

Análise do Sistema Elétrico de uma FPSO com Integração de Geradores Eólicos

James Blayne Oliveira Reis
Universidade Estadual Paulista
(UNESP)
Instituto de Ciência e Tecnologia
Sorocaba, Brasil
James.blayne@unesp.br

Fernando Pinhabel Marafão
Universidade Estadual Paulista
(UNESP)
Instituto de Ciência e Tecnologia
Sorocaba, Brasil
fernando.marafao@unesp.br

Marcelo Patricio Santana
Instituto Federal de São Paulo
Sorocaba, Brasil
mpdsantana@ifsp.edu.br

Helmo K. Morales Paredes
Universidade Estadual Paulista
(UNESP)
Instituto de Ciência e Tecnologia
Sorocaba, Brasil
helmo.paredes@unesp.br

Resumo— Os sistemas elétricos de plataformas do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) tradicionalmente utilizam geradores acionados por turbinas a gás. No entanto, a crescente demanda por maior eficiência energética e pela redução de emissões de gases poluentes têm impulsionado a adoção de fontes renováveis, como turbinas eólicas offshore. Este trabalho investiga os impactos da integração de aerogeradores ao sistema elétrico de uma FPSO, considerando diferentes cenários operacionais com dois ou três geradores a gás e até dois aerogeradores. As análises dos casos estudados, por meio de simulações no ambiente MATLAB/Simulink, revelam que a presença dos aerogeradores pode reduzir as emissões de CO₂ em cerca de 25%. Além disso, a implementação do controle *droop* QV nos geradores eólicos demonstrou-se eficaz na estabilização da tensão e na prevenção de sobrecargas durante partidas de motores de alta potência.

Palavras-chave—FPSO, geradores eólicos offshore, redução de emissões, Controle *droop* QV, sistema elétrico offshore.

I. INTRODUÇÃO

As plataformas do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*) desempenham um papel fundamental na produção offshore de petróleo e gás. No entanto, o uso de geradores acionados a gás para suprir a demanda energética dessas plataformas, impõe desafios significativos em termos de eficiência energética e emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente CO₂ [1], sendo responsável por mais de 80% das emissões do setor. Diante desse cenário, cresce a necessidade de transição para fontes renováveis, como a energia eólica offshore.

Diversos estudos [2] [3] [4] [5] recentes têm explorado metodologias para a integração da geração eólica offshore em FPSOs. Um exemplo é o projeto *Hywind Tampen*, na Noruega, que demonstra o potencial da energia eólica em reduzir significativamente as emissões operacionais dessas plataformas [6].

Iniciativas como essa reforçam a importância de se estudar sistemas híbridos gás-eólico aplicados às FPSOs, especialmente em países como o Brasil, que possui uma extensa costa e elevado potencial eólico. A busca por marcos regulatórios para energia offshore e o interesse crescente por parte dos agentes do setor reforçam essa tendência [7]. Neste

contexto, destaca-se o Plano Estratégico 2024-2028 da Petrobras, que prevê investimentos de R\$ 108 bilhões em projetos de baixo carbono, incluindo energias renováveis e iniciativas de eficiência energética [8].

Motivado por esse cenário, o presente trabalho investiga os impactos operacionais da integração de aerogeradores (*Wind Energy Converters – WECs*) em plataformas FPSO, com foco na redução das emissões de GEE. Para tanto, foi utilizado um modelo computacional completo do Sistema Elétrico de Potência (SEP) de uma plataforma, desenvolvido no ambiente MATLAB/Simulink. Essa escolha permitiu simulações precisas e detalhadas, essenciais para entender o comportamento do sistema elétrico da FPSO, com ênfase na distribuição de energia em média tensão (MT) e baixa tensão (BT) e na integração de geradores eólicos offshore. Tal abordagem permitiu avaliar, de forma criteriosa, os impactos operacionais decorrentes da inserção de aerogeradores em diferentes cenários, contribuindo para a compreensão dos benefícios técnicos e ambientais dessa integração. Com isso, o estudo oferece subsídios relevantes para o projeto de sistemas híbridos mais eficientes e sustentáveis em unidades de produção offshore de O&G.

O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção II descreve o sistema elétrico da FPSO, incluindo a modelagem dos componentes e dos controladores do sistema de gerenciamento de energia. A Seção III aborda o sistema eólico offshore, com detalhes sobre a modelagem dos componentes e o controle *droop* (QV). A Seção IV apresenta a metodologia utilizada, com análises em regime permanente e dinâmico. A Seção V discute os resultados obtidos em seis cenários distintos. Finalmente, a última seção traz as conclusões deste trabalho.

II. SISTEMA ELÉTRICO DA FPSO UTILIZADO NO ESTUDO

O SEP típico de uma FPSO é composto por geradores, motores, transformadores e cabos de distribuição de energia [9] [10] [11]. Os principais responsáveis pelo fornecimento de energia são geradores síncronos acionados por turbinas a gás. Além dos motores, o SEP alimenta diversas cargas essenciais, como equipamentos de processamento, sistemas de controle,

iluminação e comunicação, cuja diversidade é fundamental para garantir a eficiência e segurança das operações da FPSO.

