

RESSALVA

Atendendo solicitação da autor(a), o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 28/09/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE LEITE PAES

**CONTRIBUIÇÕES AO GERENCIAMENTO DE POTÊNCIAS EM PLATAFORMAS
MARÍTIMAS DE PETRÓLEO ATRAVÉS DO CONTROLE COORDENADO DE
CONVERSORES ELETRÔNICOS**

**BAURU – SP
2024**

FELIPE LEITE PAES

**CONTRIBUIÇÕES AO GERENCIAMENTO DE POTÊNCIAS EM PLATAFORMAS
MARÍTIMAS DE PETRÓLEO ATRAVÉS DO CONTROLE COORDENADO DE
CONVERSORES ELETRÔNICOS**

Defesa da Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP – Campus de Bauru, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação

Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão

Orientador

Prof. Dr. Luis Armando De Oro Arenas

Coorientador

BAURU – SP
2024

P126c	Paes, Felipe Leite Contribuições ao Gerenciamento de Potências em Plataformas Marítimas de Petróleo através do Controle Coordenado de Conversores Eletrônicos / Felipe Leite Paes. -- Bauru, 2024 161 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientador: Fernando Pinhabel Marafão Coorientador: Luis Armando De Oro Arenas 1. Controle Coordenado de Potência. 2. FPSO. 3. Teoria de Potência Conservativa. 4. Conversores Eletrônicos. I. Título.
-------	--

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O setor de óleo e gás, essencial para atender à demanda energética global, enfrenta desafios relacionados à sustentabilidade e eficiência. As plataformas FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), que utilizam geradores a gás (GTGs), são grandes emissoras de gases de efeito estufa (GEE) e sofrem com instabilidades elétricas, especialmente durante a conexão de grandes cargas elétricas. Para mitigar esses problemas e apoiar a transição energética, o setor tem investido na modernização dos sistemas e na integração de fontes renováveis de energia.

Este trabalho propõe uma metodologia de controle coordenado aplicada às plataformas FPSO, explorando a multifuncionalidade dos AFE-ASDs (*Active Front-End Adjustable Speed Drives*). Esses dispositivos, além de acionarem grandes cargas, fornecem serviços ancilares, como suporte de potência reativa balanceada e desbalanceada e mitigação de distorções harmônicas. A proposta utiliza a infraestrutura existente, com um controle centralizado que coordena sinais de referência, melhorando a qualidade da energia, reduzindo variações de tensão, desbalanços e distorções, e aumentando a confiabilidade do sistema elétrico.

Validada por simulações baseadas em dados reais de uma plataforma em operação na costa brasileira, a metodologia também contribui para validação da inserção de tecnologias de conversores eletrônicos, que indiretamente apoia a integração de fontes renováveis e sistemas de armazenamento de energia, alinhando-se às metas globais de sustentabilidade e transição energética.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The oil and gas sector, essential for meeting global energy demands, faces challenges related to sustainability and efficiency. FPSO (Floating Production Storage and Offloading) platforms, which rely on gas turbine generators (GTGs), are significant emitters of greenhouse gases (GHG) and experience electrical instabilities, particularly when connecting large loads. To address these issues and support the energy transition, the sector has been investing in system modernization and the integration of renewable energy sources.

This research proposes a coordinated control methodology applied to FPSO platforms, leveraging the multifunctionality of Active Front-End Adjustable Speed Drives (AFE-ASDs). In addition to powering large loads, these devices provide ancillary services such as balanced and unbalanced reactive power support and harmonic distortion mitigation. The proposed approach utilizes existing infrastructure and implements centralized control to coordinate reference signals, thereby improving power quality, reducing voltage variations, unbalances, and distortions, and enhancing the reliability of the electrical system.

Validated through simulations based on real-world data from a Brazilian offshore platform, the methodology also contributes to the validation of electronic converter technologies. This indirectly supports the integration of renewable energy sources and energy storage systems, aligning with global sustainability goals and the energy transition agenda.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE FELIPE LEITE PAES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 27 dias do mês de setembro do ano de 2024, às 08:30 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de FELIPE LEITE PAES, intitulada **CONTRIBUIÇÕES AO GERENCIAMENTO DE POTÊNCIAS EM PLATAFORMAS MARÍTIMAS DE PETRÓLEO ATRAVÉS DO CONTROLE COORDENADO DE CONVERSORES ELETRÔNICOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO (Orientador(a) - Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia UNESP Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. RICARDO QUADROS MACHADO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação / Escola de Engenharia de São Carlos - USP, Prof. Dr. MAURICIO BARBOSA DE CAMARGO SALLES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas / Universidade de São Paulo, Prof. Dr. JONATAS BOAS LEITE (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES (Participação Presencial) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP . Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: **APROVADO** . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO PINHABEL MARAFÃO**
Data: 28/09/2024 12:03:35-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

"A Deus, minha esposa, minhas filhas, meus pais, mentores e amigos."

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a DEUS pela saúde e pela oportunidade de estar sob Seu cuidado e luz, sempre me proporcionando novas chances de evolução.

Agradeço à minha esposa, Larissa, que sempre esteve ao meu lado, enfrentando juntos todos os momentos difíceis. Você tem sido uma verdadeira guerreira, absorvendo problemas e compartilhando o peso de gerir nossa família, sempre colocando-a como prioridade máxima. Sei que renunciou a muitos sonhos para me apoiar nesta empreitada. Foram anos longos, sempre com os olhos no futuro, e o processo foi contínuo e árduo. Quando nos casamos, o desafio era concluir a graduação em engenharia; foram anos de esforço, mas, felizmente, chegaram ao fim. Contudo, era necessário continuar. Enfrentamos juntos o processo de pós-graduação lato sensu, investindo todas as nossas economias para podermos avançar. Deixamos de fazer muitas coisas, abrimos mão de muito, mas estávamos investindo no futuro da nossa família.

Então veio o mestrado, onde o desafio não era apenas financeiro; foram noites e noites de estudo e trabalho, equilibrando as demandas da empresa com as exigências acadêmicas. Foi nesse período que nasceu nossa primeira bênção, Manuela. Os desafios aumentaram, com sustos, horas em hospitais, noites sem dormir, mas você sempre esteve ao meu lado, especialmente quando pedi demissão da empresa para ministrar aulas e focar na conclusão da dissertação. Você me apoiou quando prestei o concurso do IFSP, e, pela graça de Deus, consegui ser aprovado, mesmo sem o título de mestre e enfrentando uma concorrência de 300 candidatos por vaga. Finalmente, uma excelente notícia: professor no Instituto Federal de São Paulo. E, logo em seguida, outra notícia excepcional: aprovado na defesa de mestrado.

Mas os desafios não pararam. Surgiu a oportunidade de fazer o doutorado, e eu sabia que você achava que precisávamos de um tempo para descansar, uma pausa na correria, mas, ainda assim, me apoiou incondicionalmente mais uma vez. Desta vez, o desafio foi ainda maior: um novo tema, um projeto de pesquisa complexo, muitas entregas e muito trabalho. Durante essa jornada, enfrentamos a pandemia, perdemos amigos e nossas perspectivas mudaram. Nesse período, nasceu mais uma bênção de Deus, a Luiza, que veio florescer o jardim de nossas vidas. Apesar da alegria, ela também trouxe novos desafios: mais noites sem dormir, visitas ao hospital, especialmente quando ela ficou internada e a médica nos alertou sobre a possibilidade de intubação. Meu chão se abriu, mas você estava lá, resiliente como sempre. Agora, o momento de conclusão deste ciclo está chegando, mas você me conhece e sabe que certamente virão outros desafios, e eu sei que você estará sempre ao meu lado.

Gostaria de agradecer às minhas filhas, Manuela e Luiza. Manuela, pelo amor incondicional, pelo cuidado e carinho, pela preocupação com quantas páginas ainda faltavam para o papai concluir o trabalho, e pela compreensão de não poder estar com vocês todos os finais de semana, mesmo quando, indignada, você dizia à mamãe: "Mas hoje é domingo, não é dia de trabalhar, ele precisa folgar." À minha pequena Luiza, pelo seu olhar especial e pelas lágrimas que derrama todos os dias quando não quer sair do carro. Um dia, você lerá este texto e não se lembrará, mas todas as vezes que o papai saía da garagem, você precisava estar no meu colo, buzinando, acendendo o farol, mexendo na seta, e, no final, sempre chorava quando a mamãe vinha te pegar de volta.

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus pais, Dorival e Rosana, que sempre estiveram ao meu lado, prontos para me apoiar e fazer o que fosse necessário. Agradeço a Deus por ter me dado vocês, que, mesmo diante de dificuldades, fazem tudo ao seu alcance por mim. Aos meus irmãos, Samuel e Gersa, sobrinhos e toda a família, meu agradecimento por sempre torcerem por mim. Tive o privilégio de ser o primeiro a conquistar um diploma universitário, e é gratificante ver que isso está inspirando outros a seguirem o mesmo caminho.

Agradeço também aos meus mentores, especialmente ao professor orientador Fernando Pinhabel Marafão e ao coorientador Professor Luis de Oro Arenas, que dedicaram finais de semana, reuniões fora de horário e muitas interações para me guiar, oferecendo conselhos, críticas construtivas, cobranças e suporte de forma humanizada, entendendo cada contexto dessa trajetória. Sem eles, este momento não seria possível.

Estendo meus agradecimentos aos professores Augusto Matheus dos Santos Alonso, Helmo Kelis Morales Paredes, Flávio Alessandro Serrão Gonçalves, Rubens Hock Junior, Elisabetta Tedeschi, Marcus Vinicius, Rafael dos Santos, Danilo Iglesias Brandão e José Antenor Pomilio, que de alguma forma, em algum momento, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à empresa PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. (PETROBRAS) pelo financiamento e pela oportunidade de participar do Projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) intitulado "Ferramenta para avaliação do desempenho de sistemas elétricos de plataformas típicas para produção em Libra", no âmbito do Processo 2018/00639-5, que possibilitou o acesso a informações cruciais sobre os modelos utilizados na simulação da plataforma FPSO. Expresso também minha gratidão aos colegas pesquisadores do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI), do Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba

(ICTS), cuja colaboração foi essencial para a integração dos modelos desenvolvidos, viabilizando a avaliação do sistema elétrico, a identificação de oportunidades de melhoria e a criação de um ambiente de simulação preciso para a validação de novas propostas, como o controle coordenado apresentado neste trabalho.

Agradeço aos colegas doutorandos do GASI: Paulo Fernando Silva, José Olímpio de Arimateia Filho, Matheus Branco Arcadepani, Lucas Carvalho Souza, Alex Ferreira Silva e Luiz Bernardino, além de todos os demais integrantes do grupo. Sou especialmente grato pelas nossas conversas nos intervalos do café, pelas novas ideias compartilhadas, pelas risadas, pelas trocas de experiências e sonhos, e pela união, sempre pautada pela disposição de somar esforços em prol de um objetivo comum.

Agradeço aos colegas de profissão, professores e engenheiros que sempre torceram por este momento, em especial Elenilson Beda de Campos, Claudio Marcos Pereira, Kelvin Barbosa, Fernando Borges, Marcelo Patrício Santana, Rodrigo Diver, Marcelo Tirolli. Por fim, agradeço a todos que acreditaram neste sonho: amigos, colegas e alunos, por cada pensamento positivo, oração e palavra de ânimo. Tenho plena certeza de que este momento é fruto de uma somatória de esforços, que inclui meu desenvolvimento como aluno, professor e pesquisador, e cada contribuição de todos que se propuseram, de alguma forma, a somar neste projeto.

RESUMO

Com o avanço de tecnologias e a integração de fontes de energias renováveis, o setor de óleo e gás tem demonstrado compromisso na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e na transição energética, focando na eletrificação e modernização dos sistemas elétricos de potência (SEP) em plataformas FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*). Normalmente, essas plataformas operam de forma isolada e alimentadas por geradores a gás (GTGs), sendo grandes emissores de GEE, e devido à limitação de potência, eventos como a conexão/desconexão de cargas elevadas podem comprometer a estabilidade dos SEPs, especialmente com a partida direta de grandes motores. Conversores de frequência variável (ASDs), com entrada passiva, são frequentemente empregados para acionar motores elétricos, introduzindo componentes harmônicas que afetam a qualidade da energia, resultando em variações de tensão e frequência, baixo fator de potência e componentes harmônicas nas tensões. O SEP geralmente é supervisionado por um sistema de gerenciamento de potência (*Power Management System* - PMS), que coordena ações através de uma infraestrutura de comunicação com os equipamentos e dispositivos conectados ao SEP. No contexto de modernização e aplicação de novas tecnologias, esta tese de doutorado propõe um controle coordenado utilizando conversores eletrônicos com entrada ativa (AFE-ASDs), para o gerenciamento avançado do fluxo de potência em plataformas marítimas de petróleo, como uma funcionalidade adicional ao PMS. A metodologia proposta é fundamentada no compartilhamento das parcelas de corrente dadas pela Teoria de Potência Conservativa (*Conservative Power Theory* – CPT), usando a Transformada Discreta de Fourier (TDF) com detector de picos para o empacotamento dos sinais e envio desses dados através da infraestrutura de comunicação do PMS, e visa mitigar os efeitos da potência reativa, as distorções harmônicas e desbalanços, fazendo uso da disponibilidade de potência remanescente dos AFE-ASDs distribuídos. A estratégia de controle é avaliada no ambiente de simulação MATLAB/SIMULINK, considerando, na modelagem dos equipamentos, dados de fabricantes e relatórios de cenários operacionais reais de uma plataforma FPSO típica. Os resultados obtidos demonstram que a implementação da estratégia de controle coordenado contribui para o SEP em diversos aspectos: melhoria do fator de potência, redução da variação de tensão em eventos de partida direta de máquinas, redução do risco de colapso de tensão sob condições de carregamento próximo do nominal dos GTGs, mitigação de efeitos de distorção harmônica de corrente e potência reativa de desbalanço.

Palavras-chave: Controle Coordenado de Potência, FPSO, Teoria de Potência Conservativa, Conversores Eletrônicos.

ABSTRACT

With the advancement of technologies and the integration of renewable energy sources, the oil and gas sector has shown a strong commitment to reducing greenhouse gas (GHG) emissions and supporting energy transition, focusing on the electrification and modernization of electric power systems (EPS) in FPSO (Floating Production Storage and Offloading) platforms. These platforms typically are islanded systems powered by gas turbine generators (GTGs), which are significant GHG emitters. Due to power limitations, events such as the connection/disconnection of large loads can compromise the stability of EPS, particularly during the direct starting of large motors. Adjustable Speed Drives (ASDs), with passive input, are often used to drive electric motors, introducing harmonic components that affect power quality, resulting in voltage and frequency variations, low power factor, and harmonic distortions in voltages. EPS are generally monitored by a Power Management System (PMS), which coordinates actions via a communication infrastructure with equipment and devices connected to the EPS. In the context of modernization and the adoption of new technologies, this doctoral thesis proposes a coordinated control strategy using active front-end Adjustable Speed Drives (AFE-ASDs) for advanced power flow management in offshore oil platforms, as an additional feature to the PMS. The proposed methodology is based on the current-based control strategy by sharing the current components from the Conservative Power Theory (CPT), using the Discrete Fourier Transform (DFT) with a peak detector to encapsulate signals and transmit this data through the PMS communication infrastructure, aiming to mitigate the effects of reactive power, harmonic distortions, and imbalances by utilizing the remaining power capacity of distributed AFE-ASDs. The control strategy is evaluated in a MATLAB/SIMULINK simulation environment, incorporating equipment modeling based on manufacturer data and real operational scenarios from a typical FPSO platform. The results demonstrate that the implementation of the coordinated control strategy improves EPS performance in several aspects: power factor improvement, reduction of voltage variations during direct machine starts, reduced risk of voltage collapse under near-nominal GTG loading conditions, and mitigation of harmonic current distortion and reactive power unbalances.

Keywords: Coordinated Control, FPSO, Conservative Power Theory, Electronic Converters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de uma plataforma FPSO, com destaque dos GTGs.....	24
Figura 2 — Topologia básica do sistema elétrico de uma plataforma FPSO.	24
Figura 3 – Diagrama unifilar simplificado de uma plataforma FPSO.....	26
Figura 4 - Rendimento de GTGs em estudo de integração de energia eólica em plataforma offshore.	27
Figura 5 – Integração de funcionalidades do sistema PMS.....	30
Figura 6 – Infraestrutura de comunicação de um sistema PMS em plataformas offshore.	32
Figura 7 – Classificação das estratégias de controle coordenado.....	34
Figura 8 – Arquitetura hierárquica dos níveis de controle.	35
Figura 9 - Topologia do conversor LCI.....	41
Figura 10 – Esquemático da topologia do conversor PWM-CSC.....	42
Figura 11 – Esquemático da topologia do conversor CHB	43
Figura 12 – Esquemático simplificado da topologia do conversor NPC.....	45
Figura 13 – Esquemático da topologia do conversor FC.	46
Figura 14 – Esquemático da topologia do conversor MMC.	47
Figura 15 – Funcionalidade de <i>by-pass</i> em conversores aplicados no acionamento de motores.....	53
Figura 16 – Integração do sistema PMS com função adicional (controle coordenado).	55
Figura 17 – Metodologia de controle coordenado proposta.....	57
Figura 18 – Ciclo de atualização do controle coordenado proposto.	58
Figura 19 – Circuito elétrico simplificado.	59
Figura 20 - Algoritmo de seletividade proposto.....	62
Figura 21 - Capacidade de potência do AFE-ASD em função de sua temperatura.....	64
Figura 22 - Processo de empacotamento de sinais.	66
Figura 23 - Reconstrução de sinais.	66
Figura 24 - Sistema integrado de geração com turbinas a gás.	69
Figura 25 - Sistema integrado de geração com turbinas a gás, modelado no SIMULINK/Artemis.	69
Figura 26 - a) Circuito equivalente de um gerador síncrono b) Modelo de 8ª ordem do gerador considerando os enrolamentos de armadura, de campo e amortecedor.....	70
Figura 27 - Diagrama de blocos do sistema de excitação do gerador síncrono.....	71
Figura 28 - Diagrama de blocos de excitatriz CA.	72
Figura 29 - Diagrama de bloco do sistema de excitação AC7B/IEEE.	73
Figura 30 - Modelagem do sistema de excitação AC7B/IEEE no Simulink/ARTEMiS.	74
Figura 31 - Diagrama de blocos da turbina a gás.	74
Figura 32 - Diagrama de blocos do modelo da turbina a gás no Simulink/ ARTEMiS.	75
Figura 33 - Diagrama de blocos do regulador de velocidade do sistema de geração.....	75
Figura 34 – Diagrama de blocos do regulador de velocidade no modo <i>droop</i>	76

