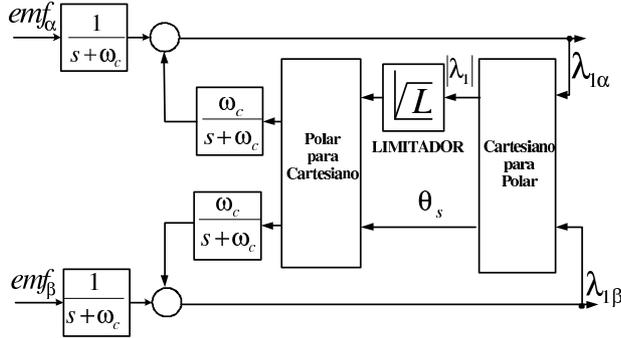


Figura 3: Diagrama de blocos para a implementação do estimador de fluxo do estator.

A estimação do fluxo de estator  $\vec{\lambda}_{1\alpha\beta}$  no referencial estacionário é dada por:

$$\vec{\lambda}_{1\alpha\beta} = \int \left( \vec{v}_{1\alpha\beta} - R_1 \vec{i}_{1\alpha\beta} \right) dt \quad (14)$$

Esta expressão pode ser implementada de forma a permitir a estimação do fluxo de estator, mesmo quando a máquina operar em baixas velocidades num sistema de controle direto de torque para motor de indução, como apresentado em Filho e Ruppert (2009).

Assim, posição do fluxo de estator utilizando a equação (14) é dada por:

$$\delta_s = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\lambda_{1\beta}}{\lambda_{1\alpha}} \right) \quad (15)$$

A estimação da velocidade síncrona  $\omega_1$  é dada por:

$$\omega_1 = \frac{d\delta_s}{dt} = \frac{(v_{1\beta} - R_1 i_{1\beta}) \lambda_{1\alpha} - (v_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha}) \lambda_{1\beta}}{(\lambda_{1\alpha})^2 + (\lambda_{1\beta})^2} \quad (16)$$

e a estimação da velocidade de escorregamento utilizando a velocidade do rotor e a velocidade síncrona é dada por:

$$\omega_{sl} = \omega_1 - B\omega_{mec} \quad (17)$$

enquanto a posição do rotor no referencial do rotor é dado por:

$$\delta_s - \delta_r = \int \omega_{sl} dt \quad (18)$$

Na Figura 3 é apresentado o diagrama de blocos da implementação desse estimador.

## 3 COMUNICAÇÃO SEM FIO

O sistema de comunicação proposto para o controle é apresentado na Figura 4 e utiliza um esquema de codificação para correção de erros LDPC (Gallager, 1963; MacKay e Neal, 1996; Lin e Costello, 2004), buscando um aprimoramento na confiabilidade e desempenho do sistema. Os códigos LDPC são códigos de bloco lineares  $(N_c, N_b)$  que possuem uma matriz de cheque de paridade  $\mathbf{H}$  que pode ser descrita através de um gráfico de Tanner (1981). Cada *bit* em uma palavra de código corresponde a um nó de variável e cada equação de cheque de paridade corresponde a um nó de cheque. Um nó de cheque  $j$  é conectado a um nó de variável  $k$  se o elemento  $h_{j,k}$  de  $\mathbf{H}$  for igual a 1 (Tanner, 1981; Lin e Costello, 2004).

O processo de codificação pode ser bastante complexo se o código não for adequadamente projetado, já que uma matriz esparsa  $\mathbf{H}$  normalmente corresponde a uma matriz de geração  $\mathbf{G}$  densa (Sripimanwat, 2010). Isto é particularmente verificado nos códigos LDPC sistemáticos irregulares, que são utilizados em aplicações que requerem altas taxas de código.

Os códigos eIRA (*extended Irregular Repeat Accumulate*) (Zhang et al., 2005; Dinoi et al., 2008) são uma subclasse especial dos códigos LDPC que melhoram o processo de codificação sistemática e geram bons códigos irregulares. Usualmente, os códigos LDPC baseados em acumuladores apresentam uma complexidade de codificação linear e baixas taxas de erro, mantendo uma complexidade de decodificação razoável (Brink e Kramer, 2003).

