

# Controle de Tensão em Parques Eólicos: Abordagem via em Algoritmos de Consenso

Robson Cerqueira dos Santos\* e Bernardo Ordoñez\*

\* Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Universidade Federal da Bahia – UFBA  
(e-mail: rcerqueira84@gmail.com; [bordonez@ufba.br](mailto:bordonez@ufba.br)).

---

Abstract: This paper presents a voltage controller based on consensus algorithm. Controlling the voltage and reactive power is important for connecting the wind farm to the power system. The consensus strategy regulates de voltage in the Wind farm at appropriate levels and optimizes reactive power sharing using local measurements., while a consensus-based secondary control performs voltage correction with time varying consensus gain. A wind farm with 20 wind turbines was used to conduct case studies in order to verify the proposed coordinated voltage control scheme under nominal and fault conditions.

Resumo: Este artigo apresenta um controlador de tensão baseado em algoritmo de consenso. O controle da tensão e da potência reativa é de suma importância na conexão do parque eólico ao sistema de energia. Esse controlador tem como objetivo manter a tensão no parque em níveis adequados e otimizar o compartilhamento de potência reativa usando as informações locais e vizinhas. No esquema de controle de tensão proposto, o controle de tensão primária é feito por um controlador local *droop* de acordo com as medições locais, enquanto um controlador secundário baseado em consenso faz a correção de tensão com ganhos de consenso variantes no tempo. Um parque eólico com 20 turbinas eólicas com gerador de indução duplamente alimentado e conversor total de energia foi usado para conduzir estudos de caso para verificar o esquema de controle de tensão coordenado proposto em condições normais e de falta.

*Keywords:* Wind farm; voltage control; consensus algorithm; cooperative control.

*Palavras-chaves:* Parques eólicos; regulação de tensão; algoritmos de consenso; controle cooperativo.

---

## 1. INTRODUÇÃO

As fontes alternativas de energia têm ganhado cada vez mais espaço e importância no cenário mundial. A escassez e sobretudo os danos causados ao meio ambiente pelos combustíveis fósseis vêm motivando as pesquisas na direção de fontes de energia mais limpa e renováveis, como é o caso da energia eólica. De acordo com dados da Global Wind Energy Council, em 2020 a energia eólica global apresentou um crescimento de 53%, o que significa a instalação de mais 93 GW em comparação com o ano de 2019, chegando a uma capacidade instalada de cumulativa de 743 GW [1]. No Brasil segundo dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) a capacidade instalada de energia eólica é de 18 GW, o que representa 10,3% da matriz energética nacional [2].

A crescente inserção da energia eólica e o aumento dos parques eólicos vêm impactando na operação e planejamento do sistema de energia elétrica, principalmente no contexto da estabilidade da tensão [3]. Como energia intermitente produzida pelos grandes parques eólicos pode causar flutuação de tensão, é preciso que estes parques sejam dotados de sistemas de controle de tensão e potência reativa, a fim de atender aos requisitos técnicos de suporte de energia reativa e a faixa de operação da tensão no ponto de conexão (POC) especificados pelos operadores do sistema. A flutuação de tensão na rede pode causar um desarmamento em cascata dos geradores das turbinas eólicas, daí a necessidade de que as

tensões terminais das turbinas sejam mantidas dentro de uma faixa adequada de operação [4]. Desta forma, na operação dos parques eólicos utilizam-se dispositivos reguladores de potência reativa ou tensão, como por exemplo: compensadores estáticos de Var (SVCs) e o compensador síncrono estático (STATCOM). Além disso, com a evolução da eletrônica de potência e das técnicas de controle, as turbinas eólicas modernas são equipadas com conversores que possibilitam o controle da potência reativa e da tensão [5].

No contexto de controle, as abordagens centralizadas têm sido utilizadas. Em [6], o controle do parque eólico é feito por uma unidade central que controla a produção de energia ativa e reativa, a referência de potência reativa total necessária é calculada de acordo com a tensão no POC. Outra abordagem é a estratégia de controle de tensão baseada em otimização, com o problema de otimização resolvido pelo controlador central [4]. Em [7] foi projetado um sistema de controle automático hierárquico com três modos diferentes de controle: um regulador de tensão central com restrições de operação, outro controlador preventivo no qual a potência reativa é otimizada de forma garantir que a tensão do parque eólico satisfaça as restrições operacionais, e um último controlador corretivo projetado para corrigir as tensões terminais das turbinas. Em [8], propõe-se um controlador de tensão para um parque eólico usando o MPC, de forma a coordenar os dispositivos de compensação de potência reativa e regulação de tensão a fim de manter a tensão no parque eólico em níveis aceitáveis.

