

Análise da Conexão de Usina Eólica *Offshore* com Plataforma de Petróleo

Rodrigo Dias

Petrobras

rodias@petrobras.com.br

Sidelmo Magalhães Silva

Universidade Federal de Minas Gerais

sidelmo@ufmg.br

Resumo — Este trabalho tem como objetivo levantar os desafios técnicos e os impactos da conexão de usinas eólicas offshore com plataformas de produção de petróleo por meio de um estudo de caso. O caso analisado é uma situação real onde uma usina eólica *offshore* será conectada a um conjunto de plataformas que possuem geração própria e estão conectadas com uma subestação em terra. Neste trabalho foram analisados os impactos da geração eólica em regime permanente (fluxo de potência e perdas no sistema de distribuição) e regime transitório (rejeição de carga, partida, afundamento de tensão e variação da velocidade do vento). Com as simulações foi possível concluir que, para o caso estudado, a geração eólica impacta pouco o desempenho dinâmico do sistema.

Palavras-chaves — Energia Eólica *Offshore*, qualidade da energia, plataformas de petróleo.

I. INTRODUÇÃO

A eletrificação de plataformas de petróleo é um tema que tem sido muito discutido pela indústria de óleo e gás na última década, pois, com o aumento do porte das plataformas, fez-se necessária uma maior preocupação com eficiência energética [1]. Isso tem levado a substituição de sistemas de acionamento de grande porte com turbinas a gás e turbinas a vapor por motores elétricos [2].

Muitos campos de produção ficam a centenas de quilômetros da costa, inviabilizando a alimentação das plataformas por cabos submarinos. Dessa forma, o suprimento de energia é provido principalmente por turbinas a gás.

Neste contexto de aumento das unidades marinhas de exploração e produção de petróleo, alguns países europeus implementaram normas para regular as emissões atmosféricas da indústria de óleo e gás, principalmente em ambiente *offshore* [3]. No Brasil uma resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) [4] especifica o limite máximo de emissão de poluentes para unidades com potência instalada superior a 100 MW. Essa regulação é um fator limitante para o aumento das plataformas atualmente, visto que muitas plataformas já possuem potência instalada de 100 MW.

Este trabalho foi desenvolvido dentro do projeto da Petrobras “Planta Piloto de Geração Eólica *Offshore*” PD-0553-0045/2016 no âmbito do programa de P&D do sistema elétrico regulado pela ANEEL. O presente trabalho também contou com apoio financeiro da Capes- Brasil.

II. CONTEXTUALIZAÇÃO

O aproveitamento da energia eólica é uma realidade no Brasil. Atualmente existem aproximadamente 430 usinas em operação, totalizando uma potência instalada de 10,8 GW. Além disso, mais 7,19 GW estão em construção [5]. Ao fim de 2016 o Brasil ocupava a 9ª posição no ranking de países com maior capacidade instalada [6].

Estudos apontam para o elevado potencial eólico no litoral do Brasil [7] [8], o que qualifica a energia eólica como uma alternativa tecnicamente viável para a eletrificação de plataformas em um cenário onde existem restrições a emissões de unidades geradoras.

Atualmente, a Petrobras desenvolve o projeto “Planta Piloto Eólica *Offshore*” que visa a construção de uma usina eólica de pequeno porte no litoral do Nordeste brasileiro.

O presente trabalho tem como objetivo analisar os impactos da conexão dessa usina eólica diretamente às plataformas de produção próximas ao empreendimento. A análise se dará em duas abordagens distintas: análise de regime permanente e análise de resposta transitória. Na primeira, será analisado o comportamento do sistema frente a variação de geração eólica por meio de estudo de fluxo de potência. Na segunda abordagem serão analisados os impactos em regime transitório da variação de geração eólica, principalmente na tensão e frequência do sistema.

III. CONEXÃO DE PLATAFORMAS COM USINAS EÓLICAS

Atualmente muitos trabalhos têm abordado o tema de conexão de usinas eólicas *offshore* com plataformas de petróleo [9-16]. Esse interesse no tema se deve principalmente a dois motivos: as restrições de emissões que têm sido impostas por agências reguladoras e a redução no custo de operação das plataformas.

Em relação à redução do custo de operação, a energia eólica vem se mostrando viável em alguns cenários pois as turbinas a gás das plataformas operam com rendimento relativamente baixo, em torno de 30 %, quando comparadas com turbinas *onshore* de ciclo combinado, que apresentam rendimento na faixa de 50 – 60 % [3].

O grande desafio da interconexão de parques eólicos com plataformas é como gerenciar em tempo real o balanço de geração e carga, visto que a geração eólica é intermitente por natureza [3]. Este desbalanço de geração e carga provoca

problemas de estabilidade de tensão e de frequência. A Fig. 1 ilustra a variação típica ao longo do dia da geração eólica em um parque de 26 MW (medições minutíssimas) na região do nordeste brasileiro.