Na FPSO em estudo, os geradores síncronos [12], acionados por turbinas a gás [13], operam em paralelo, garantindo uma distribuição uniforme de potência nos barramentos Topside A e B. Essa operação coordenada é gerenciada pelo PMS (Power Management System) [12] [14], responsável pela manutenção dos parâmetros elétricos operacionais, como tensão nominal de 11 kV e frequência de 60 Hz.

A configuração do SEP da FPSO mostrado na Fig. 1 [14]-[15] inclui três geradores síncronos principais (G1, G2 e G3) com capacidade de 36 MVA cada [13], além de dois aerogeradores offshore (WEC1 e WEC2), com potência de 10 MW cada. Todos os geradores estão conectados ao barramento principal de 11 kV (Topside A e B), formando uma arquitetura híbrida projetada para melhorar a confiabilidade do sistema e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

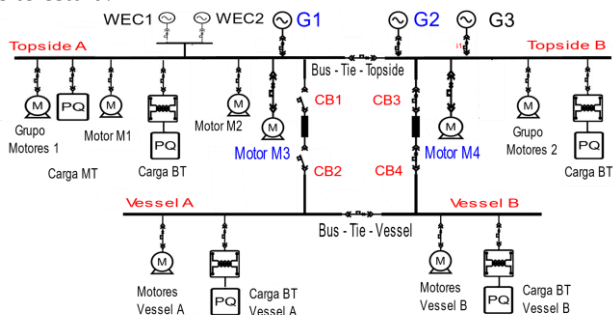


Fig. 1. Sistema elétrico de potência híbrido gás-eólico aplicado a FPSO.

O sistema também é composto por chaves de interconexão, ligações entre barramentos, motores de indução e transformadores abaixadores. A configuração dos diferentes modos de operação é realizada por meio de disjuntores (CB1 a CB4) e conexões entre os barramentos do Topside e do Vessel, conforme ilustrado na Fig. 1. Neste estudo, foi adotado o modo de operação denominado “production”, descrito nas Tabelas I e II, no qual a quantidade de cargas varia de acordo com o cenário analisado.

Tabela I –Modo de operação *production* para regime permanente.

Cenário	# Geradores a Gás	# WECs	Carga (MW)
1	3	0	75,88
2	3	1	75,88
3	3	2	75,88

Tabela II –Modo de operação *production* para regime dinâmico

Cenário	#Geradores a Gás	#WECs	#Motores de 10,70 (MW)	Carga (MW)
4	2	0	0	49,2
5	2	0	2	49,2
6	2	2	2	49,2

A. Descrição básica dos componentes e controladores

A descrição detalhada dos componentes e controladores é fundamental para avaliar o desempenho do SEP da FPSO. Isso permite uma análise aprofundada do SEP, possibilitando a caracterização do desempenho em diferentes condições operacionais, a identificação de possíveis falhas e o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção.

Informações detalhadas sobre a modelagem dos diversos componentes típicos do SEP em FPSOs podem ser encontrados em [13], bem como em trabalhos recentes [10] [11] [16] [17] [18]. A modelagem das turbinas e geradores síncronos baseia-se em [12], enquanto a modelagem dos motores de indução é descrita em [9]. Os transformadores foram modelados com base na abordagem clássica recomendada pelo IEEE [19]. As cargas não rotóricas, tanto de MT quanto de BT, foram representadas por impedâncias equivalentes, e os cabos foram modelados como elementos série compostos por resistência e indutância. Todos os modelos adotam parâmetros representativos de um SEP típico de FPSO, conforme descrito em [10] [17].

A modelagem dos controladores de tensão, frequência e potência dos geradores é fundamental para garantir a estabilidade do SEP, em conformidade com a norma ABNT NBR IEC 61892-1 [20]. Em particular, os controladores de velocidade com ação *droop* e controle secundário são indispensáveis para garantir a estabilidade na operação dos geradores da FPSO, conforme discutido em [13]. Esses controladores foram modelados por meio de equações diferenciais lineares, considerando parâmetros como ganho, tempo de resposta e margem de estabilidade. O modelo matemático adotado para o controlador de velocidade foi baseado na metodologia apresentada em [21], enquanto o sistema de excitação utilizado foi o tipo AC7B, conforme especificado em [22].

III. SISTEMA ELÉTRICO SIMPLIFICADO DE GERADOR EÓLICO

A. Descrição do modelo do gerador eólico offshore

O sistema em estudo utiliza dois aerogeradores de 10 MW equipados com geradores síncronos de ímã permanente síncrono (*Permanent Magnet Synchronous Generator – PMSG*) [23], modelados com base em aerogeradores comerciais amplamente utilizados em parques eólicos offshore, como o *Haliade-X* da GE de 14 MW [24] e o SG 14-236 DD da Siemens Gamesa de 14 MW [25], ambos empregados no parque eólico *Dogger Bank*, no Reino Unido [26].

