MAURÍCIO FIGUEIREDO DE OLIVEIRA

**Metodologia para Aplicação de Fontes Renováveis de Energia
Elétrica em Plataformas Marítimas de Produção de Petróleo e
Gás Natural**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Elétrica.

São Paulo

2013

MAURÍCIO FIGUEIREDO DE OLIVEIRA

**Metodologia para Aplicação de Fontes Renováveis de Energia
Elétrica em Plataformas Marítimas de Produção de Petróleo e
Gás Natural**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Marco Antonio Saidel

São Paulo

2013

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 10 de abril de 2013.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Maurício Figueiredo de

Metodologia para aplicação de fontes renováveis de energia elétrica em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural / M.F. de Oliveira. – versão corr. -- São Paulo, 2013. 181 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Energia elétrica (Aplicações; Metodologia) 2. Transformação de energia 3. Óleo e Gás 4. Petróleo I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

DEDICATÓRIA

À minha eterna companheira e esposa **Maíra**,
pelo amor, carinho, apoio e compreensão.

Aos meus filhos **Francisco** e **Alice**, pela
felicidade e pela bênção da paternidade.

Aos meus pais, Wilson e Maria Aparecida que
me deram carinho, educação, apoio e caráter.

À minha irmã Maria Fernanda,
pelo estímulo e exemplo.

Ao meu irmão Leandro David,
pela amizade e alegria incondicionais.

AGRADECIMENTOS

A conclusão do curso de doutorado e a confecção dessa tese se definiram como tarefas extremamente desafiadoras, e considerando que a recompensa é proporcional à grandeza do desafio, gostaria de dividi-la com aqueles que fizeram deste sonho uma realidade. Portanto, a essas pessoas, eu gostaria de agradecer.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Antonio Saidel, pela confiança demonstrada, pela amizade adquirida, pela transmissão de conhecimento e pelo apoio constante ao longo do trabalho.

Ao amigo e líder, José Alfredo Pinheiro Gomes Ferreira pelas oportunidades oferecidas, confiança demonstrada e inúmeras contribuições dadas à minha formação profissional.

À Petróleo Brasileiro S.A. pelo apoio técnico deste trabalho.

Ao mestre, Prof. Dr. Raimundo C. Ghizoni Teive pelos conselhos prestados ao longo dessa caminhada.

À Profa. Eliane Aparecida Faria Amaral Fadigas pela paciência e pelos preciosos ensinamentos.

Aos líderes José Luiz Marcusso, Kazuiohshi Minami, Humberto Americano Romanus e Marcus Vinicius da Silva Neves, pelo exemplo profissional e ao apoio constante durante a elaboração desse trabalho.

Ao professor C. Celso Camargo Brasil, pelo apoio na busca de oportunidade de doutoramento.

Ao amigo Alan Rômulo Silva Queiroz, pelos ensinamentos, solidariedade e momentos de descontração.

Ao consultor Epitácio Nascimento Filho, pelas oportunidades de trabalho e pelo pioneirismo na área de energias renováveis em plataformas de petróleo.

Aos colegas Carlos André Carreiro Cavaliere e Luiz Gustavo Oliveira Gonçalves pelo suporte na revisão final desse trabalho.

Aos demais amigos que contribuíram de alguma forma para o sucesso deste trabalho.

Aos membros da banca pelas sugestões que contribuíram para melhorar a qualidade deste trabalho e dos que estão por vir.

EPÍGRAFE

“Mude seus pensamentos e estará
mudando o seu mundo.”
(Norman Vincent Pearle)

RESUMO

A utilização de fontes renováveis em plataformas de produção de petróleo e gás natural atualmente é baseada em aplicações experimentais e esparsas. Contudo, a aplicação dessas fontes de forma estruturada permite aumentar a confiabilidade de sistemas críticos e diminuir a emissão de poluentes. Com foco nos projetos para desenvolvimento de produção dos campos petrolíferos do pré-sal no Brasil, esse trabalho apresenta uma proposta de metodologia para avaliação de utilização de fontes renováveis de energia elétrica em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural.

Para isso, foi desenvolvido um fluxograma de projeto e uma metodologia multicritério. O fluxograma de projeto determina as etapas e atividades requeridas para uma adequada aplicação da metodologia de avaliação. Enquanto a metodologia multicritério busca captar os valores e percepções de projetistas, operadores e mantenedores a respeito de características dos dispositivos conversores de energia renovável.

A metodologia proposta é aplicada em um caso de plataforma tipo fixa e em outro caso de plataforma tipo FPSO. Esse segundo caso representa características físicas das embarcações utilizadas para desenvolvimento da produção na camada pré-sal, assim como as características ambientais e geográficas de locação.

Os resultados permitem comparar as potencialidades de captação de energia renovável, assim como permitem identificar as tecnologias com estado da arte mais adequado para essa aplicação específica. Outras conclusões são apresentadas, como a estimativa de emissão de CO₂ evitada e as tecnologias verdes com atratividade para desenvolvimento no âmbito nacional.