Embora as estratégias de controle centralizadas garantam o desempenho ideal, num contexto de parques eólicos, com elevado número de turbinas, existem dois aspectos fundamentais: rede de comunicação bastante complexa e desempenho altamente dependente da confiabilidade do sistema de comunicação e do controlador central [9]. Desta forma, é bastante natural que sejam exploradas técnicas de controle descentralizadas para o problema de controle de tensão dos parques eólicos. Em [14] é proposto um controlador de tensão e frequência secundário baseado no controle cooperativo distribuído de sistemas multiagentes. Em [15] propõe-se um novo esquema de controle secundário distribuído para tensão e frequência em microrredes autônomas, o controle de tensão secundária utiliza o protocolo de consenso com o objetivo prover convergência na regulação de tensão, a um baixo custo de comunicação. Ainda, são poucos os trabalhos que incluem o compartilhamento de potência reativa na tomada de decisão. Em [13] é proposta uma abordagem baseada em algoritmos de consenso que explora o problema do controle de tensão e o compartilhamento de potência reativa. **Neste artigo, avançamos no sentido deste estudo, e propomos uma nova sintonia variante no tempo sobre os parâmetros de ganhos que determinam a convergência do consenso sobre a regulação de tensão e compartilhamento de potência reativa. Desta forma, é possível melhorar o desempenho no reestabelecimento dos níveis de tensão com outro diferencial em que o controle droop está baseado diretamente na injeção de reativa.**

O artigo está organizado da seguinte forma. Na seção II apresenta-se uma breve explicação sobre o sistema do parque eólico. Na seção III, a estratégia de controle descentralizada baseada em consenso é proposta. Na seção IV apresentam-se os resultados de simulação e as discussões. E por fim, na seção V apresenta-se a conclusão e trabalhos futuros.

## 2. SISTEMA DO PARQUE EÓLICO

O parque eólico é composto por vinte turbinas eólicas de 1,5 MW equipadas com gerador de indução duplamente alimentado (DFIG) e compensador estático síncrono (STATCOM) de 20MVar, vide fig. (1). O estator do DFIG está diretamente ligado à rede, enquanto o rotor está conectado à rede através de conversores *back-to-back*, cuja potência está em torno de 30% da potência total do gerador. As turbinas são ligadas por três alimentadores de 33 KV e deistantes 1,5 KM da subseqüente. O STATCOM atua como suporte de energia reativa para o parque eólico e está posicionado do lado de média tensão do trafo principal, com o objetivo de fornecer suporte de energia reativa ao parque eólico.

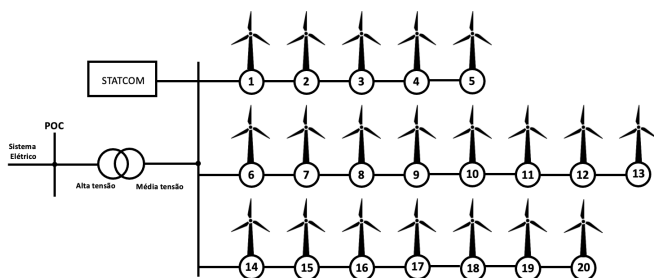


Fig. 1. Estrutura típica de um parque eólico.

Em relação ao problema de controle, tem-se que o STATCOM e as turbinas eólicas devem ser controlados cooperativamente. O primeiro objetivo é atingir o perfil de tensão exigido no parque eólico, em que as tensões no ponto de conexão (POC) e nos terminais das turbinas devem ser controladas entorno da tensão de referência  $V_{ref}$ .

Outro ponto a ser destacado, seguindo critérios do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), é o barramento coletor dos aerogeradores deve ser ajustável entre 95% e 105% da tensão nominal, para evitar ser disparado pela configuração de proteção (geralmente 0,95 - 1,05 p.u.). Para o POC, a tensão deve ser controlada entre 0,90 - 1,10 p.u.). As fontes de energia reativa, turbinas eólicas ou STATCOM são tratadas igualmente com a mesma razão de utilização de energia reativa  $\varepsilon$ , com  $\varepsilon_i = Q_i/\bar{Q}_i, \forall i \in \Gamma$ , em que  $Q_i$  e  $\bar{Q}_i$  são respectivamente as potências reativas geradas e disponíveis por cada unidade  $i$ . A potência reativa disponível da  $i$ -ésima turbina eólica é calculada com base na potência aparente nominal do gerador para cada turbina eólica, como segue:  $\bar{Q}_w = \sqrt{(S_w)^2 - (P_w)^2}$ , conforme [6].

