

# Controle Cooperativo de Conversores de Potência em Plataformas de Produção de Petróleo e Gás

Felipe Leite Paes<sup>1,2</sup>, James Blayne Oliveira Reis<sup>1</sup>, Marcus Vinícius Maia Rodrigues<sup>1</sup>, Luis De Oro Arenas<sup>1</sup>, Flavio Alessandro Serrão Gonçalves<sup>1</sup>, Helmo Kelis Morales Paredes<sup>1</sup>, Fernando Pinhabel Marafão<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista UNESP, Sorocaba, SP 18087-180 Brasil (e-mail: felipe.paes@unesp.br)

<sup>2</sup> Instituto Federal de São Paulo, Sorocaba, SP 18095-410 Brasil (e-mail: paes.felipe@ifsp.edu.br)

---

**Abstract:** Considering the modernization of the power systems in oil and gas (O&G) platforms, energy efficiency improvements and the integration of renewable energy sources have pointed to new technologies and applications. Thus, the integration of frequency converters for the operation of high-power machines, electronic energy converters for coupling alternative sources and energy storage systems provide challenges in the scope of energy balance control and power quality. However, they also generate novel opportunities to be exploited under the platforms energy management systems. In this scenario, this article aims to evaluate a typical power system of O&G production platforms, especially in the perspective of the applying frequency converters as active elements in the cooperative control of power quality.

**Resumo:** No cenário de modernização do sistema elétrico das plataformas de produção de petróleo e gás, estratégias de eficiência energética e inserção de fontes alternativas de energia tem proporcionado novas aplicações na área. A integração de inversores de frequência para controle e operação de máquinas de elevada potência, conversores eletrônicos de energia para acoplamento de fontes alternativas e sistemas de armazenamento de energia proporcionam desafios no âmbito de controle do balanço energético e qualidade de energia elétrica (QEE), entretanto também geram oportunidades para exploração desses temas no gerenciamento do sistema elétrico da planta. Nesse cenário, esse artigo tem como objetivo a avaliação de um sistema elétrico típico de plataformas de produção de petróleo e gás (O&G), especialmente no contexto da aplicação de conversores de frequência como elementos ativos no controle cooperativo da qualidade de energia elétrica.

**Palavras-chaves:** Controle Cooperativo, Plataformas Offshore de Produção de Petróleo e Gás, Qualidade de Energia Elétrica.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Os recentes desafios ambientais, relacionados com o aumento da emissão de gases poluentes, incremento da demanda energética e avanços tecnológicos na área de energia elétrica e eletrônica de potência, promoveram ações globais voltadas a maior utilização de energias renováveis (Tedeschi et al., 2012). Em consonância com o tema, existem estudos e propostas para modernização do Sistema Elétrico de Potência (SEP) em plataformas de produção de petróleo e gás do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), visando a inserção de energias renováveis como alternativa na composição do suprimento de energia (Fard and Tedeschi, 2018).

No entanto, nesse segmento industrial a confiabilidade é uma premissa caracterizada de forma muito evidente em normas nacionais e internacionais de projetos, construção e operação de plataformas offshore, sendo que novas aplicações devem preceder de maturidade tecnológica para garantir sua viabilidade (Årdal, 2014) (Kumar and Zare, 2019). Nesse sentido, existem diversos estudos que exploram os riscos e

oportunidades do ponto de vista técnico e econômico em sistemas que incluem aplicações de energias renováveis (Dias, 2018). Entre as aplicações existem casos de sistemas isolados e sistemas conectados à rede elétrica de energia da costa (Yu et al., 2020).

Nas plataformas que operam de forma isolada, o SEP é alimentado por geradores movidos por turbinas a gás e/ou motores de combustão a diesel (Vitoi et al., 2019) e sua topologia é organizada em níveis de barramentos (magnitude de tensão/potência e funcionalidades/criticidade das cargas inerentes ao processo). Nesse contexto, a modernização do sistema elétrico das plataformas exige análises detalhadas sob a perspectiva de balanço energético, eficiência e QEE.

Entre as diversas oportunidades existentes, este trabalho tem como objetivo explorar a capacidade de operação multifuncional de conversores de energia do tipo VFD (*Variable Frequency Drive*), como parte da solução dos problemas de QEE existentes no SEP de uma plataforma de produção de petróleo e gás.

## 2. SEP TÍPICO DE UMA FPSO

A Fig. 1 apresenta um diagrama unifilar típico de uma plataforma FPSO operando de forma isolada. O SEP utilizado normalmente nas plataformas inclui gerador reserva e dispositivos de manobra entre os vários barramentos, permitindo maior confiabilidade na operação do sistema.