Palavras-chave: Energia elétrica. Transformação de energia. Óleo e gás. Petróleo.

ABSTRACT

Nowadays renewable sources applications at offshore petroleum and natural gas production platform are based at experimental and particular cases. However, a structured design system can increase critical systems reliability and decrease pollutant emissions. Focuses at new developing production projects at Brazilian pre-salt petroleum fields, this work suggest a new methodology to valuate renewable source applications and solutions at offshore petroleum and natural gas production platform.

Based at this purpose, a design project workflow and a multicriteria methodology were developed. Technical activities required to a suitable valuation and sequential steps are detailed at project workflow. The multicriteria methodology simulates values and feelings of designers, operators and technical maintenance about renewable source converters appliances features.

This proposed methodology is applied at two specific cases, a fixed platform and FPSO platform. The second one represents physical characteristics of pre-salt production units as well environmental and geographic features of site location.

The comparison of results indicates potential renewable energy flows to be harvested and the technologies of renewable sources with high attractiveness for this offshore application. Other conclusions are showed, as quantification of avoided carbonic gas emitted and green technologies that should be produced in Brazil.

Keywords: Electricity. Energy conversion. Oil and gas. Petroleum.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração com representação simplificada de um típico projeto de desenvolvimento da produção em águas profundas e ultraprofundas. (adaptado de [3]).	26
Figura 2 – Ilustração de tipos de plataformas utilizadas no mundo (adaptado de [9]).	28
Figura 3 – Ilustração de plataformas marítimas utilizadas na costa brasileira (adaptado de [11]).	28
Figura 4 – Imagem de projeto e fotografias da Plataforma de Mexilhão (adaptado de [11]).	30
Figura 5 – Imagem de projeto de plataformas semi-submersível (adaptado de [10]).	32
Figura 6 – Fotografias da P-56 (adaptado de [11]).	33
Figura 7 – Fotografia do FPSO P-54 (adaptado de [11]).	34
Figura 8 – Fotografias de embarcações sob condições marítimas adversas (arquivo pessoal).	35
Figura 9 – Fotografia de instalação de sistemas industriais em um FPSO (acervo pessoal).	36
Figura 10 – Fotografia de FPSO com destaque para sistema de salvatagem (adaptado de [11]).	38
Figura 11 – Fotografia de FPSO com destaque para sistema de movimentação de carga e pessoal (adaptado de [11]).	40
Figura 12 – Fotografia de plataforma SS com destaque para o sistema de comunicação (adaptado de [11]).	41
Figura 13 – Fotografia de sistema de processamento de óleo e gás (acervo pessoal).	43
Figura 14 – Imagem de projeto do módulo de geração de eletricidade da P-50 (adaptado de [11]).	46
Figura 15 – Imagem de diagrama unifilar típico de uma plataforma fixa de produção de gás natural.	49
Figura 16 – Imagem de mapa tridimensional de área classificada (adaptado de [18]).	50

Figura 17 – Desenho esquemático conceitual de energia renovável e não renovável (adaptado de [20]).	53
Figura 18 – Desenho esquemático das correntes de energia renováveis na Terra em terawatts (adaptado de [20]).	54
Figura 19 – Desenhos esquemáticos de conceitos energéticos de sistema (Adaptado de [20]).	60
Figura 20 – Desenho esquemático elétrico de sistema híbrido (Adaptado de [27]).	63
Figura 21 – Desenho esquemático de sistema híbrido conectado ao SIN (Adaptado de [48]).	65
Figura 22 – Desenho esquemático de sistema elétrico mini-rede (Adaptado de [54]).	66
Figura 23 – Fotografia de concentrador de calor solar (Adaptado de [59]).	70
Figura 24 – Desenho esquemático de motor Stirling (Adaptado de [60]).	71
Figura 25 – Gráfico de geração fotovoltaica (Adaptado de [62]).	74
Figura 26 – Gráfico com curvas de potência típicas (Adaptado de [20]).	75
Figura 27 – Gráfico com a curva de potência para turbinas eólicas (Adaptado de [69]).	77
Figura 28 – Imagens de projeto e fotografias de dispositivos conversores de energia das ondas (Adaptado de [67] e [69]).	81
Figura 29 – Desenho do diagrama funcional do método PRO. (Adaptado de [70]).	82
Figura 30 – Diagramas esquemáticos de ciclos fechado e aberto de OTEC (Adaptado de [76]).	84
Figura 31 – Fotografias de sistemas OTEC (Adaptado de [76]).	85
Figura 32 – Fotografia de sistema de geração de eletricidade através de micro turbina a gás (Adaptado de [78]).	87
Figura 33 – Fotografia de sistema de geração de eletricidade através de micro turbina a vapor (Adaptado de [80]).	89
Figura 34 – Fotografia de sistema de geração de eletricidade através de micro turbina hidráulica (Adaptado de [82]).	90
Figura 35 – Fluxograma da metodologia proposta.	93
Figura 36 – Desenho esquemático do mapa de arborescência da metodologia multicritério.	104
Figura 37 – Imagem de mapa termográfico mundial (adaptado de [93]).	109

