

Modelagem Computacional do Sistema Elétrico de uma Plataforma de Petróleo

Felipe Thomazi Moreira * Hélio Marcos André Antunes *
Sidelmo Magalhães Silva **

* *Universidade Federal de Minas Gerais - MG, (e-mails: fthomazimoreira@gmail.com; sidelmosilva@gmail.com).*

** *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo - ES, CEP 29075-910 (e-mail: helio.antunes@ufes.br)*

Abstract: Oil and natural gas are very important energy sources on the planet, representing a very significant percentage in the energy matrix, not only in Brazil, but also worldwide. In this context, Brazil has an extremely privileged geographic position, a fact that was reinforced when, in 2007, the discovery of pre-salt reserves was announced, where it is estimated the presence of up to 176 billion barrels of oil equivalent. For the exploration of this reservoir, the development of new offshore platforms is planned, mainly FPSOs - *Floating Production Storage and Offloading*, which rely on highly complex industrial systems, requiring systems of great power, with large machines and, consequently, high-capacity electrical generators. Thus, this work aims to model the isolated electrical system of an FPSO in order to be able to carry out power flow and short circuit studies quickly and effectively. The methodology consists of using real data from an oil platform, modeling the system using OpenDSS *software* and, when possible, comparing results obtained from other models or conventional values found in the literature.

Resumo: O petróleo e o gás natural são fontes de energia muito importantes no planeta, representando uma porcentagem bastante significativa na matriz energética não só brasileira, mas também mundial. Nesse contexto, o Brasil apresenta posição geográfica extremamente privilegiada, fato que foi reforçado quando, em 2007, foi anunciada a descoberta das reservas do pré-sal, onde estima-se a presença de até 176 bilhões de barris de óleo equivalente. Para a exploração desse reservatório, é projetado o desenvolvimento de novas plataformas marítimas, principalmente as FPSOs - *Floating Production Storage and Offloading*, que contam com sistemas industriais de alta complexidade, exigindo sistemas de grandes potências, com máquinas de grande porte e, conseqüentemente, geradores elétricos de alta capacidade. Assim, esse trabalho visa modelar o sistema elétrico isolado de uma FPSO de modo a conseguir realizar estudos de fluxo de potência e de curto-circuito de forma rápida e eficaz. A metodologia consiste na utilização de dados reais de uma plataforma de petróleo, na modelagem do sistema por meio do *software* OpenDSS e, quando possível, na comparação de resultados obtidos por outros modelos ou valores convencionais encontrados na literatura.

Keywords: FPSOs; Industrial Electrical Systems; Modeling; Power flow; Fault, OpenDSS.

Palavras-chaves: FPSOs; Sistemas Elétricos Industriais; Modelagem; Fluxo de Potência; Curto-circuito; OpenDSS.

1. INTRODUÇÃO

Apesar do crescente desenvolvimento da utilização de fontes renováveis de energia, o petróleo e o gás natural ainda são fontes muito importantes no planeta. A matriz energética, que apresenta o conjunto de fontes de energia utilizadas para gerar qualquer forma de energia, podendo ser cinética, elétrica, entre outras corrobora com tal fato. Na matriz energética mundial de 2018, o petróleo e seus derivados eram responsáveis por 31,5% da composição da mesma, além de 22,8% serem representados por gás natural (IEA, 2020). No cenário brasileiro, 34,3% da matriz é composta por petróleo e derivados e 12,2% por gás natural (BEN,2020). As projeções de longo prazo de demanda por

petróleo, no mundo, apontam que o consumo de petróleo pode chegar a 105 milhões de barris por dia (IBP, 2019).

Aliada às projeções citadas, em 2007, foi anunciada a descoberta das reservas do pré-sal. Este é um conjunto de reservatórios de óleo e gás, que se encontra abaixo da camada de rocha de sal, em uma região que passa por Santa Catarina até o Espírito Santo (IBP, 2019). Desde o ano de 2015, o pré-sal já é responsável por mais de metade da produção de petróleo no país.

Para a melhor exploração desse reservatório, é projetado o desenvolvimento de novas plataformas marítimas, principalmente após a descoberta dos campos de Mero e Búzios. Levando em consideração que a camada de rocha de sal sobre as reservas pode ter uma profundidade de até 5000

m, há um grande esforço tecnológico para a extração de óleo e gás. Assim, essas plataformas contam com sistemas industriais de alta complexidade, exigindo sistemas de grandes potências, com máquinas de grande porte e, conseqüentemente, geradores elétricos de alta capacidade.

Dentre os tipos de plataforma, destaca-se, neste trabalho, a FPSO - *Floating Production Storage and Offloading*, a mais utilizada para a exploração de águas profundas e ultraprofundas, também é flutuante, usualmente, convertida a partir de navios petroleiros, sendo capaz de produzir, armazenar e transferir petróleo e gás natural, podendo operar a grandes distâncias da costa (PELUCCHI, 2019).