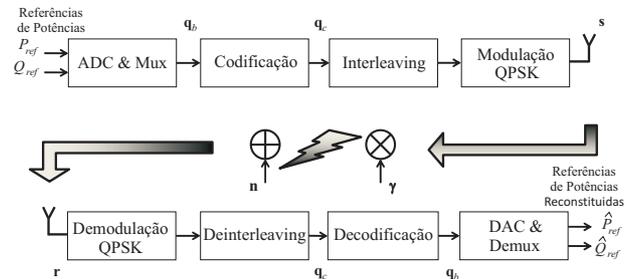


Figura 4: Diagrama do sistema de comunicação proposto. Note que  $\mathbf{n}$  possui efeito aditivo no canal sem fio, enquanto  $\gamma$  possui efeito multiplicativo.

A matriz de cheque de paridade dessa família de códigos pode ser representada por  $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1 \ \mathbf{H}_2]$ , na qual



e de cheque. A atualização dos nós pode ser feita atualizando, primeiramente, os nós de variáveis e, em seguida, os nós de cheque.

A troca de mensagens pode ser representada pela seguinte LLR (*Log-Likelihood Ratio*):

$$L_{c_k} = \log \left[ \frac{p(\mathbf{q}_c(k) = 0 | \mathbf{d})}{p(\mathbf{q}_c(k) = 1 | \mathbf{d})} \right] \quad (26)$$

A mensagem LLR do  $j$ -ésimo nó de cheque para o  $k$ -ésimo nó de variável é dada por:

$$L_{r_{j,k}} = 2 \operatorname{atanh} \left[ \prod_{k' \in V_{j \setminus k}} \tanh \left( \frac{L_{q_{k',j}}}{2} \right) \right] \quad (27)$$

O conjunto  $V_j$  contém todos os nós de variáveis conectados aos  $j$ -ésimo nó de cheque e o conjunto  $C_k$  contém todos os nós de cheque conectados ao  $k$ -ésimo nó de variável. O subconjunto  $V_{j \setminus k}$  é o conjunto  $V_j$  sem os  $k$ -ésimos membros, e o subconjunto  $C_{k \setminus j}$  é o conjunto  $V_j$  sem os  $j$ -ésimos membros.

A mensagem LLR do  $k$ -ésimo nó de variável para o  $j$ -ésimo nó de cheque pode ser representada por:

$$L_{q_{k,j}} = L_{c_k} + \sum_{j' \in C_{k \setminus j}} L_{r_{j',k}} \quad (28)$$

e a mensagem LLR para o  $k$ -ésimo bit de código é dada por:

$$L_{Q_k} = L_{c_k} + \sum_{j \in C_k} L_{r_{j,k}} \quad (29)$$

Ao final de cada iteração, a mensagem  $L_{Q_k}$  fornece uma estimativa atualizada da LLR *a posteriori* do bit de código transmitido  $\mathbf{q}_c(k)$ . Se  $L_{Q_k} > 0$ , então  $\mathbf{q}_c(k) = 1$ , caso contrário,  $\mathbf{q}_c(k) = 0$ .

## 4 DESEMPENHO DO SISTEMA PROPOSTO

Nas análises realizadas nessa seção foram utilizados os parâmetros do GIDA apresentados no Apêndice e um tempo de amostragem de  $0,5 \times 10^{-4}$  s para a estratégia de controle *deadbeat*. Durante o intervalo de tempo de 1,75 a 2,0 s, a velocidade do rotor foi aumentada de 151 rad/s para 226,5 rad/s no intuito de considerarmos também a variação na velocidade do vento durante as análises. As referências de potências utilizadas apresentam uma forma de onda em degrau, com variações da amplitude da potência ativa de -100 kW para -120 kW e da reativa de 60 kvar para 0 kvar em 1,25 s. No instante de tempo 1,5 s, as referências foram alteradas, respectivamente, de -120 kW para

-60 kW e de 0 kvar para -40 kvar. Novamente, no instante de tempo 1,75 s, as referências foram alteradas de -60 kW para -100 kW e de -40 kvar para -60 kvar.