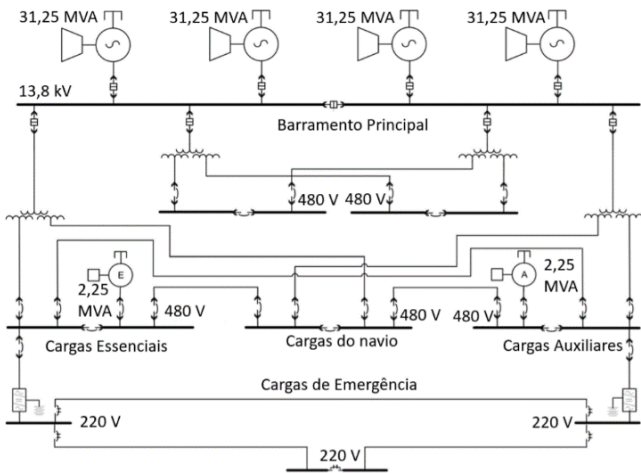


Fig. 1 – Diagrama unifilar típico de uma plataforma (Dias, 2018).

Na Fig. 1 é possível observar os diferentes níveis de tensão presentes no SEP, com geradores principais em média tensão alimentando o sistema (3 principais e 1 reserva) e as derivações/barramentos secundários atendendo as diferentes categorias de cargas. As cargas são organizadas em: não essenciais, essenciais, auxiliares e emergenciais.

As cargas/motores de potência elevada (5 a 15 MVA) estão conectadas no barramento principal em média tensão e podem ser acionadas de forma direta ou através de VFDs passivos ou ativos. A Fig. 2 apresenta um diagrama de bloco simplificado de um VFD ativo, com chaveamento no primeiro estágio, permitindo a aplicação de uma estratégia de controle multifuncional e cooperativo dos VFDs, tema que será discutido neste trabalho.

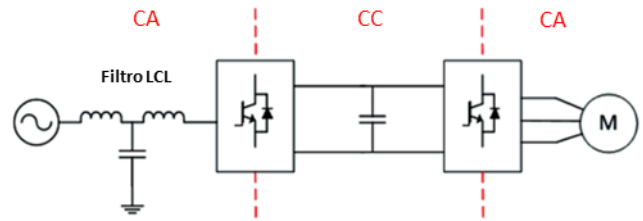


Fig. 2 – Diagrama de Bloco VFD ativo.

A aplicação de conversores multifuncionais tem sido um tema em estudo na área de microrredes de energia, com geradores de energia provenientes de arranjos fotovoltaicos, geradores eólicos ou sistemas de armazenamento de energia (Bonaldo, 2015). Utilizando a mesma perspectiva, é possível desenvolver uma solução utilizando os VFDs que estão instalados para atender motores/cargas no processo, como dispositivos para melhoria na QEE (da Rocha et al., 2021). No âmbito de técnicas de controle, diferentes estratégias já utilizadas em outras aplicações podem ser exploradas no cenário do SEP de uma plataforma. Controle do tipo local (Droop) pode ser uma opção de aplicação, como também técnicas que incluem coordenação entre os elementos ativos do SEP (da Rocha et al., 2021).

Assim, a estratégia descrita na próxima seção propõe o controle coordenado de inversores ou controle cooperativo para aprimoramento da QEE no SEP de uma plataforma de O&G. Para tanto, o sistema elétrico da FPSO foi simplificado conforme indicado na Fig. 3, na qual os geradores a gás da Fig. 1 foram simplificados por uma fonte de tensão ideal, alimentando dois motores/bombas através de VFDs ativos, enquanto o restante das cargas da FPSO foram modeladas através de um equivalente de cargas lineares e não lineares. O bloco “CARGAS” tem a finalidade de representar características de cargas típicas presentes em uma FPSO, entre elas: cargas não lineares (presença de VFDs passivos e outros equipamentos) e cargas lineares (motores sem acionamento eletrônico e com grande demanda de reativos).