Figura 38 – Imagem de mapa termográfico para localização da plataforma fixa (adaptado de [93]).	109
Figura 39 – Gráfico anual de potência média das ondas em W/m (adaptado de [94]).	110
Figura 40 – Desenho de projeto de plataforma fixa.	118
Figura 41 – Fotografias e desenho de dispositivos conversores para plataforma fixa (Adaptado de [82], [95] e [96]).	122
Figura 42 – Desenho de projeto “Topside” de plataforma fixa.	124
Figura 43 – Desenho de projeto de plataforma fixa.	125
Figura 44 – Imagem de digrama unifilar de plataforma fixa com fontes renováveis.	126
Figura 45 – Imagem de projeto de plataforma tipo FPSO (Adaptado de [3]).	129
Figura 46 – Imagem de digrama unifilar de plataforma FPSO.	134
Figura 47 – Desenho de projeto de plataforma fixa.	137
Figura 48 – Fotografias de dispositivos conversores para plataforma FPSO [81] e [95].	139
Figura 49 – Desenho de projeto da proa de plataforma FPSO.	141
Figura 50 – Desenho de projeto de plataforma FPSO.	142
Figura 51 – Imagem de digrama unifilar de plataforma FPSO com fontes renováveis.	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Eficiências globais de conversão (adaptado de [20]).	56
Tabela 2 –	Eficiências de conversão (adaptado de [20] e [24]).	61
Tabela 3 –	Fluxos energéticos renováveis em plataformas marítimas.	67
Tabela 4 –	Pesos dos aspectos para determinação da função utilidade.	103
Tabela 5 –	Valoração da qualificação dos atributos.	103
Tabela 6 –	Qualificação dos atributos do aspecto “Elétrico”.	105
Tabela 7 –	Qualificação dos atributos do aspecto “Estrutural”.	106
Tabela 8 –	Qualificação dos atributos do aspecto “Técnico”.	106
Tabela 9 –	Qualificação dos atributos do aspecto “Econômico”.	107
Tabela 10 –	Qualificação dos atributos do aspecto “Ambiental”.	107
Tabela 11 –	Fluxos energéticos em plataforma fixa.	111
Tabela 12 –	Demanda detalhada de plataforma fixa.	114
Tabela 13 –	Ranqueamento de dispositivos conversores para plataforma fixa.	121
Tabela 14 –	Lista de sistemas críticos alimentados por painéis fotovoltaicos.	123
Tabela 15 –	Distribuição e potência dos dispositivos conversores.	125
Tabela 16 –	Potenciais reais dos dispositivos conversores para plataforma fixa.	127
Tabela 17 –	Fluxos energéticos em plataforma FPSO.	131
Tabela 18 –	Demanda detalhada de plataforma FPSO.	133
Tabela 19 –	Ranqueamento de dispositivos conversores para plataforma FPSO.	138
Tabela 20 –	Distribuição e potência dos dispositivos conversores.	143
Tabela 21 –	Potenciais reais dos dispositivos conversores para plataforma FPSO.	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Árvore de Natal Molhada
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	American Petroleum Institute
BOE	Barril de Óleo Equivalente
CCM	Centro de Controle de Motores
CDC	Centro de Distribuição de Cargas
DHSV	Down Hole Safety Valve
E&P	Exploração e Produção de Hidrocarbonetos
ECOS	Estação Central de Operação e Supervisão
ESD	Emergency Shut Down
FPS	Floating Production System
FPSO	Floating, Production, Storage and Offloading
GLD	Gerenciamento pelo Lado da Demanda
GMDSS	Sistema Mundial de Socorro e Segurança Marítima
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMO	Organização Marítima Mundial
MARPOL	Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios
MAUT	Teoria da Utilidade Multicritério
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
MODM	Multiple Objective Decision Making
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
MTOE	Milhões de Toneladas de Óleo Equivalente
NBR	Norma Brasileira
NORMAM	Normas do Departamento de Portos e Costas da Marinha
OTEC	Ocean Thermal Energy Conversion
SS	Plataforma Semi-Submersível
SIN	Sistema Interligado Nacional
UEP	Unidade Estacionária de Produção
UPS	Uninterruptible Power Supply

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVO.....	19
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	PROBLEMA CIENTÍFICO	23
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2	PLATAFORMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS	
	NATURAL	26
2.1	TIPOS DE PLATAFORMA	27
2.1.1	Plataformas fixas.....	29
2.1.2	Plataformas semi-submersíveis.....	31
2.1.3	Navios plataforma	33
2.2	LOGÍSTICA E CONDIÇÕES AMBIENTAIS	35
2.3	SISTEMAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS	36
2.3.1	Utilidades e lastro	37
2.3.2	Salvagem	38
2.3.3	Ancoragem e posicionamento	38
2.3.4	Segurança, detecção e combate a incêndio.	39
2.3.5	Movimentação de carga e pessoal	39
2.3.6	Comunicação.....	40
2.3.7	Produção.....	41
2.3.8	Processamento de óleo	42
2.3.9	Processamento de gás natural	42
2.3.10	Automação, controle e parada de emergência	43
2.4	SISTEMA ELÉTRICO.....	44
2.4.1	Geração e distribuição de energia elétrica	45
2.4.2	Classificação de cargas elétricas	46
2.4.3	Classificação de áreas.....	50
3	ENERGIA RENOVÁVEL.....	51
3.1	CONCEITOS	52
3.2	PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO	55