Existem vários estudos, como os trabalhos de Oliveira (2013) e Opedal (2017), visando a integração de sistemas de geração de energia, principalmente por meio de fontes renováveis, como parques eólicos *offshore*, com as plataformas marítimas. Entretanto, atualmente, em grande parte das UEPs¹, a geração de energia elétrica é realizada na própria FPSO, dando origem a um sistema elétrico isolado.

Os sistemas elétricos isolados são definidos como aqueles não conectados ao SIN (Sistema Interligado Nacional). Estes apresentam diferentes dificuldades, quando comparados àqueles conectados ao SIN, podendo classificá-los em três grandes áreas: oscilação nos níveis de tensão, capacidade insuficiente para a partida de motores e transitórios de tensão e frequência (MARTINS et al., 1996). Além disso, é válido ressaltar que a alta potência dos geradores, nos sistemas elétricos embarcados das plataformas, aliada à baixa impedância, característica de um sistema compacto, promove níveis altíssimos de curto-circuito, necessitando de dispositivos de proteção com alta eficácia e, conseqüentemente, mais caros.

Dessa forma, este trabalho visa modelar o sistema elétrico do sistema elétrico isolado de uma UEP, com o intuito de, a partir da modelagem proposta, conseguir analisar, por meio de estudos de regime permanente e dinâmico, os diferentes cenários, ou as diferentes contingências que podem afetar o funcionamento do mesmo.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

2.1 A plataforma do tipo FPSO

Primeiramente, revisitando o conceito de FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), é um sistema flutuante de exploração de óleo e gás, que abrange em uma única unidade funções de produção, armazenamento e descarregamento para outras embarcações. A sua estrutura pode ser originada da conversão de navios antigos, como embarcações VLCC (*Very Large Crude Carrier*), ou a partir de um novo navio. Estes sistemas vêm superando as plataformas semi-submersíveis, principalmente pela capacidade de armazenamento, sendo esta o fator preponderante na diferença entre os dois sistemas (MEDEIROS, 2015). Na Figura 1 é mostrado um exemplo desse sistema.

2.2 Geração de Energia Elétrica

Em Thorsen e Dalva (1995), é citado que grande parte da potência demandada em uma plataforma *offshore* é

¹ UEP - Unidade Estacionária de Produção.



Figura 1. FPSO Cidade de São Paulo, ancorado no campo de Sapinhoá, Polo Pré-Sal da Bacia de Santos, em lâmina d'água de 2140 metros, a 310 km da costa.

suprida por meio de geradores trifásicos, 60 Hz, acoplados à turbina à gás. Além disso, também há a presença de geradores acionados por meio de motores à diesel, especialmente para situações de emergência.

Já em Martins et al. (1996), a geração de energia elétrica em uma unidade de produção *offshore* é dividida em dois blocos: geração principal e geração essencial. Em sistemas de pequeno porte, ou seja, com capacidade instalada menor que 10 MVA, usualmente, as cargas essenciais são conectadas a um gerador de emergência. Nos sistemas com maior capacidade, além dos geradores essenciais, também é comum a existência de um gerador de emergência, porém nele estará conectado apenas as cargas atreladas à garantia da vida humana. O autor cita que em plataformas de pequeno porte há a utilização de motores diesel como força motriz não somente para geração essencial, como também para a principal.

No caso do projeto da FPSO estudado no presente trabalho, assim como citado em Martins et al. (1996), a geração também é dividida em dois grupos: principal e essencial. O primeiro conta com quatro geradores trifásicos, acoplados a turbinas a gás aero derivadas, com capacidade de 36.25 MVA. Já o segundo conta com dois geradores trifásicos acoplados a motores de combustão interna, com capacidade de 3362 kVA, sendo prevista inserção de mais dois elementos do mesmo tipo no futuro. É válido ressaltar que os geradores não são todos conectados no sistema, sendo que os mesmos entram em funcionamento a partir da demanda de carga, ou seja, do modo de operação da plataforma e respeitando o critério de confiabilidade de N-1.

2.3 Distribuição

Souza (2015) descreve, de forma resumida, a distribuição de energia típica em uma plataforma *offshore* como sendo feita em um nível primário por um sistema radial, onde alimentadores de 13,8 kV chegam a barramentos de um painel principal, e em um nível secundário por um sistema seletivo de alimentadores. Na FPSO em questão, o cenário

é exatamente o descrito, onde as linhas de distribuição possuem extensão menor do que 1 km e, conseqüentemente, possuem uma baixa impedância quando comparadas com aquelas presentes na rede elétrica usual.

2.4 Cargas

Como citado em Souza (2015), as cargas elétricas de UEP são predominantemente formadas por motores elétricos, o que é justificado pela utilização de máquinas de grande porte em sistemas de compressão de gás e injeção de água. Assim, essas máquinas são definidas como os equipamentos mais importantes no ponto de vista de produção de óleo e gás.