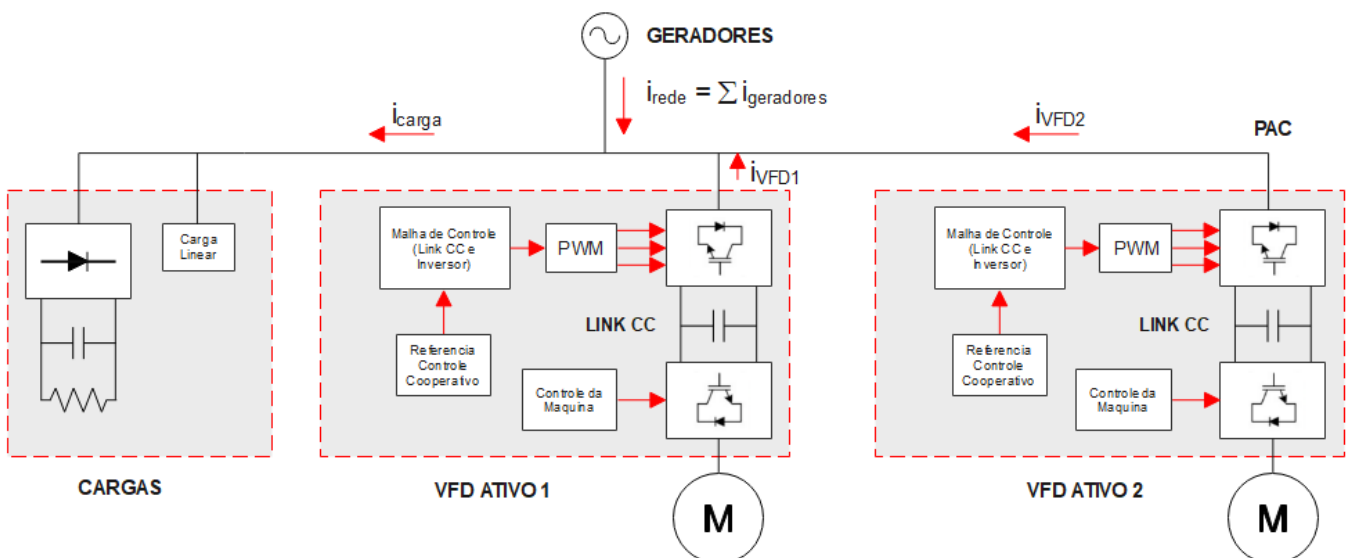


Fig. 3 – Esquemático simplificado do Sistema Elétrico de uma FPSO com inserção de VFDs ativos.

### 3. PROPOSTA DE CONTROLE COOPERATIVO DE INVERSORES EM PLATAFORMAS FPSO

Conforme supracitado, diversos trabalhos exploram o controle cooperativo de conversores eletrônicos conectados em microrredes de energia (Alonso, 2017), buscando diferentes soluções no gerenciamento dos dispositivos para desafios como: definição da melhor estratégia e infraestrutura de comunicação, intermitência da fonte de energia renovável, diferentes pontos de acoplamento (impedâncias entre os dispositivos), gestão da disponibilidade dos dispositivos entre outros (Alonso, 2021).

Considerando-se a fase metodológica em que se encontra esta pesquisa, a estratégia de controle cooperativo apresentada é baseada em uma premissa simplificadora de que os conversores (VFDs) são ideais (sem limitação de potência ou banda passante). A partir disso, a Fig. 4 apresenta o mecanismo de controle cooperativo proposto, que gera referências equivalentes, dadas por  $i_{ref}/n$  para cada VFD com intuito de compensar as parcelas de reativos e mitigação da distorção harmônica das correntes drenadas pelas cargas não lineares.

Conforme apresentado na Fig. 3, o controle coordenado ou cooperativo atua a partir da medição da corrente das cargas provenientes de equipamentos não ativos no processo de controle da QEE e realimentação da corrente dos VFDs. O objetivo é garantir a compensação (indireta) de reativos, redução da distorção harmônica e desbalanço na corrente fornecida pelos geradores (Peng et al., 1998).

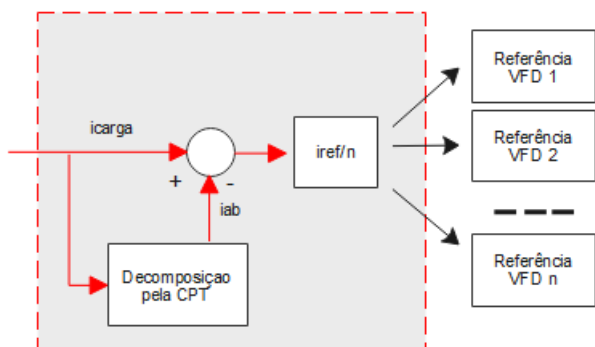


Fig. 4 – Estratégia Simplificada de Controle Cooperativo.