As referências de potência são transmitidas ao sistema de controle do GIDA através do esquema de comunicação sem fio descrito na Figura 4. O sistema completo foi analisado para canais AWGN e para canais com desvanecimento plano em frequência variantes no tempo. O espalhamento *Doppler* empregado nas análises com canais com desvanecimento plano é de 180 Hz e a duração de *bit* é de  $1,25 \times 10^{-5}$  s. Cada quadro transmitido é composto por 32400 símbolos QPSK codificados e o esquema de codificação LDPC emprega o código eIRA (64800, 32400) apresentado em (ETSI, 2005). Adicionalmente, é utilizado um esquema de codificação CONV convencional empregando um polinômio gerador (171, 133) com comprimento de restrição de 7 (Lin e Costello, 2004) como referência de desempenho. Ambos os esquemas de codificação possuem taxa de código de 1/2 e um entrelaçador aleatório de comprimento 64800. Por simplicidade, o número de iterações no processo de decodificação LDPC é limitado em 25.

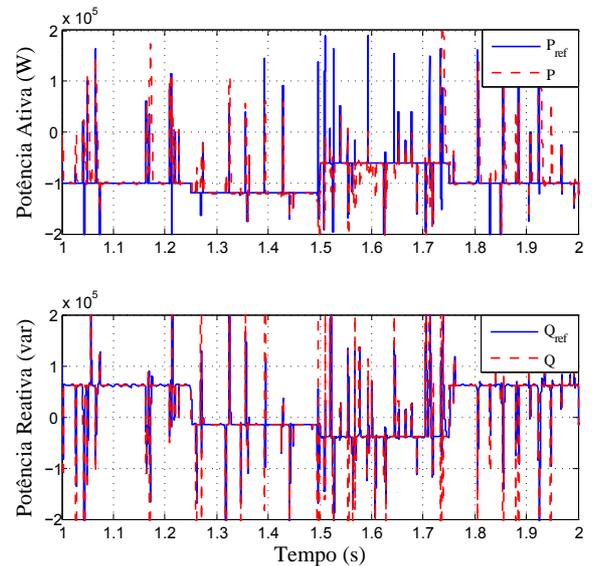


Figura 5: Respostas ao degrau das potências para o controle utilizando CONV em canais com desvanecimento plano.

Para os testes apresentados nas Figuras 5 à 10 foi utilizada uma relação  $E_b/N_0$  de 10 dB, que reflete uma condição usual de operação, e considerado um canal com desvanecimento plano em frequência. A modelagem do canal é baseada na equação (24), a qual incorpora o efeito da propagação por multipercursos e do ruído branco. As correntes de referência foram calculadas, a

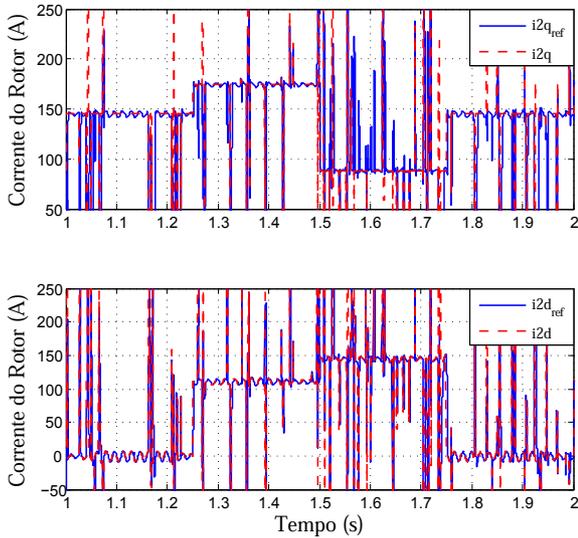


Figura 6: Respostas ao degrau das correntes de rotor no referencial síncrono para o controle utilizando CONV em canais com desvanecimento plano.

partir das referências reconstituídas das potências ativa e reativa, com auxílio das equações (12) e (13).