A interface de potência utiliza um conversor *back-to-back* do tipo 3L-NPC (*Three level - Neutral Point Clamped*) operando com filtro LCL [5], o que proporciona melhor qualidade de tensão e controle eficiente de corrente. Essa estrutura realiza a conversão AC/CC/AC, viabilizando o controle da tensão e a regulação de potência via o método *droop* [15] [27], conforme ilustrado na Fig. 2. As simulações consideram uma turbulência de 7% e uma velocidade média de vento de 13 m/s, com o sistema *back-to-back*, operando em paralelo e transmitindo energia à FPSO, por meio de um cabo umbilical submarino de 12 km, seguindo a metodologia descrita em [4]. Tal configuração permite a injeção direta da energia gerado pelos WECs no barramento Topside A.

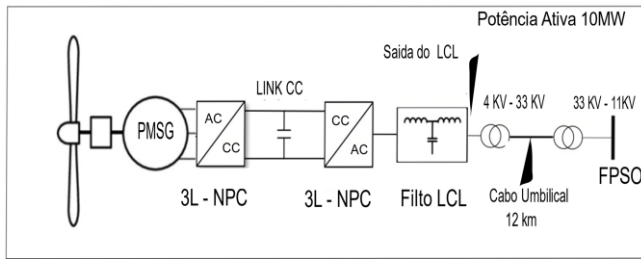


Fig. 2. Sistema de geração eólica offshore conectado a FPSO.

O modelo do PMSG utilizado nas simulações foi desenvolvido com base na abordagem proposta em [5] [23], incorporando características técnicas dos componentes, condições ambientais específicas do sistema offshore e os desafios associados à integração entre sistemas eólicos e o SEP da FPSO [5]. Essa integração é fundamental e tem sido amplamente discutida na literatura [15] [16].

B. Controle droop (Q-V)

O controle *droop* Q-V é essencial para garantir a estabilidade no sistema elétrico da FPSO, ajustando dinamicamente a tensão dos geradores eólicos conforme as variações da potência reativa [5] [15] [27]. Essa técnica proporciona controle efetivo da potência reativa dos geradores, além de promover o compartilhamento proporcional da carga reativa entre os geradores, prevenindo situações de sobrecarga [15]. Para que o controle seja eficaz, é necessário que todos os geradores operem com a mesma taxa de *droop* [12].

Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela III. A tensão nominal considerada, de (3266 V), resulta da transformação da tensão de saída do filtro LCL de 4 kV, conforme ilustrado no diagrama do WEC na Fig. 2. Para garantir a estabilidade da tensão no barramento, o controle *droop* Q-V ajusta o valor da potência reativa de referência (Q_{ref}) com base na diferença entre a tensão atual medida no sistema (V_{atu}) e a tensão nominal (V_{nom}), de modo a mantê-la dentro dos limites operacionais definidos na saída do filtro LCL.

Tabela III – Parâmetros de controle *droop* Q-V.

Parâmetros de cada WEC	Variáveis para os parâmetros	Valores dos parâmetros
Potência reativa máxima	Q_{max}	10 MVar
Potência reativa mínima	Q_{min}	- 10 MVar
Tensão máxima	V_{max}	3592 V
Tensão mínima	V_{min}	2939 V
Tensão nominal	V_{nom}	3266 V

Assim, através de (1) e (2) e em conjunto com os dados da Tabela III, pode-se calcular Q_{ref} a partir da diferença de tensão, utilizando o parâmetro do controlador *droop* (n):

$$Q_{ref} = \frac{V_{atu} - V_{nom}}{n} \quad (1)$$

Tal que:

$$n = \frac{V_{max} - V_{min}}{2Q_{max}} \quad (2)$$

Os parâmetros considerados incluem a potência reativa de referência (Q_{ref}), tensão atual (V_{atu}) e tensão nominal na saída do filtro LCL (saída), o parâmetro n do *droop*, a tensão

máxima (V_{max}) e a tensão mínima (V_{min}) e a potência reativa máxima do WEC (Q_{max}).

A Fig. 3 ilustra uma relação entre tensão e carga, demonstrando como o controle da potência reativa contribui para a regulação da tensão. Essa técnica permite compensar variações de carga, evitando sobrecargas e garantindo que a tensão permaneça dentro dos limites aceitáveis ao longo da operação do sistema.

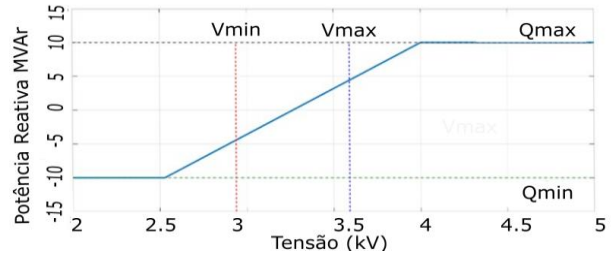


Fig. 3. Controle *droop* Q-V.