Figura 35 - Regulador de velocidade no modo <i>droop</i> com controle secundário no Simulink/Artemis.	76
Figura 36 - Equação mecânica do sistema de geração com 3 geradores.	77
Figura 37 – Circuito equivalente de transformador tipo “T”.	79
Figura 38 – Diagrama de blocos do modelo LUT utilizado.	80
Figura 39 – Nuvem de pontos de curvas: a) corrente e velocidade do motor b) conjugado e velocidade da carga c) conjugado e velocidade do motor.	81
Figura 40 – Modelo LUT desenvolvido.	81
Figura 41 – Acoplamento do modelo LUT através de fontes de corrente.	82
Figura 42 - Condições de operação do sistema elétrico da FPSO, através da configuração de chaves e barramentos.	89
Figura 43 - Sinais de tensão, velocidade, corrente e torque do motor em processo de partida direta sem controle coordenado.	93
Figura 44 - Sinais de tensão, velocidade, corrente e torque para evento do motor em processo de partida direta com controle coordenado.	94
Figura 45 – Tensão, velocidade, corrente e torque do motor partindo sem o controle coordenado.	97
Figura 46 – Potência Ativa, Potência Reativa, Potência Aparente e Fator de Potência do motor partindo sem o controle coordenado.	97
Figura 47 – Tensão, corrente, frequência e corrente de campo do GTG1 durante evento sem o controle coordenado.	98
Figura 48 - Corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente do GTG1 durante evento sem o controle coordenado.	98
Figura 49 – Corrente, torque, potência ativa, potência reativa, potência aparente e velocidade de um motor em operação durante o evento sem o controle coordenado.	99
Figura 50 - Tensão, velocidade, corrente e torque do motor partindo com o controle coordenado.	100
Figura 51- Potência Ativa, Potência Reativa, Potência Aparente e Fator de Potência do motor partindo com o controle coordenado.	100
Figura 52 - Tensão, corrente, frequência e corrente de campo do GTG1 durante evento com o controle coordenado.	101
Figura 53 - Corrente, potência ativa, potência reativa e potência aparente do GTG1 durante evento com o controle coordenado.	101
Figura 54 – Tensão, corrente, frequência, e corrente de campo do GTG1 sem o controle coordenado para estudos de casos 3A-3D.	104
Figura 55 - Tensão, corrente, frequência, e corrente de campo do GTG1 com o controle coordenado para estudos de casos 3A-3D.	104
Figura 56 - Tensão, corrente, frequência, e corrente de campo do GTG1 sem o controle coordenado - caso 3E.	106

Figura 57 - Tensão, corrente, frequência, e corrente de campo do GTG1 com o controle coordenado para o caso 3E.	107
Figura 58 – Tensão, corrente, frequência, potência ativa, potência reativa e potência aparente do GTG1 para EC4/CB sem o controle coordenado.	112
Figura 59 - Tensão, corrente, frequência, potência ativa, potência reativa e potência aparente do GTG1 para o caso 4B com o controle coordenado.....	112
Figura 60 – Corrente, torque, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência de um motor em operação durante o evento de partida do caso 4B sem o controle coordenado.....	114
Figura 61 - Corrente, torque, potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência de um motor em operação durante o evento de partida do caso 4B com o controle coordenado.	114
Figura 62 – Tensão instantânea e corrente instantânea do GTG1 para o caso 4C.	115
Figura 63 - Tensão, corrente, frequência, potência ativa, potência reativa e potência aparente do GTG1 para o caso 4D sem o controle coordenado.	116
Figura 64 - Tensão, corrente, frequência, potência ativa, potência reativa e potência aparente do GTG1 para o estudo de caso 4D com o controle coordenado.	117
Figura 65 – Saturador de potência por temperatura: a) temperatura e capacidade de potência do AFE-ASD, b) fatores de seletividade, c) potências de compensação e disponibilidade total dos AFE-ASDs de compensação, d) referência de compensação de corrente reativa e de distorção, e) corrente do AFE-ASD em análise.....	119
Figura 66 – Parcelas de potência da CPT durante a simulação: a) A, P, Q, D e Ur durante os intervalos 1-8 de simulação, b) A, P e Q durante intervalos 2-4, c) D e Ur durante intervalos 3-6, d) D e Ur durante intervalo 4, e) D e Ur durante intervalo 5, f) A, P e Q durante intervalos 6-7, g) A, P e Q durante intervalos 7-8.....	121
Figura 67– Parcelas de compensação de corrente no contexto do algoritmo de seletividade: a) A, P, Q, D e Ur durante os intervalos 1-8 de simulação, b) fatores de seletividade, c) potências de compensação e disponibilidade total dos AFE-ASDs, d) parcelas de referência de compensação.	124
Figura 68– Parcelas de compensação de corrente reativa de um AFE-ASD: a) as três fases da parcela reativa da referência de compensação de um AFE-ASD (Int. 1-8), b) início de compensação (Int. 3), c) presença de desbalanceamento (Int. 5), d) saída da carga de desbalanceamento (Int. 5-6), e) redução da compensação antes da partida (Int. 6-7), f) compensação no instante de partida (Int. 6-7), g) compensação no instante de descarte de carga (Int. 7-8).	126
Figura 69 – Parcelas de compensação de corrente de distorção e reativa desbalanceada de um AFE-ASD (3 fases): a) parcelas de corrente de distorção (Int. 4-5), b) início da compensação da potência D (Int. 4), c) término da compensação da potência D (Int. 4-5), d) parcelas de corrente reativa desbalanceada (Int. 5-6), e) início da compensação da potência Ur (Int. 5), f) término da compensação da potência Ur (Int. 5-6).	128

Figura 70 – Empacotamento dos sinais de corrente através da TDF: a) sinais no domínio do tempo das parcelas de compensação reativa, de distorção e desbalanço (Int. 3-6), b) vetor de dados com os sinais empacotados da fase a, c) vetor de dados com os sinais empacotados da fase b, d) vetor de dados com os sinais empacotados da fase c.	129
Figura 71– Sinais das parcelas de corrente de distorção: a) vetor de dados com os sinais empacotados da fase a (Int. 3-6); b) detalhe dos dados referentes à corrente de distorção da fase a (Int. 4-5); c) sinal no domínio do tempo da corrente de distorção da fase a; d) dados referentes à corrente de distorção da fase b (Int. 4-5); e) detalhe do sinal no domínio do tempo da corrente de distorção da fase b; f) dados referentes à corrente de distorção da fase c (Int. 4-5); g) sinal no domínio do tempo da corrente de distorção da fase c.	130
Figura 72– Sinais das parcelas das correntes reativas (balanceadas e desbalanceadas): a) vetor de dados com os sinais empacotados da fase a (Int. 3-6); b) detalhe dos dados referentes às correntes reativas da fase a (Int. 4-5); c) sinal no domínio do tempo das correntes reativas da fase a; d) dados referentes às correntes reativas da fase b (Int. 4-5); e) detalhe do sinal no domínio do tempo das correntes reativas da fase b; f) dados referentes às correntes reativas da fase c (Int. 4-5); g) sinal no domínio do tempo das correntes reativas da fase c.....	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de potência entre categorias de carga da FPSO.....	25
Tabela 2 - Dados técnicos de modelos de turbinas a gás com potência entre 25 e 40 MW.....	27
Tabela 3 – Modelos de conversores de potência em média tensão disponíveis no mercado.	49
Tabela 4 - Informações comparativas entre topologias de conversores em média tensão.	52
Tabela 5 - Saturador de potência dos AFE-ASDs através de medição de temperatura.....	63
Tabela 6 - Parâmetros da máquina síncrona presente no estudo.....	77
Tabela 7 – Lista dos geradores na plataforma FPSO em estudo.	77
Tabela 8 - Dados técnicos de transformadores da FPSO objeto de estudo.	78
Tabela 9 – Motores de média tensão da plataforma FPSO em estudo.	83
Tabela 10 – Modelagem RL de cabos da plataforma FPSO em estudo.	84
Tabela 11 – Lista de cargas em operação no modo de operação <i>Production</i>	85
Tabela 12 - Lista de cargas em operação no modo de operação <i>Production/ Offloading</i>	86
Tabela 13 - Lista de cargas em operação no modo de operação <i>Preservation</i>	86
Tabela 14 – Lista de cargas instaladas na FPSO modelada.....	87
Tabela 15 - Modos de operação e carregamento na geração da FPSO em estudo.	88
Tabela 16 – Casos e cenários simulados.	92
Tabela 17 – Resultados de variação de tensão e frequência nos geradores de turbina a gás para evento de partida direta de motor.....	94
Tabela 18 – Configuração do sistema elétrico para o estudo de caso 2.	95
Tabela 19 – Disponibilidade dos AFE-ASDs para controle coordenado no estudo de caso 2.....	96
Tabela 20 – Parâmetros do sistema elétrico do estudo de caso 3.....	102
Tabela 21 – Condições operacionais exploradas no estudo de caso 3.	102
Tabela 22 - Disponibilidade dos AFE-ASDs para controle coordenado no estudo de caso 3.	103
Tabela 23 – Variação de tensão nas simulações com e sem controle coordenado para os estudos de casos 3A-3D.....	105
Tabela 24 – Resultados em regime dos GTGs para estudos de casos 3A-3D.....	105
Tabela 25 – Variação de Tensão nas simulações para o 3E.....	107
Tabela 26 – Resultados em regime dos GTGs para simulações com e sem controle coordenado para o caso 3E.	108
Tabela 27 – Parâmetros do sistema elétrico do estudo de caso 4.....	109
Tabela 28 – Cenários de análise para estudo de caso 4.....	109
Tabela 29 - Disponibilidade dos AFE-ASDs para controle coordenado no estudo de caso 4.	109
Tabela 30 – Resultados em regime dos GTGs para simulações com e sem controle coordenado - caso 4A.....	110

Tabela 31 – Resultados de potências, perdas, eficiência, emissão de CO2 e tensão para o caso 4A..	111
Tabela 32 - Variação de Tensão nas simulações para o caso 4B.	113
Tabela 33 – Resultado de distorção harmônica de tensão e corrente para o EC4/CC.....	116
Tabela 34 - Valores de referência tolerância de tensão.....	154
Tabela 35 - Limites de tensão para operação de motores elétricos IEC 60034-1.	155
Tabela 36 - Indicadores e limites de frequência.....	155
Tabela 37 - Limites de Distorção Harmônica de Tensão.	156
Tabela 38 - Indicadores e limites aplicáveis ao SEP de uma plataforma marítima.....	157

SUMÁRIO

1	Introdução	21
1.1	Transição energética e eletrificação de plataformas de petróleo.....	21
1.2	Sistema elétrico de uma plataforma marítima do tipo FPSO	23
1.3	Desafios e oportunidades relacionadas ao SEP de plataformas marítimas de petróleo	28
1.4	Controle coordenado aplicado ao sistema de gerenciamento de energia	32
1.5	Objetivos	37
1.6	Estrutura e organização da tese	38
2	Conversores eletrônicos de potência em plataformas de petróleo.....	40
2.1	Principais topologias de conversores eletrônicos de média tensão aplicadas em plataformas ...	40
2.1.1	Conversor comutado por carga LCI	40
2.1.2	Conversor fonte de corrente PWM CSC	42
2.1.3	Conversor multinível ponte H em cascata CHB.....	43
2.1.4	Conversor com ponto neutro grampeado NPC.....	44
2.1.5	Conversor multinível com capacitor flutuante	46
2.1.6	Conversor modular multinível.....	47
2.1.7	Conversores comerciais de média tensão aplicados na indústria de óleo e gás	48
2.2	Aplicações de condicionamento ativo de potência através de conversores multiníveis	50
2.3	Considerações parciais.....	51
3	Proposta de controle coordenado através de AFE-ASDs em plataformas FPSO.....	54
3.1	Controle coordenado integrado ao PMS	54
3.2	Desenvolvimento da metodologia.....	56
3.2.1	Etapa A: sinais amostrados.....	58
3.2.2	Etapa B: definições da teoria de potência conservativa	59
3.2.3	Etapa C: referência de potência de compensação.....	60
3.2.4	Etapa D: coeficiente de disponibilidade dos AFE-ASDs	60
3.2.5	Etapa E: algoritmo de seletividade	61
3.2.6	Etapa F: corrente total de compensação	62

3.2.7	Etapa G: cálculo de referência de compensação dos AFE-ASDs	63
3.3	Saturador de Temperatura.....	63
3.4	Infraestrutura de Comunicação	65
3.5	Considerações parciais.....	67
4	Modelagem computacional do SEP de uma FPSO	68
4.1	Sistema integrado de geração de turbinas a gás	68
4.2	Transformadores	78
4.3	Motores Elétricos	79
4.4	Cabos elétricos, cargas e modos de operação	83
4.5	Levantamento de cargas e modos de operação	85
4.6	Considerações parciais.....	90
5	Simulações computacionais	91
5.1	Estudo de Caso 1: variação de tensão frente a disponibilidade de AFE-ASDs	93
5.2	Estudo de Caso 2: suporte de potência reativa em cenário de colapso de tensão	95
5.3	Estudo de caso 3: diferentes configurações de chaves seccionadoras	101
5.3.1	Estudos de casos 3A ao 3D: três chaves fechadas e uma aberta	103
5.3.2	Estudo de caso 3E: duas chaves abertas e duas fechadas	106
5.4	Estudo de caso 4: análise em regime e eventos transitórios com compensação	108
5.4.1	Caso 4A: ajuste de fator de potência em regime	110
5.4.2	Caso 4B: suporte de potência reativa em conexão de cargas	111
5.4.3	Caso 4C: compensação de distorção harmônica de corrente.....	115
5.4.4	Caso 4D: suporte de potência reativa em descarte de cargas	116
5.5	Estudo de caso 5: análise de saturação de potência por temperatura do AFE-ASD	117
5.6	Estudo de caso 6: análise das etapas da metodologia de controle coordenado	120
5.7	Considerações parciais.....	132
6	Conclusões	134
6.1	Trabalhos futuros	135
6.2	Publicações	136
	Referências	138

Apêndice A – Normas aplicadas 153

Anexo 1 – Dados de manual (inversor WEG MVW3000) 159

CAPÍTULO 1

1 Introdução

Este capítulo aborda algumas das tendências sobre transição energética em plataformas marítimas de petróleo, descrevendo as características do sistema elétrico e destacando desafios e oportunidades. Além disso, apresenta os objetivos e motivações desta deste trabalho de doutorado.

O aumento da demanda global por energia é uma realidade que já perdura algumas décadas e com projeções de crescimento entre 30% e 76% até 2050 [1]. E, apesar dos investimentos e aumento na adoção de novas fontes de energia, ainda é prevista uma participação significativa dos combustíveis derivados do setor de óleo e gás na matriz energética mundial [2]. Além disso, o mercado de óleo e gás não se limita à produção de energia, pois também é responsável por suprir insumos para diversos setores, fornecendo materiais essenciais para as indústrias química, de produção de plástico, de fluidos lubrificantes, asfalto e outras [3], [4].

No Brasil, com a descoberta de reservas na camada pré-sal, a produção de hidrocarbonetos teve em aumento anual médio de produção de 4% nos últimos 10 anos e acúmulo de reservas comprovadas de 14,8 bilhões de barris [5], [6]. O Brasil ocupa a nona posição global na produção diária de óleo e gás, com plataformas offshore do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) desempenhando um papel crucial na extração e tornando o Brasil o líder mundial no número de plataformas deste tipo em operação [1], [7], [8].

Apesar da agenda global voltada para a redução de emissões de poluentes e a inserção de fontes alternativas de energia, a indústria de óleo e gás ainda exerce um papel crucial no atendimento à crescente demanda energética [9]. O foco das discussões está na modernização dessa indústria, visando torná-la mais eficiente e capaz de incorporar conceitos de transição energética em seus projetos e processos [10], [11]. Sob essa perspectiva, o setor tem avançado em estudos e aplicações relacionados à eletrificação de plataformas e à transição energética, incluindo estudos sobre a viabilidade de integração de fontes renováveis e sistemas de armazenamento de energia [12], [13], [14].

1.1 Transição energética e eletrificação de plataformas de petróleo

A eletrificação de plataformas marítimas é um tema que vem sendo estudado como uma resposta às demandas atuais de transição energética, e tem sido objeto de investigação em diversas aplicações, abrangendo perspectivas como a busca por fontes alternativas de energia,

a redução de emissões de poluentes e o gerenciamento energético eficiente [15], [16]. Nesse contexto, o desafio da indústria de óleo e gás concentra-se em implementar essa transição em seus projetos, sem deixar de priorizar a confiabilidade dos sistemas [17], [18], [19]. Os grandes equipamentos rotativos, responsáveis por operações de bombeamento, compressão de gás e outras aplicações e que antes eram acionados por turbinas a gás dedicadas, já são acionados por motores elétricos, caracterizando a evolução para plataformas FPSO *All Electric* [20], [21]. Essas plataformas operam sob condições de alta demanda de energia, com sistemas elétricos isolados e dependentes de geração local [22]. O sistema elétrico conta com a instalação de geradores elétricos movidos por turbinas a gás (GTG – *Gas Turbine Generator*), que são responsáveis por suprir à demanda de energia elétrica da plataforma, geradores a diesel para eventos de emergências, transformadores, motores elétricos de alta potência, cabos umbilicais, sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*) para circuitos prioritários e um sistema de gerenciamento de energia (PMS - *Power Manager System*) [14].

Apesar dos avanços tecnológicos nos projetos atuais de plataformas offshore, com o sistema elétrico sendo alimentado por geradores de turbinas a gás e as cargas representadas por motores elétricos, características como a emissão de CO₂ e a baixa eficiência dos geradores, em torno de 30% a 40%, ainda fazem parte dessa geração de plataformas [23], [24], [25]. A complexidade desses sistemas, aliada à baixa inércia e à regulação de tensão limitada, suscita alguns problemas associados à qualidade de energia, incluindo variações de tensão, baixo fator de potência e distorção harmônica nas correntes [26], [27]. Esses problemas impactam não apenas a eficiência operacional e a segurança das instalações, mas também representam desafios significativos para a confiabilidade e vida útil dos sistemas [28].

No campo da eletrificação de plataformas, várias estratégias estão sendo exploradas para aumentar a eficiência energética e a sustentabilidade em ambientes offshore. Essas estratégias incluem conectar sistemas offshore à rede elétrica terrestre [29], estabelecer conexões diretas entre plataformas e fontes de energia offshore, através de estruturas de microrredes [30], e reutilizar instalações de petróleo e gás descomissionadas em locais de produção de energia renovável [31]. O conceito de transformar plataformas offshore em centros de energia renovável, tem sido indicado como uma alternativa econômica e ecologicamente viável ao descomissionamento tradicional, reduzindo significativamente as emissões de carbono e permitindo a integração de novas funcionalidades aos sistemas existentes [32].

Em [33], os autores apresentaram o conceito de *Power Hubs* flutuantes. Com uma capacidade de geração de 450 MW, esses hubs têm como função centralizar o fornecimento de

energia para as unidades adjacentes. Os resultados indicaram uma eficiência de 45%, considerando a aplicação do conceito de geração por meio de ciclo combinado. Turbinas de geração através de ciclo combinado incluem o aproveitamento da queima dos gases através de uma turbina adicional a vapor [34].

A possibilidade de implantação de *Power Hubs* em plataformas offshore em fase de descomissionamento tem demonstrado ser uma opção atrativa no contexto estratégico. Em um estudo realizado por [35] foram indicadas vantagens, tais como a redução do aporte de investimento inicial, o aumento da eficiência de geração, especialmente com técnicas de ciclo combinado implementadas, e a diminuição da emissão de poluentes.

Em um estudo realizado por [32], foi investigada a implementação de *Power Hubs* com integração de plataformas offshore no contexto do pré-sal brasileiro. O foco do estudo foi analisar o comportamento do sistema elétrico e os desafios relacionados ao gerenciamento de energia e equipamentos, fluxo de potência, eventos de curto-circuito, indisponibilidade de energia e partida de máquinas. Os resultados demonstram que é possível operar tal sistema com um fornecimento estável e seguro.

Assim, o conceito de transição energética em plataformas offshore está se expandindo em várias frentes tecnológicas, dentre as quais se destacam: a integração de conversores eletrônicos de potência para conectar plataformas em *Power Hubs*; a aplicação de conversores eletrônicos para acionamento de cargas [36], [37] e o desenvolvimento e aplicação de tecnologias de armazenamento de energia [38], [39], [40]. A longo prazo, o setor busca a viabilidade de uma plataforma totalmente elétrica, eliminando a necessidade de gás para acionar turbinas ou sistemas de troca de calor ainda existentes nos processos de uma FPSO [9], [41].