## 3. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DESCENTRALIZADA PARA O CONTROLE DE TENSÃO

Para o controle de tensão apresenta-se uma abordagem baseada em algoritmos de consenso que explora o problema do controle de tensão e o compartilhamento de potência reativa. O consenso é utilizando num esquema de controle secundário para correção de possíveis afastamentos não corrigidos pelo controle primário, baseado num controle *droop* simples. Vide fig. (2).

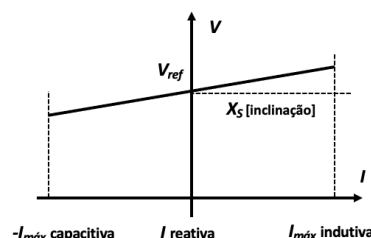


Fig. 2. Característica V-I da turbina eólica.

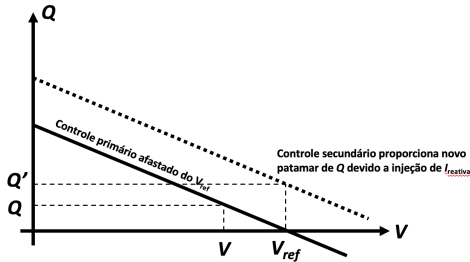
A estratégia de controle é baseada em dois níveis. O primeiro deles, denominado primário ou controle *droop*, tem uma rápida resposta frente a oscilações de tensão na rede [16,17], porém não é capaz de evitar desvios de tensão e frequência dos valores de referência mesmo com as técnicas de *droop* modificadas [18]. Neste artigo, o controle primário é baseado na curva de *droop* I-V, como mostrado na fig. (2), o qual baseia-se no fato de que a magnitude de tensão depende predominantemente da potência reativa. Este controle tem como objetivo gerar a referência de potência reativa para as turbinas e para o STATCOM conforme a tensão medida. A potência reativa injetada através de corrente pelo controlador  $I_{ref}^i$  é definida como:

$$I_{ref}^i = -\frac{1}{X_s} (V_i^m - V_{ref}), \quad (1)$$

em que,  $I_{ref}^i$  [p.u./Pnom] é a referência da parcela de corrente reativa;  $X_s$  [p.u./Pnom] é a reatância de *droop*;  $V_i^m$  [p.u.] é a tensão medida na turbina  $i$  e  $V_{ref}$  [p.u.] é a tensão de referência. Ainda, Pnon é a potência nominal trifásica do conversor. O controle de tensão primário no ponto de conexão com a rede (POC) é realizado conforme a equação:

$$I_{ref}^i = -\frac{1}{X_s} (V_i^{mPOC} - V_{ref}), \quad (2)$$

em que  $I_{ref}^i$  é a referência da parcela de corrente reativa;  $X_s$  é a reatância de *droop*;  $V_i^{mPOC}$  é a tensão medida no POC e  $V_{ref}$  é a tensão de referência.



**Fig. 3.** Diagrama esquemático do controle de tensão primária e secundária.

Analisando a eq. (1) é possível constatar que o controlador *droop* pode não ser capaz de evitar desvios na tensão. Assim, conforme apresentado na fig. (3), é proposto um controlador secundário, baseado em consenso, para diminuir o desvio de tensão provocado pelo controlador de *droop*, e ainda, proporcionar um compartilhamento mais uniforme de potência reativa no parque.