IV. METODOLOGIA DE ESTUDOS E CENÁRIOS AVALIADOS

Esta seção apresenta a metodologia para avaliar o desempenho do SEP da FPSO, conforme ilustrado na Fig. 1. O sistema é composto por três geradores síncronos (G1, G2 e G3), com potência nominal total de 108 MVA. Na simulação, os geradores operam fornecendo 76,25 MW de potência ativa, 36,93 Mvar de potência reativa e 84,53 MVA de potência aparente. As cargas, distribuídas em BT e MT, totalizam 75,88 MW, atendendo a grupos de motores e outros equipamentos nos barramentos Torside e Vessel.

Para todas as simulações do sistema híbrido (geração eólica, turbina a gás da FPSO), foi adotado um passo de integração único de $T_s = 100 \mu s$, conforme práticas estabelecidas em sistemas híbridos gás-eólico [3]. Os demais parâmetros de simulação seguem as configurações descritas na modelagem do sistema eólico (Seção III).

O estudo compara cenários com e sem a presença de aerogeradores, analisando parâmetros como tensão, fluxo de potência e redução de emissões de CO_2 . A metodologia de cálculo das emissões baseia-se em [1]. A análise é estruturada em duas etapas principais:

- Regime Permanente: Avaliação da redução de emissões em três cenários (Tabela I), considerando tensão, potência ativa e reativa e estabilidade de tensão;
- Regime Dinâmico: Análise do comportamento do sistema em três cenários (Tabela II), incluindo o desempenho do controle *droop* Q-V, variações de tensão e potência e capacidade de recuperação após distúrbios, como o colapso de tensão.

A. Análise em regime permanente

As simulações foram realizadas conforme o modo de operação e cenários descritos na Tabela I. A potência ativa total dos três geradores a gás resulta 76,25 MW. A avaliação incluiu parâmetros elétricos e ambientais, evidenciando a viabilidade da integração dos WECs para a redução das emissões de CO_2 . Foram analisados três cenários distintos: operação com três geradores a gás sem WECs (cenário 1), operação com três geradores a gás e um WEC (cenário 2) e operação com três geradores a gás e dois WECs (cenário 3). Em todos os cenários, a carga total foi mantida constante em

75,88 MW, distribuída entre as redes de MT e BT, conforme detalhado na Tabela I.

B. Análise em regime dinâmico

Assim como no regime permanente, as simulações de regime dinâmico seguiram o modo de operação e cenários apresentados na Tabela II. O sistema opera com os geradores G1 e G2, enquanto o gerador G3 é desativado, resultando em uma potência ativa total de 53,39 MW. As cargas do sistema, conforme as Tabelas II e IV, somam 49,2 MW, sendo 40,49 MW em MT e 8,53 MW em BT. Além disso, os motores M3 e M4 contribuem com 21,4 MW (10,70 MW por motor), conforme ilustrado na Fig. 1.

O comportamento do sistema foi avaliado durante eventos dinâmicos em três cenários: dois geradores a gás sem WECs (cenário 4), dois geradores a gás sem WECs com dois motores (cenário 5) e dois geradores com 2 WECs e dois motores (cenário 6). A modelagem dos motores considerou parâmetros operacionais detalhados em [9]. O controle *droop* QV nos geradores eólicos foi analisado com base nas medições de tensão, potência ativa e reativa.

C. Estimativa de emissões de CO₂ em plataformas FPSO

A quantificação das emissões de CO₂ em plataformas FPSO é crucial, uma vez que mais de 92% das emissões totais são associadas ao funcionamento das turbinas a gás. Para essa avaliação, adota-se o método estequiométrico descrito em [28], que permite estimar as emissões com base na demanda de potência elétrica da plataforma. O cálculo é realizado em duas etapas principais. Primeiramente, calcula-se a vazão mássica de gás natural (Y , em kg/s), a partir da razão entre a potência elétrica requerida (P) e a potência nominal (P_N), ajustada por um fator de correção mostrado (FC), conforme expressa em (3).

$$Y = \frac{P}{P_N} * FC \quad (3)$$

O (FC) é um parâmetro ajustado para refletir as condições operacionais específicas da FPSO. Neste estudo, adotou-se o valor de 9,14, obtido a partir da relação entre (P_N) e a vazão de gás natural, conforme indicado em [1] [28].

Na segunda etapa, calcula-se a emissão de CO₂, utilizando o fator de potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential – GWP*), considerado igual a 1,57 [1]. A equação (4) expressa a taxa de emissão de CO₂ com base na vazão mássica de gás natural:

$$CO_2 \text{ (kg/s)} = GWP * Y \quad (4)$$

Com base nessa abordagem é possível estimar as emissões de CO₂ equivalentes das FPSOs, em conformidade com as metodologias estabelecidas em [1]. Essa quantificação é fundamental para avaliar os benefícios ambientais decorrentes da integração de fontes renováveis, como os aerogeradores *offshore*, no sistema de geração de energia das plataformas.

V. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações do comportamento do SEP da FPSO, tanto em regime permanente quanto dinâmico, de acordo com os cenários descritos nas Tabelas I e II.