1.2 Sistema elétrico de uma plataforma marítima do tipo FPSO

A Figura 1 apresenta uma ilustração em 3D de uma plataforma do tipo FPSO, com destaque para dois sistemas de geração a gás. Através dessa figura é possível observar que os geradores a gás ocupam parte representativa do espaço disponível na plataforma. Assim, a otimização de espaço e peso fazem parte da lista de requisitos em projetos de plataformas, pois impactam significativamente no custo e capacidade produtiva das plataformas.

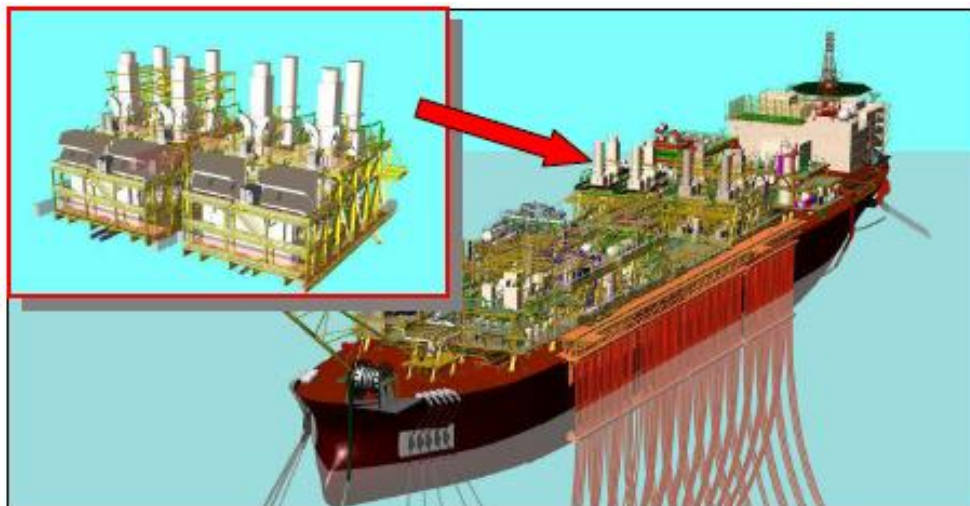


Figura 1 - Ilustração de uma plataforma FPSO, com destaque dos GTGs.

Fonte: Adaptado de [42].

A Figura 2 ilustra um exemplo do sistema elétrico de potência (SEP) de uma plataforma marítima FPSO, com seus barramentos de média e baixa tensão, geradores, transformadores e cargas, incluindo, cargas essenciais, não essenciais, auxiliares e de emergência. A organização das cargas em diferentes tipos/prioridades visa separá-las de modo que seja possível planejar estratégias para mitigar os riscos de interrupção de energia [42], [43].

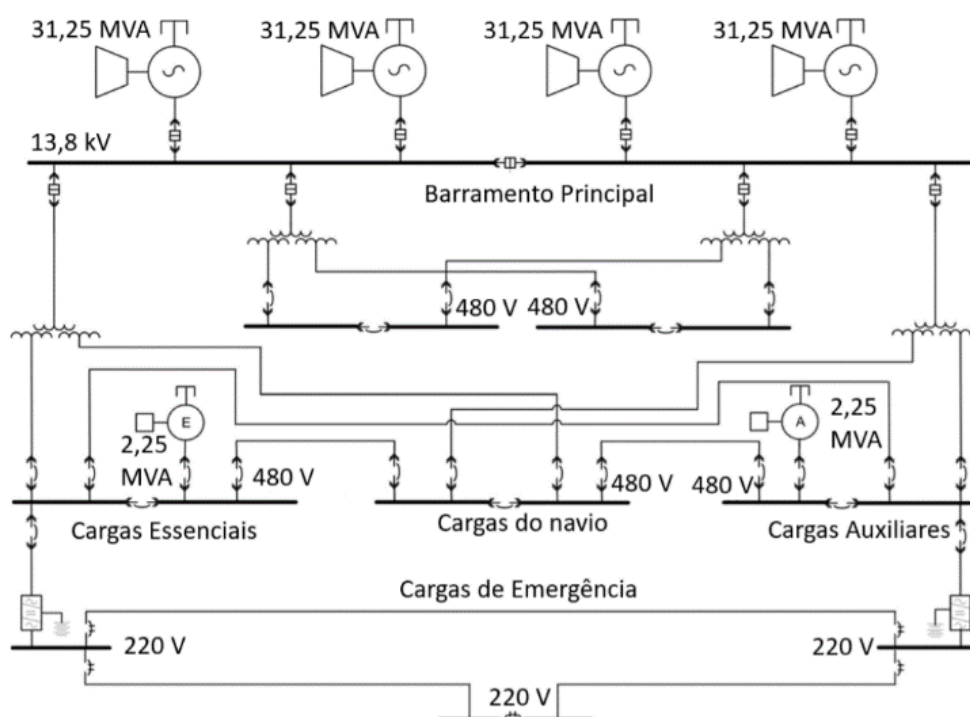


Figura 2 - Topologia básica do sistema elétrico de uma plataforma FPSO.

Fonte: Adaptado de [42].

As cargas não essenciais, predominantes em plataformas FPSO, não representam riscos operacionais ou de segurança durante interrupções de energia. As cargas auxiliares são responsáveis por dar suporte à partida dos equipamentos e geralmente têm geradores a diesel instalados para fornecer energia quando os geradores principais não estão disponíveis [44], [45]. Essa abordagem estruturada para categorização das cargas e a implementação de redundâncias desempenham um papel vital na garantia de operações ininterruptas e de segurança em plataformas de petróleo, especialmente em situações críticas que exigem recursos imediatos de *backup* e restauração da fonte de alimentação [46].

Em caso de falha, as cargas essenciais podem comprometer operações ou a segurança da instalação. Nestes circuitos são consideradas redundâncias entre circuitos alimentadores, incluindo a instalação de geradores de emergência [42]. Quanto às cargas de emergência, estas são equipamentos responsáveis pela segurança da plataforma, das pessoas e pelas operações críticas no processo. Para essas cargas, além das medidas utilizadas nas cargas essenciais, adiciona-se a instalação de sistemas com armazenamento de energia do tipo UPS, que garantem a continuidade ininterrupta da tensão em eventos de interrupção de energia ou transitórios do sistema elétrico [43]. A Tabela 1 apresenta informações sobre a distribuição típica de potência entre os diferentes tipos de carga.

Tabela 1 - Distribuição de potência entre categorias de carga da FPSO

Tipo de Carga	Potência
Não Essenciais	94.41 %
Auxiliares	2.48 %
Essenciais	1.98 %
Emergenciais	1.13 %

Fonte: Adaptado de [42].

Com o objetivo de simplificar o SEP típico de uma FPSO, é possível reduzir o diagrama unifilar sob a perspectiva de Média Tensão (MT), aglomerando as cargas em Baixa Tensão (BT) em blocos, conforme mostra a Figura 3. Assim sendo, o sistema elétrico da FPSO é composto por diferentes níveis de tensão, sendo que os barramentos principais são alimentados em MT e, a partir deles, há derivações para transformadores em BT. A baixa tensão abrange uma variedade de cargas e aplicações, com diferentes níveis de tensão: 690-720 V, 440-480 V e 220-240 V.

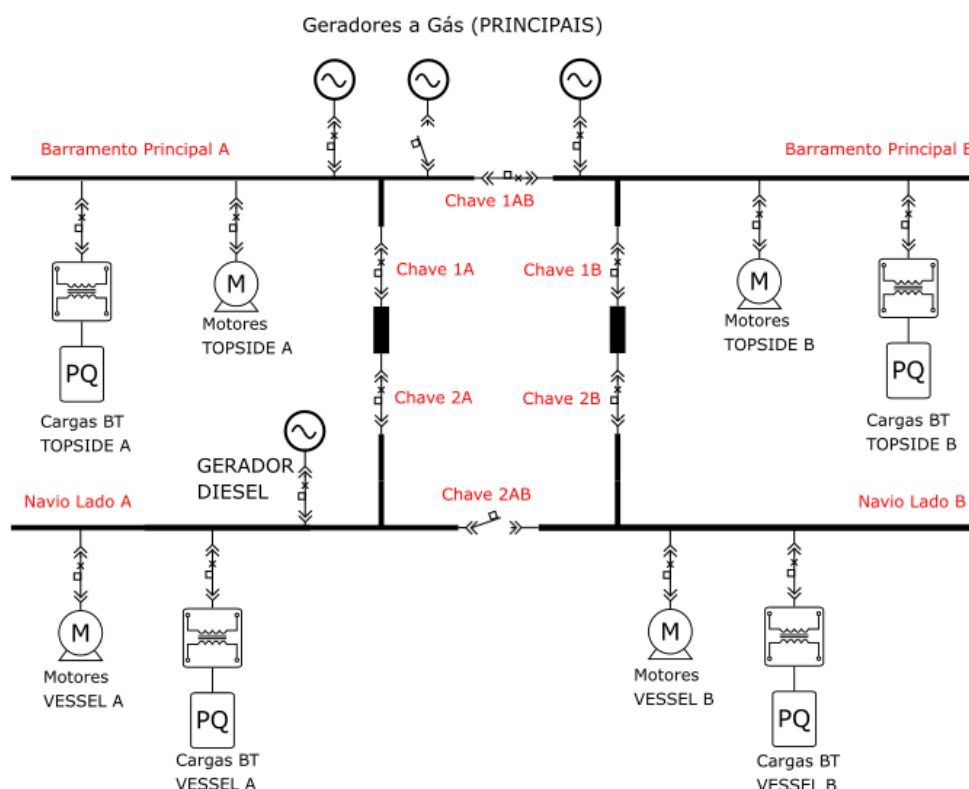


Figura 3 – Diagrama unifilar simplificado de uma plataforma FPSO.

Os geradores principais da Figura 3 são responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica na FPSO, sendo máquinas síncronas operadas em MT, classe 15 kV, e com potência elevada, aproximadamente 40 MVA, movidas em sua grande maioria por turbinas a gás aero-derivadas que operam de forma agrupadas (duas ou três máquinas ligadas e uma de reserva). A potência é dividida de forma compartilhada entre as máquinas [47].

Quanto aos geradores de emergência, são máquinas síncronas que operam em média ou baixa tensão e normalmente são movidos por motores de combustão interna a diesel, com potências variando entre 0,3 e 20 MVA. Esses equipamentos são estrategicamente posicionados com o objetivo de atender cargas auxiliares, essenciais e de emergência quando solicitados [48].

No contexto dos geradores principais, a Tabela 4 apresenta um levantamento de dados técnicos dos modelos de turbinas dos principais fabricantes [49], [50], [51], [52], [53], [54], com potência gerada na faixa de 25 a 40 MW. Observa-se que esses modelos apresentam eficiência variando entre 36% e 41%, além de informações sobre emissões de NO_x (15 a 25 ppm), taxa de fluxo de massa dos gases de escape (105 a 130 kg/s) e temperatura de saída dos gases (500 a 569 °C). É importante destacar que os modelos listados não incluem a tecnologia de ciclo combinado.

Tabela 2 - Dados técnicos de modelos de turbinas a gás com potência entre 25 e 40 MW.

Fabricante	Modelo	Potência (MW)	Eficiência (%)	Emissão de NO _x (ppm)	Taxa de Fluxo de Massa dos Gases de Escape (kg/s)	Temperatura de Saída dos Gases de Escape (°C)	Ref.
General Electric	LM2500	33-36	37-39	25	115	566	[52]
Rolls-Royce	RB211	35-40	38-40	25	130	530	[51]
Siemens	SGT-A35	35-40	38-41	15-25	130	500	[50]
Mitsubishi	H-25	25-40	36	15	105	569	[49]

No contexto da análise da eficiência de turbinas a gás em função da variação de potência, a Figura 4, adaptada de [55], apresenta a curva de rendimento e a curva de consumo de gás em relação à potência fornecida pelos GTGs.

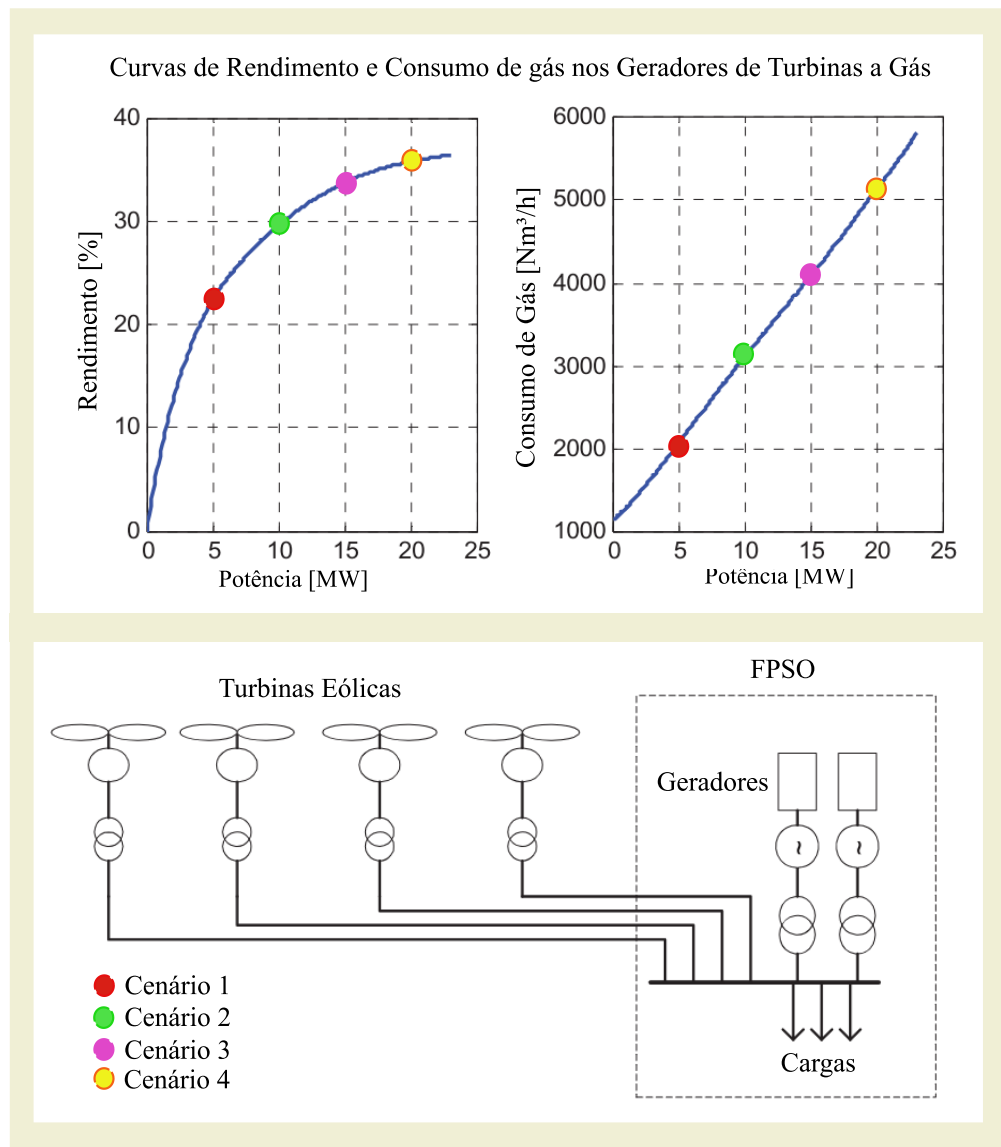


Figura 4 - Rendimento de GTGs em estudo de integração de energia eólica em plataforma offshore.

Fonte: Adaptado de [55].

O cenário disposto na Figura 4 considera a integração de turbinas eólicas, cujo objetivo é reduzir a participação dos GTGs no fornecimento de energia da plataforma. Nesse cenário, os GTGs passam a operar abaixo da potência nominal, o que, em termos de rendimento e consumo de gás, deve ser cuidadosamente considerado nas estratégias de operação. Observa-se que, dependendo do ponto de operação e do carregamento de potência dos GTGs, a relação de consumo de gás em Nm³/h com a potência gerada em MW pode aumentar.

Quanto aos equipamentos de processo, como bombas de injeção de água, compressores de gás e outros equipamentos de grande porte, estes são, em sua maioria, acionados por máquinas de indução trifásica (MIT) conectadas ao barramento de média tensão. Apesar da tecnologia de ASD (*Adjustable Speed Drive*) já ser aplicada em projetos de plataformas offshore, ainda é usual o projeto de FPSOs com a aplicação do método de partida direta em motores elétricos com potências nominais em torno de alguns MW [56].

1.3 Desafios e oportunidades relacionadas ao SEP de plataformas marítimas de petróleo

Considerando que o sistema elétrico das plataformas se caracteriza como um sistema isolado e com geração limitada, eventos de entrada e saída de cargas podem provocar variações significativas de tensão [57]. E, sabendo-se que o método de partida direta de motores de elevada potência ainda faz parte da realidade de muitas plataformas em operação, incluindo novos projetos, essa característica pode acarretar diversos problemas de qualidade de energia elétrica, dentre eles os principais são: as variações de tensão e frequência nos barramentos e o risco de colapso de tensão em situações de elevado carregamento de potência dos geradores principais [45], [47], [58], [59].

A despeito da existência de sistemas de controle para regulação dos próprios geradores, e considerando a inércia dessas máquinas rotativas de grande porte, o tempo de resposta destes pode ser de vários segundos, fazendo com que as perturbações excedam os limites de tensão recomendados nas normas de qualidade de energia elétrica para plataformas offshore [60].

Ainda que não sejam utilizados em todos os projetos de plataformas, a aplicação de ASDs do tipo passivos para o acionamento de motores elétricos e outros conversores eletrônicos com entrada do tipo passiva podem contribuir para existência de distorção harmônica de corrente nos SEPs [61], [62]. Além disso, os cabos submarinos, aplicados em plataformas offshore, têm o potencial de criar condições de ressonância paralela ao interagir com as correntes harmônicas de ASDs [63]. Neste contexto, destaca-se que a utilização de umbilicais

para conectar geradores eólicos offshore também pode contribuir para o surgimento de frequências ressonantes, devido à sua capacitância intrínseca [64].

Considerando que a geração de energia por meio de turbinas eólicas flutuantes tem sido amplamente proposta para conexão em plataformas offshore [28], [65], [66], sua aplicação requer enfrentar vários desafios, entre eles o gerenciamento do fluxo energético da plataforma, pois a intermitência das fontes pode comprometer a confiabilidade do sistema [66], [67]. No contexto de oportunidades, a conexão dos sistemas de geração de energia eólica com as plataformas pode ser realizada através de conversores eletrônicos de potência, os quais além de condicionar a energia de fonte renovável, podem permitir a implementação de técnicas de controle com inclusão de serviços ancilares, através da multifuncionalidade desses conversores [47], [68].

Sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias e supercapacitores, gerenciados por conversores eletrônicos de potência, também têm sido estudados como tecnologias modernas que podem contribuir para a mitigação de intermitências de fontes renováveis e com outros serviços ancilares nas FPSOs [69], [30], [38], [39].