3.3	FATORES TÉCNICOS DE PROJETO	57
3.4	CONVERSÃO	61
3.5	SISTEMAS HÍBRIDOS E MINI-REDE.....	62
3.6	APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL ..	64
3.7	AMBIENTE INDUSTRIAL MARÍTIMO.....	67
4	CONVERSORES DE ENERGIA	68
4.1	ENERGIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR.....	69
4.1.1	Termelétrica solar	69
4.1.2	Motor Stirling	71
4.1.3	Fotovoltaica	72
4.2	ENERGIA DOS VENTOS	75
4.3	ENERGIA DAS ONDAS.....	78
4.4	ENERGIA DO GRADIENTE SALINO	82
4.5	ENERGIA DO GRADIENTE TÉRMICO OCEÂNICO	83
4.6	ENERGIA DE EFLUENTES SANITÁRIOS E RESTOS ALIMENTARES.....	86
4.7	ENERGIA DA ÁGUA EFLUENTE VAPOR	88
4.8	ENERGIA DA ÁGUA EFLUENTE LÍQUIDA	89
5	METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL	91
5.1	FLUXOGRAMA DE PROCESSO	91
5.1.1	Caracterização do meio ambiente e tipologia da plataforma	93
5.1.2	Fluxos energéticos.....	94
5.1.3	Tecnologia dos conversores.....	95
5.1.4	Tipologia da demanda	96
5.1.5	Avaliação oferta e demanda.....	96
5.1.6	Determinação dos conversores	97
5.1.7	Potencial real	98
5.2	METODOLOGIA MULTICRITÉRIO.....	98
5.2.1	Teoria da utilidade multicritério	100
5.2.2	Proposta multicritério	101
6	ESTUDO DE CASO	108

6.1	PLATAFORMA FIXA	108
6.1.1	Caracterização do meio ambiente e tipologia da plataforma marítima	108
6.1.2	Determinação dos fluxos energéticos.....	111
6.1.3	Avaliação de dispositivos conversores	112
6.1.4	Tipologia da demanda	114
6.1.5	Avaliação de oferta e demanda:.....	117
6.1.5.1	Localização física dos dispositivos conversores.....	117
6.1.5.2	Localização elétrica dos dispositivos conversores.....	119
6.1.5.3	Ranqueamento dos dispositivos conversores.....	120
6.1.6	Determinação dos dispositivos conversores e da tipologia de alimentação elétrica	121
6.1.7	Determinação do potencial real	127
6.2	PLATAFORMA FPSO	128
6.2.1	Caracterização do meio ambiente e tipologia da plataforma marítima	128
6.2.2	Determinação dos fluxos energéticos.....	130
6.2.3	Avaliação de dispositivos conversores	131
6.2.4	Tipologia da demanda	133
6.2.5	Avaliação de oferta e demanda.....	136
6.2.5.1	Localização física dos dispositivos conversores.....	136
6.2.5.2	Localização elétrica dos dispositivos conversores.....	138
6.2.5.3	Ranqueamento dos dispositivos conversores.....	138
6.2.6	Determinação dos dispositivos conversores e da tipologia de alimentação elétrica	139
6.2.7	Determinação do potencial real	145
7	CONCLUSÃO	146
7.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	150
8	REFERÊNCIAS.....	151
	APÊNDICE A: NORMAS TÉCNICAS	162
	APÊNDICE B: CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA.....	165

APÊNDICE C: DESCRIÇÃO E QUALIFICAÇÃO DOS ATRIBUTOS	167
APÊNDICE D: CÁLCULOS	172
APÊNDICE E: DESCRIÇÃO TÉCNICA DE DISPOSITIVOS	
CONVERSORES.....	174
APÊNDICE F: CARGAS ELÉTRICAS ALIMENTADAS POR BATERIAS	
EM PLATAFORMA FIXA E FPSO	176
APÊNDICE G: AVALIAÇÃO DE OFERTA E DEMANDA PARA	
PLATAFORMA FIXA E FPSO	178
APÊNDICE H: DISPOSIÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM	
PLATAFORMA FIXA	181

1 INTRODUÇÃO

O petróleo e o gás natural são combustíveis imprescindíveis para a manutenção da sociedade moderna. A dependência desses produtos se tornou relevante a partir da integração econômica dos países e continentes. Além disso, o crescimento demográfico e desenvolvimento de economias emergentes contribuem de forma significativa para aumento da demanda energética. As tecnologias mais utilizadas atualmente e as fontes de energia disponíveis em larga escala para consumo reforçam essa dependência nas próximas décadas. Atualmente o consumo de petróleo e gás natural corresponde a mais da metade de toda energia primária utilizada no planeta. Em 2008 foram consumidos quase 8.000 milhões de toneladas de óleo equivalente (Mtoe) de petróleo e gás natural. A estimativa para o ano de 2030 é que esse montante alcance 9.000 Mtoe [1] e [2].