As Figuras 5 e 6 mostram a resposta do controlador sem fio utilizando CONV para os sinais de referência de potência ativa e reativa em degrau descritos no início da seção. Os picos apresentados na resposta do sistema são decorrentes dos erros ocorridos no processo de comunicação sem fio, devido aos efeitos destrutivos do canal no sinal transmitido, mesmo com a utilização de um esquema de correção de erros bastante eficiente.

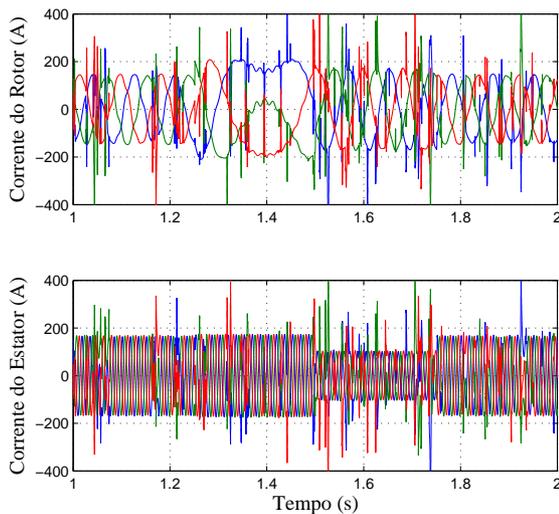


Figura 7: Correntes de estator e rotor para o controle utilizando CONV em canais com desvanecimento plano.

Pode-se observar que muitos desses picos presentes nos sinais de referência são seguidos pelo controlador e outros não, devido ao tempo de resposta do controlador não ser suficiente para atender a todas as rápidas variações das referências causadas pelo canal de radiopropagação. Esses erros na resposta do sistema podem danificar permanentemente o aerogerador, o sistema de geração eólica, ou mesmo, ocasionar uma perda da eficiência do sistema, pois a máquina passa a não gerar sua potência máxima naquele instante de tempo para a velocidade do vento que está acionando as pás do aerogerador. Os mesmos erros podem ainda, adicionalmente, gerar componentes harmônicas indesejáveis para a rede elétrica de alimentação.

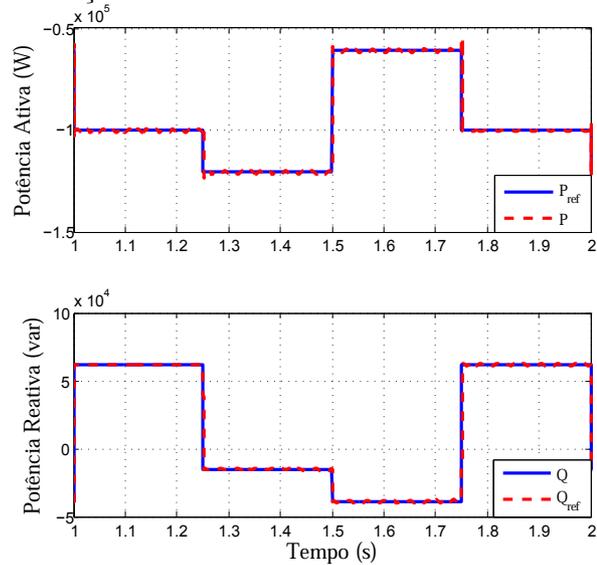


Figura 8: Respostas ao degrau das potências para o controle com codificação LDPC em canais com desvanecimento plano.

Os danos relacionados ao sistema de geração eólica podem ocorrer devido ao fato que altos valores de  $\frac{di}{dt}$  podem deteriorar por completo as chaves IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dos conversores de potência e podem causar curtos-circuitos nos enrolamentos do rotor e/ou estator do aerogerador, como pode-se verificar pelos sinais apresentados na Figura 7. Assim sendo, fica clara a necessidade de se utilizar um sistema de controle sem fio com capacidade de minimizar a ocorrência destes picos decorrentes dos erros causados pelo canal de radiopropagação.