É válido ressaltar que, assim como a geração de energia, o perfil de carga do sistema muda a partir do modo de operação da plataforma. Desse modo, para facilitar a descrição do sistema, as cargas serão descritas detalhadamente na subseção seguinte, associadas às situações operacionais trabalhadas.

2.5 Os modos de operação analisados

Dois modos de operação da FPSO são analisados: *Production* e *Production/Offloading*. As representações dos sistemas elétricos equivalentes a esses cenários podem ser visualizadas, respectivamente, nas Figuras 2 e 3.

A descrição detalhada dos sistemas, para ambos os modos, é apresentada a seguir:

Production:

- Três geradores principais: 111-EGEG-0100A, 111-EGEG-0100B e 111-EGEG-0100C;
- Painéis elétricos *Topsides* e *Vessel* ativos, com *bus-tie* interligando os barramentos A e B;
- No barramento *Topsides* temos 15 motores na barra A e 7 motores na barra B;
- Carga equivalente em 11 kV, situada no *Topsides*;
- Carga equivalente em baixa tensão: três no *Topsides* e duas no *Vessel*.

Production/Offloading:

- Três geradores principais: 111-EGEG-0100A, 111-EGEG-0100B e 111-EGEG-0100C;
- Um gerador essencial: 111-EGEG-5100;
- Painéis elétricos *Topsides* e *Vessel* ativos, com *bus-tie* interligando os barramentos A e B;
- No barramento *Topsides* temos 15 motores na barra A e 7 motores na barra B;
- Carga equivalente em 11 kV, situada no *Topsides*;
- Carga equivalente em baixa tensão: três no *Topsides* e duas no *Vessel*.

3. MODELAGEM NO OPENDSS

3.1 O OpenDSS

O DSS começou a ser desenvolvido em 1997 na empresa Electrotek Concepts, Inc. pelos pesquisadores Roger Dugan e Thomas McDemmont. No ano de 2004, o programa foi comprado pelo EPRI e, em 2008, o EPRI apresentou

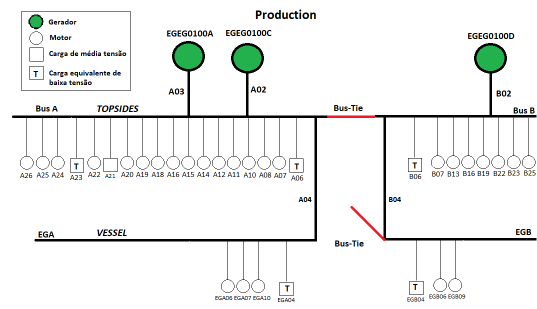


Figura 2. Diagrama unifilar do modo *Production*.

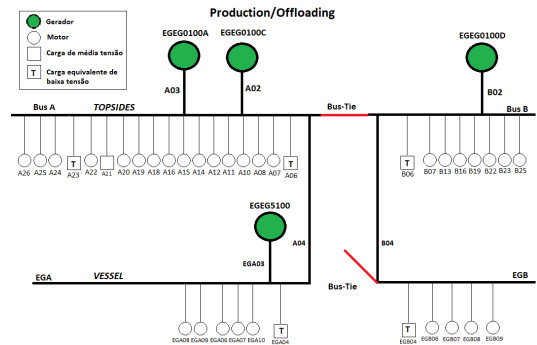


Figura 3. Diagrama unifilar do modo *Production/Offloading*.

o software OpenDSS. Como o prefixo *Open* sugere, ele foi lançado sob a licença de código aberto (SEXAUER, 2016).

O OpenDSS tem a capacidade de realizar a maioria das análises em regime permanente senoidal (RMS) usualmente praticadas para análise de sistemas de distribuição. É válido ressaltar também que o programa foi projetado para ser capaz de atender os novos tipos de análise necessárias para a integração das *Smart Grids*. Assim, muitos dos recursos que o software possui foram originalmente destinados ao suporte no estudo de sistemas que contém geração distribuída. Ainda, uma das suas principais vantagens em relação a outros programas de simulação de sistemas elétricos é o fato do OpenDSS ser um software *open source*, ou seja, de código aberto, que pode ser expandido e modificado de modo a atender futuras necessidades atreladas à evolução dos sistemas, ou necessidades específicas dos usuários (SEXAUER, 2016).

3.2 Geradores síncronos

Os geradores síncronos trifásicos foram modelados por meio de dois objetos no OpenDSS: o elemento *Vsource* e um objeto *Generator*. Em uma primeira vista, tal modelagem pode parecer estranha pelo fato de um gerador ser representado, usualmente, por uma fonte de tensão ou por um bloco gerador, aliás, modelos comumente usados no software *Simulink*. Entretanto, como mencionado anteriormente, pela forma em que o software foi projetado, é necessária a presença de ao menos um elemento *Circuit* (ou *Vsource*).