Nesse sentido, a aplicação da tecnologia AFE-ASD (*Active Front End Adjustable Speed Drive*) em plataformas offshore não apenas proporciona os benefícios reconhecidos, como partida em rampa e controle de velocidade e torque de motores elétricos, mas também tem grande potencial de ampliar sua abrangência, com a possibilidade de inserção de estratégias de controle multifuncional para oferta de funções ancilares através dos conversores [37], [48], [57], [70].

O sistema de gerenciamento de energia da plataforma, composto por dispositivos de controle integrados à infraestrutura de comunicação, abrange todo o SEP e é responsável pelo monitoramento, gerenciamento e tomadas de decisão do sistema elétrico [71], [72], incorporando estratégias de controle de tensão e frequência dos geradores. Além disso, o PMS inclui gerenciamento de cargas prioritárias, permitindo o descarte de cargas não prioritárias sob condições de falhas de geradores ou eventos pré-programados [72], [73]. A Figura 5 destaca as funcionalidades do PMS em uma plataforma FPSO.

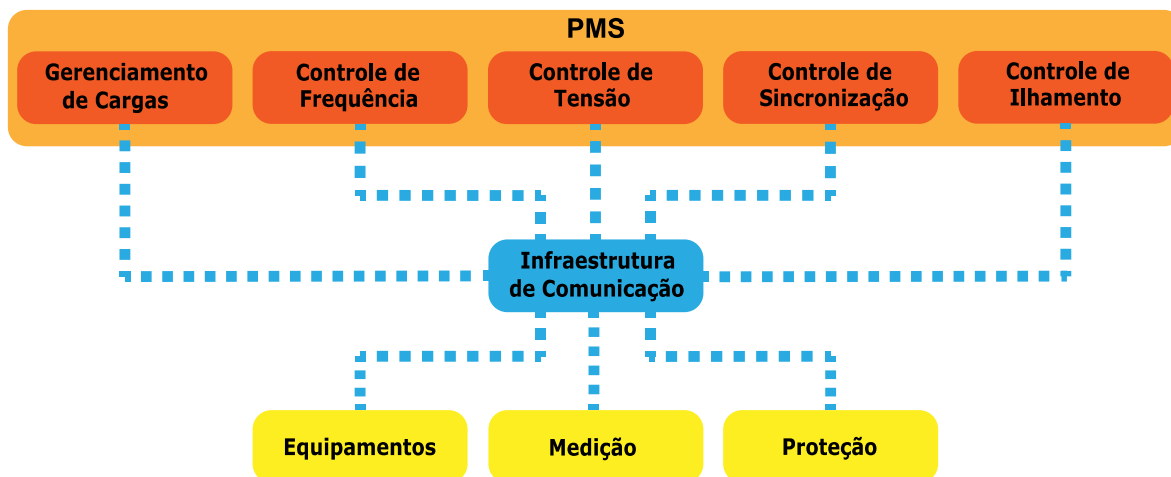


Figura 5 – Integração de funcionalidades do sistema PMS.

Fonte: Adaptado de [73], [74].

Como citado, no contexto de gerenciamento de cargas, além de atribuições de supervisão, o descarte de cargas (*Load Shedding*) também faz parte da rotina do PMS, desligando cargas para evitar a falha em cascata do sistema de geração [75]. O descarte de carga pode ser acionado em diversas condições, como perda súbita de um gerador, sobrecarga gradual dos geradores ou frequência do sistema abaixo de um valor pré-definido.

Sobre o controle de frequência do sistema elétrico, o PMS tem como atribuição a coordenação de ações para que se mantenha estável. Assim, seguindo parâmetros predefinidos e quando a frequência diverge do intervalo aceitável, o PMS ajusta os governadores dos geradores para corrigi-la, garantindo que permaneça dentro dos limites estabelecidos [74]. A estratégia de controle de frequência implementada pelo PMS é abordada em [76] sob duas óticas principais: a primeira estratégia consiste em operar um gerador no modo isócrona enquanto os demais funcionam em modo de resposta à carga, e a segunda, em fazer com que todos os geradores operem em modo de resposta à carga.

O PMS também tem um papel importante na regulação da tensão do sistema elétrico, assegurando sua estabilidade e mantendo-a dentro dos limites estabelecidos [73]. Isso é realizado pelo controle dos reguladores de tensão (AVRs - *Automatic Voltage Regulators*) dos geradores, por meio de instruções para elevar ou reduzir a tensão conforme necessário. Em [76] examina-se diversas técnicas de controle de tensão, incluindo o ajuste proporcional (*droop*) e o controle de tensão constante utilizando AVRs, e avalia-se detalhadamente o impacto dessas abordagens na estabilidade do sistema elétrico.

No contexto de fornecimento de potência ativa e reativa, o PMS ajusta os parâmetros visando uma distribuição equitativa entre os geradores [72]. Esta distribuição pode ser executada de maneira uniforme, proporcionalmente à capacidade de cada gerador, ou de acordo com uma configuração de carga especificamente determinada pelo operador [76], [77]. As metodologias para um compartilhamento eficaz da potência ativa através do PMS são discutidas em [76], destacando-se estratégias como a distribuição proporcional de carga, a aplicação de ajustes predeterminados e o controle manual por parte do operador. Essas abordagens são cruciais para otimizar a eficiência operacional dos sistemas de geração, garantindo uma gestão energética balanceada e adaptativa.

A partida de motores, coordenação de chaves e circuitos, sistema de proteção e outras funcionalidades também estão integradas ao sistema de gerenciamento de energia, sendo capaz de se comunicar com o sistema de segurança, permitindo a integração e sincronização de dados e informações importantes sobre o sistema de energia da plataforma FPSO [77]. No contexto de modernização do PMS, [72] aborda tendências de otimização de sistemas de gerenciamento de energia em sistemas ilhados, e destaca a oportunidade de aplicação de ferramentas de predição no que tange a operação do sistema elétrico, por meio de medições das grandezas, banco de dados com informações de eventos anteriores e integração com interface de operação.

Todas essas funcionalidades são garantidas através da infraestrutura de comunicação, sendo que a integração entre os diversos dispositivos e o PMS de plataformas FPSO deve atender os requisitos estabelecidos pela norma IEC-61850 [78], permitindo confiabilidade nos links de comunicação e interação entre os dispositivos de controle do SEP. Para [79] a utilização da IEC-61850 nos sistemas de comunicação contribui para confiabilidade do suprimento de energia elétrica nas plataformas FPSO da indústria de petróleo e gás. Nesse estudo destaca-se a funcionalidade de desligamento e inibição de cargas com base na potência disponível na plataforma, operacionalizada por meio de mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), resultando em respostas ágeis a eventos críticos, como quedas súbitas na geração de energia.

A Figura 6 apresenta uma solução de sistema de gerenciamento de energia baseada na IEC-61850 [71]. Observa-se a infraestrutura de rede de comunicação entre os diferentes dispositivos do sistema. No primeiro nível, é possível observar a integração de canais de comunicação entre os controladores e os dispositivos de campo, tais como painéis elétricos, motores elétricos, geradores, medidores e dispositivos de proteção. No segundo nível, de supervisão e controle, é possível observar a infraestrutura de comunicação entre controladores,

estações de operação, estações de engenharia e servidores. No terceiro nível, observa-se a infraestrutura de rede TCP/IP com possibilidade de acesso remoto de usuários, bem como supervisionar toda a planta do sistema elétrico. Assim sendo, o sistema de gerenciamento do sistema elétrico tem abrangência nos diferentes níveis hierárquicos, o qual abre as possibilidades para explorar à incorporação de estratégias de controle de sistemas de distribuição modernos, especificamente as microrredes de energia, no PMS das plataformas FPSO.

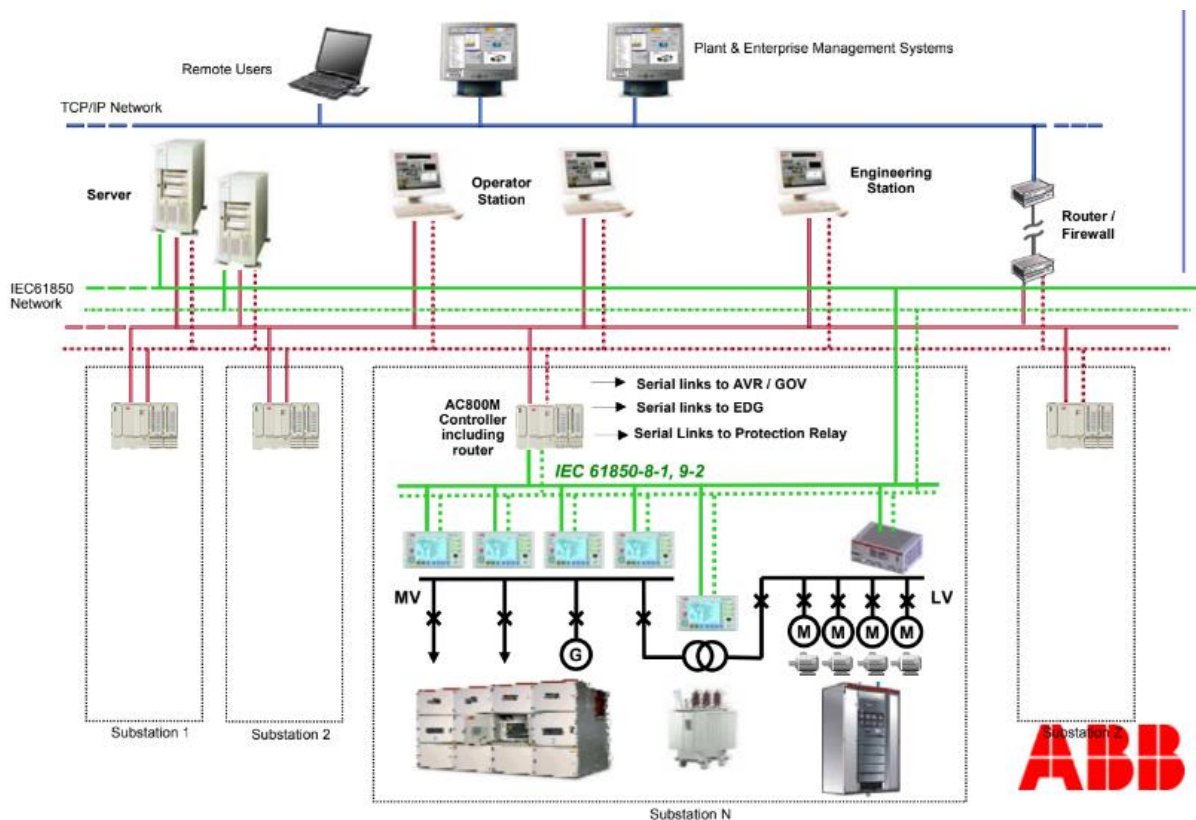


Figura 6 – Infraestrutura de comunicação de um sistema PMS em plataformas offshore.

Fonte: Adaptado de [71].

1.4 Controle coordenado aplicado ao sistema de gerenciamento de energia

Com o avanço da integração de fontes renováveis de energia nos sistemas elétricos, viabilizado pelo uso de conversores eletrônicos de potência (CEP), as discussões sobre a necessidade de gerenciamento dos recursos energéticos distribuídos (DER – *Distributed Energy Resources*) têm se intensificado substancialmente [80]. Nesse cenário, na última década, a utilização dos CEPs para o condicionamento ativo de energia se tornou um tema de grande relevância e ampla exploração na literatura, possibilitando a oferta de serviços ancilares aos

sistemas elétricos [81]. No entanto, essa aplicação impõe novos desafios, tanto do ponto de vista do controle local, no seu ponto de conexão, como também, do ponto de vista global, na coordenação e otimização do fluxo de potência dentro do sistema elétrico [82]. Esses desafios requerem abordagens que considerem a complexidade dos diversos elementos envolvidos no sistema, ressaltando a importância de estratégias de controle avançadas [83].

Nesse contexto, o controle coordenado tem sido destacado como uma das principais estratégias para o gerenciamento eficaz dos recursos energéticos distribuídos no sistema elétrico, sendo amplamente aplicado no controle e na operação de microrredes [84], [85]. Os objetivos principais do controle coordenado incluem o gerenciamento eficiente da potência ativa e reativa, a manutenção da estabilidade de tensão e frequência, além de garantir a confiabilidade do fornecimento de energia, tanto em condições de operação conectada à rede quanto em modo autônomo [86], [87]. A Figura 7 apresenta a classificação das estratégias de controle coordenado em duas categorias principais: as técnicas que não exigem infraestrutura de comunicação, conhecidas como estratégias de controle descentralizadas, e as técnicas que requerem infraestrutura de comunicação, classificadas como estratégias de controle centralizadas e distribuídas [87]. Cada uma dessas abordagens apresenta vantagens e limitações que devem ser cuidadosamente avaliadas de acordo com as características específicas do sistema e os objetivos de controle estabelecidos [88].

A estratégia de controle descentralizada, oferece uma abordagem em que cada CEP opera de maneira independente, tomando decisões baseadas exclusivamente em informações locais. Essa independência confere certo grau de confiabilidade ao sistema, já que a operação dos CEPs não depende de uma infraestrutura de comunicação que possa estar sujeita a falhas ou atrasos [86]. No entanto, essa autonomia também traz certas limitações, pois a atuação de cada CEP é restrita ao seu ponto de conexão, o que pode impedir o atendimento de objetivos globais dos sistemas ou até mesmo, contribuir para a estabilidade do mesmo [87], [89].

Na estratégia de controle centralizada, um controlador central desempenha o papel crucial de reunir informações de todos os dispositivos conectados ao sistema elétrico, permitindo a tomada de decisões operacionais de maneira centralizada e coordenada [87], [90]. Essa abordagem oferece a vantagem significativa de otimizar a operação do sistema, pois considera as interações entre todos os componentes, resultando em uma operação mais eficiente [91]. Contudo, essa estratégia exige uma infraestrutura de comunicação robusta para garantir a transmissão confiável de dados entre os dispositivos e o controlador central. Além disso, um

dos principais desafios é a vulnerabilidade a falhas no ponto central de controle, o que, em alguns casos, pode comprometer a operação de todo o sistema [92], [93].

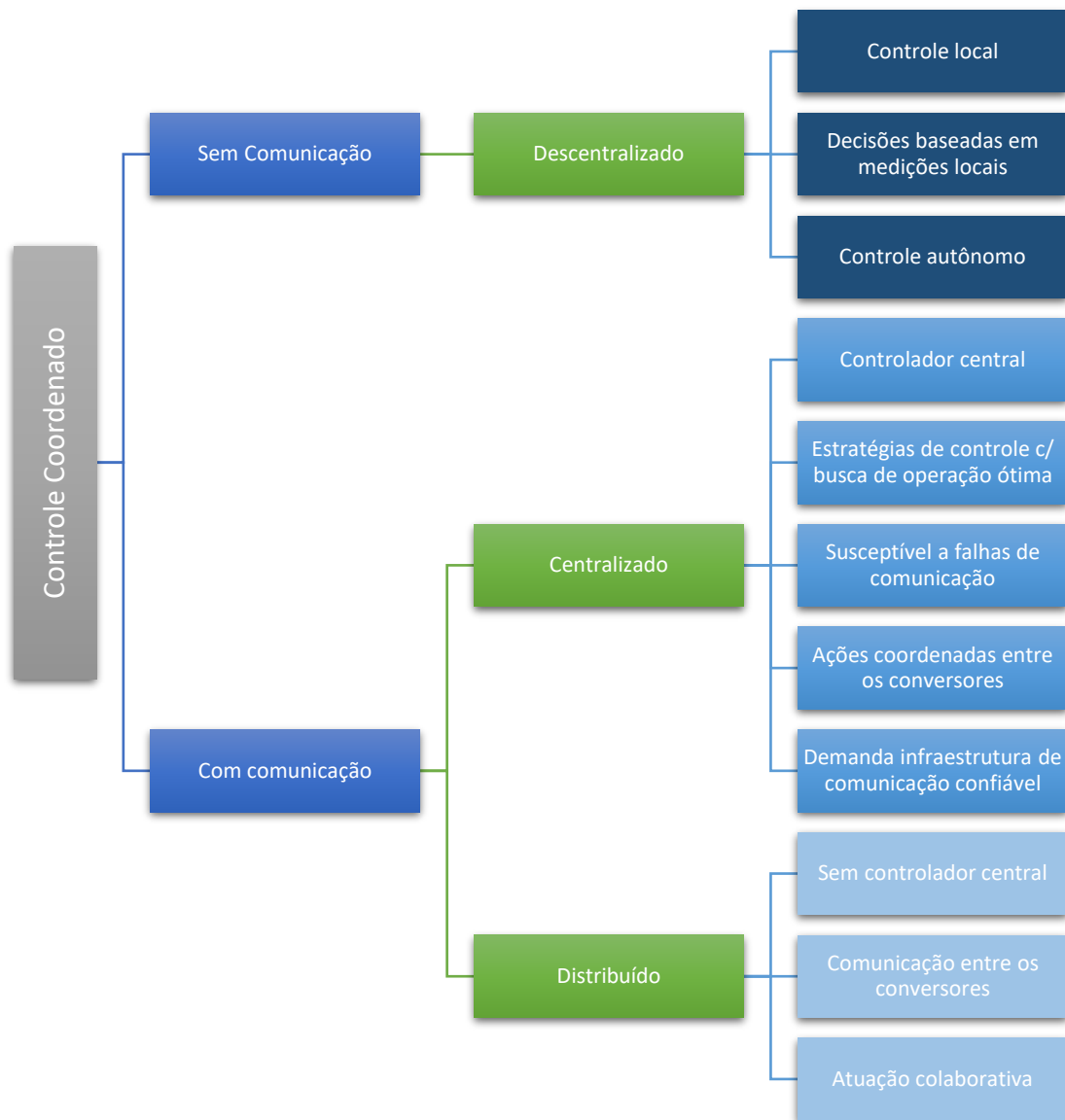


Figura 7 – Classificação das estratégias de controle coordenado.

Portanto, embora o controle centralizado possa oferecer uma otimização superior, sua implementação requer uma avaliação cuidadosa das necessidades de infraestrutura e dos riscos associados à centralização do controle.

A estratégia de controle distribuído combina características das abordagens centralizadas e descentralizadas. Embora ainda faça uso da comunicação, as decisões operacionais são tomadas de maneira colaborativa, permitindo o compartilhamento de informações e coordenação de ações de forma autônoma, reduzindo a dependência de um controlador central, mitigando o risco de falhas decorrentes de um único ponto de falha, como

ocorre na estratégia centralizada [87]. Adicionalmente, a abordagem distribuída pode aumentar a resiliência do sistema, uma vez que a tomada de decisão conjunta entre as unidades proporciona uma maior adaptabilidade frente a perturbações [87], [94].

Dando continuidade à análise das estratégias de controle coordenado, é relevante aprofundar a abordagem hierárquica, que se distingue pela estruturação sistemática das estratégias de controle em diferentes níveis [95]. O controle hierárquico emerge como uma metodologia para a gestão de sistemas elétricos complexos, segmentando as funções de controle em níveis primário, secundário e terciário [96], [97], [98].

No nível primário, o controle é responsável pela regulação direta de variáveis críticas como corrente e tensão em conversores multifuncionais. Este nível assegura a estabilidade imediata da microrrede, reagindo rapidamente às flutuações de carga e distúrbios no sistema, utilizando métodos como o controle *droop* para definir as referências de corrente, em função da potência ativa e reativa, injetada pelos CEPs [99]. Em contraste, o controle secundário atua supervisionando e ajustando o controle primário, corrigindo desvios de frequência e tensão e gerenciando a transição entre os modos conectado e isolado. Este nível de controle frequentemente requer comunicação entre os controladores locais e um controlador central, para garantir que os parâmetros do sistema permaneçam dentro dos limites aceitáveis [100]. Por fim, o nível terciário é responsável pela coordenação com a rede externa, gerenciando o fluxo de potência entre a microrrede e a rede principal e otimizando a operação com base em critérios econômicos, como custos de energia e eficiência operacional [101]. A Figura 8 apresenta a arquitetura hierárquica dos níveis de controle em uma microrrede.