A divisão da referência de corrente em “n” partes equivalentes (cada VFD fica responsável para corrigir a enésima parte) trata-se de uma simplificação da estratégia do controle cooperativo e pressupõe a disponibilidade equivalente e impedância “desprezível” entre os VFDs. Sob a perspectiva prática, projetos que incluam VFDs conectados no mesmo painel/barramento permitem uma simplificação quanto a impedância existente entre eles. Entretanto, sobre a disponibilidade instantânea de cada VFD, é imprescindível uma arquitetura de comunicação ou gerenciamento que garanta o controle coordenado e sincronismo dos inversores respeitando a disponibilidade de cada um (Alonso, 2021), assunto que será abordado em estudos em andamento pelos autores.

As próximas seções descrevem os principais subsistemas que compõem a metodologia de controle de cada VFD inserido na estratégia de controle cooperativo proposta.

#### 3.1 Geração do Sinal de Referência

Conforme indicado na Fig. 4, a geração de referências para o estágio de entrada dos VFDs ativos foi baseada na CPT (Tenti et al., 2011), do inglês *Conservative Power Theory*, a qual se trata de uma teoria desenvolvida no domínio do tempo com decomposição da corrente e potência em parcelas ortogonais, tal como em (1):

$$\underline{i} = \underline{i}_a^b + \underline{i}_r^b + \underline{i}^u + \underline{i}_v = \underline{i}_a^b + \underline{i}_{na} \quad (1)$$

sendo  $\underline{i}_a^b$  a corrente ativa balanceada,  $\underline{i}_r^b$  a corrente reativa balanceada,  $\underline{i}^u$  trata-se da corrente de desbalanço que ainda pode ser decomposta em ativa e reativa ( $\underline{i}^u = \underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u$ ),  $\underline{i}_v$  é a corrente *void* (residual) que representa as não linearidades entre a tensão de alimentação e a corrente drenada pela carga.

Através dessa decomposição é possível escolher qual parcela controlar ou compensar através dos VFDs. Para efeito de simplificação, este trabalho explora a utilização da corrente não-ativa, que resulta da diferença entre a corrente total e a corrente ativa balanceada ( $\underline{i}_{na} = \underline{i} - \underline{i}_a^b = \underline{i}_{ref}$ ), representando a soma de parcelas indesejáveis da corrente das cargas ( $\underline{i}_{ref} = \underline{i}_{na}$ ). A terminologia compensação eletrônica é muito utilizada em estudos envolvendo Filtros Ativos de Potência (Rodrigues et al., 2021) e também se aplica no contexto do controle dos VFDs ativos com operação multifuncional, conforme proposto neste trabalho.

#### 3.2 Malha de Controle do Barramento CC

A malha de tensão tem como finalidade regular a tensão no barramento CC (Buso and Mattavelli, 2006) de cada VFD e como consequência consegue garantir disponibilidade de potência para o estágio de saída do VFD (inversor de frequência que atua na alimentação do motor). O controlador utilizado foi o proporcional integral (PI) (Rodrigues, 2021). A Fig. 5 apresenta o diagrama de blocos da malha de controle utilizada.

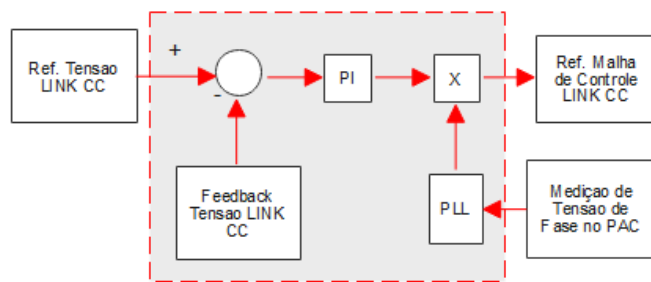


Fig. 5 – Malha de Controle link CC.

Através da Fig. 5 observa-se que o sinal de saída do controlador é multiplicado por um sinal extraído de um bloco PLL (*Phase Locked Loop*) para gerar o sinal de referência por fase e permitir acoplamento com malha de controle de corrente (responsável pelas correções impostas pelo controle cooperativo) (Padua et al., 2007) e que será apresentada no subitem 3.3.

#### 3.3 Malha de Controle da Corrente de Entrada dos VFDs

A malha de controle da corrente de entrada tem como objetivo sintetizar uma corrente capaz de contribuir para

melhoria de QEE (redução de reativos, harmônicas e possíveis desbalanços), ao mesmo tempo que garante o fluxo de potência necessário para alimentação da carga/motor conectado no segundo estágio do VFD. A Fig. 6 apresenta o diagrama de blocos da malha de controle implementada.