A. Cenário 1 – três geradores a gás sem WEC

O sistema opera de maneira estável e convencional, mantendo uma tensão constante de 11 kV e uma frequência de

60 Hz. A potência ativa total gerada foi de 76,25 MW, com 25,42 MW por gerador, enquanto a potência reativa total atingiu 37,7 Mvar, distribuída igualmente entre os geradores (12,57 Mvar cada). As cargas consumiram 75,88 MW de potência ativa, resultando em emissões de 14,05 kg/s. A diferença de apenas 0,46% entre a potência ativa total gerada e consumida reflete uma perda mínima, indicando a alta eficiência do sistema.

B. Cenário 2 – três geradores a gás e um WEC

No Cenário 2, um gerador eólico (WEC) de 10 MW foi integrado ao SEP. A integração do WEC1 resultou na redução da carga dos geradores a gás, cuja potência ativa total diminuiu de 76,25 MW para 66,2 MW após a entrada em operação do WEC1 no instante 85 s. A Fig. 4 ilustra essa redução a partir de 100 s, mostrando a potência ativa total, bem como a de cada gerador (G1, G2, G3) e a geração eólica (WEC1). O intervalo de 15 segundos observado entre a conexão do WEC1 e a injeção efetiva de potência deve-se à conversão de energia AC/CC/AC realizada pelo conversor back-to-back e às características do cabo umbilical de 12 km.

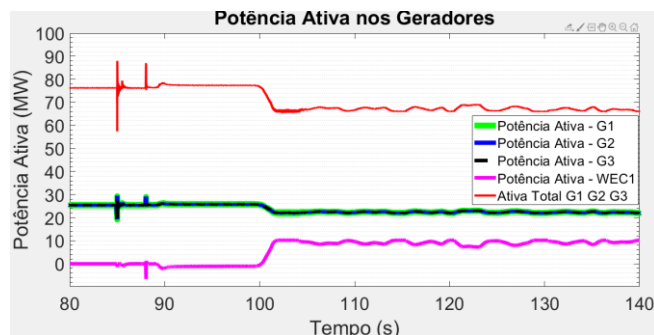


Fig. 4. Cenário 2: três geradores a gás e um WEC - Potência ativa total e individual dos G1, G2 e G3 e do WEC1.

A Fig. 5 apresenta as potências reativas total e individual. As cargas continuam consumindo 75,88 MW de potência ativa, conforme no cenário 1, mas as emissões do sistema de geração foram reduzidas para 11,53 kg/s. Assim, a adição de uma turbina eólica resultou na redução de 18% nas emissões, de 14,05 kg/s para 11,53 kg/s.

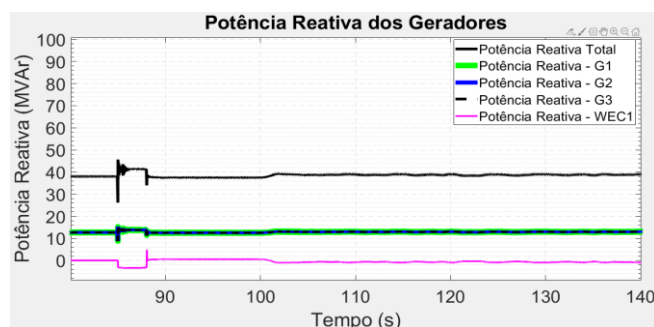


Fig. 5. Cenário 2: três geradores a gás e um WEC - Potência reativa total e individual dos G1, G2 e G3 e do WEC1

Como observado na Fig. 6, a frequência do sistema variou entre 59,5 Hz e 60,5 Hz devido à turbulência do vento de 7% e velocidade média de 13 m/s configurada no WEC. Essas oscilações permaneceram dentro dos limites aceitáveis da norma IEC 61892-2, que estabelece uma variação máxima da frequência de $\pm 2\%$ [20].

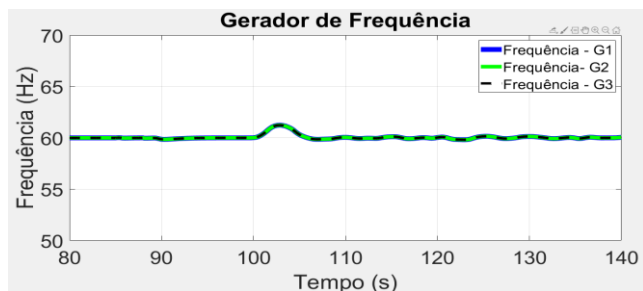


Fig. 6. Cenário 2: três geradores a gás e um WEC - Frequência dos geradores G1, G2 e G3.

C. Cenário 3 – três geradores a gás e dois WECs

Quando o sistema opera com três geradores a gás e dois eólicos (WECs), nota-se uma redução progressiva na potência ativa fornecida pelos geradores a gás, proporcional à integração das unidades eólicas. Inicialmente, a potência ativa total era de 76,25 MW, sendo reduzida para 67,05 MW após a entrada do WEC1 em 85 s, e posteriormente para 56,2 MW com a conexão do WEC2 em 110 s. É importante ressaltar que, embora os WECs sejam conectados nesses instantes, a injeção efetiva de potência ativa só ocorre a partir de 100 s (WEC1) e 125 s (WEC2), seguindo o mesmo atraso de 15 s observado no Cenário 2.