### 3.1 Preliminares sobre algoritmos de consenso

No contexto de controle cooperativo, consenso pode ser definido como um compromisso entre integrantes de um grupo sobre um objetivo em comum. Uma variável definida como estado da informação é usada para modelar a visão coletiva deste objetivo em comum, como por exemplo, a correção de potência reativa que cada turbina deve proceder para reestabelecer os níveis de tensão. Seja a topologia de informação modelada por um grafo de ordem  $i$  representado por  $G_i = (v_i, \delta_i)$  com um conjunto de nós  $v_i = \{v_1, \dots, v_i\}$  e um conjunto de arestas  $\delta_i \subseteq v_i \times v_i$ , em que  $i$  é o número de turbinas. Os nós pertencem a um conjunto finito  $\Gamma = \{1, \dots, i\}$ . Uma aresta de  $G_i$  é denominada por  $e_{ij} = (v_i, v_j)$ . Os elementos da matriz de adjacência ( $a_{ij}$ ) associados com as arestas do grafo são positivos, i.e.,  $e_{ij} \in \delta \Leftrightarrow a_{ij} > 0$ . E por fim, o conjunto de vizinhos de um nó  $v_i$  é identificado por  $N_i = \{v_j \in v_i: (v_i, v_j) \in \delta_i\}$ .

Seja  $\xi_i \in \mathfrak{R}$  a variável do estado da informação do nó  $v_i$ , então,  $G_\xi = (G_i, \xi)$  com  $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_i)^T$  representa uma rede com valores  $\xi \in \mathfrak{R}^n$  e topologia de comunicação  $G_i$ . Se cada nó  $v_i$  do grafo  $G_i$  tem a seguinte dinâmica, na qual  $u_i \in \mathfrak{R}^n$  é o sinal de entrada de controle da turbina  $i$ :

$$\dot{\xi}_i = f(\xi_i, u_i), \quad i \in \Gamma \quad (3)$$

então, pode-se definir o grafo como um sistema dinâmico representado por  $G_\xi = (G_i, \xi)$ , no qual a evolução dos estados da informação  $\xi_i$  são governados pela dinâmica de cada nó pertencente a rede  $\dot{\xi}_i = f(\xi_i, u_i)$ . O protocolo básico de consenso de 1ª ordem para o estado da informação:

$$\dot{\xi}_i(t) = u_i(t), \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

pode ser definido como:

$$u_i(t) = -\sum_{j=1}^i a_{ij} (\xi_i(t) - \xi_j(t)), \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

em que  $a_{ij}$  é a entrada da matriz de adjacência  $A_i \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  associada ao grafo  $G_\xi$ . O consenso para todo grupo é obtido se para qualquer instante inicial  $\xi_i(0)$ :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |\xi_i(t) - \xi_j(t)| = 0, \quad i, j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

### 3.2 Controle secundário de tensão baseado em protocolo de consenso

O controle de tensão baseado no protocolo de consenso descentralizado (ou seja, somente informação de tensão de turbinas vizinhas) tem por objetivo eliminar os desvios de tensão causado pelo controlador *droop*, além de proporcionar o compartilhamento mais uniforme de potência reativa no parque eólico. Para as unidades que operam no regime do controlador primário e, portanto, apresentam um desvio de tensão  $V_i^m - V_{ref}$ , o controlador secundário garante a atenuação desse desvio e a restauração da tensão para referência ajustando a potência reativa através da corrente injetada na rede conforme equacionamento abaixo:

$$I_{ref}^i = -\frac{1}{X_s} (V_i^m - V_{ref}) + u_i \quad (7)$$

O controle de tensão secundário no POC é semelhante ao controle das turbinas e segue como descrito na equação a seguir:

$$I_{ref}^i = -\frac{1}{X_s} (V_i^{mPOC} - V_{ref}) + u_i \quad (8)$$

em que,  $u_i$  é a entrada de controle de consenso, que na prática é a correção de corrente reativa injetada, a qual é calculada através do seguinte protocolo de consenso:

$$\begin{aligned} \dot{u}_i(t) = & -\alpha_i(t)(V_i^m - V_{ref}) \\ & -\beta_i \sum_{j=1}^i a_{ij} (V_i^m - V_j^m) \\ & -\gamma_i \sum_{j=1}^i a_{ij} \left( \frac{Q_i^m(t)}{\bar{Q}_i(t)} - \frac{Q_j^m(t)}{\bar{Q}_j(t)} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

em que os ganhos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  são parâmetros de controle ajustados para atenuar os desvios de tensão e regular o compartilhamento de potência reativa.

Ao adotar uma estratégia descentralizada de controle secundário não faz muito sentido ajustar os ganhos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  com os mesmos valores, desconsiderando as dinâmicas locais de compartilhamento da informação na busca do consenso. No limite, com extrapolação da palavra, é como se os ganhos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  fossem ajustados de forma centralizada. Neste contexto, este artigo propõe uma estratégia para que estes ganhos sejam ajustados de forma variante no tempo conforme a dinâmica da resolução do problema de consenso, e mais, como cada turbina  $i$  tem condições de vento e vizinhos diferentes, os ganhos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  também serão ajustados conforme as especificidades locais.