No programa, o objeto *Vsource* é equivalente a uma fonte de tensão atrás de uma impedância. Já o *Generator*, em estudos de fluxo de potência, é essencialmente tratado como uma carga negativa. Ou seja, é como se a fonte

de tensão fosse responsável por alimentar o circuito e o objeto do gerador tivesse a função de atribuir um ponto de operação àquela fonte. As Tabelas 1 e 2 demonstram, respectivamente, os atributos utilizados para declarar tais objetos.

Tabela 1. Parâmetros utilizados para declarar objeto *Vsource*.

Nomenclatura	Descrição
phases	Número de fases da fonte de tensão
bus1	Barra em que a fonte de tensão será conectada
baseKV	Tensão base (kV)
baseMVA	Potência base (MVA)
puZ1	Impedância de sequência positiva

Tabela 2. Parâmetros utilizados para declarar objeto *Generator*.

Nomenclatura	Descrição
phases	Número de fases do gerador
bus1	Barra em que o gerador será conectado
kv	Tensão nominal do gerador (kV)
MVA	Potência nominal do gerador (MVA)
kW	Potência ativa do gerador (kW)
Model	Modelo do gerador

3.3 Motores de indução

Na FPSO, os motores, principais cargas do sistema elétrico, são de indução, com rotor do tipo gaiola de esquilo dupla. O objeto que modela máquinas de indução no OpenDSS é o *IndMach012*. Na solução de fluxo de potência do programa a máquina de indução também é essencialmente uma impedância. A Tabela 3 demonstra os atributos utilizados para declarar esse objeto.

3.4 Cabos

Os cabos são modelados por linhas no OpenDSS, representadas pelo elemento *Line*. É considerado, por simplicidade, que não há impedância mútua entre as fases. O sistema elétrico da plataforma, que é objeto de estudo do presente trabalho, apresenta cabos trifásicos, sem o condutor neutro. Outra consideração feita na modelagem realizada é que a impedância da linha equivalente é dada pela impedância por quilômetro do cabo dividida pelo número de condutores. Os atributos utilizados para declarar esse objeto são apresentados na Tabela 4.

3.5 Transformadores

Os transformadores abaixadores da plataforma FPSO apresentam configuração delta-estrela. A modelagem desses elementos no OpenDSS é realizada por meio do objeto *Transformer*. Os atributos utilizados para declarar esse objeto são apresentados na Tabela 5.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para declarar objeto *IndMach012*.

Nomenclatura	Descrição
phases	Número de fases da máquina
bus1	Barra em que a máquina será conectada
kv	Tensão nominal da máquina (kV)
kW	Potência ativa da máquina (kW)
kVA	Potência aparente da máquina (kVA)
puRs	Resistência de estator (pu)
puXs	Reatância de estator (pu)
puRr	Resistência de rotor (pu)
puXr	Reatância de rotor (pu)
puXm	Reatância de magnetização (pu)

Tabela 4. Parâmetros utilizados para declarar objeto *Line*.

Nomenclatura	Descrição
phases	Número de fases da linha
bus1	Primeira barra conectada à linha
bus2	Segunda barra conectada à linha
length	Comprimento da linha
units	Unidade de medida do comprimento da linha
linecode	Elemento de suporte

Tabela 5. Parâmetros utilizados para declarar objeto *Transformer*.

Nomenclatura	Descrição
Phases	Número de fases do transformador
wdg	Lado a qual está se referindo (1, 2 ou 3) (Ω/km)
bus	Barra que o lado a qual está se referindo está conectado
conn	Configuração
kV	Tensão nominal
Kva	Potência nominal

3.6 Cargas

O diagrama unifilar da plataforma estudada apresenta cargas equivalentes em média e em baixa tensão, ambas foram modeladas no OpenDSS por meio do objeto *Load*. Este elemento de conversão de energia pode ter vários modelos, o que é definido no parâmetro *Model*. No caso da modelagem realizada, as cargas foram definidas como P e Q constantes (*Model=1*), definição mais comum para o estudo de fluxo de potência. Como dito para todos os elementos apresentados, há várias possibilidades para atribuição do elemento *Load* no programa. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros utilizados para declarar objeto *Load*.

Nomenclatura	Descrição
bus1	Barra em que a carga está conectada
Phases	Número de fases da carga
kV	Tensão nominal da carga (kV)
kW	Potência ativa da carga (kW)
kvar	Potência reativa da carga (kvar)

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos por meio da modelagem, utilizando o *software* OpenDSS, do sistema elétrico da plataforma. Ele será dividido em dois blocos: *Production* e *Production/Offloading*. Cada um destinado a apresentar os dados coletados nas simulações dos modos de operação da FPSO citados.

Os resultados contemplam a solução do fluxo de potência no programa, além do efeito da inserção de uma falta trifásica no circuito na barra *Topsides*. No código, tal falta é inserida no barramento A. Entretanto, caso a mesma acontecesse no barramento B, praticamente não haveria diferença, uma vez que há um *bus-tie* interligando tais barramentos. É válido ressaltar, mais uma vez, que o OpenDSS é um programa destinado ao regime permanente, de modo que o seu modo dinâmico é um regime quase estático.