O impacto dessa previsão reflete na necessidade de expandir fronteiras exploratórias de petróleo e gás natural. Novos reservatórios de hidrocarbonetos devem substituir os campos maduros em declínio e ainda incrementar a produção global. Neste panorama o Brasil figura posição privilegiada. As descobertas de petróleo e gás natural na camada pré-sal prevêem reservas de aproximadamente 10 bilhões de barris de óleo equivalente (boe) [3]. Dessa forma, além de garantir hidrocarbonetos para demanda interna, o país ainda pode se tornar um exportador relevante no cenário mundial.

O planejamento para o desenvolvimento da produção de novos campos de petróleo e gás natural determina a construção de mais de quarenta plataformas marítimas de produção até 2020, somente no Brasil [4]. Essas plataformas de produção são constituídas de sistemas industriais complexos, que separam o gás natural, o óleo e a água produzida. Além disso, existem outros sistemas de grande potência para injeção de água e gás natural no reservatório dos campos de hidrocarbonetos. A grande quantidade de bombas, compressores e ventiladores instalados na plataforma marítima de produção determinam a característica eletro-intensiva dessa atividade extrativista.

Considerando-se essa característica de eletro-intensidade nas plataformas marítimas modernas, a utilização de fontes renováveis nesse tipo de ambiente industrial torna-se extremamente atrativo. Ou seja, a geração de energia elétrica através de fluxos energéticos renováveis presentes na localização da plataforma marítima pode diminuir o consumo de combustíveis fósseis. Em grande escala, considerando o planejamento para o desenvolvimento da produção de petróleo e gás natural no Brasil, a integração de fontes renováveis com geradores elétricos acionados por combustíveis fósseis vislumbra ganhos ambientais, técnicos e econômicos significativos.

O desenvolvimento de aplicações de fontes alternativas de eletricidade para plataformas marítimas permite auxiliar na mitigação dos impactos decorrentes da atividade de produção. A diversidade da matriz energética de instalações industriais através da utilização de tecnologias limpas para geração de eletricidade vislumbra a economicidade da produção e a diminuição da poluição. A utilização de tecnologias limpas deve permear toda cadeia produtiva e de consumo de energéticos, buscando oportunidades de substituição à energia não renovável independente do nível de escala de aplicação.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de metodologia para avaliação de utilização de fontes renováveis de energia elétrica em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural. Para isso, foi desenvolvido um fluxograma de projeto e uma metodologia multicritério. O fluxograma de projeto determina as etapas e atividades requeridas para uma adequada aplicação da metodologia de avaliação. Enquanto a metodologia multicritério busca captar os valores e percepções de projetistas, operadores e mantenedores a respeito de características dos dispositivos conversores de energia renovável no ambiente industrial em estudo.

A prospecção e avaliação de oportunidades para instalação devem ser realizadas ainda na fase de projeto, para que a estrutura da plataforma marítima de produção seja construída com foco na utilização de tecnologias renováveis.

1.2 JUSTIFICATIVA

As recentes descobertas de petróleo na camada pré-sal em território brasileiro estão modificando profundamente o país. Enquanto no âmbito econômico existem projeções para se tornar um importante exportador de petróleo e gerador de divisas, no âmbito político existem discussões acerca de como investir o montante de capital a ser gerado em prol do bem estar social da população brasileira. Em paralelo, grandes esforços são realizados no caminho da superação tecnológica e desenvolvimento da engenharia nacional, com vistas aos desafios existentes na exploração e produção de petróleo e gás natural em águas ultra profundas¹ e distantes da costa.

Devido à cessão onerosa pela União das reservas localizadas na camada pré-sal, torna-se imperativo o início imediato do desenvolvimento de produção desses campos, através da construção de poços, sistemas submarinos, plataformas e dutos. Portanto, importantes programas tecnológicos, tanto de capacitação técnica quanto de desenvolvimento de equipamentos são necessários nessa etapa. Estão previstas a construção de pelo menos quarenta plataformas marítimas e o incremento de cem por cento na produção nacional de hidrocarbonetos até 2020 [4]. Ou seja, grandes oportunidades tecnológicas permeiam esse planejamento.

Esse aquecimento da indústria petrolífera, e conseqüentemente naval, no Brasil, está alinhado com as projeções energéticas no âmbito mundial para os próximos anos, que apontam uma forte dependência do petróleo e aumento da produção de hidrocarbonetos [1] e [2]. Essa dependência é motivada pela

¹ Na indústria do petróleo e gás natural, o conceito de águas profundas representa profundidades de até mil metros. Enquanto o conceito de águas ultra profundas representa profundidades de mil a três mil metros [3].

inexistência, no curto e médio prazo, de energético substituto com características similares para utilização em escala e distribuída, facilidade de logística, estocagem e transformação. Contudo, a poluição atmosférica e as mudanças climáticas refletem a necessidade de diminuir a utilização de combustíveis fósseis como o petróleo e o gás natural [5]. Essa situação vislumbra uma janela de oportunidade para o Brasil no cenário mundial. Pois a utilização de fontes renováveis de energia elétrica podem mitigar esses impactos ambientais e garantir o atendimento da demanda energética global.