#### 4. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, para validar a eficácia da estratégia de controle proposta dois cenários foram adotados, em que inicia-se a operação em condições normais, e aos 0,2 segundos há uma falta no barramento, vide Figuras (4), (5) e (6). A flutuação interna da energia eólica foi considerada. A ideia da falta é considerar o impacto da rede externa no parque eólico. O parque eólico é composto por 20 x 1,5 MW turbinas com gerador de indução duplamente alimentado (DFIG), conectado ao sistema de elétrico por meio de uma linha de transmissão de 10 km. A modelagem da condição de vento do parque eólico foi implementada de forma desigual frente as 20 turbinas, para tal, utilizou-se o pacote *WindSpeed* disponível no *Simulink/MatLab*. O cenário de simulação de todo o parque eólico conectado foi implementado no *Simulink/MatLab* com as respectivas turbinas implementadas usando o pacote *WindTurbine* DFIG e por fim, as estratégias de controle, primária e secundária, foram implementadas no mesmo ambiente com a eq. (9) discretizada com  $T_s = 0,01$  segundos. A tensão de referência é definida como 1,0 p.u. Nesta estratégia de controle a potência reativa é calculada com base na tensão do Ponto de Conexão com a Rede (POC) e então distribuída de forma proporcional para as turbinas.

##### 4.1 Sobre a topologia de comunicação entre as turbinas

Ao propor uma estratégia de controle descentralizada baseada em consenso para o problema de regulação da tensão no parque, a topologia de comunicação entre as turbinas tem um papel importante, já que o consenso depende do grafo de comunicação. Neste contexto, considerando a definição de caminho orientado a seguir, tem-se o *Teorema 4.1*.

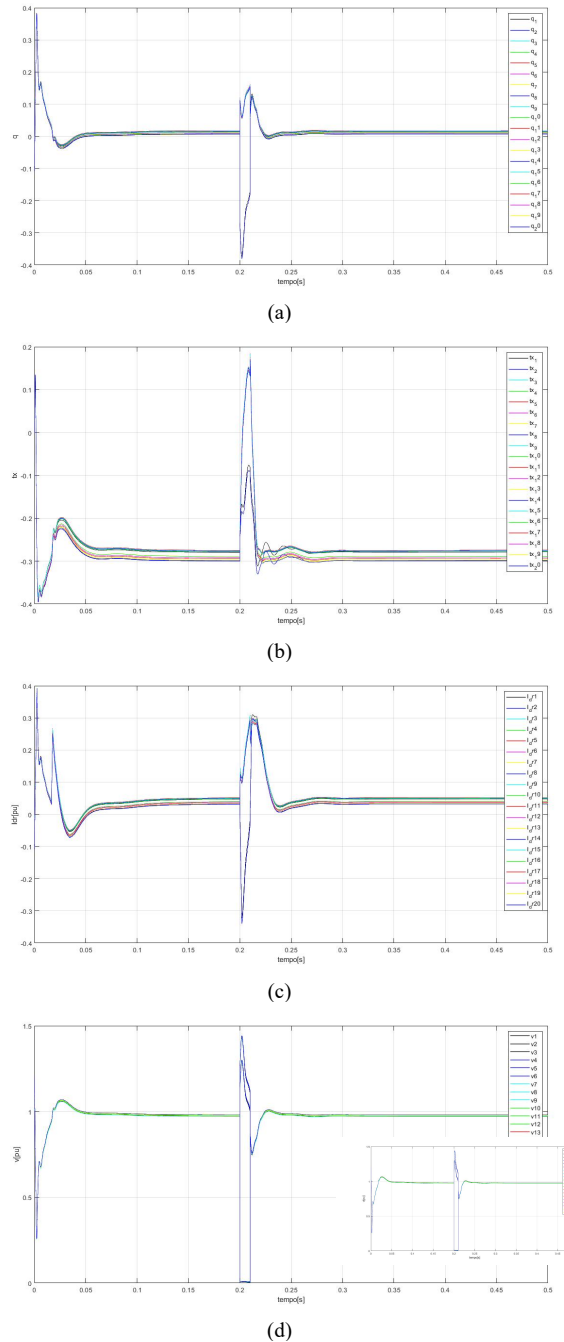
**Caminho orientado:** Um caminho orientado é um dígrafo  $G_n = (v_n, \delta_n)$  na forma  $v_n = \{v_1, \dots, v_n\}$  e  $\delta_n \subseteq v_n \times v_n$  em que os nós são diferentes. Os nós  $v_1$  e  $v_n$  são conectados por  $G_n$  mediante uma sequência ordenada de atestas em  $\delta_n$ . De forma mais geral tem-se  $(v_i, v_{i+1}) \in \delta_n$  para qualquer  $i=1,2,\dots,n$ .