4.1 Production

Primeiramente, para demonstrar a equivalência do sistema modelado, é coletado no OpenDSS o diagrama unifilar do circuito, no modo *Production*, apresentado na Figura 4, onde a espessura das linhas é diretamente proporcional à quantidade de potência que está fluindo de um elemento para o outro.

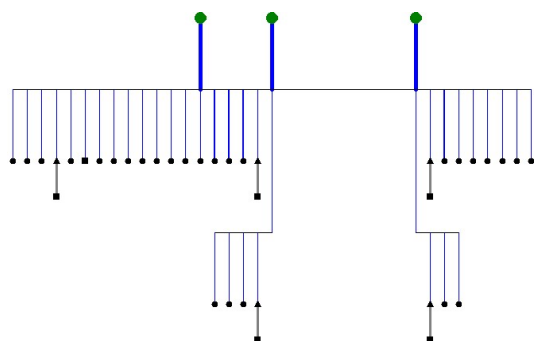


Figura 4. Diagrama unifilar do modo *Production* extraído do *software* OpenDSS.

Os primeiros resultados obtidos consistem na resolução do fluxo de potência, método de solução no OpenDSS denominado *PowerFlow*. Com a realização da simulação no *software*, foi possível obter dados de potência ativa, potência reativa, potência aparente e corrente fluindo pelo circuito. Com o intuito de simplificar a visualização dos

valores obtidos, são apresentados, na Tabela 7, o fluxo de potência e corrente entre elementos cruciais do sistema, de modo a cobrir todos os componentes que a modelagem se propõe a simular.

Tabela 7. Resultados específicos de fluxo de potência obtidos no modo *Production*.

Do elemento	Para o Elemento	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (Mvar)	Perda Ativa (kW)	Potência Aparente (MVA)	Corrente (kA)
111-EGEG-0100C	Bus A (Topsides)	28,87	14,04	104,56	32,10	1,68
Bus A (Topsides)	EGA (Vessel)	3,53	2,33	1,38	4,23	0,22
Bus A (Topsides)	441EEP-T2101A	3,47	1,78	0,70	3,90	0,20
441EEP-T2101A	Carga (Baixa) - A06BT	3,46	1,78	13,62	3,90	0,20
Bus A (Topsides)	Water Injection Pump A (A07)	13,05	5,65	56,57	14,23	0,75

Além disso, na resolução do fluxo de potência, obviamente, são fornecidos os dados de tensão em todas as barras do sistema. Também como uma forma de simplificar a visualização dos dados coletados, são apresentados, na Tabela 8, as tensões resultantes, em pu, de alguns elementos cruciais do circuito, como geradores principais, barramentos dos painéis e transformadores. Outro resultado oriundo da resolução de fluxo de potência é o nível de tensão ao longo do comprimento do alimentador, demonstrado na Figura 5.

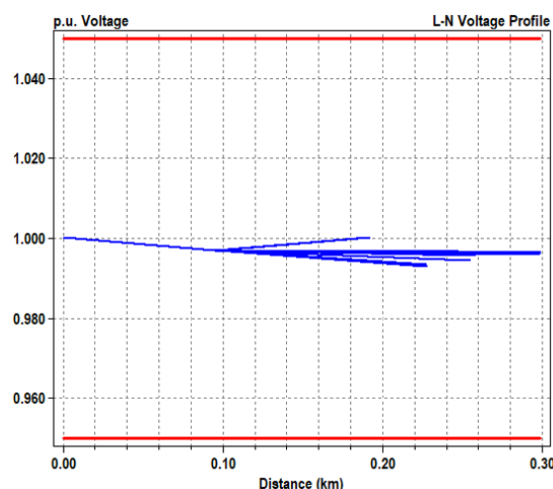
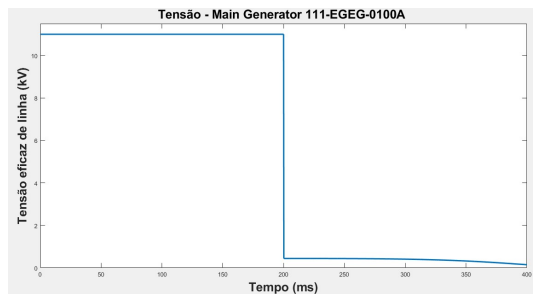


Figura 5. Diagrama de tensão ao longo do comprimento do alimentador do modo *Production*, extraído do *software* OpenDSS.