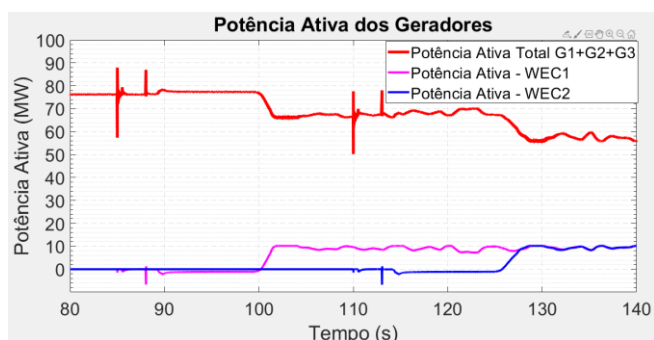


Fig. 7. Cenário 3: três geradores a gás e dois WECs - Potência ativa total e individual dos geradores, G1, G2, G3, WEC1 e WEC2.

Complementarmente, a adição dos WECs resultou em uma redução nas emissões de CO₂. Com um WEC, as emissões caíram de 14,05 kg/s para 11,53 kg/s, representando uma redução de 8%. Com dois WECs, a redução foi de 25%, atingindo 10,5 kg/s. Assim, a integração das turbinas eólicas mostrou ser eficaz na diminuição das emissões, contribuindo para uma operação mais sustentável das plataformas offshore.

D. Cenário 4 – dois geradores a gás sem WECs e sem motores.

Nesse cenário, o sistema mantém-se estável, atendendo à demanda de carga por meio dos geradores a gás.

Tabela IV – Potência total das cargas em regime dinâmico.

Categoria	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVar)	Potência Aparente (MVA)
Média Tensão (MT)	40,49	23,65	45,87
Baixa Tensão (BT)	8,53	4,90	9,87
Total (BT + MT)	49,2	28,55	55,74
Motor M3 Adicional	10,70	6,43	13,38
Motor M4 Adicional	10,70	6,43	13,38

De acordo com as Tabela II e IV, a carga de MT exigiu 40,49 MW de potência ativa, 23,65 Mvar de potência reativa e 45,87 MVA de potência aparente, enquanto a carga de BT demandou 8,53 MW, 4,90 Mvar e 9,87 MVA. No total, o sistema apresentou uma demanda combinada (BT + MT) de 49,02 MW, 28,55 Mvar e 55,74 MVA. Para suprir essa demanda, dois geradores a gás de potência nominal 36,25 MVA cada estavam em operação.

E. Cenário 5 – dois geradores a gás sem WECs com dois Motores

Neste cenário é avaliado a partida direta de dois motores (M3 e M4) de grande porte. O sistema operou apenas com dois geradores a gás (G1 e G2). A adição de dois motores de 10,70 MW cada, aos 85 s e 110 s, aumentou significativamente a demanda de potência. Considerando as cargas de MT e BT, os resultados indicam um aumento da potência total das cargas para 70,42 MW, sendo 49,03 MW das cargas originais e 21,39 MW dos motores adicionais (Tabela IV). Esse aumento da demanda superou a capacidade dos geradores, ocasionando uma queda abrupta da tensão de 11 kV para 7 kV aos 110 s, como ilustrado na Fig. 8. Esse colapso comprometeu a estabilidade do sistema, resultando na perda no fornecimento de energia.

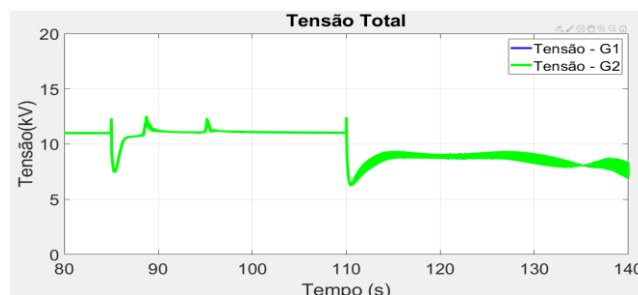


Fig. 8. Cenário 5: dois geradores a gás e sem WECs - Tensão dos geradores antes e após a partida dos motores.

F. Cenário 6: dois geradores a gás e dois WECs com dois motores.

Neste cenário, é analisado a partida de dois motores (M3 e M4) de grande porte, alimentados por dois geradores a gás e dois WECs. Este cenário evidencia a contribuição dos WECs para a estabilidade da tensão durante a partida dos motores. A Fig. 9 mostra a potência reativa fornecida pelos geradores G1 e G2, bem como os eólicos WEC1 e WEC2. A integração dos WECs no SEP da FPSO foi decisiva para evitar o colapso de tensão, especialmente durante a partida direta dos dois motores de 10 MW cada, aos 110s.