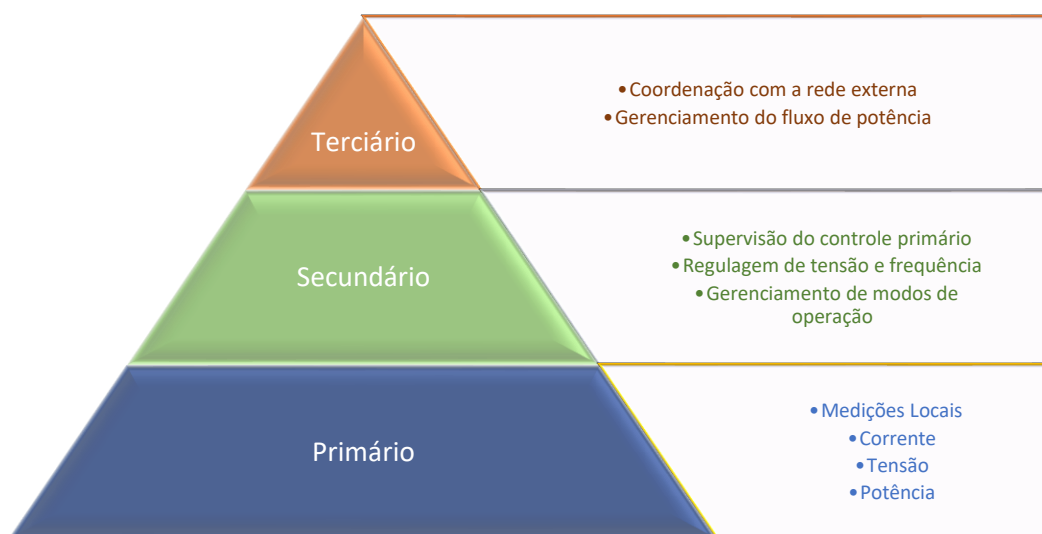


Figura 8 – Arquitetura hierárquica dos níveis de controle.

Fonte: Adaptado pelo autor.

Em aplicações de microrredes implementadas em BT, o controle coordenado de DERs em sistemas isolados é amplamente explorado, com diversas abordagens sugeridas para garantir o gerenciamento eficiente do fluxo de potência entre os recursos, assegurando a estabilidade do sistema e o compartilhamento adequado de potência ativa e reativa. Em [102], aplica-se um controle coordenado centralizado e hierárquico, utilizando a técnica de controle *droop* para o compartilhamento de potência entre os DERs. Já em [103], é adotado um controle descentralizado, também baseado no controle *droop*, mas com maior flexibilidade para lidar com a distribuição dos recursos. Em [104], [105] discute-se a adaptação do controle *droop* com a implementação de impedância virtual para aprimorar o compartilhamento de potência. Outros estudos [106], [107], [108], [109], [110] compartilham os mesmos objetivos, com proposições voltadas para o gerenciamento do sistema isolado, compartilhamento de potências e garantia da qualidade no fornecimento de tensão a microrrede.

Ainda em BT, em sistemas conectados à rede elétrica principal, os estudos [111], [112] propõem a implementação de controle coordenado por meio da implementação de um link de comunicação entre DERs, com atuação centralizada para o compartilhamento de energia com a rede. No mesmo sentido, [113] propõe adicionar múltiplos DERs e alcançar um gerenciamento eficiente de energia em microrredes.

Entre as proposições da literatura, voltadas ao controle coordenado centralizado, consta o método de controle baseado em parcelas de potência (PBC - *Power-Based Control*) [114], [115] que tem sido expandida para incluir camadas de controle no âmbito de tensão, distorção harmônica e frequência [116]. Destaca-se também a metodologia de controle coordenado baseada no compartilhamento de referências de correntes (CBC - *Current-Based Control*) [91], [96], [117], [118], a qual emprega a Transformada Discreta de Fourier (TDF) para extrair as suas componentes em frequência, em fase e quadratura, estabelecendo uma correlação entre as amplitudes de correntes detectadas com as parcelas de potências em cada frequência explorada, o que permite, além de controlar o fluxo das parcelas de potência ativa e reativa, contribuir na compensação seletiva das parcelas vinculadas à distorção harmônica. Adicionalmente, empregando as definições da Teoria de Potência Conservativa (CPT – *Conservative Power Theory*), como ferramenta adicional para decomposição da corrente em parcelas de corrente ortogonais, também tem sido propostas estratégias para compensação da potência vinculada aos desbalanços de carga em sistemas trifásicos, como explorado em [114].

Na área de óleo e gás, o controle coordenado tem sido proposto através das aplicações de CEPs para integração de fontes renováveis de energias, especialmente agrupando os

geradores de turbinas eólicas, sistema de armazenamento de energia (*Energy Storage Systems* - ESS), baseados em baterias (*Battery Energy Storage Systems* BESS) e/ou supercapacitores, e AFE-ASDs, utilizados para acionamento de motores elétricos nas plataformas. Essas tecnologias tem sido aplicadas para implementar soluções similares às utilizadas em microrredes elétricas em sistemas de distribuição de baixa tensão [28].

Diante esse panorama, no estudo apresentado em [20], discute-se a integração de uma turbina eólica ao sistema elétrico da plataforma, explorando o controle coordenado com um sistema de armazenamento de energia para fornecer suporte de potência reativa durante a partida direta de um motor. Através dos resultados de simulação foi possível reduzir a variação de tensão do barramento, em função do suporte de potência reativa oferecido pelo CEP. Em [119] propõe-se a utilização do CEP integrado ao BESS para prover serviço de energização de um transformador em uma plataforma marítima de petróleo. Em [29], é apresentada uma metodologia de controle coordenado baseada em PBC, que atua no compartilhamento de potência reativa para suporte em eventos de degrau de carga, com ajuste *droop* Volt/Var modificado. Já em [34], aborda-se a implementação de controle coordenado com compartilhamento de potência reativa e ajuste Volt/Var em um cenário de integração de energia eólica na plataforma.

Assim sendo, observa-se que entre os principais estudos e proposições disponíveis sobre controle coordenado aplicados no âmbito de plataformas offshore, existem diversas lacunas quanto a interpretar os cenários operacionais e oportunidades de melhorias, como também a ausência de propostas que explorem estratégias de compensação das parcelas de potência vinculada à distorção harmônica de corrente e a potência atrelada ao desbalanço de carga reativo. Neste contexto, entre as diversas técnicas e ferramentas disponíveis na literatura para compensação, a CPT tem-se destacado como uma ferramenta sólida para correlacionar os fenômenos físicos vinculados à natureza das cargas, mas também, como uma solução viável para o controle do fluxo de potência do sistema [83], [120], pelo fato de garantir a decomposição da corrente em componentes ortogonais e portanto, a compensação seletiva dessas componentes mediante o uso de CEP multifuncionais.

1.5 Objetivos

Considerando as diversas oportunidades e desafios trazidos pelo processo de transição energética das plataformas marítimas de petróleo, entendendo os ganhos do controle coordenado em sistemas elétricos de potência, e considerando a estrutura do sistemas de

gerenciamento de energia das plataformas FPSO, este trabalho tem como objetivo propor e implementar uma metodologia de controle coordenado centralizado, que permita ser integrada ao Sistema de Gerenciamento de Energia como função adicional, para garantir a operação de AFE-ASDs multifuncionais em plataformas FPSO. A proposta visa aprimorar a compensação de potência reativa balanceada, reduzir a distorção harmônica de corrente e mitigar o desbalanceamento de potência reativa, por meio do compartilhamento eficiente das parcelas de corrente entre os dispositivos, empregando as definições da Teoria da Potência Conservativa.

Objetivos específicos

- ✓ Desenvolver uma arquitetura de controle coordenado que possa ser incorporada ao PMS, adaptando métodos e técnicas para atender às condições de infraestrutura dos sistemas já existentes.
- ✓ Inserir as definições da CPT como ferramenta para obtenção das referências de compensação para garantir a ortogonalidade entre as parcelas de corrente, permitindo uma compensação seletiva e eficiente de potência reativa, distorção harmônica e desbalanceamentos de potência reativa no sistema elétrico da plataforma.
- ✓ Desenvolver um algoritmo de seletividade capaz de priorizar a compensação das componentes de corrente em função da quantidade de potência aparente disponível nos AFE-ASDs e das condições operacionais específicas da plataforma FPSO.
- ✓ Implementar a técnica de empacotamento de sinais através da Transformada Discreta de Fourier para integrar e compartilhar os sinais de corrente nos canais de comunicação, garantindo a factibilidade do compartilhamento dos sinais de medições e referências.
- ✓ Avaliar a estratégia de controle proposta em um ambiente de simulação modelada através de informações de uma plataforma FPSO real em operação na costa brasileira, avaliando o desempenho em termos de redução de variação de tensão, melhora do fator de potência, redução das distorções harmônicas e potências reativas desbalanceadas.

1.6 Estrutura e organização da tese

O Capítulo 2 explora as principais topologias de conversores eletrônicos de potência utilizados em plataformas offshore, com ênfase nos modelos mais relevantes disponíveis no mercado, além de aplicações voltadas para o condicionamento de qualidade de energia em média tensão, utilizando conversores multiníveis.

No Capítulo 3, detalha-se a metodologia de controle coordenado proposta, descrevendo suas etapas, como a aquisição de sinais de tensão e corrente, a utilização da CPT para decomposição ortogonal das correntes e potências, permitindo a compensação seletiva. Também é proposto um algoritmo que prioriza a compensação de parcelas de potência, considerando a disponibilidade dos AFE-ASDs. A metodologia inclui o cálculo e a geração de sinais de referência de compensação e a aplicação da TDF para o compartilhamento desses sinais por meio da infraestrutura de comunicação.

O Capítulo 4 apresenta os modelos do sistema em estudo, incluindo geradores modelados com polinômios de 8ª ordem, motores elétricos de alta potência modelados via LUT (*Look Up Table*) com dados de fabricantes, transformadores baseados em modelos disponibilizados pelo IEEE, e cabos modelados conforme dados reais de impedância e comprimento, e outras cargas representadas por blocos de potência constante.

No Capítulo 5, são expostos os resultados organizados conforme os cenários analisados. Esses cenários incluem a análise da redução de variação de tensão em partidas diretas de motores com suporte reativo, bem como a análise em cenários com dois geradores em operação e carga próxima à capacidade nominal, destacando o risco de colapso de tensão. Outras análises incluem variações nas chaves de seccionamento em barramentos de média tensão, descarte de cargas, e compensação da distorção harmônica de corrente. Adicionalmente, considerando dados de fabricantes, apresenta-se uma estratégia que gerencia o suporte de serviços ancilares vinculados aos AFE-ASDs, em função dos perfis de potência operacional limitados pela sua temperatura de operação. Por fim, o capítulo inclui a apresentação dos resultados sob a perspectiva da metodologia, demonstrando o compartilhamento das referências de compensação, a compensação de desbalanço e a aplicação da TDF no compartilhamento das referências.

Por fim, no Capítulo 6, são reportadas as conclusões do trabalho com uma análise geral das contribuições a partir dos resultados obtidos, sugerindo possíveis desenvolvimentos futuros e destacando as publicações geradas a partir desta pesquisa.

6 Conclusões

A busca por soluções que contribuam para a modernização e inclusão de novas tecnologias em setores relevantes para o desenvolvimento sustentável é uma das principais demandas da indústria de óleo e gás. Nesse sentido, esta pesquisa contribuiu para o atendimento dos principais desafios e oportunidades vinculadas à definição de estratégias flexíveis de gerenciamento avançado do fluxo de potência, como suporte nas diversas configurações de operação dos sistemas elétricos (isolados) de plataformas marítimas de petróleo e a melhora dos seus índices de qualidade de energia elétrica, o que também favorece a integração de novos recursos energéticos nas tendências de transição energética desse setor. Para isso, foi proposta uma metodologia de controle coordenado de AFE-ASDs multifuncionais que pode ser incorporada ao sistema de gerenciamento de potência (PMS) de uma plataforma FPSO. O esquema de controle proposto fundamentou-se em soluções recentemente exploradas em aplicações de microrredes elétricas, com arquitetura de controle hierárquico, em que os níveis de controle são compatíveis com os implementados no PMS das plataformas FPSO, e cuja infraestrutura de comunicação é baseada na norma IEC-61850, como aplicado em projetos dessas plataformas. Dessa forma é possível integrar a metodologia de controle coordenado proposta como uma funcionalidade adicional ao PMS.

O emprego das definições da Teoria da Potência Conservativa como estratégia de compensação seletiva das parcelas de potências reativa, balanceadas e desbalanceadas, assim como, a potência de distorção, permitiu avaliar detalhadamente os ganhos nos índices de qualidade de energia elétrica, em diversos cenários de operação de uma plataforma típica, tais como durante partida e descarte de máquinas de alta potência, presença de componentes harmônicas impostas por ASDs com entrada passiva e desbalanços no fluxo de reativos.

Os resultados do Capítulo 5 indicaram que a aplicação da metodologia proposta pode trazer contribuições importantes para operação do SEP das plataformas. Assim, em condições de regime permanente, os estudos indicaram que o controle coordenado proposto é capaz de prover benefícios como: (i) redução de perdas elétricas, com respectivo aumento da eficiência do SEP; (ii) melhoria do fator de potência, com respectivo aumento da disponibilidade de fornecimento de energia pelos geradores síncronos instalados; (iii) mitigação de correntes harmônicas e reativas desbalanceadas, promovendo o aprimoramento das condições operacionais de motores e máquina rotativas; dentre outros. Os resultados de regime também indicaram que, apesar das melhorias citadas, o controle coordenado baseado nas parcelas não

ativas de corrente não produz melhora significativa nas emissões de fases de efeito estufa, uma vez que estes estão diretamente associados à demanda de potência ativa nos GTGs. No caso dos estudos considerando condições transitórias, principalmente a partida de motores de grande porte, os resultados indicaram que o controle coordenado é capaz de reduzir significativamente as variações de tensão no ponto de acoplamento (barramento) comum da plataforma, minimizando o risco de desligamento ou mau funcionamento de cargas sensíveis ou mesmo a operação indevida de outros motores.

Destaca-se que, a revisão bibliográfica realizada e a identificação de soluções comerciais de AFE-ASDs que operam em média tensão (~ 13 KV), com potências elevadas (~ 20 MW), especialmente as topologias baseadas em CEPs multiníveis, valida a premissa da capacidade destes equipamentos atuarem como condicionadores ativos de energia, sintetizando as correntes de compensação solicitadas pelo controlador central, proporcionalmente à sua capacidade de potência disponível, e as prioridades dadas pelo algoritmo de seletividade proposto.

Por fim, entendendo que um dos principais desafios das estratégias de controle coordenado centralizado é a dependência dos links de comunicação dos equipamentos controláveis com o controlador central, assumiu-se que, devido ao grau de confiabilidade e a presença de sistemas de monitoramento redundantes, o sistema de processamento do PMS possui a capacidade de processar todos os passos da metodologia em tempo real, i.e., a cada período da rede ($\sim 16,67$ ms), incluindo a técnica de empacotamento de sinais utilizada.

6.1 Trabalhos futuros

Através dos modelos desenvolvidos, com a composição do sistema elétrico de uma plataforma FPSO e a aplicação do controle coordenado apresentado neste trabalho, é possível explorar diversas oportunidades. A seguir, algumas oportunidades para trabalhos futuros:

- ✓ **Compensação de Potência Ativa através dos ASDs:** os conversores AFE comerciais já possuem funções regenerativas de energia, injetando potência ativa em situações de frenagem de carga, dessa forma é possível explorar essa possibilidade na metodologia do controle coordenado, para eventos transitórios, de maneira a reduzir variação de frequência no sistema elétrico.
- ✓ **Malha de Tensão:** estudar aplicação de malha de monitoramento e controle de tensão junto às estratégias de compensação de potência reativa, com objetivo de mitigar efeitos de sobretensão.

- ✓ **Integração do BESS e Turbinas Eólicas nas estratégias de controle coordenado:** explorar a multifuncionalidade de CEPs do sistema BESS e Turbinas Eólicas no controle coordenado e ampliar a atuação da metodologia para injeção de potência ativa para mitigação de variação de frequência em eventos de descarte de cargas.
- ✓ **Energização de umbilicais:** explorar a aplicação do controle coordenado, especificamente na compensação de energia reativa nos processos de energização de umbilicais.
- ✓ **Hubs de Energia:** estudar aplicações de controle coordenado em cenários de conexão elétrica entre plataformas, avaliando limitações de controle centralizado, descentralizado e distribuído.
- ✓ **Controle Distribuído entre GTGs e CEPs:** estudar integração de controle integrado no compartilhamento de potências entre os GTGs e CEPs integrados ao SEP da plataforma.
- ✓ **Estudo de limitações de comunicação:** estudar as implicações de restrições de comunicação, através de experimentos com *hardware-in-the-loop*, avaliando-se os tempos de cálculo e atualização das referências do controle coordenado e, considerando-se as configurações de hardware dos controladores e a infraestrutura de comunicação aplicados no PMS.

6.2 Publicações

Durante o período de doutorado, foram submetidos e apresentados 7 trabalhos em congressos acadêmicos, além de 1 trabalho submetido a uma revista, como segue:

F. L. Paes, L. D. O. Arenas, A. M. S. Alonso, M. P. Santana, H. K. M. Paredes, F. A. S. Gonçalves, E. Tedeschi, F. P. Marafão, “Coordinated Control of Adjustable Speed Drives Applied to Oil and Gas Production Platforms,” *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*, Florianópolis, Brazil, 2023, pp. 1-8, doi: 10.1109/SPEC56436.2023.10407290. (**PUBLICADO**).