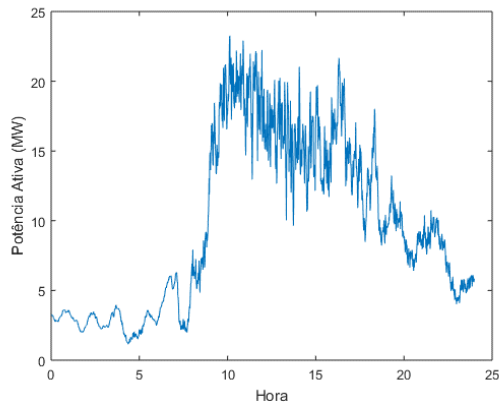


Fig. 1. Variação da potência de saída de um parque eólico de 26 MW.

Nas referências [14] e [16], os autores abordam o tema de estabilidade de tensão e de frequência para sistemas isolados. Para sistemas conectados à rede elétrica estes problemas são mais raros.

Na referência [3] o autor mostra, por meio de simulações computacionais, que um controle adequado das usinas eólicas pode melhorar a resposta dinâmica do sistema para controle de frequência, visto que a inércia dos aerogeradores é consideravelmente menor que a inércia das turbinas a gás.

Atualmente também estão sendo desenvolvidas soluções que envolvem armazenamento de energia para mitigar ou suavizar as variações de potência nos aerogeradores [17]. A associação de armazenando de energia com técnicas de previsão da geração eólica permitem uma maior flexibilidade de operação, facilitando o gerenciamento do balanço de geração e carga [18].

Em [12], são apresentados dois estudos, um de fluxo de potência e um de estabilidade transitória, onde um grupo de plataformas se conecta a dois parques eólicos *offshore* por meio de uma subestação *offshore*, que por sua vez se conecta à terra por meio de um *link* HVDC (*High Voltage DC*) de 280 km com potência nominal de 200 MVA. No estudo de estabilidade transitória é analisado como o sistema se comporta frente a faltas em diferentes pontos do circuito.

Em 2007 a *Talisman Energy UK* concluiu a construção do projeto *Beatrice Wind*, um parque eólico de demonstração composto de dois aerogeradores *offshore* de 5 MW localizado no mar da Escócia, que fornece energia para a plataforma *Beatrice Alpha*, localizada a dois quilômetros do parque eólico [19]. O parque cessou a sua operação em 2015 e se encontra em fase de descomissionamento [20]. Este projeto foi o primeiro parque eólico construído em águas profundas (aproximadamente 45 m). Na Fig. 2 é apresentada uma foto do parque eólico e da plataforma.

Em [19] também é apresentada uma pequena plataforma de exploração de gás no Mar do Norte que é totalmente alimentada por energia eólica *offshore* e solar fotovoltaica e um projeto da CNOOC (*China National Offshore Oil Corporation*) de construção de um parque eólico *offshore* para alimentar plataformas de produção de Petróleo no Mar de Bohai (China).



Fig. 2. Foto do parque eólico *Beatrice Wind Power* na Escócia (Fonte: [21]).

IV. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema estudado neste trabalho é composto por nove plataformas de produção de pequeno porte que são interconectadas por cabos submarinos de 13,8 kV em uma topologia de conexão radial. Uma das plataformas será conectada à terra e a um parque eólico *offshore* por cabos submarinos de 34,5 kV. O sistema elétrico estudado é mostrado na Fig. 3.

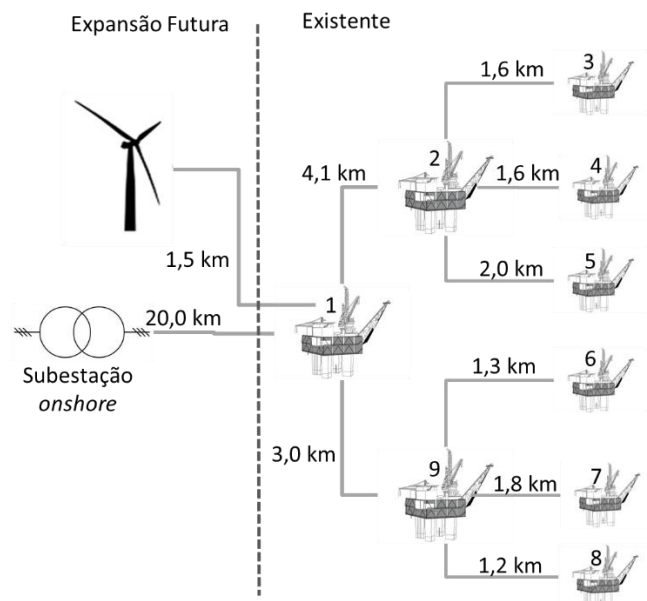


Fig. 3. Sistema elétrico estudado.