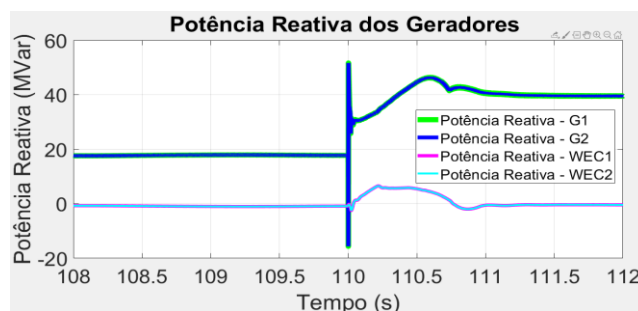


Fig. 9. Cenário 6: dois geradores a gás e dois WECs - Potências reativas dos geradores antes e após a partida de motores.

A Fig. 10 ilustra o compartilhamento de potência ativa entre os geradores a gás e os WECs. O WEC1 foi conectado ao sistema em 40 s, mas, devido aos processos de conversão AC/CC/AC do conversor back-to-back e às características do cabo umbilical, começou a injetar 10 MW apenas aos 55 s. Já o WEC2 foi conectado em 60 s, começando a injetar a potência ativa de 10 MW no instante de tempo 75 s, totalizando 20 MW os dois WECs. Consequentemente, a potência ativa dos geradores a gás (G1 e G2) foi reduzida em 10 MW cada.

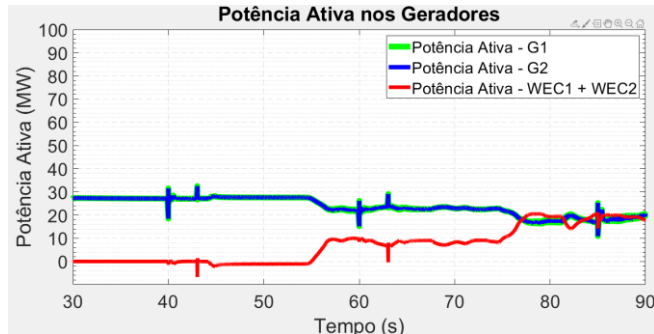


Fig. 10. Cenário 6: dois geradores a gás e dois WECs - Potência ativa dos geradores antes e após a partida de motores

A Fig 11 ilustra a estabilidade de tensão do sistema, mantendo a tensão em 11 kV após a partida dos dois motores de grande porte (M3 e M4). A integração dos WECs foi fundamental para garantir estabilidade de tensão e aliviar a carga dos geradores a gás, assegurando a continuidade e confiabilidade do fornecimento de energia na FPSO.

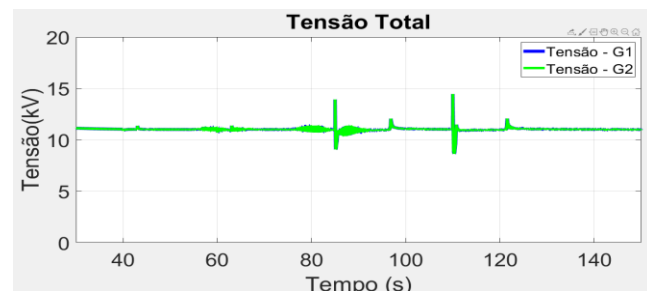


Fig. 11. Cenário 6: dois geradores a gás e dois WECs - Tensão dos geradores antes e após a partida dos motores.

VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho contou com apoio da Fundação e Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) sob o proc. 2022/15423-3, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob os procs. 309297/2021-4 e 317175/2023-8, e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) Código de Financiamento 001.

VII. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou os impactos da integração de geradores eólicos (WECs) no sistema elétrico de uma FPSO, analisando diferentes cenários que combinando geradores a gás e WECs. O objetivo foi compreender como essas combinações de operações influenciam a potência ativa, a potência reativa e a estabilidade do sistema da FPSO.

Nos cenários que incluíam WECs, observou-se que a geração eólica contribuiu significativamente para aliviar o carregamento dos geradores a gás, resultando também em uma redução substancial das emissões de CO₂. A análise em

regime permanente revelou uma diminuição de 25% nas emissões de CO₂, um avanço importante para a mitigação dos impactos ambientais da operação offshore.

A integração de dois WECs garantiu uma distribuição uniforme da potência ativa, especialmente durante a partida de motores de alta potência. O controle *droop* nos WECs desempenhou um papel crucial ao ajustar a potência reativa, estabilizando a tensão e evitando quedas de tensão que poderiam comprometer a operação da FPSO, especialmente durante a partida de motores. Além disso, os WECs foram fundamentais para compensar a carga adicional imposta pelos motores durante a partida direta, garantindo que a tensão do sistema se mantivesse dentro dos limites aceitáveis, conforme estabelecido pela norma IEC 61892-2. Esse estudo destaca a importância da integração de fontes renováveis, como os WECs, para aumentar a eficiência e a sustentabilidade das plataformas offshore, ao mesmo tempo em que melhora a estabilidade do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS