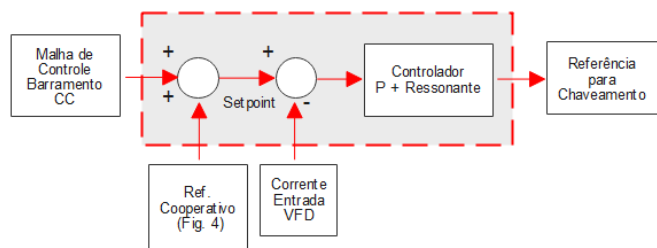


Fig. 6 – Malha de Controle de Corrente (VFDs).

Conforme pode-se observar na Fig. 6, a referência dessa malha trata-se da somatória da referência de corrente gerada pelo controle cooperativo com a referência de corrente proveniente da malha de controle da tensão CC. O controlador utilizado foi o proporcional ressonante, com objetivo de rastrear as frequências de 5ª e 7ª ordem harmônica presentes na simulação (Pádua, 2007) (Bonaldo, 2015).

### 3.4 Módulo de Controle de Motor e Cargas

O módulo de controle de carga (motor) faz parte do segundo estágio do VFD, responsável de fato pelo acionamento do motor, o foco desse controle está associado ao tipo de operação e processo da referida máquina. Entre as grandezas controláveis no âmbito de controle de um motor estão

velocidade e torque. No entanto, devido ao foco deste trabalho situar-se no controle do primeiro estágio dos VFDs, o controle dos motores (VFD1 e VFD2) foi implementado através de malha aberta e não será objeto de estudo neste trabalho.

## 4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Com o intuito de validar a metodologia proposta, o sistema da Fig. 3 foi implementado na Plataforma de simulação PSIM. Considerando-se a previsão de futuros trabalhos em uma bancada experimental, o circuito foi modelado considerando um SEP de baixa tensão. A seguir, a Tabela 1 apresenta os parâmetros principais utilizados nas simulações e as Fig. 7 e Fig. 8 apresentam resultados da simulação.

Tabela 1. Parâmetros da Simulação.

Grandeza	Magnitude
Tensão Nominal	127 V
Frequência	60 Hz
Frequência de chaveamento do estágio de entrada (VFD)	18 kHz
Potência Motor 1	2,7 kW
Potência Motor 2	2,7 kW
Capacitância Link CC ( $C_{CC}$ )	2,1 mF
Tensão Link CC	400 V
Potência Carga Linear	45 kVA
Fonte de Corrente	10 A / 420 Hz