Nesse panorama, fontes alternativas em plataformas marítimas de produção de hidrocarbonetos constitui uma inovação de aplicação e promove a integração de fontes de energia primária. A utilização em baixa e média escala de tecnologias verdes para geração de eletricidade em ambiente industrial permite incremento na confiabilidade e continuidade de atendimento às cargas críticas. Ou seja, em relação à cadeia industrial de exploração e produção de petróleo e gás natural no Brasil, a implementação de sistemas elétricos mais limpos permitirá a diminuição da poluição e incrementará a disponibilidade de hidrocarbonetos para utilização em terra, sem denegrir a segurança e a continuidade operacional.

Os sistemas elétricos industriais necessitam de alta confiabilidade e disponibilidade de energia elétrica. Tais características são ainda mais importantes na indústria de petróleo e gás, onde existem elevados requisitos de segurança operacional devido à constante presença de produtos inflamáveis e atmosferas potencialmente explosivas. Além disso, o risco ambiental é elevado no caso de falhas de equipamentos e sistemas. Uma das características marcantes das plataformas marítimas modernas é a eletro-intensidade. Nas unidades recém construídas o consumo médio de eletricidade pode chegar a 80 MVA, para uma produção correspondente de 180 mil barris de petróleo por dia (mbp/d) [6]. Considerando os critérios de projeto de confiabilidade e manutenibilidade a capacidade instalada atinge a potência de 120 MVA.

Nesse contexto, a utilização de fontes renováveis de produção de energia elétrica constitui uma inovação e um novo paradigma na indústria petrolífera nacional. Tecnicamente, existe a possibilidade de utilização de energia solar, eólica, das ondas e até mesmo hidráulica no ambiente de plataforma marítima de produção, onde a energia existente na natureza está disponível em grande escala. Além disso,

sistemas elétricos essenciais podem ter confiabilidade e disponibilidade aumentada, valorizando questões de segurança operacional e humana no ambiente industrial. Integrar ações de diversidade energética em projetos de produção de energéticos convencionais é a proposta desse estudo. Ou seja, criar um espaço real para a participação das energias renováveis na composição dos recursos energéticos necessários à extração de combustíveis fósseis.

A característica marítima da produção de petróleo e gás natural no Brasil deve ser aproveitada para integrar tecnologias verdes. A disponibilidade de energia primária nesse ambiente é grande e permitirá o desenvolvimento de soluções integradas, com vistas ao atendimento à demanda de eletricidade na costa em um futuro próximo. A iniciativa proposta nesse estudo está alinhada com a característica intrínseca do Brasil, onde a matriz energética é considerada limpa.

A inserção de novos sistemas industriais e equipamentos em plataformas marítimas de produção devem obedecer algumas restrições técnicas. Quesitos como tamanho, peso, frequência de manutenção, resistência às intempéries, disponibilidade e requisitos legais são exemplos comuns de restrições técnicas. Contudo, a utilização de fontes renováveis deve ser maximizada e adaptada, de forma a tornar a cadeia de Exploração e Produção (E&P) de petróleo e gás natural mais sustentável. A evolução dessa iniciativa permeia a regulação do setor e está alinhada com as iniciativas globais de diminuição da poluição [5].

Uma ressalva relevante é o fato de que atualmente existe o requisito de conteúdo nacional mínimo para a construção de plataformas marítimas destinadas à lavra de hidrocarbonetos preconizada pelo governo federal brasileiro. Essa determinação representa grande oportunidade e incentivo para empresas nacionais desenvolverem soluções e equipamentos para indústria petrolífera, mais especificamente para o foco desse trabalho, as tecnologias renováveis de geração de eletricidade.

Deste modo, este trabalho, visando à integração de fontes renováveis de energia elétrica com plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural, avaliará as tecnologias existentes e aspectos operacionais relacionados à viabilidade técnico-econômica dessa aplicação específica e inovadora para novos projetos de desenvolvimento de produção de hidrocarbonetos.

1.3 PROBLEMA CIENTÍFICO

Atualmente, a utilização de fontes renováveis não é considerada na etapa de projeto de ambientes industriais. Paradigmas sobre custos, continuidade e qualidade da energia elétrica dos dispositivos conversores induzem ao preconceito de baixa atratividade das soluções verdes [7]. Contudo, existem aplicações experimentais que atestam a atratividade e o sucesso da utilização integrada de aerogeradores, painéis solares e banco de baterias em sistemas industriais [8].

A utilização em escala de dispositivos conversores de fluxo energético renovável em eletricidade deve obedecer a uma metodologia e a critérios de projeto, com vistas à aplicação adequada da solução verde aos requisitos do consumidor.