- [1] AP-42, Stationary Internal Combustion Sources, 5th ed. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2024, Sec. 3.1, Table 3.1-1.
- [2] M. F. Oliveira, "Metodologia para aplicação de fontes renováveis de energia elétrica em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural," Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013".
- [3] K. S. Medeiros et al, *Melhoria da qualidade de energia de plataforma offshore de petróleo e gás com alta penetração de energia eólica e armazenamento de energia*, "Eletrônica de Potência, vol. 30, p. e202524, 2025.
- [4] P. F. Schmitz et al., Technical feasibility of integrating an offshore wind energy conversion system with an FPSO." 2022.
- [5] M. S. Dall Asta et. al, "'Offshore wind energy conversion system connected to a floating production storage and offloading unit: electrical aspects" in Proc. IEEE ECCE 2023, in press".
- [6] Equinor, Hywind Tampen., *The world's first floating wind farm to power oil and gas platforms* [Online]. Available: <https://www.equinor.com/energy/hywind-tampen>. [Acesso: 3, Abril 2025].
- [7] Senado Federal, *Marco legal das eólicas offshore é aprovado em comissão e segue para o Plenário*, "Senado Federal Notícias [Online]. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/40151309>. [Acesso em: 3 abr. 2025].
- [8] PETROBRAS, *Petrobras aprova Plano Estratégico 2024-2028+ com investimentos de US\$ 102 bilhões*. 2023. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/w/institucional/petrobras-aprova-plano-estrategico-2024-2028-com-investimentos-de-us-102-bi>. Acesso em: 3 Abril. 2025.
- [9] F. A. S. Gonçalves et al, "Estratégias para Modelagem de Motores de Indução e Estudo de Caso em uma Plataforma Marítima de Petróleo. PCIC Brasil Petroleum and Chemical Industry Conference, 2024".
- [10] F. T. Moreira, H. M. A. Antunes, and S. Magalhaes, Modelagem computacional do sistema elétrico de uma plataforma de petróleo," Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, vol. 2, no. 1, pp. 1–14, 2022.
- [11] H. M. A. Antunes, D. I. Brandao, V. H. M. Biajo, M. H. S. Alves, F. S. Oliveira, and S. M. Silva, Floating, Production, Storage, and Offloading Unit: A Case Study Using Variable Frequency Drives," IEEE Trans Ind Appl, pp. 1–9, 2023.
- [12] M. P. de Santana et al, "Modeling and Tuning of Speed Regulators for FPSOs Generation Systems," in 2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP), IEEE, Nov. 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/SPEC56436.2023.10408478".

- [13] A. L. Sheldrake, Handbook of Electrical Engineering: For Practitioners in the Oil, Gas, and Petrochemical Industry. Hoboken, NJ, USA, 2016.
- [14] F. L. PAES, Contribuições ao gerenciamento de potências em plataformas marítimas de petróleo através do controle coordenado de conversores eletrônicos. 2024. 161 f. Tese (Doutorado Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- [15] J. B. O. Reis et al, "Análise do Colapso de Tensão em Plataformas FPSO com Integração de Geradores Eólicos Offshore," em 2024 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Brasil (PCIC Brasil), 2024".
- [16] R. Dias, "Análise da viabilidade de utilização de geração eólica offshore para eletrificação de plataformas de petróleo," Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2018".
- [17] L. C. Souza et al, "Análise computacional do sistema elétrico de potência de uma plataforma FPSO de petróleo em regime permanente," in 2024 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Brasil (PCIC Brasil), IEEE, Apr. 2024, pp. 1–8, doi: 10.1109/PCICBrasil54376.2024.105".
- [18] P. F. Castro, "Análise de confiabilidade do sistema elétrico de uma plataforma de produção de petróleo e gás," Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020".
- [19] P. C. Sen, Principles of electric machines and power electronics, 2nd ed., vol. 1, John Wiley & Sons, 2007, pp. 100–150.
- [20] NBR IEC 61892-1-2-3, Unidades marítimas fixas e móveis - Instalações elétricas, ABNT, 2016.
- [21] Rolls-Royce, techreport, Datasheet: Industrial RB211 Generic G62/GT62 60Hz Simplified Governor Model. 2006.
- [22] Brush, Computer representation of brushless excitation system," Tech. Rep. 2005, pp. 105–125.
- [23] T. Ackermann, Wind power in power systems, John Wiley & Sons, 2012..
- [24] General Electric (GE), *General Electric (GE), "Haliade-X offshore wind turbine,"* 2023. [Online]. Available: <https://www.gevernova.com/wind-power/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine> [Accessed: Apr. 3, 2025].
- [25] Siemens Gamesa, *SG 14-236 DD offshore wind turbine,"* 2023. [Online]. Available: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLlibrary/Files/24592a22-7983-44f1-6455-08dcc8d7a892/Data> [Accessed: Apr. 2, 2025].
- [26] SENGE-SC, *Dogger Bank - o maior parque eólico do planeta,"* 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.senge-sc.org.br/confirma-imagens-do-dogger-bank-o-maior-parque-eolico-do-planeta/>. [Acesso em: 3 abr. 2025]..
- [27] S. D'Arco et al, *Droop regulated VSCs for island operation of future offshore systems,"* in 2011 IEEE Trondheim PowerTech, IEEE, 2011.
- [28] C. A. Ogunbode, R. Doran and G. Böhm, "Exposure to the IPCC special report on 1.5 C global warming is linked to perceived threat and increased concern about climate change," *Climatic Change*, vol. 158, p. 361–375, 2020.