**Teorema 4.1:** Seja uma matriz de adjacência  $A_{n \times n}$  constante, o problema de consenso é resolvido com eq. (4) se e somente se o grafo  $G_n$  for conectado [22].

Conforme a topologia de comunicação entre as turbinas, fig. (1), constata-se que o grafo é conectado (há pelo menos um caminho orientado entre quaisquer duas turbinas). Num parque eólico é podem-se incluir *links* de comunicação entre as turbinas para adicionar robustez a topologia de comunicação.

##### 4.2 Simulações e análise dos resultados

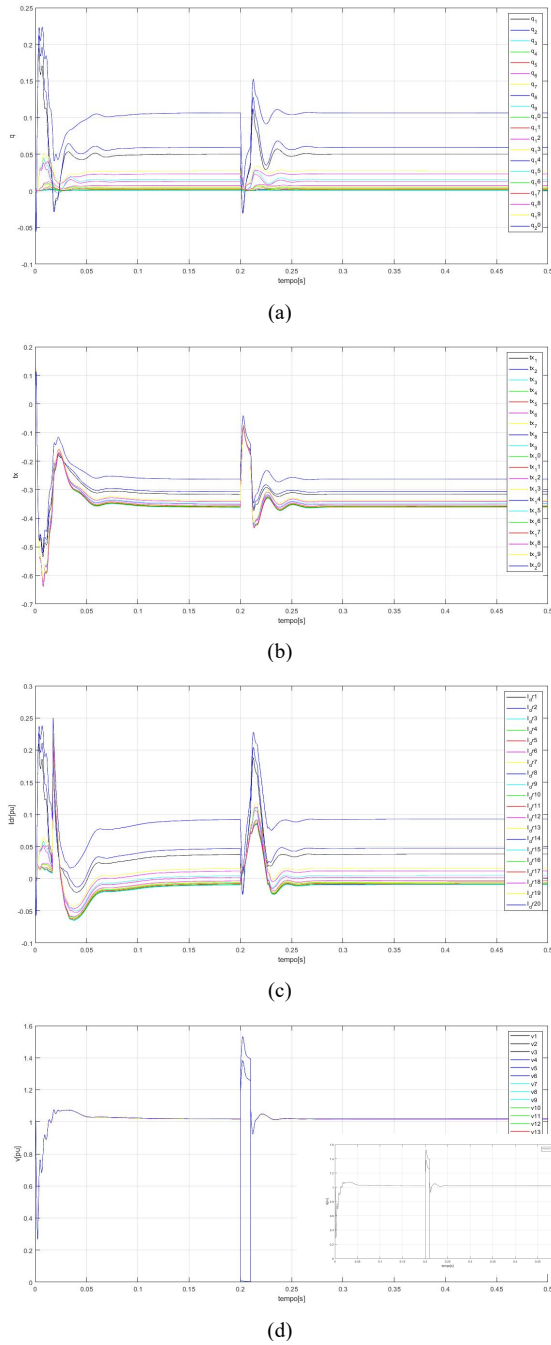
Dois casos sob condições normais e de falta no barramento são considerados para análise da influência dos ganhos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  no controle dos níveis de tensão e compartilhamento de potência reativa, vide Figuras (4) e (5).



**Fig (4).** Cenário 01 para  $\alpha_i = 1$ ,  $\beta_i = 1$  e  $\gamma_i = 0$ : (a) controle de consenso, (b) compartilhamento de potência reativa, (c) injeção de corrente reativa; (d) regulação de tensão.