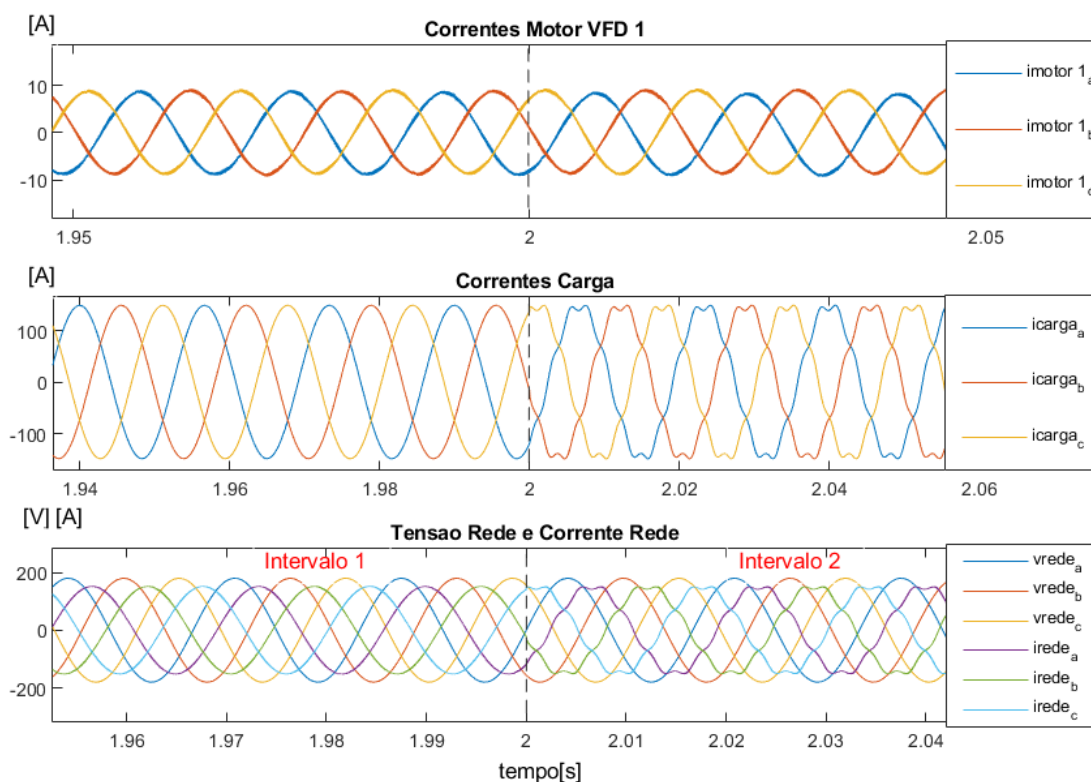


Fig. 7 – Resultados da Simulação sem a implementação do Controle Cooperativo no SEP.

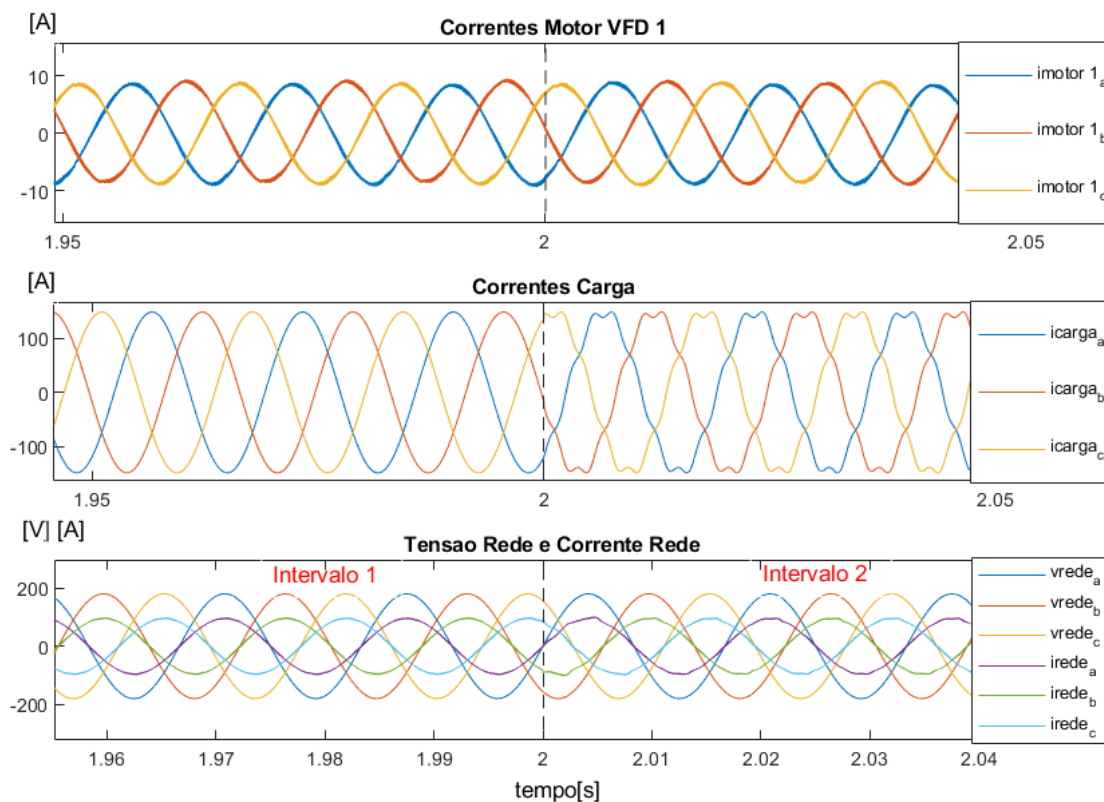


Fig. 8 – Resultados da Simulação com a implementação do Controle Cooperativo no SEP.

A Fig. 7 apresenta resultados da simulação sem a implementação da metodologia proposta e a Fig. 8 apresenta resultados com a estratégia cooperativa implementada.

Nas duas figuras, a parte superior apresenta o gráfico das correntes que estão sendo fornecidas ao motor trifásico, pelo segundo estágio do VFD. O escopo da análise restringiu-se ao regime permanente, não analisando condições de partidas e/ou outros transitórios.