Neste contexto é que se destaca a proposta de se utilizar um sistema de controle sem fio empregando um esquema de codificação mais robusto baseado na codificação LDPC. As Figuras 8 e 9 mostram a resposta do controlador sem fio empregando o esquema de codificação LDPC para os sinais de referência em degrau descritos no início dessa seção. Pode-se verificar o bom

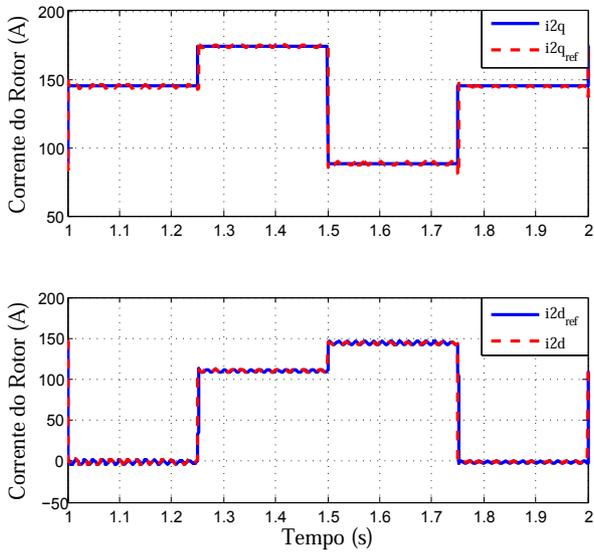


Figura 9: Respostas ao degrau das correntes de rotor no referencial síncrono para o controle com codificação LDPC em canais com desvanecimento plano.

desempenho do controlador notando que os sinais de referência de potência são seguidos adequadamente pelo controlador. Adicionalmente, pode-se observar nas Figuras 8, 9 e 10 que não há presença de picos causados por erros no sistema de transmissão sem fio.

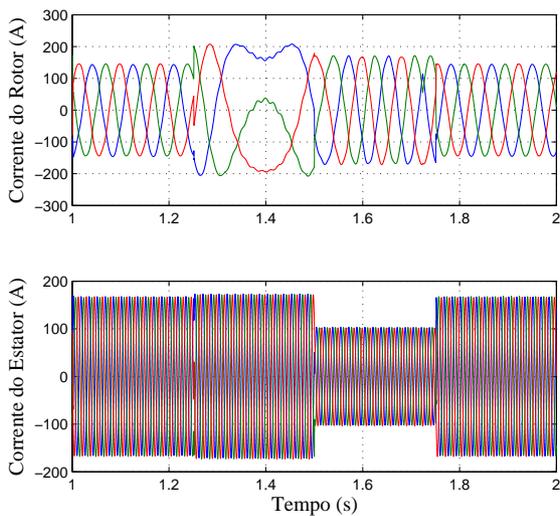


Figura 10: Correntes de estator e rotor para o controle com codificação LDPC em canais com desvanecimento plano.

Para completar a análise do sistema de controle sem fio proposto são apresentadas nas Figuras 11 e 12 comparações de desempenho entre sistemas utilizando CONV, utilizando LDPC e sem codificação, para diferentes valores de  $E_b/N_0$  e, respectivamente, para canais

AWGN e canais com desvanecimento plano em frequência. Para ambos os canais, pode-se verificar que o desempenho do esquema de codificação LDPC é significativamente superior ao obtido pelo esquema de referência utilizando CONV. Como mostrado na Figura 11, para o canal AWGN, o ganho em  $E_b/N_0$  para uma BER de  $10^{-5}$  é de aproximadamente 5,3 dB enquanto, como apresentado na Figura 12, para o canal com desvanecimento plano o ganho é de aproximadamente 26,8 dB.