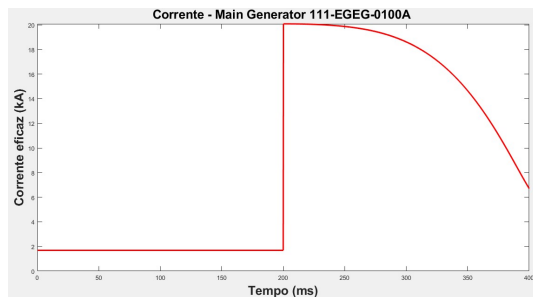
Tabela 8. Resultados específicos obtidos para níveis de tensão nos elementos do sistema, no modo *Production*.

Elemento	Tensão (pu)
111-EGEG-0100A	1,00
111-EGEG-0100B	1,00
111-EGEG-0100C	1,00
Bus A (Topsides)	0,99
Bus B (Topsides)	0,99
EGA (Vessel)	0,99
EGB (Vessel)	0,99
441EPT2101A (BT)	0,99

Assim como para o problema do fluxo de potência, é possível observar o efeito de uma falta em todos os elementos do circuito. Entretanto, para simplificar a visualização dos resultados, foram coletadas as curvas de tensão e corrente em alguns elementos específicos, sendo eles: gerador principal, motor de grande porte (*Water Injection Pump A - A07*) e o barramento A do painel *Topsides*, local do curto-circuito trifásico. As Figuras 6, 7 e 8 exibem, respectivamente, as curvas adquiridas e a Tabela 9 resume os valores encontrados na simulação dinâmica. Todas as curvas são resultantes de uma simulação que já inicia em regime permanente e uma falta trifásica é adicionada na *Bus A (Topsides)* após 200 ms.

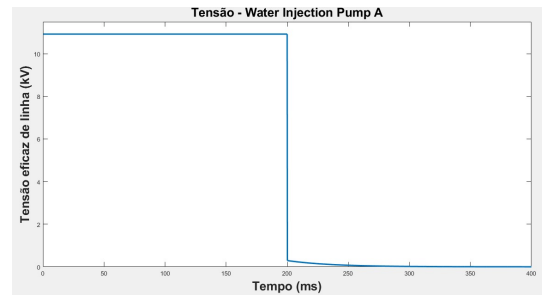


(a) Curva de tensão no gerador principal 111-EGEG-0100A, para o modo *Production*.

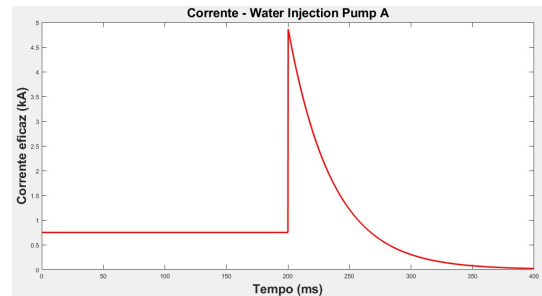


(b) Curva de corrente no gerador principal 111-EGEG-0100A, para o modo *Production*.

Figura 6. Curvas de tensão e corrente no gerador principal 111-EGEG-0100A obtidas na simulação com falta trifásica, para o modo *Production*.

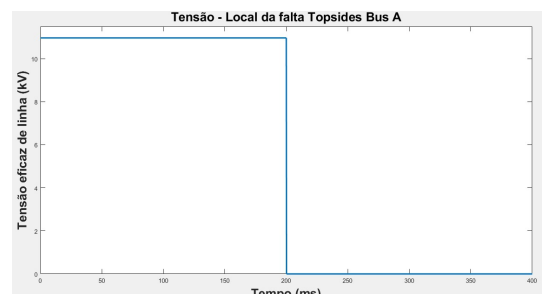


(a) Curva de tensão no motor *Water Injection Pump A*, para o modo *Production*.

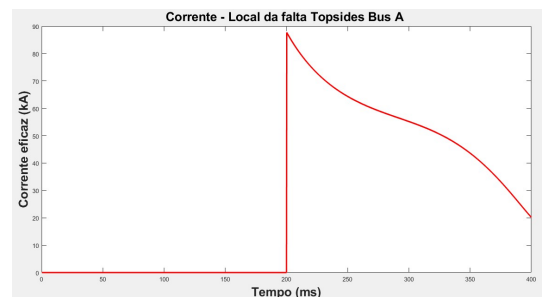


(b) Curva de corrente no motor *Water Injection Pump A*, para o modo *Production*.

Figura 7. Curvas de tensão e corrente no motor *Water Injection Pump A* obtidas na simulação com falta trifásica, para o modo *Production*.



(a) Curva de tensão no barramento A (*Topsides*), para o modo *Production*.



(b) Curva de corrente no barramento A (*Topsides*), para o modo *Production*.

Figura 8. Curvas de tensão e corrente no barramento A (*Topsides*) obtidas na simulação com falta trifásica, para o modo *Production*.

Tabela 9. Resumo dos resultados obtidos na simulação de falta trifásica no barramento A do *Topsides*, para o modo *Production*.