O gráfico intermediário apresenta a medição da corrente na carga, responsável por demandar reativos e componentes harmônicas. Já a parte inferior apresenta o gráfico com os sinais de tensão e corrente na rede (saída dos geradores), com objetivo de verificar a compensação de reativos através da defasagem entre tensão e corrente.

A Fig. 7 está organizada em dois intervalos, sendo que o primeiro traz a condição de operação apenas com cargas lineares (resistiva-indutiva), até o instante de tempo igual a 2s. Em seguida é acoplada uma carga não linear, representada pela componente harmônica de corrente em 420 Hz. Esses resultados retratam a simulação sem a funcionalidade do VFD como elemento ativo no aprimoramento da QEE.

Observa-se na Fig.7 que a corrente da rede está defasada em relação a tensão e depois de 2 s, além de defasada, passa a ser

distorcida em função da operação da carga não linear. Pode-se constatar que o sistema demanda correção de reativos e também da distorção harmônica na corrente.

Na Fig. 8, o SEP está submetido às mesmas condições de carga da Fig. 7, entretanto observa-se através do gráfico da parte inferior, que a corrente de rede está em fase com a tensão da rede e no instante de tempo de 2 s, enquanto observa-se distorção harmônica de corrente na carga (DHTI = 6,8 %), na rede acontece a correção desse sinal, mantendo a compensação de reativos e distorção harmônica de corrente (DHTI = 2,3 %). O comportamento observado confirma o funcionamento da metodologia proposta, incluindo um controle cooperativo e multifuncionalidade dos VFDs.

Quanto a corrente observada no motor, não houve comprometimento, pois trata-se de controle independente e o gerenciamento do Link CC está atendendo a dinâmica do equipamento.

A Fig. 9 apresenta o compartilhamento de correntes dos VFDs e as correntes de referência geradas pelo controle cooperativo. Através destes gráficos é possível observar a aderência das correntes de referência com as correntes observadas na entrada dos VFDs.

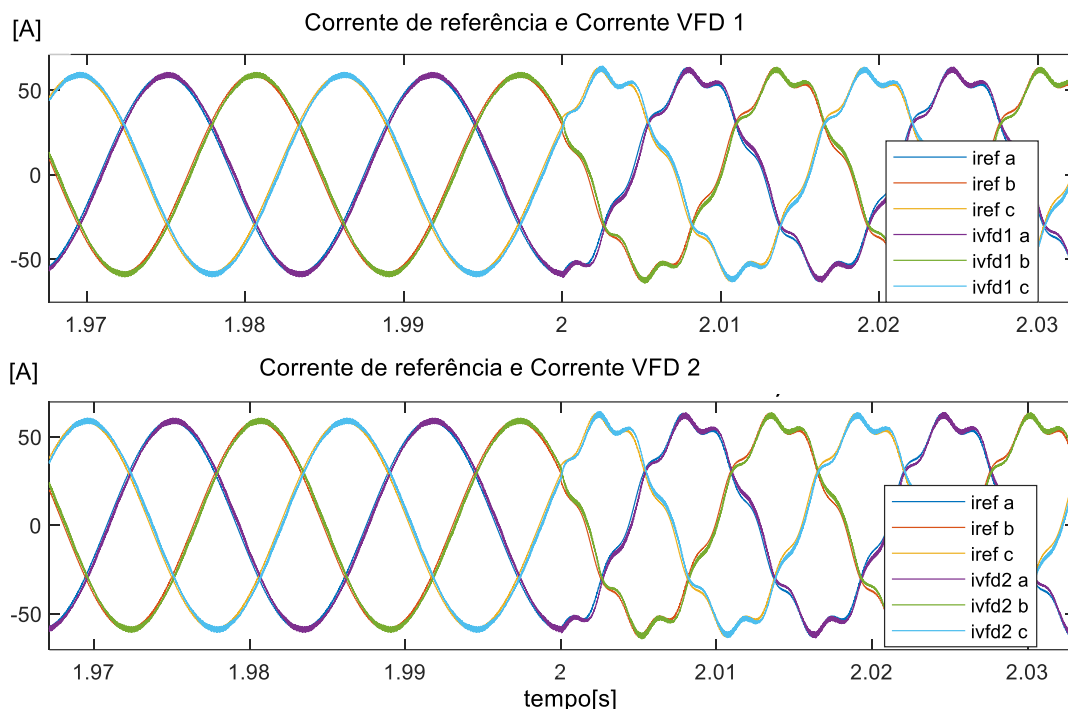


Fig. 9 – Correntes dos VFDs (com Controle Cooperativo)

## 5. CONCLUSÕES

Através das simulações e resultados coletados foi possível constatar o funcionamento e viabilidade da metodologia proposta, a qual permite avançar em diversos aspectos do gerenciamento energético e controle da QEE em FPSOs.