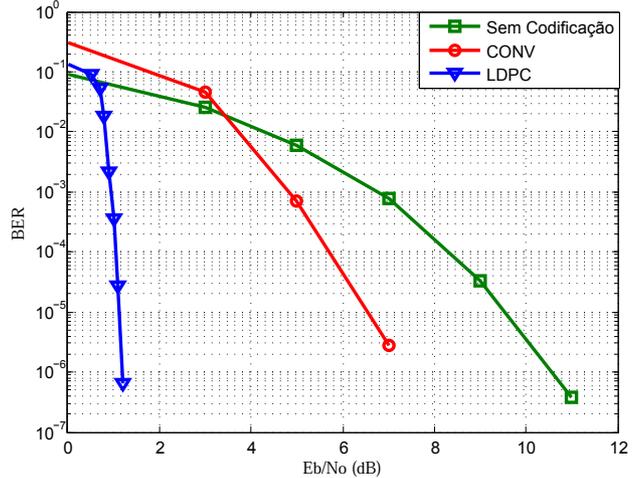


Figura 11: Comparação de desempenho em canais AWGN.

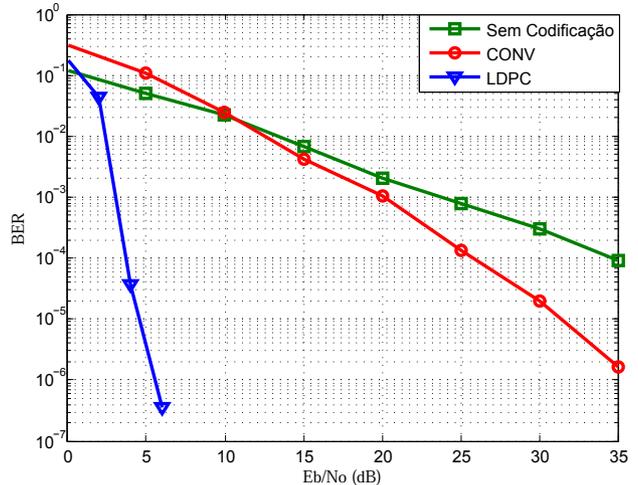


Figura 12: Comparação de desempenho em canais com desvanecimento plano (180 Hz).

As Tabelas 1 e 2 mostram o número e porcentagem das inversões de fase, correspondente aos sinais de referência  $P_{ref}$  e  $Q_{ref}$ , presentes no sinal reconstituído após o processo de decodificação para ambos os canais de propagação. Na Tabela 1, pode-se verificar que, para um canal AWGN, a codificação LDPC requer uma  $E_b/N_0$  muito menor do que a necessária para a CONV apresentar uma mesma ordem de inversões. A redução na

$E_b/N_0$  é ainda mais significativa para um canal com desvanecimento plano em frequência como mostrado na Tabela 2.

Tabela 1: Inversões nas referências reconstituídas (Canais AWGN)

Esquema de Codificação	BER	$E_b/N_0$ (dB)	Número de Inversões
CONV	$10^{-3}$	4,80	225 (0,12%)
CONV	$10^{-4}$	5,65	21 (0,01%)
CONV	$10^{-5}$	6,40	2 (0,001%)
LDPC	$10^{-3}$	0,98	204 (0,11%)
LDPC	$10^{-4}$	1,06	21 (0,01%)
LDPC	$10^{-5}$	1,13	2 (0,001%)

Tabela 2: Inversões nas referências reconstituídas (Canais com desvanecimento plano).

Esquema de Codificação	BER	$E_b/N_0$ (dB)	Número de Inversões
CONV	$10^{-3}$	20,0	167 (0,087%)
CONV	$10^{-4}$	25,5	21 (0,01%)
CONV	$10^{-5}$	31,5	4 (0,002%)
LDPC	$10^{-3}$	3,20	188 (0,098%)
LDPC	$10^{-4}$	3,80	26 (0,013%)
LDPC	$10^{-5}$	4,70	1 (0,0005%)

Para ambos os canais de propagação pode-se verificar que mesmo para uma BER relativamente baixa de  $10^{-5}$ , ocorrem mudanças nos sinais de referência das potências ativa e reativa que podem causar sérios problemas ao sistema de geração. Entretanto, o uso da codificação LDPC reduz notavelmente este número para valores típicos de  $E_b/N_0$  e melhora consideravelmente a robustez do sistema a variações do canal de propagação. Tomando como exemplo um sistema operando em canal variante no tempo com desvanecimento plano em frequência, valor típico de  $E_b/N_0$  de 10 dB e empregando um esquema de CONV, o mesmo irá falhar drasticamente, enquanto que um sistema empregando codificação LDPC irá operar livre de erros.