A demanda de potência de cada plataforma é mostrada na Tabela I, onde se nota que a demanda média das plataformas é de aproximadamente 1 MVA. A maioria das plataformas possui geração própria suficiente para o atendimento da carga, com exceção das plataformas 1 e 9. A plataforma 9 é a única que não possui geração própria, dependendo inteiramente da conexão com outras plataformas. A Tabela II mostra a potência instalada em cada plataforma. Vale ressaltar que este estudo levou em conta apenas os geradores principais, desconsiderando geradores reserva e geradores de emergência.

As principais cargas das plataformas são bombas de transferência de médio porte (baixa tensão) e inversores de frequência que alimentam BCS (bombeio centrífugo submerso). Nenhuma das plataformas estudadas possui cargas significativas de média tensão.

Para este estudo, considerou-se que a usina eólica possui capacidade nominal de 5 MW e opera no modo fator de potência unitário, não regulando a tensão no seu ponto de conexão. O estudo de impacto da integração da usina eólica com o sistema se faz relevante pois o porte da usina é

significativo, quando comparado com a carga ou geração nas plataformas.

TABELA I. CARGAS ELÉTRICAS DAS PLATAFORMAS.

Plataforma	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
1	1,78	1,06
2	0,90	0,48
3	0,69	0,29
4	1,15	0,49
5	1,03	0,43
6	0,25	0,11
7	0,69	0,29
8	0,57	0,24
9	0,81	0,35

TABELA II. CAPACIDADE INSTALADA NAS PLATAFORMAS.

Plataforma	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)
1	1,00	0,75
2	0,93	0,70
3	0,80	0,60
4	1,60	1,20
5	1,20	0,90
6	0,40	0,30
7	0,80	0,60
8	0,80	0,60

O Recurso eólico do local de interesse foi modelado utilizando os parâmetros da distribuição de Weibull estimados em [7] para a região. Os parâmetros utilizados foram 9,1 m/s para o fator de escala e 6,1 para o fator de forma. Para os estudos transitórios foi assumido que a variação da velocidade do vento se dá em rampa.

V. MODELAGEM COMPUTACIONAL

Os cabos submarinos foram modelados com parâmetros concentrados pelo modelo pi [22]. Essa aproximação é possível devido o comprimento dos cabos.

Cada plataforma foi modelada como uma única carga linear RL, de maneira que nenhum equipamento foi modelado de forma individualizada.

O estudo dos impactos da conexão da usina eólica *offshore* no *cluster* de plataformas foi dividido em duas partes, estudos de regime permanente e estudos de regime transitório. Os estudos de regime permanente serão pautados principalmente na análise de fluxo de potência. Para isso, foi utilizado o software ANAREDE, que é o software de simulação mais utilizado pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) nos planejamentos de expansão e operação do sistema elétrico nacional.

No ANAREDE, as plataformas foram modeladas como barras PV (potência ativa e tensão constantes), por possuírem geração com regulação automática de tensão. A usina eólica foi modelada como uma barra PQ (potência ativa e potência reativa constantes) devido ao modo de operação escolhido (fator de potência unitário).

A geração eólica foi variada de 0 a 5,0 MW em passos de 1,0 MW de forma a analisar o impacto da intermitência da geração.

Os estudos de regime transitório se basearam na análise da resposta dinâmica (tensão e frequência) do sistema elétrico para as seguintes perturbações:

- Caso 1 - variação abrupta de velocidade do vento;
- Caso 2 - desconexão da Plataforma 3;
- Caso 3 - desconexão da Plataforma 4;
- Caso 4 - reconexão da Plataforma 4;

- Caso 5 - afundamento de tensão proveniente da rede *onshore*.

Para a simulação transitória foi utilizado o software Simulink/MATLAB onde foi possível modelar em maiores detalhes o sistema elétrico estudado.

Na modelagem dos casos apresentados assumiu-se que as plataformas operavam sem geração própria, ou seja, toda energia elétrica era suprida pela usina eólica e pela subestação terrestre.

Para análise dos impactos das perturbações, foi medida a tensão e a frequência na plataforma mais próxima ao distúrbio (Plataforma 1 para os casos 1 e 5 e Plataforma 5 para os demais casos). A medição de frequência foi realizada utilizando o PLL (*Phase-locked loop*) apresentado em [23].

O aerogerador modelado é do tipo PMSG (Gerador Síncrono a Ímã Permanente) conectado à rede por um conversor PWM (*Pulse-Width Modulation*) *back-to-back*. O modelo da máquina se encontra disponível no Simulink. A Fig. 4 mostra um esquema simplificado do aerogerador utilizado.