Dessa forma, o problema científico se apresenta como limite do conhecimento para essa aplicação específica de fontes renováveis de energia elétrica em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural. Essa problemática se configura na necessidade de uma metodologia que permita, de forma adequada: identificar os fluxos energéticos e determinar o potencial energético teórico da localização; analisar e avaliar os dispositivos conversores que podem ser instalados em plataformas marítimas e os requisitos dos consumidores; definir a localização elétrica e física desses conversores; e estimar a energia elétrica produzida por esses conversores.

O resultado da aplicação dessa metodologia também permitirá estimar a emissão de CO₂ evitado e a atratividade de venda de créditos de carbono. Embora este mercado passe por reformulações, sua importância é inquestionável, como principal agente do aquecimento global.

Outro aproveitamento desse resultado é a sinalização de oportunidades de desenvolvimento de produção de dispositivos conversores de energia renovável para a cadeia produtiva industrial nacional.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 são apresentadas as plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural, o contexto no desenvolvimento de campos petrolíferos e os tipos mais utilizados no Brasil. Também são apresentadas as particularidades dos sistemas industriais e da instalação elétrica, com ênfase nos requisitos de confiabilidade e qualidade requeridos pelos consumidores. Normas de sociedades classificadoras e sociedades técnicas são exibidas como requisitos para projetos de sistemas elétricos para a aplicação em estudo.

A conceituação de fontes renováveis e não renováveis, tipos de fluxos energéticos e tipos de conversão são discutidas no Capítulo 3. A elaboração de soluções energéticas verdes é discutida através de técnica de análise de projeto baseado em princípios de aplicação e fatores técnicos. Exemplos de aplicações industriais são apresentados, com foco na configuração de sistemas híbridos e mini-redes. A identificação e classificação dos fluxos energéticos presentes em ambientes industriais marítimos são expostos.

O Capítulo 4 avalia tipos de dispositivos conversores de fluxos renováveis em eletricidade, com ênfase nas plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural. Aspectos técnicos como eficiência, custo, densidade energética e maturidade tecnológica são apresentados e comparados.

A metodologia para avaliação de fontes renováveis em plataformas de petróleo e gás natural é proposta no Capítulo 5, através do detalhamento de seu fluxograma de processo etapa a etapa. Destaque para a aplicação de técnica multicritério desenvolvida para ranqueamento das soluções verdes. A determinação dos aspectos e atributos é apresentada, assim como o conceito de valoração dos mesmos.

O Capítulo 6 exhibe dois estudos de caso da aplicação da metodologia proposta. O primeiro caso é baseado em uma plataforma tipo fixa, enquanto o segundo caso é baseado em uma plataforma tipo embarcação FPSO (*Floating*,

Production, Storage and Offloading). As diferenças de aplicação permitem comparar a importância do fluxograma de projeto na análise da problemática em estudo e a influência da metodologia multicritério na decisão dos projetistas sobre quais tecnologias aplicar ao projeto.

Finalizando o trabalho, o Capítulo 7 apresenta as principais conclusões da aplicação da metodologia proposta para avaliação de fontes renováveis em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural. Sugestões para trabalhos futuros também são apresentados.

2 PLATAFORMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

O foco de aplicação de fontes renováveis desse trabalho são as plataformas de produção de petróleo e gás natural. Logo, o conhecimento sobre o processo dessa cadeia industrial, sistemas relevantes e tipos de consumidores de energia elétrica é necessário para adequada avaliação de aplicação das tecnologias verdes. Nesse capítulo serão apresentados os principais sistemas presentes no desenvolvimento de produção de hidrocarbonetos, os tipos de plataforma utilizados no Brasil, principais sistemas industriais e características especiais do sistema elétrico e equipamentos elétricos.

Figura 1 – Ilustração com representação simplificada de um típico projeto de desenvolvimento da produção em águas profundas e ultraprofundas. (adaptado de [3]).

O desenvolvimento da produção de campos de petróleo e gás natural em ambientes marítimos é baseado em uma complexa infraestrutura, para permitir a retirada dos hidrocarbonetos do reservatório e envio para unidades industriais de tratamento e refino, normalmente localizadas em terra. Compõe essa infraestrutura os sistemas submarinos, as plataformas de produção, os dutos de escoamento e modais de transporte [9]. Os equipamentos existentes nessa infraestrutura (com

exceção aos modais de transporte) e os sistemas de operação, monitoramento e controle, requerem energia elétrica e hidráulica para seu funcionamento. Essa energia provém da plataforma de produção, também conhecida como Unidade Estacionária de Produção (UEP). A Figura 1 demonstra um esquema típico de projeto de desenvolvimento da produção de hidrocarbonetos em águas profundas e ultraprofundas. Destacam-se o reservatório, o poço, as instalações submarinas e a plataforma de produção marítima.

2.1 TIPOS DE PLATAFORMA

O planejamento de desenvolvimento da produção determina o tipo de plataforma e os processos industriais que serão construídos para produzir petróleo e gás natural de um determinado campo. As diversas opções técnicas disponíveis de plataformas marítimas devem atender as condições do reservatório (pressão e temperatura), as características físico-químicas dos hidrocarbonetos (nível API e existência de contaminantes) e as características de localização dos poços (profundidade, correntes marítimas e distância da costa) [10].