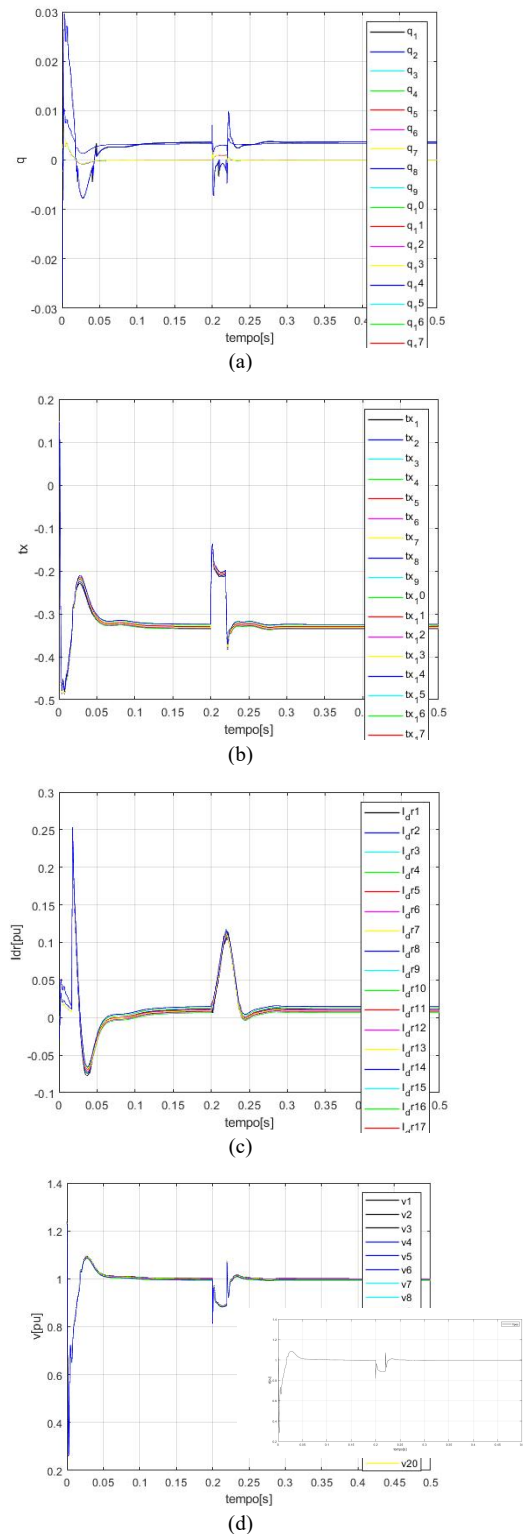
Nas Figuras (4), (5) e (6), na letra (d) apresenta-se o resultado da regulação de tensão no POC em destaque.

Na figura (6), em condições de operação nominal e com falta, apresenta-se o resultado da implementação dos ganhos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  variantes no tempo.



**Fig (5).** Cenário 02 para  $\alpha_i = 0$ ,  $\beta_i = 0$  e  $\gamma_i = 1$ : (a) controle de consenso, (b) compartilhamento de potência reativa, (c) injeção de corrente reativa; (d) regulação de tensão.

Ao analisar qualitativamente as figuras (4) e (5), percebe-se como os ganhos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  e  $\gamma_i$  de fato são um parâmetro importante de controle na abordagem de consenso. Embora os problemas de regulação de tensão e compartilhamento de potência reativa sejam conflitantes. Percebe-se que ajustes no ganho  $\gamma_i$  fazem com que o sistema busque a regulação de tensão com contribuições diferentes de injeção de corrente reativa na rede.



**Fig (6).** Cenário 03 para  $\alpha_i = [0,75 - 1]$ ,  $\beta_i = [0,75 - 1]$  e  $\gamma_i = [0,1 - 0,35]$ : (a) controle de consenso, (b) compartilhamento de potência reativa, (c) injeção de corrente reativa; (d) regulação de tensão.

Em relação aos resultados apresentados na Fig. (6), nota-se que independentemente da condição do sistema, o ajuste dos ganhos conforme as condições locais de cada turbina faz com que cada uma delas procure reestabelecer a tensão em seus terminais com diferentes níveis de injeção de potência reativa, o que faz sentido, uma vez que as condições de geração de energia através do vento são únicas para cada turbina.