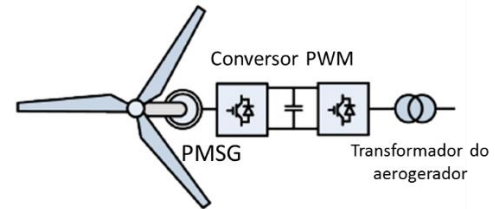


Fig. 4. Esquema do aerogerador utilizado (Fonte: adaptado de [24]).

A Fig. 5 apresenta um diagrama simplificado dos conversores eletrônicos do aerogerador utilizado.

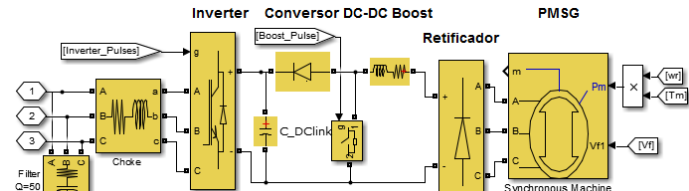


Fig. 5. Detalhe dos conversores eletrônicos do aerogerador (Fonte: modelo disponível no Simulink).

VI. IMPACTOS DE REGIME PERMANENTE

A análise de fluxo de potência considerou dois casos, o primeiro, onde todas as plataformas estão operando com os geradores em máxima potência e o segundo onde todos os geradores estão desligados e as plataformas são alimentadas unicamente pela subestação em terra e pela usina eólica.

A Fig. 6 mostra o perfil de tensão das barras de interesse do sistema elétrico estudado em função da variação da geração eólica no cenário em que todos os geradores das plataformas operam na sua condição nominal.

A Fig. 7 mostra o perfil de tensão no cenário em que os geradores das plataformas estão desligados.

Pelos resultados apresentados nas Figuras 6 e 7 é possível notar que quando os geradores das plataformas estão operando, estes são capazes de regular as tensões nas respectivas barras, de forma que a variação na injeção de potência pela usina eólica não provoca nenhum impacto aparente. No caso oposto, onde todos os geradores estão desligados, a variação de geração eólica provoca flutuação

nas tensões das plataformas, porém essa flutuação é da ordem de 0,2 %.

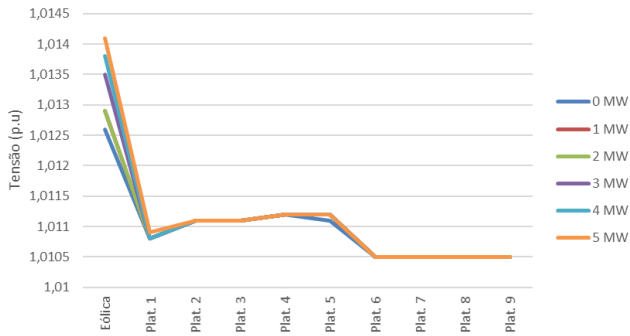


Fig. 6. Perfil de tensão com todos geradores operando.

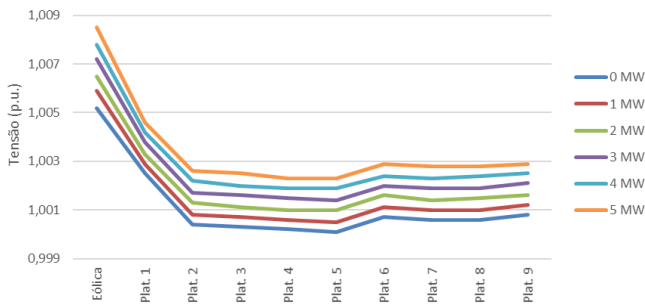


Fig. 7. Perfil de tensão com todos geradores desligados.

Na Fig. 8, é apresentada uma análise da soma das perdas elétricas por efeito joule no sistema estudado para os dois casos. O resultado dos dois casos apresenta comportamento contrário, isso ocorre porque quando os geradores estão ligados, um aumento da geração eólica implica em exportação de energia para a terra. Quando os geradores estão desligados, o aumento da geração eólica resulta na diminuição de importação de potência da subestação em terra. Em todo caso, percebe-se que as perdas ôhmicas do sistema são reduzidas pela operação da geração eólica.