A utilização da CPT como estratégia na geração do sinal de referência permite obter correntes senoidais e em fase com as tensões (fator de potência unitário). Além disso, com base nas parcelas de corrente decomposta pela CPT, ainda é possível atuar com seletividade na correção/compensação gerando um cenário com diferentes opções para o controle cooperativo.

Trabalhos futuros dos autores abordarão de forma detalhada a interação da estratégia cooperativa dos VFDs com o sistema de controle secundário dos geradores a gás da FPSO, bem como da inserção de limites operacionais de cada VFD na metodologia cooperativa. Com isso, espera-se contribuir para a melhoria do gerenciamento energético em plataformas FPSO, especialmente em termos de eficiência energética e QEE.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNESP Sorocaba e Instituto Federal de São Paulo pelo apoio à pesquisa, ao suporte financeiro do CNPq Processo 309297/2021-4 e da FAPESP Processo 2016/08645-9 no desenvolvimento desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

Alonso, A. M. dos S. (2017) “Compensação Distribuída de Harmônicos em Redes Monofásicas de Baixa Tensão.”

118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

Alonso, A. M. dos S. (2021) “Multi-Purpose Coordinated Control of Distributed Energy Resources in Transactive AC Microgrids.” 252 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

Årdal, A. (2014) “Challenges with integration and operation of offshore oil & gas platforms connected to an offshore wind power plant,” em Petroleum and Chemical Industry Conference Europe.

Bonaldo, J. P. (2015) “Multifuncionalidade de Conversores Eletrônicos de Potência Utilizados em Microrredes Inteligentes.” 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Buso, S. and Mattavelli, P. (2006) “Digital Control in Power Electronics”. Morgan&Claypool Publishers, 1ª Edição, Itália.

da Rocha, L. F., Vitoi, L. A., Tedeschi, E. and Brandao, D. I. (2021) “Control Strategies for Multifunctional Active Front-End Converter in Oil and Gas Platforms” Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), pp. 1-8, doi: 10.1109/COBEP53665.2021.9684089.

Dias, R. (2018) “Análise de Viabilidade de Utilização de Geração Eólica Offshore para Eletrificação de plataformas de Petróleo” 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte.

Dias, R. and Silva, S. M. (2018) “Synthetic generation of offshore wind speed time series using MCMC method,” Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), Niterói.

Fard, R. N. and Tedeschi, E. (2018) “Integration of

- distributed energy resources into offshore and subsea grids,*” CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 3, no. 1, pp. 36–45.
- Kumar, D. and Zare, F. (2019) “*A comprehensive review of maritime microgrids: System architectures, energy efficiency, power quality, and regulations,*” IEEE Access, vol. 7, pp. 67 249–67 277.
- Padua, M. S., Deckmann, S. M., Sperandio, G. S., Marafão, F.P., Colin, D. (2007). “*Comparative analysis of synchronization algorithms based on pll, rdft and kalman filter*”. In: 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007, pp. 964–970.
- Peng, F., Ott, G. and Adams, D. (1998) “*Application Issues of Active Power Filter*” IEEE Industry Application Magazine, vol, ED-4, PP. 21-30.
- Rodrigues, M. V. M., Paredes, H. K. M., Paes, F. L., Arcadepani, M. B., Gonçalves, F. A. S. and Marafão, F. P. (2021) “*Aprimoramento da Qualidade da Energia Elétrica em Instalações Monofásicas,*” 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), pp. 375-379, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529441.
- Tedeschi, E., Robles, E., M. Santos, Duperray ,O. e Salcedo, F. (2012) “*Effect of energy storage on a combined wind and wave energy farm,*” em *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*.
- Tenti, P., Paredes, H. K. M. and Mattavelli, P. (2011) “*Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids,*” IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 3, pp. 664-673.
- Vitói, L., Brandao, D. and Tedeschi, E. (2019) “*Active Power Filter Pre-Selection Tool to Enhance the Power Quality in Oil and Gas Platforms,*” Energies MDPI.
- Yu, Q., Liu, Y., Li, D., Jiang, Z., and Long, G. (2020) “*Research of SSO and Suppression Method of Distributed Micro Grid in Offshore Oil Platform,*” em 39th Chinese Control Conference (CCC).