Elemento	Corrente Eficaz Máxima (kA)
Ponto de Falta	87,69
Gerador Principal	20,08
Water Injection Pump A (A07)	4,86

4.2 *Production/Offloading*

Assim como realizado para os resultados do *Production*, para demonstrar a equivalência do sistema modelado, é coletado no OpenDSS o diagrama unifilar do circuito, no modo *Production/Offloading*, apresentado na Figura 9, onde, novamente, a espessura das linhas está diretamente relacionada à quantidade de potência fluindo pelas mesmas.

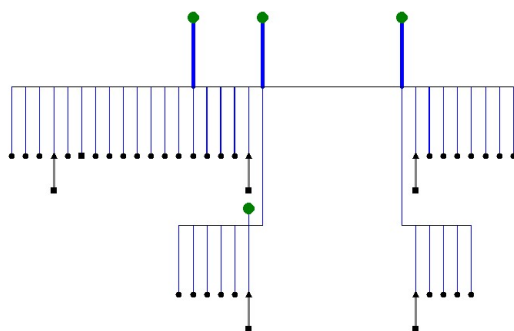


Figura 9. Diagrama unifilar do modo *Production/Offloading* extraído do software *OpenDSS*.

Os primeiros resultados adquiridos na simulação do modo *Production/Offloading* são oriundos da resolução do fluxo de potência no OpenDSS. Com a realização da mesma, de modo análogo ao *Production*, foi possível obter os dados de potência ativa, potência reativa, potência aparente e corrente fluindo pelo circuito. Com o intuito de simplificar a visualização dos valores obtidos, são demonstrados, na Tabela 10, o fluxo de potência e corrente entre alguns elementos do sistema, de modo a cobrir todos os tipos de componente que a modelagem se propõe a ser capaz de simular.

Com a solução do fluxo de potência, também é possível obter a tensão em todas as barras do circuito. Novamente com o intuito de facilitar a visualização dos valores obtidos, na Tabela 11, são apresentados os resultados para elementos específicos do sistema, mais uma vez buscando cobrir todos os tipos de componente que a modelagem se propõe a conseguir representar. Além disso, novamente, é mostrado na Figura 10, o diagrama de tensão por comprimento na extensão da plataforma.

Tabela 10. Resultados específicos de fluxo de potência obtidos no modo *Production/Offloading*.

Do elemento	Para o Elemento	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (Mvar)	Perda Ativa (kW)	Potência Aparente (MVA)	Corrente (kA)
111-EGEG-0100C	Bus A (Topsides)	29,21	14,38	107,46	32,56	1,71
Bus A (Topsides)	EGA (Vessel)	2,21	1,91	0,92	2,92	0,15
Bus A (Topsides)	441EEP-T2101A	3,49	1,79	0,71	3,93	0,21
441EEP-T2101A	Carga (Baixa) - A06BT	3,49	1,79	13,79	3,93	0,21
Bus A (Topsides)	Water Injection Pump A (A07)	13,05	5,66	56,53	14,23	0,75
111-EGEG-5100	EGA (Vessel)	3,62	1,87	6,76	4,07	0,21

Tabela 11. Resultados específicos obtidos para níveis de tensão nos elementos do sistema, no modo *Production/Offloading*.

Elemento	Tensão (pu)
111-EGEG-0100A	1,00
111-EGEG-0100B	1,00
111-EGEG-0100C	1,00
Bus A (Topsides)	0,99
Bus B (Topsides)	0,99
EGA (Vessel)	0,99
EGB (Vessel)	0,99
441EEP-T2101A (BT)	0,99
111-EGEG-5100	0,99

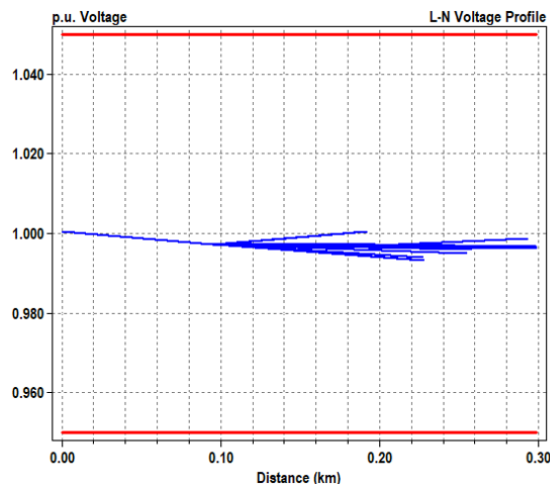


Figura 10. Diagrama de tensão ao longo do comprimento do alimentador do modo *Production/Offloading*, extraído do software *OpenDSS*.

Da mesma maneira que foi realizada na apresentação dos resultados de simulação dinâmica para o modo *Production*, serão exibidos apenas alguns resultados mais relevantes. No caso, as curvas encontradas têm o mesmo formato que as apresentadas para o modo *Production*, alterando apenas a magnitude das mesmas. A Tabela 12 resume os valores encontrados. Novamente, os dados são resultantes de uma simulação que já inicia em regime permanente e uma falta trifásica é adicionada na *Bus A (Topsides)* após 200 ms.