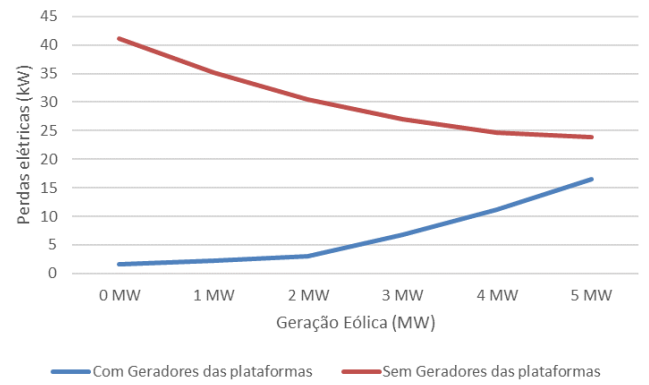


Fig. 8. Perdas no sistema elétrico estudado em função da geração eólica.

VII. IMPACTOS DE REGIME TRANSITÓRIO

A Fig. 9 mostra o Sistema elétrico modelado no Simulink. Dentre os casos analisados dos impactos de regime transitório, o único que apresenta variação na velocidade do vento é o Caso 1. Para todos os outros casos foram assumidos ventos de 15 m/s, o que equivale a usina eólica operando em potência nominal.

Para os casos 2, 3, 4 e 5, foi comparada a resposta ao distúrbio com e sem a geração eólica presente, de forma a analisar como a conexão com a usina eólica afeta a resposta dinâmica do sistema.

A Fig. 10 mostra a variação de tensão na Plataforma 1 e a variação na potência de saída da usina eólica com a variação abrupta da velocidade do vento. Embora a variação da velocidade do vento seja abrupta (variação de 15 m/s a 0 m/s em 1 s) a variação da potência de saída é lenta devido à inércia da máquina. Utilizando a abordagem proposta em [25] é possível estimar que a constante de inércia do rotor do aerogerador estudado é da ordem de 5 s.

Nas Fig. 11 (a), (b) e (c) são mostrados os impactos na frequência do sistema (medido na plataforma 5) frente às perturbações dos casos 2, 3 e 4 respectivamente. De forma análoga, as Fig. 12 (a), (b) e (c) mostram o impacto na tensão da Plataforma 5 para os mesmos casos. Nos casos 2, 3 e 4 as perturbações ocorrem no tempo de 0,5 s.

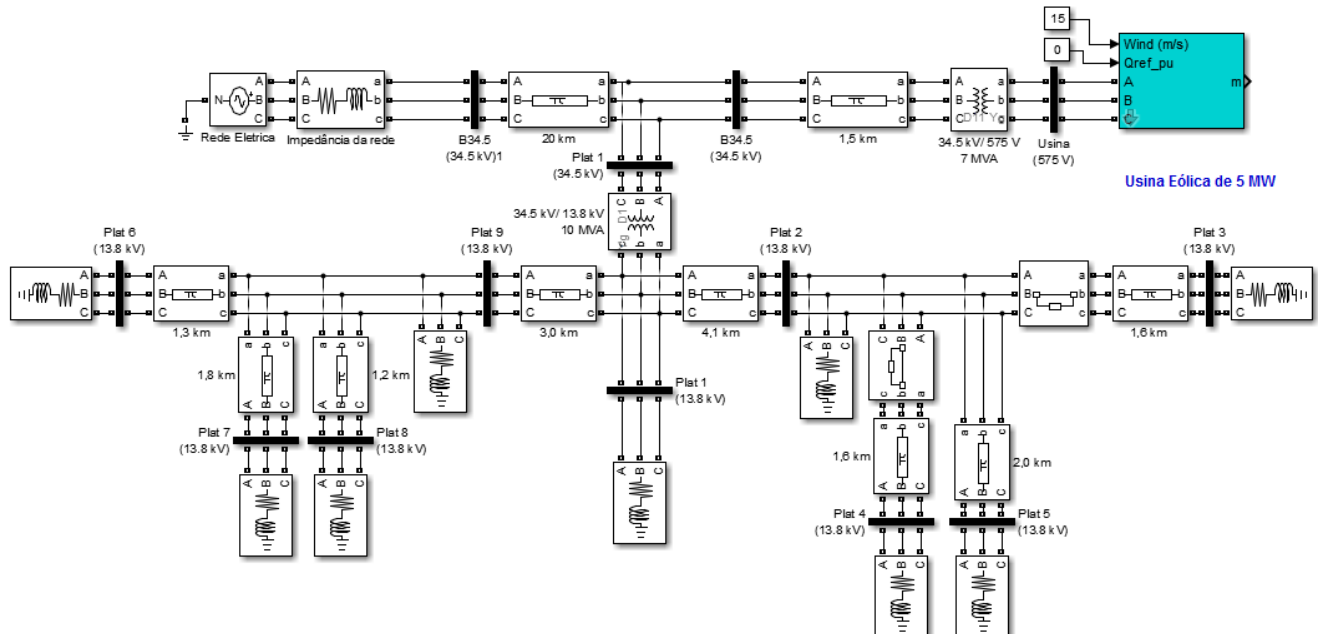


Figura 9 – Sistema elétrico simulado no Simulink.