F. L. Paes; L. C. Souza; A. M. S. Alonso; L. D. O. Arenas; D. I. Brandão; E. Tedeschi; F. P. Marafão, “Evaluating A Coordinated Control Proposal in Operational Scenarios of an FPSO Oil and Gas Platform,” *2024 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Brasil (PCIC Brasil)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2024, pp. 1-8, doi:

10.1109/PCICBrasil54376.2024.10553099. **(PUBLICADO)**

F. L. Paes, J. B. O. Reis, M. V. M. Rodrigues, L. D. O. Arenas, F. A. S. Gonçalves, H. K. M. Paredes, F. P. Marafao, "Cooperative Control of Power Converters in Oil and Gas Production Platforms", *Brazilian Congress of Automation (CBA 2022)*. **(PUBLICADO)**

F. L. Paes, L. C. Souza, A. M. S. Alonso, H. K. M. Paredes, F. A. S. Goncalves, L. D. O. Arenas, F. P. Marafão, " Contribuições ao Sistema de Gerenciamento de Potência em Plataformas FPSO através do Controle Coordenado de Conversores Multifuncionais," *Eletrônica de Potência (ACEITO)*

M. V. M. Rodrigues, H. K. M. Paredes, **F. L. Paes**, M. B. Arcadepani, F. A. S. Gonçalves and F. P. Marafão, "Aprimoramento da Qualidade da Energia Elétrica em Instalações Monofásicas," *2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Paulo, Brazil, 2021, pp. 375-379, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529441. **(PUBLICADO)**

M. P. de Santana, H. K. M. Paredes, F. S. Gonçalves, **F. L. Paes**, E. V. Liberado, E. G. Junior, F. S. Oliveira, R. M. P. Rosa and F. P. Marafao, "Modeling and Tuning of Speed Regulators for FPSOs Generation Systems," *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*, Florianopolis, Brazil, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/SPEC56436.2023.10408478. **(PUBLICADO)**

L.C. Souza, **F. L. Paes**, L.D.O. Arenas, D. I. Brandão, E. Tedeschi, F. P. Marafão. "An overview on recent advances and research in offshore O&G power systems," *2024 Rio Oil and Gas Conference (ROG.e 2024)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2024. **(PUBLICADO)**

A. M. S. Alonso; L. C. Souza; **F. L. Paes**; L. D. O. Arenas; H. K. M. Paredes; F. A. S. Gonçalves; F. P. Marafão; F. S. Oliveira; M. J. M. Spelta, "Operation Assessment for the Electrical Power System of an Oil and Gas Platform Integrating VFD and Wind Turbine Models," *2024 Rio Oil and Gas Conference (ROG.e 2024)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2024. **(PUBLICADO)**

Referências

- [1] R. C. Camargo, H. Sakamoto, L. F. N. Lourenço, M. B. C. Salles, and L. Kulay, “Eco-efficiency of power supply systems for offshore platforms,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, p. 100475, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100475.
- [2] N. Dutt, “Editorial Welcome to International Journal of Energy Resources Applications: A Journal focussing on the energy demand and applications,” *International Journal of Energy Resources Applications*, pp. 1–4, Sep. 2022, doi: 10.56896/IJERA.2022.1.1.001.
- [3] A. K. Yazdi, P. F. Wanke, T. Hanne, F. Abdi, and A. H. Sarfaraz, “Supplier selection in the oil & gas industry: A comprehensive approach for Multi-Criteria Decision Analysis,” *Socioecon Plann Sci*, vol. 79, p. 101142, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.seps.2021.101142.
- [4] A. Karimu, G. Agordoh, P. Quartey, and R. Brännlund, “The Economics of Oil and Gas Resources,” in *The Economics of the Oil and Gas Industry*, London: Routledge, 2023, pp. 75–91. doi: 10.4324/9781003315056-9.
- [5] J. D. O. Alves and W. R. Faria, “Reserves, well drilling and production: Assessing the optimal trajectory of oil extraction for Brazil,” *Resources Policy*, vol. 88, p. 104341, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.resourpol.2023.104341.
- [6] 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/PCICBrasil54376.2024.10553041.
- [7] S. B. Schaffel, F. F. Westin, O. M. Hernandez, and E. L. La Rovere, “Replacing Fossil Fuels by Wind Power in Energy Supply to Offshore Oil&Gas Exploration and Production Activities – Possibilities for Brazil,” in *Day 2 Wed, October 30, 2019*, OTC, Oct. 2019. doi: 10.4043/29879-MS.
- [8] F. De Jesus Delgado, P. H. Neves Goncalves, and M. Chambriard, “Brazil Oil and Gas Sector Piece De Resistance: The Pre-Salt Play Developments,” in *Day 2 Wed, October 30, 2019*, OTC, Oct. 2019. doi: 10.4043/29840-MS.
- [9] L. Riboldi, S. Völler, M. Korpås, and L. O. Nord, “An Integrated Assessment of the Environmental and Economic Impact of Offshore Oil Platform Electrification,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 11, p. 2114, Jun. 2019, doi: 10.3390/en12112114.
- [10] S. L. Kovács, “Oil and gas industry: environmental and sustainability in the energy transition to net-zero,” in *84th EAGE Annual Conference & Exhibition*, European Association of Geoscientists & Engineers, 2023, pp. 1–5. doi: 10.3997/2214-4609.2023101044.
- [11] J. A. B. Maisy and S. Brown, “Electrification Solution for Greenfield and Brownfield Facilities Utilizing Offshore Floating Microgrids, as an Alternative to Power from Shore,” in *Day 3 Wed, May 03, 2023*, OTC, Apr. 2023. doi: 10.4043/32223-MS.

- [12] J. Olubodun, "Assessment of the Prospect and Challenges of the African Oil and Gas Industry in Harnessing Energy for a More Sustainable World," in *Day 2 Tue, August 02, 2022*, SPE, Aug. 2022. doi: 10.2118/211937-MS.
- [13] X. Cheng, M. Korpas, and H. Farahmand, "The impact of electrification on power system in Northern Europe," in *2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, IEEE, Jun. 2017, pp. 1–7. doi: 10.1109/EEM.2017.7981866.
- [14] R. N. Fard, "Integration of Distributed Energy Resources into Offshore and Subsea Grids," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 36–45, Mar. 2018, doi: 10.24295/CPSSSTPEA.2018.00004.
- [15] M. C. Abraham-Dukuma, M. O. Dioha, O. C. Aholu, N. V. Emodi, C. Ogbumbada, and A. Isah, "A marriage of convenience or necessity? Research and policy implications for electrifying upstream petroleum production systems with renewables," *Energy Res Soc Sci*, vol. 80, p. 102226, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.erss.2021.102226.
- [16] A. Ray and K. Rajashekara, "Electrification of Offshore Oil and Gas Production: Architectures and Power Conversion," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 15, p. 5812, Aug. 2023, doi: 10.3390/en16155812.
- [17] Z. Li *et al.*, "Reducing carbon footprint of deep-sea oil and gas field exploitation by optimization for Floating Production Storage and Offloading," *Appl Energy*, vol. 261, p. 114398, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114398.
- [18] S. Oliveira-Pinto, P. Rosa-Santos, and F. Taveira-Pinto, "Electricity supply to offshore oil and gas platforms from renewable ocean wave energy: Overview and case study analysis," *Energy Convers Manag*, vol. 186, pp. 556–569, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.050.
- [19] A. R. Ardal, K. Sharifabadi, O. Bergvoll, and V. Berge, "Challenges with integration and operation of offshore oil & gas platforms connected to an offshore wind power plant," in *2014 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe*, IEEE, Jun. 2014, pp. 1–9. doi: 10.1109/PCICEurope.2014.6900054.
- [20] K. Basha, A. Intieri, A. Mantini, M. Ermini, and S. Del Puglia, "Decarbonizing FPSO: Lifecycle Assessment of State-of-the-Art Rotating Equipment Solutions," in *Day 4 Thu, May 04, 2023*, OTC, Apr. 2023. doi: 10.4043/32513-MS.
- [21] S. Fang, Y. Xu, S. Wen, T. Zhao, H. Wang, and L. Liu, "Data-Driven Robust Coordination of Generation and Demand-Side in Photovoltaic Integrated All-Electric Ship Microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 1783–1795, May 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2954676.
- [22] A. A. Adeyemo, E. Alves, F. Marra, D. Brandao, and E. Tedeschi, "Suitability assessment of high-power energy storage technologies for offshore oil and gas platforms: A life cycle cost perspective," *J Energy Storage*, vol. 61, p. 106643, May 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.106643.

- [23] T. Antunes, R. Castro, P. Santos, and A. Pires, “Standardization of Power-from-Shore Grid Connections for Offshore Oil & Gas Production,” *Sustainability*, vol. 15, no. 6, p. 5041, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15065041.
- [24] M. Voldsund *et al.*, “Low carbon power generation for offshore oil and gas production,” *Energy Conversion and Management: X*, vol. 17, p. 100347, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100347.
- [25] H. Myklebust, K. Eriksson, B. Westman, and G. Persson, “Valhall power from shore after five years of operation,” in *2017 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe)*, IEEE, May 2017, pp. 1–4. doi: 10.23919/PCICEurope.2017.8015056.
- [26] L. A. Vitoi, D. Brandao, and E. Tedeschi, “Active Power Filter Pre-Selection Tool to Enhance the Power Quality in Oil and Gas Platforms,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 4, p. 1024, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14041024.
- [27] R. M. Vidaurre and M. Z. Fortes, “The interaction of submarine cables and the power quality of an oil rig’s electrical system,” *Electrical Engineering*, vol. 102, no. 3, pp. 1521–1530, Sep. 2020, doi: 10.1007/s00202-020-00972-1.
- [28] E. Alves, S. Sanchez, D. Brandao, and E. Tedeschi, “Smart Load Management with Energy Storage for Power Quality Enhancement in Wind-Powered Oil and Gas Applications,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 15, p. 2985, Aug. 2019, doi: 10.3390/en12152985.
- [29] A. Karbozov, M. G. Majumder, H. S. Krishnamoorthy, and K. Rajashekara, “Triple Active Bridge Based Multiport Energy Router for Subsea – Renewable Interconnection,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 59, no. 4, pp. 4528–4538, Jul. 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3267031.
- [30] N. Anglani, S. R. Di Salvo, G. Oriti, and A. L. Julian, “Steps towards Decarbonization of an Offshore Microgrid: Including Renewable, Enhancing Storage and Eliminating Need of Dump Load,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 3, p. 1411, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16031411.
- [31] R. Itiki, S. G. Di Santo, C. Itiki, M. Manjrekar, and B. H. Chowdhury, “A comprehensive review and proposed architecture for offshore power system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 111, pp. 79–92, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.04.008.
- [32] L. F. N. Lourenco, D. F. Pereira, R. M. Monaro, M. B. C. Salles, and R. M. P. Rosa, “Assessment of an Isolated Offshore Power Grid Based on the Power Hub Concept for Pre-Salt Oil and Gas Production,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 87671–87680, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3199761.
- [33] J. Hetland, H. M. Kvamsdal, G. Haugen, F. Major, V. Kårstad, and G. Tjellander, “Integrating a full carbon capture scheme onto a 450MWe NGCC electric power generation hub for offshore operations: Presenting the Sevan GTW concept,” *Appl Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 2298–2307, Nov. 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.03.019.
- [34] K. Kunitomi *et al.*, “Modeling combined-cycle power plant for simulation of frequency

- excursions,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 724–729, May 2003, doi: 10.1109/TPWRS.2002.807112.
- [35] D. Flórez-Orrego, R. A. Freire, J. A. M. da Silva, C. Albuquerque Neto, and S. de Oliveira Junior, “Centralized power generation with carbon capture on decommissioned offshore petroleum platforms,” *Energy Convers Manag*, vol. 252, p. 115110, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2021.115110.
- [36] P. Pandele, E. Thibaut, and E. Meyer, “All-Electrical FPSO Scheme With Variable-Speed Drive Systems,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 49, no. 3, pp. 1188–1197, May 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2252133.
- [37] J. Banda, S. Chapaloglou, and E. Tedeschi, “MV Multi-functional Retrofit Converter for Enhanced Power Quality on O&G Platforms,” in *2022 IEEE 13th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/PEDG54999.2022.9923203.
- [38] J. K. Banda, A. A. Adeyemo, F. Marra, and E. Tedeschi, “Co-operative Control of BESS and Wind Turbines for Heavy Motor Starting on Industrial Isolated Grids,” in *2023 11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia)*, IEEE, May 2023, pp. 192–198. doi: 10.23919/ICPE2023-ECCEAsia54778.2023.10213912.
- [39] A. Adeyemo, F. Marra, and E. Tedeschi, “Sizing of energy storage for spinning reserve and efficiency increase in isolated power systems within a stochastic unit commitment framework,” *SSRN Electronic Journal*, 2024, doi: 10.2139/ssrn.4733919.
- [40] S. Chapaloglou, D. Varagnolo, and E. Tedeschi, “Techno-Economic Evaluation of the Sizing and Operation of Battery Storage for Isolated Oil and Gas Platforms with High Wind Power Penetration,” in *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, Oct. 2019, pp. 4587–4592. doi: 10.1109/IECON.2019.8926739.
- [41] L. Rusu and V. Stratigaki, “Offshore Renewables for a Transition to a Low Carbon Society,” *J Mar Sci Eng*, vol. 11, no. 6, p. 1185, Jun. 2023, doi: 10.3390/jmse11061185.
- [42] M. F. Oliveira, “Metodologia para aplicação de fontes renováveis de energia elétrica em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural,” Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [43] A. L. Sheldrake, *Handbook of Electrical Engineering: For Practitioners in the Oil, Gas, and Petrochemical Industry*. Hoboken, NJ, USA, 2016.
- [44] C. H. P. Teles, “Estudos de novas propostas para fornecimento de energia elétrica a plataformas offshore de óleo e gás com aplicação a Bacia de Santos,” Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- [45] F. L. Paes *et al.*, “Coordinated Control of Adjustable Speed Drives Applied to Oil and Gas Production Platforms,” in *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th*

- Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*, IEEE, Nov. 2023, pp. 1–8. doi: 10.1109/SPEC56436.2023.10407290.
- [46] D. Kumar and F. Zare, “A Comprehensive Review of Maritime Microgrids: System Architectures, Energy Efficiency, Power Quality, and Regulations,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 67249–67277, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917082.
- [47] L. F. da Rocha, L. A. Vitoi, E. Tedeschi, and D. I. Brandao, “Control Strategies for Multifunctional Active Front-End Converter in Oil and Gas Platforms,” in *2021 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, IEEE, Nov. 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/COBEP53665.2021.9684089.
- [48] F. L. Paes *et al.*, “Controle Cooperativo de Conversores de Potência em Plataformas de Produção de Petróleo e Gás,” Oct. 2022. doi: 10.20906/CBA2022/3280.
- [49] POWER MHI, “H-25 Series.” Accessed: Jun. 04, 2024. [Online]. Available: <https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/h25>
- [50] SIEMENS ENERGY, “SGT-A35 gas turbine.” Accessed: Sep. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/sgt-a30-a35-rb.html#/>
- [51] Rodrigo Dias and Waldyr Luiz Ribeiro Gallo, “Exergetic and Thermoeconomic Analysis of a Cogeneration Plant on a Brazilian Pre-Salt Oil Offshore Platform,” 2015. doi: 10.20906/CPS/COB-2015-0654.
- [52] GEVERNNOVA, “LM2500 aeroderivative gas turbine.” Accessed: Jun. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.gevernova.com/>
- [53] GTW, “2024 Gas Turbine Market Forecast.”
- [54] M. Faqih, M. B. Omar, R. Ibrahim, and B. A. A. Omar, “Dry-Low Emission Gas Turbine Technology: Recent Trends and Challenges,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 21, p. 10922, Oct. 2022, doi: 10.3390/app122110922.
- [55] M. Korpås, L. Warland, W. He, and J. O. G. Tande, “A Case-Study on Offshore Wind Power Supply to Oil and Gas Rigs,” *Energy Procedia*, vol. 24, pp. 18–26, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.06.082.
- [56] 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, doi: 10.1109/TIA.2023.3258420.
- [57] H. M. A. Antunes, D. I. Brandao, V. H. M. Biajo, F. S. Oliveira, and S. M. Silva, “Floating, Production, Storage, and Offloading Unit: A Contingency Operating Mode Using Variable Frequency Drives,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 68149–68159, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3400686.
- [58] F. R. ; S. F. P. . ; V. W. Silva, “Colapso de tensão causado pela partida de grandes motores,” in

15^o Encontro de Engenharia Elétrica Petrobras, Rio de Janeiro: GP/CE/Universidade Petrobras., 2019.

- [59] M. A. Hossain, S. J. Kelly, M. F. Ahmed, and M. J. Roa, “Cause and effect of catastrophic failure of shipboard and offshore vessel/platform power sources,” in *Industry Applications Society 60th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, IEEE, 2013, pp. 1–8. doi: 10.1109/PCIcon.2013.6666029.
- [60] J. M. S. Callegari, L. A. Vitoi, and D. I. Brandao, “VFD-Based Coordinated Multi-Stage Centralized/Decentralized Control to Support Offshore Electrical Power Systems,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 14, no. 4, pp. 2863–2873, Jul. 2023, doi: 10.1109/TSG.2022.3224616.
- [61] A. H. Hoevenaars, M. McGraw, and J. Alexander, “Rightsizing Generators Through Harmonic Mitigation Realizes Energy, Emissions, and Infrastructure Reductions,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 53, no. 1, pp. 675–683, Jan. 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2603143.
- [62] P. Pande, E. Thibaut, and E. Meyer, “All-electrical FPSO scheme with variable-speed drive systems,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 49, no. 3, pp. 1188–1197, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2252133.
- [63] X. Liang and W. Jackson, “Influence of Subsea Cables on Offshore Power Distribution Systems,” in *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, IEEE, Oct. 2008, pp. 1–7. doi: 10.1109/08IAS.2008.377.
- [64] G. Kim, J. Ahn, S. Chae, and E.-H. Kim, “Analysis of Resonant Frequency of Transmission Line Based on Large Scale Offshore Wind Farm,” in *2019 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, IEEE, Oct. 2019, pp. 221–225. doi: 10.1109/ISEE2.2019.8921149.
- [65] I. Legorburu, K. R. Johnson, and S. A. Kerr, “Multi-use maritime platforms - North Sea oil and offshore wind: Opportunity and risk,” *Ocean Coast Manag*, vol. 160, pp. 75–85, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2018.03.044.
- [66] N. Saadallah and Y. Heggelund, “Electrification of Oil and Gas Platforms by Wind Energy,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 7, p. 3062, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16073062.
- [67] L. Eyni, M. Stanko, H. Schumann, and A. Qureshi, “Dynamic Process Modeling of Topside Systems for Evaluating Power Consumption and Possibilities of Using Wind Power,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 24, p. 9482, Dec. 2022, doi: 10.3390/en15249482.
- [68] K. de S. Medeiros, J. M. S. Callegari, L. F. da Rocha, and D. I. Brandao, “Power Quality Assessment of Oil and Gas Platform with High Penetration of Floating Offshore Wind Power,” 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/SPEC56436.2023.10408371.
- [69] Y. Arellano-Prieto, E. Chavez-Panduro, P. Salvo Rossi, and F. Finotti, “Energy Storage

- Solutions for Offshore Applications,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 17, p. 6153, Aug. 2022, doi: 10.3390/en15176153.
- [70] F. L. Paes *et al.*, “Evaluating A Coordinated Control Proposal in Operational Scenarios of an FPSO Oil and Gas Platform,” in *2024 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Brasil (PCIC Brasil)*, IEEE, Apr. 2024, pp. 1–8. doi: 10.1109/PCICBrasil54376.2024.10553099.
 - [71] ABB, “The Trend of Power Quality Management by ABB Power Management System (PMS),” 2008.
 - [72] P. Xie *et al.*, “Optimization-Based Power and Energy Management System in Shipboard Microgrid: A Review,” *IEEE Syst J*, vol. 16, no. 1, pp. 578–590, Mar. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2020.3047673.
 - [73] K. G. Ravikumar, T. Alghamdi, J. Bugshan, S. Manson, and S. K. Raghupathula, “Complete power management system for an industrial refinery,” in *2015 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC)*, IEEE, Oct. 2015, pp. 1–9. doi: 10.1109/PCICON.2015.7435114.
 - [74] ABB, “Marine Power Manager PMS Object Control Libraries Generator Operation Manual,” 2018.
 - [75] R. F. Silva, R. S. Takeda, M. Z. Fortes, and G. G. Sotelo, “Energy efficiency calculation of turbine-generator groups for the load sharing feature,” in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, IEEE, May 2018, pp. 1–6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395922.
 - [76] F. D. Painter, J. MacKay, and A. R. O. Mora, “A user’s perspective: Design considerations for Power Management Systems at Islanded facilities - Part 1,” in *2012 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe Conference Proceedings (PCIC EUROPE)*, Czech Republic, 2012, pp. 1–6.
 - [77] P. Auscher and G. Robine, “EMS for Interconnected O&G Offshore Facilities a Success Story,” in *2021 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe)*, IEEE, Jun. 2021, pp. 1–11. doi: 10.23919/PCICEurope50407.2021.9805423.
 - [78] IEC 61850, “IEC 61850 series: Communication networks and systems for power utility automation (parts 1–10),” 2011, *Switzerland*.
 - [79] R. Preston, L. Bevrote, Q. Houston, and R. Munoz, “Utilizing IEC 61850 for a Power Management System of an Offshore Platform,” in *2019 72nd Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, IEEE, Mar. 2019, pp. 1–7. doi: 10.1109/CPRE.2019.8765891.
 - [80] A. S. Bubshait, A. Mortezaei, M. G. Simoes, and T. D. C. Busarello, “Power Quality Enhancement for a Grid Connected Wind Turbine Energy System,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 53, no. 3, pp. 2495–2505, May 2017, doi: 10.1109/TIA.2017.2657482.
 - [81] J. P. Bonaldo, H. K. M. Paredes, A. Costabeber, and J. A. Pomilio, “Adaptive saturation system for grid-tied inverters in low voltage residential micro-grids,” in *2015 IEEE 15th International*

- Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, IEEE, Jun. 2015, pp. 784–789. doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165264.
- [82] T. D. C. Busarello, A. Mortezaei, A. Peres, and M. G. Simoes, “Application of the Conservative Power Theory Current Decomposition in a Load Power-Sharing Strategy Among Distributed Energy Resources,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 4, pp. 3771–3781, Jul. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2820641.
 - [83] H. K. Morales-Paredes, J. P. Bonaldo, and J. A. Pomilio, “Centralized Control Center Implementation for Synergistic Operation of Distributed Multifunctional Single-Phase Grid-Tie Inverters in a Microgrid,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 8018–8029, Oct. 2018, doi: 10.1109/TIE.2018.2801780.
 - [84] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, and M. Castilla, “Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, Jan. 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2066534.
 - [85] G. dos Reis, E. Liberado, F. Marafão, C. Sousa, W. Silva, and D. Brandao, “Model-Free Power Control for Low-Voltage AC Dispatchable Microgrids with Multiple Points of Connection,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 19, p. 6390, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14196390.
 - [86] L. S. Araujo, J. M. S. Callegari, B. J. Cardoso Filho, and D. I. Brandao, “Heterogeneous microgrids: Centralized control strategy with distributed grid-forming converters,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 158, p. 109950, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.109950.
 - [87] P. Ilyushin, V. Volnyi, K. Suslov, and S. Filippov, “State-of-the-Art Literature Review of Power Flow Control Methods for Low-Voltage AC and AC-DC Microgrids,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 7, p. 3153, Mar. 2023, doi: 10.3390/en16073153.
 - [88] J. Ronaldo Silveira Junior, B. R. P. Conrado, A. Matheus dos Santos Alonso, and D. Iglesias Brandao, “Interoperability of single-controllable clusters: Aggregate response of low-voltage microgrids,” *Appl Energy*, vol. 340, p. 121042, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121042.
 - [89] J. M. Guerrero, J. Matas, L. Garcia de Vicuna, M. Castilla, and J. Miret, “Decentralized Control for Parallel Operation of Distributed Generation Inverters Using Resistive Output Impedance,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 2, pp. 994–1004, Apr. 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.892621.
 - [90] K. Zuo and L. Wu, “A review of decentralized and distributed control approaches for islanded microgrids: Novel designs, current trends, and emerging challenges,” *The Electricity Journal*, vol. 35, no. 5, p. 107138, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.tej.2022.107138.
 - [91] A. M. S. Alonso, F. P. Marafão, and E. Tedeschi, “Dispatchable Microgrids: An Extended Provision of Systemic Ancillary Services to Low-Voltage Distribution Grids,” *IEEE Access*, vol.

- 12, pp. 76692–76706, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3406899.
- [92] S. K. Sahoo, A. K. Sinha, and N. K. Kishore, “Control Techniques in AC, DC, and Hybrid AC–DC Microgrid: A Review,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 6, no. 2, pp. 738–759, Jun. 2018, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2786588.
 - [93] J. M. Soares Callegari, L. S. Araujo, D. A. De Lisboa Brandão, B. J. Cardoso Filho, and D. I. Brandao, “Centralized Strategy Incorporating Multiple Control Actions Applied to Advanced Microgrids,” 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/SPEC56436.2023.10408015.
 - [94] J. Hu and A. Lanzon, “Distributed Finite-Time Consensus Control for Heterogeneous Battery Energy Storage Systems in Droop-Controlled Microgrids,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 4751–4761, Sep. 2019, doi: 10.1109/TSG.2018.2868112.
 - [95] B. Zhang, C. Dou, D. Yue, Z. Zhang, and T. Zhang, “A Cyber-Physical Cooperative Hierarchical Control Strategy for Islanded Microgrid Facing With Random Communication Failure,” *IEEE Syst J*, vol. 14, no. 2, pp. 2849–2860, Jun. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2019.2956774.
 - [96] A. M. S. Alonso, “Multi-Purpose Coordinated Control of Distributed Energy Resources in Transactive AC Microgrids,” Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2021.
 - [97] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T.-L. Lee, and P. C. Loh, “Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids—Part I: Decentralized and Hierarchical Control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, Apr. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2194969.
 - [98] P. C. Loh, D. Li, Y. K. Chai, and F. Blaabjerg, “Hybrid AC–DC Microgrids With Energy Storages and Progressive Energy Flow Tuning,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 28, no. 4, pp. 1533–1543, Apr. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2210445.
 - [99] X. Hou *et al.*, “Distributed Hierarchical Control of AC Microgrid Operating in Grid-Connected, Islanded and Their Transition Modes,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77388–77401, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2882678.
 - [100] J. N. N. da Costa, J. A. Passos Filho, and W. Peres, “Development of Steady-State Voltage Control Techniques Applied to Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 83887–83899, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3410955.
 - [101] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, “Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32, no. 3, pp. 2427–2451, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2569597.
 - [102] A. Micallef, M. Apap, C. Spiteri-Staines, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, “Reactive Power Sharing and Voltage Harmonic Distortion Compensation of Droop Controlled Single Phase Islanded Microgrids,” *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1149–1158, May 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2291912.

- [103] A. H. Yazdavar, M. A. Azzouz, and E. F. El-Saadany, "A Novel Decentralized Control Scheme for Enhanced Nonlinear Load Sharing and Power Quality in Islanded Microgrids," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 10, no. 1, pp. 29–39, Jan. 2019, doi: 10.1109/TSG.2017.2731217.
- [104] W. Deng, N. Dai, K.-W. Lao, and J. M. Guerrero, "A Virtual-Impedance Droop Control for Accurate Active Power Control and Reactive Power Sharing Using Capacitive-Coupling Inverters," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, no. 6, pp. 6722–6733, Nov. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.3012934.
- [105] P. Sreekumar and V. Khadkikar, "Direct Control of the Inverter Impedance to Achieve Controllable Harmonic Sharing in the Islanded Microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 827–837, Jan. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2574308.
- [106] M. Soshinskaya, W. H. J. Crijns-Graus, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Microgrids: Experiences, barriers and success factors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 659–672, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.198.
- [107] L. S. De Araujo, A. M. D. S. Alonso, and D. I. Brandao, "Decentralized Control of Voltage- and Current-Controlled Converters Based on AC Bus Signaling for Autonomous Microgrids," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 202075–202089, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3036592.
- [108] L. I. Minchala-Avila, L. E. Garza-Castañón, A. Vargas-Martínez, and Y. Zhang, "A Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids," *Procedia Comput Sci*, vol. 52, pp. 780–787, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.05.133.
- [109] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, and J. M. Guerrero, "Review of Power Sharing Control Strategies for Islanding Operation of AC Microgrids," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 200–215, Jan. 2016, doi: 10.1109/TSG.2015.2434849.
- [110] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 4, pp. 882–892, Dec. 2014, doi: 10.1109/TEC.2014.2358612.
- [111] Z. Cheng, J. Duan, and M.-Y. Chow, "To Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 6–24, Mar. 2018, doi: 10.1109/MIE.2018.2789926.
- [112] T. Caldognetto, P. Tenti, A. Costabeber, and P. Mattavelli, "Improving Microgrid Performance by Cooperative Control of Distributed Energy Sources," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 50, no. 6, pp. 3921–3930, Nov. 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2313648.
- [113] Z. Zeng, R. Zhao, and H. Yang, "Coordinated control of multi-functional grid-tied inverters using conductance and susceptance limitation," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 7, pp. 1821–1831, Jul. 2014, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0692.
- [114] T. Caldognetto, S. Buso, P. Tenti, and D. I. Brandao, "Power-Based Control of Low-Voltage

- Microgrids,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 3, no. 4, pp. 1056–1066, Dec. 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2015.2413361.
- [115] F. P. Marafao, A. M. S. Alonso, F. Gothner, E. Tedeschi, and D. I. Brandao, “Power- and Current-Based Control of Distributed Inverters in Low-Voltage Microgrids: Considerations in Relation to Classic Droop Control,” in *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, IEEE, Sep. 2020, pp. 1–10. doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242545.
- [116] J. M. S. Callegari, H. A. Pereira, and D. I. Brandao, “Voltage Support and Selective Harmonic Current Compensation in Advanced AC Microgrids,” *IEEE Trans Ind Appl*, pp. 1–12, 2023, doi: 10.1109/TIA.2023.3268644.
- [117] A. M. dos Santos Alonso, D. I. Brandao, T. Caldognetto, F. P. Marafão, and P. Mattavelli, “A selective harmonic compensation and power control approach exploiting distributed electronic converters in microgrids,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 115, p. 105452, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105452.
- [118] A. M. dos Santos Alonso, D. I. Brandao, E. Tedeschi, and F. P. Marafão, “Distributed selective harmonic mitigation and decoupled unbalance compensation by coordinated inverters in three-phase four-wire low-voltage networks,” *Electric Power Systems Research*, vol. 186, p. 106407, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106407.
- [119] J. K. Banda, L. S. Araujo, D. I. Brandao, F. P. Marafão, and E. Tedeschi, “Exploring Bess Services for Transformer Energization on Offshore Oil and Gas Platforms,” in *2024 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Brasil (PCIC Brasil)*, IEEE, Apr. 2024, pp. 1–7. doi: 10.1109/PCICBrasil54376.2024.10553154.
- [120] J. P. Bonaldo, H. K. Morales Paredes, and J. A. Pomilio, “Control of Single-Phase Power Converters Connected to Low-Voltage Distorted Power Systems With Variable Compensation Objectives,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 3, pp. 2039–2052, Mar. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2440211.
- [121] F. Deng, J. Hou, Y. Zhang, M. Cheng, Y. Hu, and S. Vazquez, “A Furtherance of High-Power Adjustable-Speed Drive Systems: Medium-Frequency ac Link-Powered Machine Drive Systems,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 17, no. 4, pp. 17–31, Dec. 2023, doi: 10.1109/MIE.2022.3218915.
- [122] S. C. Richu and P. P. Rajeevan, “A Load Commutated Multilevel Current Source Inverter Fed Open-End Winding Induction Motor Drive With Regeneration Capability,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 1, pp. 816–825, Jan. 2020, doi: 10.1109/TPEL.2019.2916224.
- [123] A. Mohammad, B. Armstrong, A. R. Khatib, and S. Manson, “Load Commutated Inverter Modeling: Impacts and Solutions for an Isolated Power System,” in *Record of Conference Papers - Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, Institute of Electrical and

- Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 345–351. doi: 10.1109/PCIC43643.2023.10414312.
- [124] J. I. Leon, S. Kouro, L. G. Franquelo, J. Rodriguez, and B. Wu, “The Essential Role and the Continuous Evolution of Modulation Techniques for Voltage-Source Inverters in the Past, Present, and Future Power Electronics,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 5, pp. 2688–2701, May 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2519321.
- [125] N. R. Zargari, Z. Cheng, and R. Paes, “A Guide to Matching Medium-Voltage Drive Topology to Petrochemical Applications,” in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2018, pp. 1912–1920. doi: 10.1109/TIA.2017.2785759.
- [126] L. Ding and Y. W. Li, “DC current balance with common-mode voltage reduction for parallel current source converters,” in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, Oct. 2017, pp. 824–829. doi: 10.1109/ECCE.2017.8095870.
- [127] Z. Yang, J. Sun, X. Zha, and Y. Tang, “Power Decoupling Control for Capacitance Reduction in Cascaded-H-Bridge-Converter-Based Regenerative Motor Drive Systems,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 1, pp. 538–549, Jan. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2818719.
- [128] V. G. Monopoli *et al.*, “Applications and Modulation Methods for Modular Converters Enabling Unequal Cell Power Sharing: Carrier Variable-Angle Phase-Displacement Modulation Methods,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 16, no. 1, pp. 19–30, Mar. 2022, doi: 10.1109/MIE.2021.3080232.
- [129] A. Dekka, B. Wu, and M. Narimani, “A Series-Connected Multilevel Converter: Topology, Modeling, and Control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 8, pp. 5850–5861, Aug. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2875642.
- [130] F. P. Feletto, R. A. Durham, E. da C. Bortoni, and J. G. de Carvalho Costa, “Improvement of MV Cascaded H-Bridge Inverter (CHBI) VFD Availability for High-Power ESP Oil Wells,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 55, no. 1, pp. 1006–1011, Jan. 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2866481.
- [131] S. Ouni, M. Narimani, Z. Cheng, and N. R. Zargari, “A New Postfault Control Method for CHB Inverter to Increase Maximum Output Voltage,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 56, no. 5, pp. 5499–5510, Sep. 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2997306.
- [132] J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer, and I. E. Lizama, “A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2219–2230, Jul. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2032430.
- [133] M. Verma, N. Bhatia, S. D. Holdridge, and T. O’Neal, “Isolation Techniques for Medium-Voltage Adjustable Speed Drives: Drive Topologies for Maintaining Line-Side Performance,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 25, no. 6, pp. 92–100, Nov. 2019, doi: 10.1109/MIAS.2019.2923114.
- [134] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, “Multilevel Voltage-Source-Converter

- Topologies for Industrial Medium-Voltage Drives,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, Dec. 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.907044.
- [135] Z. Ye, Y. Lei, Z. Liao, and R. C. N. Pilawa-Podgurski, “Investigation of Capacitor Voltage Balancing in Practical Implementations of Flying Capacitor Multilevel Converters,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 37, no. 3, pp. 2921–2935, Mar. 2022, doi: 10.1109/TPEL.2021.3119409.
- [136] S. Du, B. Wu, N. R. Zargari, and Z. Cheng, “A Flying-Capacitor Modular Multilevel Converter for Medium-Voltage Motor Drive,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32, no. 3, pp. 2081–2089, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2565510.
- [137] D. D. Le, S. Hong, and D.-C. Lee, “Fault detection and tolerant control for flying-capacitor modular multilevel converters feeding induction motor drives,” *Journal of Power Electronics*, vol. 22, no. 6, pp. 947–958, Jun. 2022, doi: 10.1007/s43236-022-00425-x.
- [138] A. Dekka, B. Wu, R. L. Fuentes, M. Perez, and N. R. Zargari, “Evolution of Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 5, no. 4, pp. 1631–1656, Dec. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2742938.
- [139] B. Li, “Hybrid Back-to-Back MMC System for Variable Speed AC Machine Drives,” *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 5, no. 2, pp. 114–125, Jun. 2020, doi: 10.24295/CPSSSTPEA.2020.00010.
- [140] S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, “Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 1, pp. 37–53, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2309937.
- [141] Q. Xu, F. Ma, A. Luo, Z. He, and H. Xiao, “Analysis and Control of M3C-Based UPQC for Power Quality Improvement in Medium/High-Voltage Power Grid,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 12, pp. 8182–8194, Dec. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2016.2520586.
- [142] E. Kontos, G. Tsolaridis, R. Teodorescu, and P. Bauer, “High Order Voltage and Current Harmonic Mitigation Using the Modular Multilevel Converter STATCOM,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16684–16692, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2749119.
- [143] Yunbo Long, Xiangning Xiao, Yonghai Xu, Yu Baolai, Yunfei Xu, and Junwei Hao, “MMC-UPQC: Application of Modular Multilevel Converter on Unified Power Quality Conditioner,” in *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672613.
- [144] M. S. Hamad, K. H. Ahmed, and A. I. Madi, “Current harmonics mitigation using a modular multilevel converter-based shunt active power filter,” in *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, IEEE, Nov. 2016, pp. 755–759. doi: 10.1109/ICRERA.2016.7884436.
- [145] V. Narasimhulu, D. V. Ashok Kumar, and Ch. Sai Babu, “Recital analysis of multilevel cascade

- H-bridge based active power filter under load variation,” *SN Appl Sci*, vol. 1, no. 12, p. 1621, Dec. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-1669-8.
- [146] A. A. Valdez-Fernández, G. Escobar, G. A. Catzin-Contreras, M. E. Hernández-Ruíz, and R. Morales-Caporal, “A $6h \pm 1$ Repetitive Scheme for the Three-Phase CHB Seven-Level Converter Used in an APF Application,” *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 12, no. 2, pp. 1641–1653, Apr. 2024, doi: 10.1109/JESTPE.2024.3349933.
- [147] L. Silva, S. Pimentel, and A. Pomilio, “SISTEMA DE FILTRAGEM ATIVA COM INVERSOR MULTINÍVEL ASSIMÉTRICO EM CASCATA DE DEZENOVE NÍVEIS E CONTROLE DE TENSÃO NOS BARRAMENTOS CC,” *Eletrônica de Potência*, vol. 11, pp. 17–24, Mar. 2006.
- [148] S. A. Abdul-Azeez, J. K. Banda, L. S. Araujo, and E. Tedeschi, “Multi-Level BESS Power Conversion Topologies for Isolated Grids: a Systematic Comparison,” in *2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, IEEE, Jun. 2024, pp. 533–538. doi: 10.1109/SPEEDAM61530.2024.10609092.
- [149] WEG, “Inversor de Frequência de Média Tensão MVW3000,” Mar. 2022. Accessed: Jan. 09, 2024. [Online]. Available: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h93/hd6/WEG-10004617270-MVW3000-manual-usuario-pt.pdf>
- [150] H. K. M. Paredes, “Teoria de Potência Conservativa: Uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades,” UNICAMP, Campinas, 2011.
- [151] P. Tenti, H. K. M. Paredes, and P. Mattavelli, “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, Mar. 2011, doi: 10.1109/TPEL.2010.2093153.
- [152] A. M. S. Alonso, L. D. O. Arenas, D. I. Brandao, E. Tedeschi, R. Q. Machado, and F. P. Marafão, “Current-Based Coordination of Distributed Energy Resources in a Grid-Connected Low-Voltage Microgrid: An Experimental Validation of Adverse Operational Scenarios,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 17, p. 6407, Sep. 2022, doi: 10.3390/en15176407.
- [153] M. P. de Santana, E. L. G. Junior, E. J. Agnoletto, H. K. Morales Paredes, and F. P. Marafão, “Modelo de Gerador Síncrono de Ordem Reduzida para Otimizar Simulações Computacionais de Sistemas de Energia de Plataformas de Petróleo e Gás,” in *2024 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Brasil (PCIC Brasil)*, IEEE, Apr. 2024, pp. 1–9. doi: 10.1109/PCICBrasil54376.2024.10553201.
- [154] F. P. Marafão *et al.*, “Ferramenta para avaliação do desempenho de sistemas elétricos 13.8kV de plataformas típicas para produção em Libra,” Sorocaba, 2022.
- [155] 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.