## 5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentado o problema de regulação de tensão nos terminais das turbinas num parque eólico. De forma complementar ao problema de controle de tensão procurou-se também estabelecer que a regulação da tensão deveria considerar as condições locais de cada turbina no compartilhamento de potência reativa, através da corrente injetada na rede. Para tal, foi proposto um controle primário *droop* diretamente relacionado a injeção de corrente reativa, e para correção do controle da tensão optou-se pela implementação de uma estratégia baseado em consenso. E mais, como diferencial, os ganhos relacionados as parcelas de consenso são variantes no tempo conforme as condições locais de geração de energia de cada turbina. Como resultado simulado, observou-se que a estratégia baseada em consenso com ganhos variantes no tempo obteve sucesso frente ao controle de tensão e injeção de reativa, tanto em condições nominais como em falta. Como trabalho futuro pode-se avançar no ajuste ótimo dos ganhos de consenso e também no controle da topologia da rede de comunicação entre as turbinas, com intuito de agregar robustez e desempenho ao controlador baseado em consenso.

## REFERÊNCIAS

- [1] Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2021 (GWEC, 2021); Mar. 2021. 1-80.
- [2] <http://abceolica.org.br/>
- [3] M. J. Hossain, H. R. Pota, M. A. Mahmud, and R. Ramos, "Investigation systems," *IEEE Syst. Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 76–84, 2012.
- [4] Yifei Guo, Houlei Gao\*, Qiuwei Wu. Distributed cooperative voltage control of wind farms based on consensus protocol. *Electrical Power and Energy Systems*, (2019).
- [5] Z. Chen, J. M. Guerrero, and F. Blaabjerg, "A review of the state of the art of power electronics for wind turbines," *IEEE Trans. Power Electron*, vol. 24, no. 8, pp. 1859–1875, 2009.
- [6] A. D. Hansen, P. E. Sørensen, F. Iov, and F. Blaabjerg, "Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 7, pp. 935–951, 2006.
- [7] Q. Guo, H. Sun, B. Wang, B. Zhang, W. Wu, and L. Tang, "Hierarchical automatic voltage control for integration of large-scale wind power: Design and implementation," *Electric Power Systems Research*, vol. 120, pp. 234–241, 2015.
- [8] Zhao H, Wu Q, Guo Q, et al. Coordinated voltage control of a wind farm based on model predictive control. *IEEE Trans Sustainable Energy* 2016;7(4):1440–51.
- [9] Yazdanian M, Mehrizi-Sani A. Distributed control techniques in microgrids. *IEEE Trans Smart Grid* 2014;5(6):2901–9.
- [10] Xin H, Liu Y, Qu Z, et al. Distributed control and generation estimation method for integrating high-density photovoltaic systems. *IEEE Trans Energy Convers* 2014;29(4):988–96.
- [11] Zhao Y, Chai J, Sun X. Relative voltage control of the wind farms based on the local reactive power regulation. *Energies* 2017;10(3).
- [12] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Resolução Normativa nº 903/2020: Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. Submódulo 2.10. 2020.
- [13] Yifei Guo, Houlei Gao, Qiuwei Wu. Distributed cooperative voltage control of wind farms based on consensus protocol. *Electrical Power and Energy Systems*, (2019).
- [14] A. Bidram, F. L. Lewis, Z. Qu, and A. Davoudi, "Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, pp. 822-831, 2013.
- [15] G. Lou, W. Gu, Y. Xu, M. Cheng, and W. Liu, "Distributed MPC-Based Secondary Voltage Control Scheme for Autonomous Droop-Controlled Microgrids," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, pp. 792-804, 2017.
- [16] Z. Shuai, S. Mo, J. Wang, Z. J. Shen, W. Tian, and Y. Feng, "Droop control method for load share and voltage regulation in high-voltage microgrids," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 4, pp. 76-86, 2016.
- [17] Z. Ahmad and S. N. Singh, "DROOP Control Strategies of Conventional Power System Versus Microgrid Based Power Systems - A Review," pp. 1499-1504, 2015.
- [18] Begum, M.; Abuhilaleh, M.; Li, L.; Zhu, J. Distributed Secondary Voltage Regulation for Autonomous Microgrid. In *Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Sydney, Australia, 11–14 August 2017.
- [19] C. Schauder and H. Mehta, "Vector analysis and control of advanced static VAR compensators," *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 140, no. 4, Jul. 1993, pp. 299-306.
- [20] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press, New York, 2000.
- [21] Z. Saad-Saoud, M. L. Lisboa, J. B. Ekanayake, N. Jenkins, and G. Strbac, "Application of STATCOMs to wind farms," *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 5, Sept. 1998, pp. 511-516.
- [22] Ren, W. e Beard, R. *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control - Theory and Applications*, Springer, 2008.