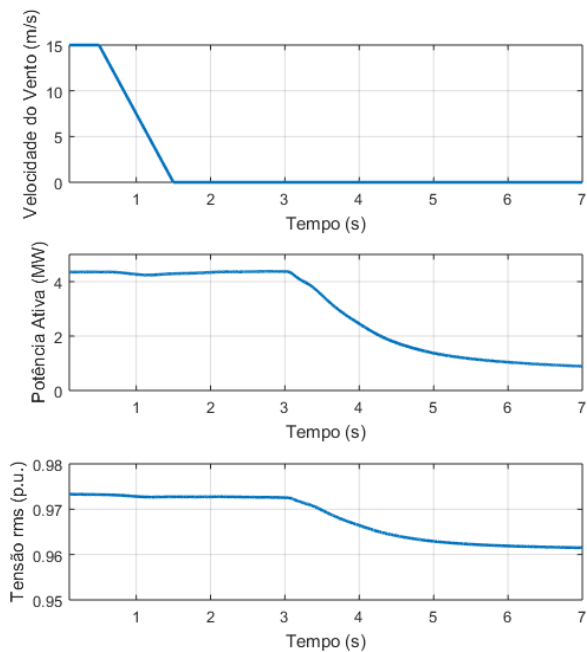


Fig. 10 – Resposta do sistema elétrico a uma variação abrupta de velocidade do vento.

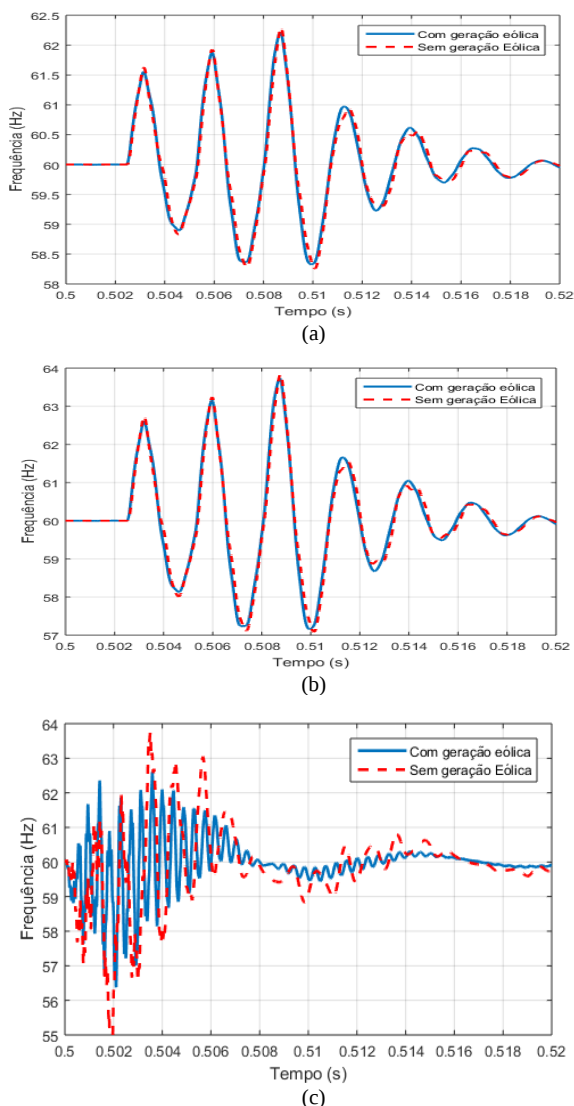


Fig. 11 – Distúrbios na frequência da rede provocados pelas perturbações: (a) Caso 2; (b) Caso 3; (c) Caso 4.

O impacto na frequência das perturbações, embora seja significativo em módulo, possui curta duração, correspondendo a aproximadamente um ciclo da tensão da rede. Nos casos 2 e 3, a flutuação de frequência do sistema com geração eólica é ligeiramente menor que a flutuação de frequência do sistema sem geração eólica. No caso 4, o distúrbio na rede sem geração eólica é visivelmente mais pronunciado do que na rede com a geração eólica.

Vale ressaltar que o caso 4 (reconexão de uma plataforma) não corresponde a uma situação operativa real, pois o religamento de uma plataforma é realizado de forma gradual, partindo pequenos conjuntos de carga de forma sequencial.

Após as perturbações dos casos 2 e 3 (desligamento de plataformas) é observada uma redução na queda de tensão nos cabos submarinos e no transformador da Plataforma 1, de forma que o nível de tensão aumenta com o desligamento. Da mesma forma, para o caso 4 a diminuição do nível de tensão se justifica pelo aumento na queda de tensão. É possível observar também que a variação de tensão se dá na forma de um transitório lento. Isso se deve à capacitância dos cabos submarinos, que filtram as componentes de alta frequência das perturbações.