- [156] F. A. Serrão Gonçalves *et al.*, “Estratégias para Modelagem de Motores de Indução E Estudo de Caso em Uma Plataforma Marítima de Petróleo,” in *2024 IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference Brasil (PCIC Brasil)*, IEEE, Apr. 2024, pp. 1–11. doi: 10.1109/PCICBrasil54376.2024.10552927.
- [157] PRYSMIAN, “Guia de dimensionamento de cabos para média tensão,” https://br.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Guia_Dimensionamento_Media_Tensao.pdf.

Apêndice A – Normas aplicadas

A.1 Principais normas consultadas

As principais normas consultadas que tratam de indicadores e limites para grandezas elétricas aplicáveis a sistemas elétricos variados (incluindo o de plataformas de O&G), estão indicadas a seguir, em conjunto com uma descrição simplificada de suas finalidades:

- ✓ *ABNT NBR IEC 61892 - Unidades marítimas fixas e móveis - Instalações elétricas (Partes 1, 2 e 3)* tratam especificamente dos requisitos de projeto, instalação e operação do sistema elétrico aplicados em plataformas de produção de óleo e gás.
- ✓ *IEC 60034-1 - Rotating electrical machines (Part 1: Rating and performance)*: norma específica para máquinas elétricas girantes e consta como referência de parâmetros de alguns indicadores na norma nacional ABNT NBR IEC 61892.
- ✓ *IEC 61000-2-4 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*: norma que proporciona informações sobre compatibilidade eletromagnética em sistemas elétricos industriais e citada como referência para distorção harmônica de tensão na ABNT NBR IEC 61892.
- ✓ *IEEE Std 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*: norma americana que proporciona informações sobre requisitos de distorção harmônica para sistemas elétricos de potência.

Além do estabelecimento dos índices de mérito aplicáveis aos sistemas elétricos de potência de interesse, a coletânea de normas também apresenta diversas informações sobre os métodos construtivos, níveis de proteção e outras características pertinentes. Todavia, com objetivo de trazer apenas informações que são aplicáveis ao escopo da tese, tais aspectos adicionais não foram considerados.

Limites de tensão e frequência

Assim, a ABNT NBR IEC 61892-1 apresenta a definição de parâmetros para instalações elétricas em unidades fixas ou móveis, destinadas à extração e produção de petróleo. Tal norma se aplica às instalações alimentadas em corrente alternada (CA) e níveis de tensão de até 35 kV ou em corrente contínua (CC) e níveis de tensão de até 1,5 kV. Alguns dos requisitos e tolerâncias de tensão estabelecidos na norma e de interesse do projeto estão indicados na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores de referência tolerância de tensão.

Características de tensão	Valor
Tolerância de tensão (regime permanente)	+6 / -10%
Tolerância de desbalanceamento de tensão (sequência negativa)	7%
Variação cíclica ou flutuação de tensão (regime permanente)	2%
Transitórios de tensão (desvio de tensão nominal)	+20 / -20%
Tempo de restabelecimento dos transitórios de tensão	Máximo 1,5 s

Fonte: ABNT NBR IEC 61892-1.

Sendo que:

- ✓ **Tolerância de tensão:** desvio máximo da tensão nominal durante as condições de operação normal (regime permanente), excluindo-se os transitórios e variações cíclicas de tensão (flutuações).
- ✓ **Tolerância de desbalanceamento de tensão:** diferença entre o maior e o menor valor de tensão eficaz entre as fases.
- ✓ **Variação cíclica de tensão:** trata-se do desvio periódico entre os valores eficazes máximo e mínimo da tensão nominal, podendo ser consequência direta do uso de cargas de comportamento repetitivo/cíclico.
- ✓ **Transitório de tensão:** trata-se da variação rápida de tensão que ultrapassa os limites de tolerância da tensão nominal, retornando em seguida para faixa de valores admissíveis após certo intervalo de tempo específico após o início da perturbação (faixa de tempo em segundos).
- ✓ **Tempo de restabelecimento de transitório de tensão:** é o tempo transcorrido desde o instante em que a tensão cruza a faixa de valores admissíveis (para mais ou para menos), até o restabelecimento e permanência da tensão dentro dos limites estabelecidos de operação normal.

Com relação à operação dos motores elétricos, a norma IEC 60034-1 traz limites de operação mais restritivos do que a ABNT NBR IEC 61892-1, conforme indicados na Tabela 35.

Tabela 35 - Limites de tensão para operação de motores elétricos IEC 60034-1.

Indicadores de tensão	Valor
Diferença entre componente de sequência negativa e positiva (longos períodos)	< 1%
Diferença entre componente de sequência negativa e positiva (períodos curtos)	< 1,5 %
Limitação de transitórios na tensão de alimentação (variação entre limites)	±20 %

Fonte: ABNT NBR 60034-1.

Os principais requisitos relacionados à frequência para sistemas isolados, conforme estabelecidos na ABNT NBR IEC 61892-2, estão indicados na Tabela 36.

Tabela 36 - Indicadores e limites de frequência.

Características da frequência	Valor
Tolerância de frequência (regime permanente)	±5%
Variação cíclica da frequência (regime permanente)	0,5%
Tolerância de transitório de frequência	±10 %
Tempo de restabelecimento dos transitórios de frequência	Máximo 5s
Recomenda-se que a soma das excursões da frequência em qualquer condição de operação (tolerância e transitórios) não exceda ±25% da frequência nominal.	

Fonte: ABNT NBR IEC 61892-2.

Sendo:

- ✓ **Tolerância de frequência:** é o desvio máximo da frequência nominal durante condições de operação, excluindo os transitórios e variações cíclicas de frequência.
- ✓ **Variação cíclica de frequência:** é o desvio periódico na frequência durante a operação em regime permanente.
- ✓ **Transitórios de frequência:** são variações rápidas do valor de frequência que ultrapassam os limites de tolerância por um determinado intervalo de tempo, depois de iniciado o distúrbio, retornando e permanecendo dentro dos limites em seguida (faixa de tempo em segundos).
- ✓ **Tempo de restabelecimento dos transitórios de frequência:** é o intervalo de tempo decorrido desde o momento do não atendimento aos limites normais de tolerância até o restabelecimento e permanência da frequência dentro daqueles limites.

Distorção harmônica de tensão

A ABNT NBR IEC 61892 estabelece que os limites aceitáveis para a distorção harmônica de tensão (DHTv) estão condicionados diretamente com as condições de conformidade definidas pela norma IEC 61000-2-4 2002 classe 1, sumarizadas na Tabela 37.

Tabela 37 - Limites de Distorção Harmônica de Tensão.

Grandezas	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTv) IEC 61000-2-4	5%	8%	10%
Distorção Harmônica de Tensão (individual)	< 3%		

Fonte: ABNT NBR IEC 61892.

As exigências requeridas pela norma IEC 61000-2-4 são estabelecidas de forma diferente para três classes, definidas por características dos equipamentos e do ponto de conexão em análise, resumidas a seguir.

Classe 1: abrange equipamentos sensíveis às perturbações do sistema elétrico (cenário de redes protegidas com níveis de compatibilidade mais baixo do que redes públicas);

Classe 2: abrange equipamentos industriais e nível de compatibilidade similar aplicado ao PAC (Ponto de Acoplamento Comum) entre rede de distribuição e ambiente industrial;

Classe 3: classe de compatibilidade superior aos supracitados, é aplicada para pontos de conexão internos numa instalação elétrica industrial (em que normalmente apresenta transitórios de cargas e controle de velocidade através de conversores).

Em condições normais de operação os níveis de emissão de distorção harmônica dos equipamentos devem estar em conformidade com os limites estabelecidos na Tabela 37, Classe 1. Todavia, desde que os equipamentos de geração, distribuição e os consumidores envolvidos sejam projetados para operar de forma tolerante a condições mais flexíveis, limites superiores de distorção de tensão podem ser aceitos.

Resumo das principais normas aplicáveis em plataformas marítimas

Além das informações discutidas nas seções anteriores, a Tabela 38 sintetiza os principais indicadores e limites estabelecidos pelas normas consultadas.

Tabela 38 - Indicadores e limites aplicáveis ao SEP de uma plataforma marítima.

Local	Descrição / Grandeza	Condição	Valor	Norma
PAC	Tolerância de tensão	Regime permanente	+6 / -10%	IEC 61892-1
	Tolerância de desbalanceamento de tensão		7 %	
	Variação cíclica de tensão	Regime permanente	2%	
	Tolerância de tensão	Transitório	+20 / -20%	
	Tempo de restabelecimento da tensão		até 1,5 s	
Motor	Diferença entre componente de sequência negativa e positiva	longos períodos	< 1%	IEC 60034-1
	Diferença entre componente de sequência negativa e positiva	períodos curtos	< 1,5 %	
	Limitação de transitórios na tensão de alimentação	variação entre limites	±20%	
PAC	Distorção Harmônica Total de Tensão	Classe 1	5%	IEC 61892 / IEC 61000-2-4
	Distorção Harmônica Total de Tensão	Classe 2	8%	
	Distorção Harmônica Total de Tensão	Classe 3	10%	
	Distorção Harmônica de Tensão	Individual	< 3%	
PAC	Tolerância de frequência	Regime permanente	±5 %	IEC 61892-2
	Variação cíclica da frequência		0,5%	
	Tolerância de frequência	Transitório	±10 %	
	Tempo de restabelecimento de frequência		até 5 s	
Motor	Corrente de curto-circuito	Subtransitória	$6,25 \cdot I_n$	IEC 61892-2
	Corrente de curto-circuito	Simétrica T/2	$4 \cdot I_n$	
	corrente curto-circuito	Valor de pico	$10 \cdot I_n$	
PAC	Distorção Harmônica individual - Tensão	1 KV < V ≤ 69 KV	3	IEEE Std 519
	Distorção Harmônica Total - Tensão		5	
PAC	Distorção Harmônica de Corrente ($I_{sc}/I_L < 20$)	3 ≤ h < 11	4.0	IEEE Std 519
		11 ≤ h < 17	2.0	
		17 ≤ h < 23	1.5	
		23 ≤ h < 35	0.6	
		35 ≤ h ≤ 50	0.3	
		TDD	5.0	
	Distorção Harmônica de Corrente ($20 < I_{sc}/I_L < 50$)	3 ≤ h < 12	7.0	
		11 ≤ h < 18	3.5	
		17 ≤ h < 24	2.5	
		23 ≤ h < 36	1.0	

		35<=h<=51	0.5	
		TDD	8.0	
PAC	Distorção Harmônica de Corrente ($50 < I_{sc}/I_L < 100$)	3<=h<13	10.0	IEEE Std 519
		11<=h<19	4.5	
		17<=h<25	4.0	
		23<=h<37	1.5	
		35<=h<=52	0.7	
		TDD	12.0	
		3<=h<14	12.0	
	Distorção Harmônica de Corrente ($100 < I_{sc}/I_L < 1000$)	11<=h<20	5.5	
		17<=h<26	5.0	
		23<=h<38	2.0	
		35<=h<=53	1.0	
		TDD	15.0	
		3<=h<15	15.0	
	Distorção Harmônica de Corrente ($I_{sc}/I_L > 1000$)	11<=h<21	7.0	
		17<=h<27	6.0	
		23<=h<39	2.5	
		35<=h<=54	1.4	
		TDD	20.0	

Sendo:

- ✓ I_{sc} : corrente de curto-circuito;
- ✓ I_L : corrente da carga;
- ✓ I_n : corrente nominal;
- ✓ TDD: Distorção de demanda total;
- ✓ h: ordem harmônica.

Anexo 1 – Dados de manual (inversor WEG MVW3000)



INFORMAÇÕES GERAIS

Tabela 2.2: Especificações gerais

ALIMENTAÇÃO DE POTÊNCIA	Tensões	1150 - 13800 V ($\pm 10\%$, -20% com redução da potência de saída) (Valores padrões na Tabela 2.1 na página 2-2 e sob consulta)
	Frequência	50 ou 60 Hz $\pm 5\%$ (outros valores sob consulta)
	Desbalanceamento de tensão entre fases	< 3%
	Cos ϕ	> 0,95
	Categoria de sobre-tensão	Categoria III
ALIMENTAÇÃO AUXILIAR	Tensões (trifásicas)	220, 380, 400, 415, 440, 460, 480 V padrão (525 V e outros valores opcional)
	Frequência	50 ou 60 Hz ($\pm 5\%$)
	Desbalanceamento de tensão entre fases	< 3%
GRAU DE PROTEÇÃO	Padrão	NEMA 1, IP21
	Opcional	IP41 e IP42
DIMENSÕES	Largura/ Altura/ Profundidade (mm)	16 mecânicas distintas. Para todas as mecânicas disponíveis, consultar a Figura 4.3 na página 4-3 e Tabela 4.2 na página 4-3 até Tabela 4.16 na página 4-6
CONDIÇÕES AMBIENTAIS	Temperatura	0 a 40 °C (até 50 °C com redução de 2,5% / °C na corrente de saída)
	Umidade	5 a 90% sem condensação
	Altitude	0 a 1000 m (até 4000 m com redução de 10% / 1000 m na corrente de saída)
	Grau de poluição	2 (poluição não condutora)
REVESTIMENTO DE CARTÕES	Classe	3C3 (outros revestimentos sob consulta)
ACABAMENTO	Cor	RAL7035 (cinza claro) (outras cores sob consulta)
CONTROLE	Microprocessador	32 bits
	Método de controle	PWM senoidal
	Tipo de controle	Escalar (tensão imposta - V/f), Vetorial (com sensor ou sensorless)
	Frequência de chaveamento dos IGBTs	500 Hz
	Frequência de chaveamento da tensão de saída	2*n*500 Hz, onde n=quantidade de células em série; Valores dos modelos nas tabelas Tabela 10.2 na página 10-3 até Tabela 10.16 na página 10-10
	Variação de frequência	0 a 120 Hz
	Sobrecarga admissível	115% durante 60 s a cada 10 minutos (outras sobrecargas sob consulta)
DESEMPENHO	Rendimento	Maior que 96,5% (com transformador em alumínio) Maior que 97,0% (com transformador em cobre)
	Controle de velocidade	■ V/f: Regulação: 1% da velocidade nominal com compensação de escorregamento; Resolução: 1 rpm (referência via teclado da HMI).
		■ Sensorless: Regulação: 0,5% da velocidade nominal; Faixa de variação da velocidade: 1:100. ■ Com sensor (usar cartão EBA, EBB ou EBC): Regulação: ±0,01% da velocidade nominal com entrada analógica 14 bits (EBA); ±0,01% da velocidade nominal com referência digital (teclado, serial, Fieldbus, potenciômetro eletrônico, multispeed); 0,1% da velocidade nominal com entrada analógica 10 bits.

Tabela 10.13: Modelo 11000 V e 40-600 A

Dados técnicos: Modelo 11000 V		
Tensão nominal	11000	V
Classe de tensão de saída	12	kV
Quantidade de transformadores defasadores	< 225 A: 1 ≥ 225 A: 2	-
Quantidade de células de potência por fase: padrão - redundante (N+1)	10 - 10	-
Frequência de chaveamento de saída: padrão - redundante N+1	10000 - 10000	Hz
Pico de tensão (fase-terra): padrão - redundante	9936 - 9265	V
Pico de tensão (fase-fase): padrão - redundante	18630 - 17253	V
Distorção harmônica total da corrente de entrada - THDi	≤ 5 (conforme ou melhor IEEE 519) (para THDv da tensão de rede elétrica ≤ 2)	%
Distorção harmônica total da corrente de saída - THDi	Conforme das características do motor	%
Distorção harmônica total da tensão de entrada - THDv	≤ 5 (conforme ou melhor IEEE 519)	%
Distorção harmônica total da tensão de saída - THDv	Sem filtro & filtro tipo 1: Sob consulta Filtro tipo 2: ≤ 5	%
Ruído acústico	Sob consulta	dB
Ventiladores redundantes	Padrão até mec. E. (Opcional para mec. F e G)	-

Tabela 10.14: Modelo 12000 V e 40-600 A

Dados técnicos: Modelo 12000 V		
Tensão nominal	12000	V
Classe de tensão de saída	17,5	kV
Quantidade de transformadores defasadores	< 225 A: 1 ≥ 225 A: 2	-
Quantidade de células de potência por fase: padrão - redundante (N+1)	11 - 12	-
Frequência de chaveamento de saída: padrão - redundante N+1	11000 - 12000	Hz
Pico de tensão (fase-terra)	10868	V
Pico de tensão (fase-fase)	20493	V
Distorção harmônica total da corrente de entrada - THDi	≤ 5 (conforme ou melhor IEEE 519) (para THDv da tensão de rede elétrica ≤ 2)	%
Distorção harmônica total da corrente de saída - THDi	Conforme das características do motor	%
Distorção harmônica total da tensão de entrada - THDv	≤ 5 (conforme ou melhor IEEE 519)	%
Distorção harmônica total da tensão de saída - THDv	Sem filtro & filtro tipo 1: Sob consulta Filtro tipo 2: ≤ 5	%
Ruído acústico	Sob consulta	dB
Ventiladores redundantes	Padrão até mec. E. (Opcional para mec. F e G)	-

Tabela 10.15: Modelo 13200 V e 40-600 A

Dados técnicos: Modelo 13200 V		
Tensão nominal	13200	V
Classe de tensão de saída	17,5	kV
Quantidade de transformadores defasadores	< 225 A: 1 ≥ 225 A: 2	-
Quantidade de células de potência por fase: padrão - redundante (N+1)	12 - 12	-
Frequência de chaveamento de saída: padrão - redundante N+1	12000 - 12000	Hz
Pico de tensão (fase-terra): padrão - redundante	11799 - 11183	V
Pico de tensão (fase-fase): padrão - redundante	22356 - 21087	V
Distorção harmônica total da corrente de entrada - THDi	≤ 5 (conforme ou melhor IEEE 519) (para THDv da tensão de rede elétrica ≤ 2)	%
Distorção harmônica total da corrente de saída - THDi	Conforme das características do motor	%
Distorção harmônica total da tensão de entrada - THDv	≤ 5 (conforme ou melhor IEEE 519)	%
Distorção harmônica total da tensão de saída - THDv	Sem filtro & filtro tipo 1: Sob consulta Filtro tipo 2: ≤ 5	%
Ruído acústico	Sob consulta	dB
Ventiladores redundantes	Padrão até mec. E. (Opcional para mec. F e G)	-

Tabela 10.16: Modelo 13800 V e 40-600 A

Dados técnicos: Modelo 13800 V		
Tensão nominal	13800	V
Classe de tensão de saída	17,5	kV
Quantidade de transformadores defasadores	< 225 A: 1 ≥ 225 A: 2	-
Quantidade de células de potência por fase padrão	12	-
Frequência de chaveamento de saída: padrão - redundante N+1	12000 - 12000	Hz
Pico de tensão (fase-terra)	11799	V
Pico de tensão (fase-fase)	22356	V
Distorção harmônica total da corrente de entrada - THDi	≤ 5 (conforme ou melhor IEEE 519) (para THDv da tensão de rede elétrica ≤ 2)	%
Distorção harmônica total da corrente de saída - THDi	Conforme das características do motor	%
Distorção harmônica total da tensão de entrada - THDv	≤ 5 (conforme ou melhor IEEE 519)	%
Distorção harmônica total da tensão de saída - THDv	Sem filtro & filtro tipo 1: Sob consulta Filtro tipo 2: ≤ 5	%
Ruído acústico	Sob consulta	dB
Ventiladores redundantes	Padrão até mec. E. (Opcional para mec. F e G)	-