## 5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi proposto um sistema de controle *deadbeat* codificado sem fio para um gerador de indução duplamente alimentado voltado à geração eólica para aplicações em redes inteligentes. Uma implementação inicial utilizando um esquema de codificação convolucional convencional, com boa capacidade de correção de erros, mostrou que mesmo para taxas relativamente altas de relação sinal-ruído ( $E_b/N_0$ ), podem ocorrer alterações nas referências de potência suficientes para causar

danos permanentes ao aerogerador e, por consequência, acarretar distúrbios na planta energética.

Deste modo, se propôs neste trabalho, o uso de um esquema de controle sem fio empregando codificação LDPC para aumentar a robustez do sistema. Os resultados obtidos evidenciam a melhora significativa de desempenho do novo sistema, mesmo em condições severas de ruído e desvanecimento, reduzindo drasticamente ou mesmo eliminando a ocorrência de erros na resposta do sistema proposto quando se adota condições normais de operação.

## APÊNDICE

Parâmetros do gerador de indução duplamente alimentado:

$$R_1 = 24,75 \text{ m}\Omega; R_2 = 13,3 \text{ m}\Omega; L_M = 14,25 \text{ mH}; \\ L_{l1} = 284 \text{ }\mu\text{H}; L_{l2} = 284 \text{ }\mu\text{H}; J = 2,6 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2; B = 2; \\ P_N = 149,2 \text{ kVA}; V_N = 575 \text{ V}.$$

onde  $R$  - Resistência do enrolamento,  $L_M$  - Indutância do mútua,  $L_l$  - Indutância de dispersão,  $J$  - Momento de inércia,  $B$  - Número de pares de polos,  $P_N$  - Potência nominal,  $V_N$  - Tensão nominal. Os subscritos 1 e 2 são, respectivamente, referências ao estator e ao rotor da máquina.

## AGRADECIMENTOS

Esse trabalho contou com os apoios da FAPESP, CAPES e CNPq.

## REFERÊNCIAS

- Adamowicz, M., Strzelecki, R., Krzeminski, Z., Szweczyk, J. e Lademan, L. (2010a). Application of wireless communication to small WECS with induction generator, *IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference* pp. 944–948.
- Adamowicz, M., Strzelecki, R., Krzeminski, Z., Szweczyk, J. e Lademan, L. (2010b). Wireless short-range device for wind generators, *12th Biennial Baltic Electronics Conference* pp. 1736–3705.
- Anaya-Lara, O., Jenkins, N. e McDonald, J. R. (2006). Communications requirements and technology for wind farm operation and maintenance, *IEEE International Conference on Industrial and Information Systems* pp. 173–178.
- Barbieri, A., Piemontese, A. e Colavolpe, G. (2007). On the ARMA approximation for frequency-flat rayleigh fading channels, *IEEE International Symposium on Information Theory* pp. 1211–1215.