Tabela 12. Resumo dos resultados obtidos na simulação de falta trifásica no barramento A do *Topsides*, para o modo *Production/Offloading*.

Elemento	Corrente Eficaz Máxima (kA)
Ponto de Falta	107,361
Gerador Principal	20,105
Water Injection Pump A (A07)	4,837

5. CONCLUSÕES

O objetivo proposto para o trabalho consiste em realizar uma modelagem computacional do sistema elétrico de uma FPSO. Tal enfoque foi dado em função da importância e do constante desenvolvimento de novas plataformas marítimas no planeta e, principalmente, no Brasil, desde a descoberta do pré-sal. Outros pontos preponderantes para o objetivo citado passam pela alta complexidade dos sistemas elétricos ilhados nas FPSOs e pela carência de modelos que consigam simular esses circuitos de maneira eficaz, com baixo tempo de processamento.

A metodologia do trabalho consistiu na obtenção dos dados elétricos da plataforma FPSO e na modelagem do sistema elétrico da mesma, por meio do *software* OpenDSS. Foram escolhidos dois modos de operação para a realização das simulações: *Production* e *Production/Offloading*. Para a criação dos modelos foi necessário o estudo do *software*, de modo a entender como cada elemento era representado, tanto na solução do fluxo de potência, quando em estudo dinâmico.

Para o modo de operação *Production*, pela ótica do fluxo de potência, a ideia da modelagem era conseguir obter a solução do fluxo em um ponto específico do sistema, isto é, com os geradores principais trabalhando no nível de tensão de 1 pu. Por meio dos resultados apresentados nesse trabalho, principalmente, na Tabela 8, é notório que a simulação está seguindo esse requisito. Além disso, observando os valores apresentados na Tabela 7, percebe-se também que os elementos demonstraram valores de potência muito próximos aos nominais. Ou seja, foi possível criar um modelo que retorna resultados coerentes para a solução de fluxo e que possui um tempo de processamento muito pequeno, na ordem de segundos.

Para o modo de operação *Production/Offloading*, também no ponto de vista do fluxo de potência, a ideia da modelagem foi exatamente a mesma: obter a solução de fluxo para os geradores trabalhando a 1 pu. Os resultados apresentados no presente trabalho também ilustram que tal objetivo foi alcançado, conseguindo, assim como no modo *Production*, criar um modelo que apresenta valores

coerentes de tensão e potência, possuindo um tempo de processamento praticamente irrelevante.

No estudo de curto-circuito, para ambos os modos de operação simulados, foi utilizada a inserção de uma falta trifásica no sistema. Os resultados de tensão e corrente, apresentados nas seções 4.1 e 4.2, demonstram coerência com o comportamento esperado dos elementos do sistema durante um curto-circuito trifásico. Dessa forma, o objetivo de conseguir modelar o sistema, no OpenDSS, com simulações de baixo tempo de processamento, foi alcançado, tendo em vista que para o estudo de curto-circuito o tempo gasto pelo programa também é, praticamente, irrelevante. É importante ressaltar, porém, que como o OpenDSS é um programa de regime permanente, a sua simulação dinâmica é quase estática, assim, o transitório nos componentes não é tão fielmente representado. Além disso, componentes DC presentes no circuito não são acrescentadas às curvas, uma vez que o *software* trabalha com valores eficazes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a equipe de engenheiros da Petrobras e o Laboratório TESLA da UFMG, que colaboraram bastante na realização desse estudo.

REFERÊNCIAS

- de Castro, P.F., Rodriguez, Y.P.M., and de Carvalho, F.B.S. (2020). Avaliação de parâmetros de confiabilidade aplicados a sistemas elétricos de plataformas tipo fpso com análise de fluxo de carga.
- de Medeiros, V.A. (2015). O estado da arte do fpso. *Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- Martins, M.O.P. et al. (1996). Simulação computacional do comportamento transitório do sistema elétrico de plataformas de petróleo.
- Oliveira, M.F.d. (2013). *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.
- Opedal, J.F. (2017). *Electrical Grid Study of Using Offshore Wind Power for Oil & Gas Offshore Installations.* Master's thesis, NTNU.
- Peluchi, C.S. (2019). *Modelagem do Sistema Elétrico Isolado de Uma Plataforma de Petróleo para Análise do Comportamento Dinâmico.* Master's thesis, UFES.
- Pereira, J.A.M. and de Jesus, J.D. (2015). Caracterização dos sistemas de geração elétrica dos fpsos em operação no Brasil. *Engevista*, 17(3), 433–443.
- Souza, A.S.d. (2015). Contribuição à estabilidade transitória de sistemas elétricos industriais de unidades estacionárias de produção de petróleo.
- Thorsen, O.V. and Dalva, M. (1995). A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries. *IEEE transactions on industry applications*, 31(5), 1186–1196.