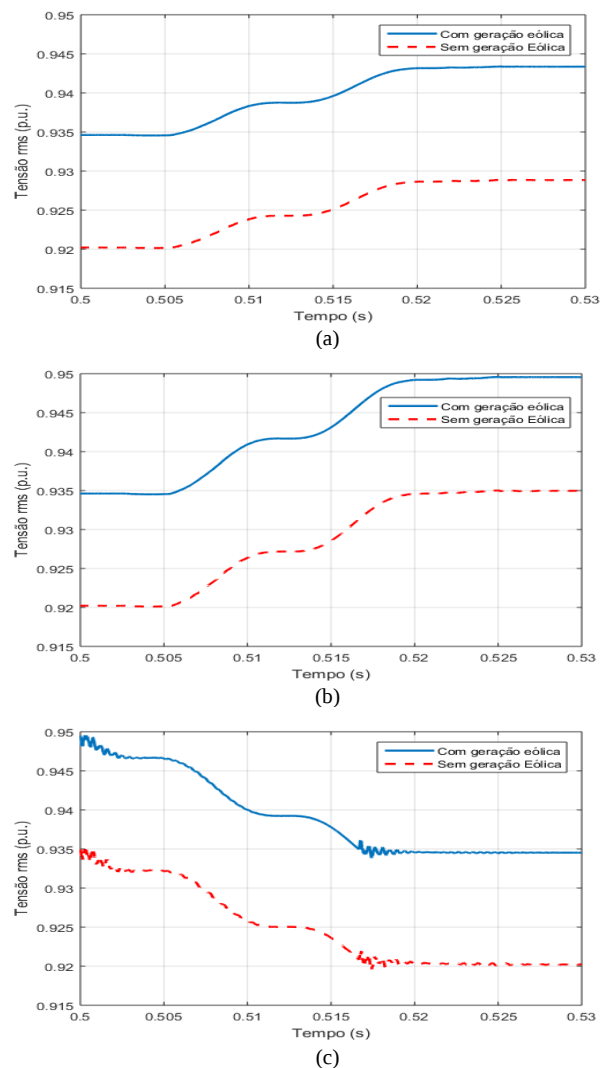


Fig. 12 - Distúrbios na tensão da rede provocados pelas perturbações: (a) Caso 2; (b) Caso 3; (c) Caso 4.

A última simulação mostra a resposta do sistema frente a um afundamento de tensão trifásico com tensão residual de 50 % e duração de 0,2 s, proveniente da subestação *onshore*.

Na Fig. 13 são mostrados os impactos do afundamento de tensão na tensão da Plataforma 1 e na potência gerada pela usina eólica.

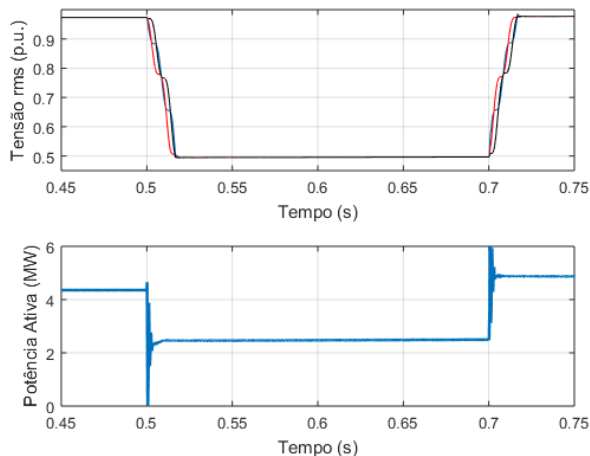


Fig. 13 – Perfil de tensão na Plataforma 1 e potência ativa gerada pela usina eólica durante o afundamento de tensão trifásico.

Pelo resultado apresentado na Fig. 13 fica claro que o aerogerador opera como uma fonte de corrente constante. Do ponto de vista do perfil de tensão nas plataformas, não houve sobretensão significativa durante o restabelecimento da tensão.

VIII. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar alguns aspectos da conexão de plataformas de petróleo com usinas eólicas *offshore* em um cenário onde existe conexão com a terra.

Devido ao pequeno porte das instalações, não se observou grandes impactos da variação da geração eólica, tanto na análise de regime permanente quanto na análise transitória. Também foi possível demonstrar por meio de simulação que a variação instantânea da velocidade do vento é amortecida pela inércia do aerogerador, suavizando a resposta transitória.

Nas análises de rejeição de carga e partida (casos 2, 3 e 4) não se observou grande influência da geração eólica na resposta dinâmica do sistema. A operação de usinas eólicas para regulação de tensão e suporte no controle de frequência [3] é um tema promissor, principalmente para operação em sistemas ilhados, e deve ser estudado mais a fundo.