- Blau, J. (2010). Europe plans a north sea grid, *IEEE Spectrum* pp. 08–09.
- Brink, S. T. e Kramer, G. (2003). Design of repeat-accumulate codes for iterative detection and decoding, *IEEE Trans. Signal Process* **51**(11): 2764–2772.
- Chen, J. e Abedi, A. (2011). Distributed turbo coding and decoding for wireless sensor networks, *IEEE Communications Letters* **15**: 166–168.
- Datta, R. e Rangathan, V. T. (2002). Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine - A comparison with alternative schemes, *IEEE Trans. on Energy Conversion* **17**(3): 414–421.
- Dinoui, L., Sottile, F. e Benedetto, S. (2008). Design of versatile eIRA codes for parallel decoders, *IEEE Transactions on Communications* **56**(12): 2060–2070.
- ETSI (2005). DVB-S.2, *Standard Specification* pp. 302–307.
- Filho, A. J. S. e Ruppert, E. (2009). The complex controller for three-phase induction motor direct torque control, *SBA - Controle e automação* **20**(2): 256–262.
- Filho, A. J. S. e Ruppert, E. (2010). A deadbeat active and reactive power control for doubly-fed induction generators, *Electric Power Components and Systems* **38**(5): 592–602.
- Franklin, G. F., Powell, J. D. e Workman, M. (1994). *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Gallager, R. G. (1963). *Low-Density Parity-Check Codes*, Cambridge.
- Glinkowski, M., Hou, J. e Rackliffe, G. (2011). Advances in wind energy technologies in the context of smart grid, *Proceedings of the IEEE* **99**(6): 1083–1097.
- Guo, J., Cai, X. e Gong, Y. (2008). Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed induction generator, *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies* pp. 2620 – 2625.
- IEEE (2004). Standard for local and metropolitan area networks, part 16: Air interface for fixed and mobile wireless access systems, *IEEE Std. 802.16-2004*.
- Ilic, M. D. (2007). From hierarchical to open access electric power systems, *Proceedings of the IEEE* **95**(5): 1060–1084.
- Jiang, J. e Narayanan, K. R. (2004). Iterative soft decision decoding of Reed Solomon, *IEEE Communications Letters* **8**: 244–246.
- Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z. e Zhang, P. (2010). Smart transmission grid: Vision and frameworks, *IEEE Transactions on Smart Grid* **1**(2): 186–192.
- Li, T. J. (2002). *Low complexity capacity approaching schemes: Design, analysis, and applications*, Ph.D. dissertation, Texas AM Univ.
- Li, Z., Zheng, F., Wu, Y. e Gao, H. (2009). Offshore wind farm construction platform jack up control system, *World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference* pp. 24–26.
- Lin, S. e Costello, D. J. (2004). *Error control coding*, Prentice Hall.
- MacKay, D. J. C. e Neal, R. M. (1996). Near Shannon limit performance of low-density parity-check codes, *IET Electronics Letters* **32**: 1645–1646.
- Morren, J. e Haan, S. W. H. (2005). Rides through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **20**(2): 435–441.
- Novotny, D. W. e Lipo, T. A. (1996). *Vector Control and Dynamics of AC Drives*, Clarendon Press Oxford.
- Proakis, J. G. (2001). *Digital Communications*, McGraw-Hill.
- Richardson, T., Shokrollahi, A. e Urbanke, R. (2001). Design of capacity-approaching low-density parity-check codes, *IEEE Transactions on Information Theory* **47**: 619–637.
- Simões, M. G. e Farret, F. A. (2004). *Renewable Energy Systems with Induction Generators*, CRC Press.
- Sripimanwat, K. (2010). *Turbo Code Applications: A Journey from a Paper to Realization*, Springer.
- Strzelecki, R. e Benysek, G. (2008). *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks*, Springer-Verlag.
- Tanner, R. M. (1981). A recursive approach to low complexity codes, *IEEE Transactions on Information Theory* **27**(5): 533–547.

- Tapia, A., Tapia, G., Ostolaza, J. X. e Sáenz, J. R. (2003). Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator, *IEEE Trans. on Energy Conversion* (194-204).
- Wang, J., Du, X. e Zhang, X. (2011). Comparison of wind power generation interconnection technology standards, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* .
- Wanzhi, C., Zhiyong, T., Quangui, Z. e Liang, C. (2009). Research of wireless communication based on lonworks for wind turbine control system, *IEEE International Conference on Energy and Environment Technology* pp. 787–789.
- Xin-fang, Z., Da-ping, X. e Yi-bing, L. (2004). Predictive functional control of a doubly fed induction generator for variable speed wind turbines, *IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation* .
- Xiwen, W., Xiaoyan, Q., Jian, X. e Xingyuan, L. (2010). Reactive power optimization in smart grid with wind power generator, *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference* .
- Yedidia, J. S., Wang, Y. e Draper, S. C. (2011). Divide and conquer and difference-map BP decoders for LDPC codes, *IEEE Transactions on Information Theory* **57**(2): 786–802.
- Zhang, Y., Ryan, W. E. e Li, Y. (2005). Structured eIRA codes with low floors, *Proceedings of the International Symposium on Information Theory* pp. 174–178.