Na análise de perdas do sistema de distribuição se constatou que a alimentação das plataformas por meio de geração eólica reduz as perdas elétricas (quando comparada com a alimentação exclusivamente por meio de cabos submarinos), dessa forma, este fator deve ser avaliado em uma análise de economicidade da geração eólica para plataformas.

IX. REFERÊNCIAS

- [1] L. K. Panton, “Exergy analysis of conventional and electrified oil and gas platforms”, Tese de Mestrado, NTNU – Norwegian University of Science and Technology. Junho de 2014.
- [2] TMEIC Corporation, “Drive Solutions for the Oil and Gas Industry”, 2011.
- [3] A. R. Ardal, K. Sharifabadi, *et al*, “Challenges Whith Integration and Operation of Offshore Oil & Gas Plataforms Connected to an Offshore Wind Power Plant”, PCIC Europe
- [4] Resolução N° 436, de 22 de dezembro de 2011. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente.

- [5] ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica, <http://www.portalabeeolica.org.br/>, acessado em 09 de fevereiro de 2017.
- [6] GWEC – Global Wind Energy Cuncil, “Global Wind Report – Annual Market Update 2016”, Bruxelas – Bélgica, Fevereiro de 2016.
- [7] H. M. P. Nunes, “Avaliação do potencial eólico ao largo da costa nordeste do Brasil”. Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2012, 133 p. Dissertação de Mestrado.
- [8] F. Pimenta, *et al*, “Combining meteorological stations and satellite data to evaluate the offshore wind power resource of Southeastern Brazil”, *Renewable Energy* 33. Janeiro de 2008.
- [9] M. Korpas, L. Warland, *et al*, “A Case-Study on Offshore Wind Power Supply to Oil and Gas Rigs”, *Energy Procedia* 24, Janeiro de 2012.
- [10] A. R. Ardal, S. D’Arco, *et al*, “Parametric sensitivity of Transients in an Islanded System with na Offshore Wind Farm Connected to na Oil Platform”, *IEEE Power Electronics and Applications, Proceedings of the 2011-14th European Conference*. Setembro de 2011.
- [11] W. He, M. Hadiya, *et al*, “Case Study of Integrating an Offshore Wind Farm with Offshore Oil and Gas Platform and with an Onshore Electrical Grid”, *Hindawi – Journal of Renewable Energy*, volume 2013. Março de 2013.
- [12] J. I. Marvik, *et al*, “Electrification of offshore petroleum installations with offshore wind integration”, *Renewable Energy* 50. Agosto de 2012.
- [13] A. R. Ardal, “Feasibility Studies on Integrating Offshore Wind Power with Oil Platforms”, Tese de Mestrado, NTNU – Norwegian University of Science and Technology. Junho de 2011.
- [14] D. Hu, X. Zhao, *et al*, “Impact of Wind Power on Stability of Offshore Platform Power Systems”, *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. Maio de 2008.
- [15] H. G. Svendsen, *et al*, “Integration of offshore wind farm with multiple oil and gas platforms”, *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*. Setembro de 2011.
- [16] A. R. Ardal, *et al*, “Voltage and frequency control in offshore wind turbines connected to isolated oil platform power systems”, *Energy Procedia* 24. Janeiro de 2012.
- [17] M. Jannati, S. H. Hosseinian, *et al*, “A significant reduction in the costs of battery energy storage systems by use of smart parking lots in the power fluctuation smoothing process of the wind farms”, *Renowable Energy* 87. Outubro de 2015.
- [18] N. W. Miller, “GE Experience with Turbine Integrated Battery Energy Storage”. *IEEE PES – Power & Energy Society, General Meeting* 2014.
- [19] J. C. Viterbo, “Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica offshore”, Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- [20] 4C Offshore, <http://www.4c offshore.com/windfarms/project-dates-for-beatrice-demonstration-uk46.html>, acessado em 23 de fevereiro de 2017.
- [21] <http://offshorewind.works/inform/a-history-of-offshore-wind-power/>, acessado em 23 de fevereiro de 2017.
- [22] F. M. F. da Silva, “Analysis and simulation of electromagnetic transients in HVAC cable transmission grids”, Tese de Doutorado. Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet.
- [23] P. Rodríguez, J. Pou, *et al*, “Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, volume 22. Março de 2007.
- [24] NREL – National Renewable Energy Laboratory, “Simulation for Wind Turbine Generators – With FAST and MATLAB-Simulink Modules”. Abril de 2014.
- [25] J. Morren, J. Pierik, S. W. H. de Haan, “Inertial Response of Variable Speed Wind Turbines”, *Electric Power Systems Research*, Janeiro de 2006.