A Figura 2 ilustra diversos tipos de plataformas marítimas utilizadas mundialmente para a lavra de hidrocarbonetos. A diversidade de estruturas disponíveis deve-se principalmente aos fatores marítimos da locação (condições ambientais). Por exemplo, as plataformas do tipo *Spar* são muito utilizadas no Golfo do México, devido à resistência sob condições ambientais severas (furações e tornados). Além disso, essas estruturas são apropriadas para a filosofia de desenvolvimento da produção naquela região, em que poucas linhas estão conectadas à superfície e a planta de processo é pequena.

Figura 2 – Ilustração de tipos de plataformas utilizadas no mundo (adaptado de [9]).

Ao contrário do Brasil, nos Estados Unidos da América não são comuns os navios plataforma. Já na Noruega são mais comuns as plataformas fixas com base de concreto, devido às condições ambientais extremas do Mar do Norte.

A Figura 3 ilustra os principais tipos de plataformas marítimas de produção utilizados na costa brasileira. A seguir são apresentadas suas características construtivas e operacionais.

Figura 3 – Ilustração de plataformas marítimas utilizadas na costa brasileira (adaptado de [11]).

2.1.1 Plataformas fixas

As plataformas do tipo fixa destinam-se às águas rasas, com lâmina d'água até 200 m. Foram as primeiras unidades de produção utilizadas no mundo, uma vez que as primeiras descobertas no mar foram em profundidades menores [12]. Geralmente as plataformas fixas são constituídas de estruturas modulares de aço, instaladas no local de operação, com estacas cravadas no fundo do mar.

O processo de construção de uma plataforma fixa é iniciado pela jaqueta, estrutura base da plataforma, a ser fixada no fundo do mar. A sua construção é feita nos estaleiros na posição horizontal. Concluída sua construção, a jaqueta é levada para a sua locação em barcas de grande porte e lançada ao mar na posição vertical, no ponto onde vai operar. Depois de devidamente fixadas no fundo do mar, a jaqueta recebe as partes superiores da plataforma, que constituem os equipamentos de segurança, estocagem de materiais, alojamento de pessoal, bem como todas as instalações necessárias para a produção dos poços. Escoam a produção diretamente por dutos ou para navios, uma vez que não possuem tanques de armazenamento.

Este tipo de plataforma é projetado para uma determinada locação onde permanece até o esgotamento da jazida, pois não pode ser transferida para outro campo. A vida média útil de um reservatório de petróleo é de 30 anos, podendo ser menor ou maior, dependendo de diversos fatores, como tamanho do reservatório e porosidade da rocha armazenadora. Quando desativadas, as plataformas fixas podem se transformar em criadouro de peixes, como arrecifes artificiais.

Figura 4 – Imagem de projeto e fotografias da Plataforma de Mexilhão (adaptado de [11]).

A Figura 4 ilustra imagens de projeto e fotografias de uma plataforma marítima fixa para produção de gás natural e condensado, instalada na Bacia de Santos. Nesse caso, a jaqueta é uma estrutura de aço com base quadrada medindo 70 por 70 metros e topo também quadrado de 40 por 40 metros, formada por tubulares, pesando 11.300 toneladas no total. Com 182 metros de altura, seu topo está a 10 metros acima do nível do mar. A altura final da plataforma, do solo marinho até o ponto mais alto dos módulos é de 227 metros, equivalente a um edifício de 75 andares.

Os dois módulos que foram colocados sobre a jaqueta, juntos, pesam mais de doze mil toneladas. Neles estão as instalações de processamento de gás, utilidades, incluindo capacidade de 10 MW de geração de energia elétrica, acomodações para até 100 pessoas e heliponto [11].

2.1.2 Plataformas semi-submersíveis

As plataformas do tipo semi-submersíveis (SS) são compostas de vários conveses, apoiados por colunas em flutuadores submersos, pouco abaixo do nível do mar. Também são conhecidas, em língua inglesa, como FPS (*Floating Production System*). Essas plataformas são projetadas para realizar operações de produção de hidrocarbonetos, processamento e transferência do óleo (*offloading*). Contudo, não permitem armazenamento de petróleo. Não existe limite máximo de lâmina d'água para sua instalação, uma vez que flutua na superfície. Esse tipo de plataforma mantém seu posicionamento geográfico através de ancoragem ou através de motores de propulsão automática, o sistema de posicionamento dinâmico (somente para sondas e sistemas de testes de longa duração).

O sistema de ancoragem é constituído de diversas linhas podendo ser compostas por amarras e tramos de poliéster fixos no fundo do mar através de âncoras. Essas linhas atuam como molas, que produzem esforços capazes de restaurar a posição da plataforma flutuante, quando essa é modificada pela ação dos ventos, ondas e correntes marítimas.

O sistema de posicionamento dinâmico é composto de sensores acústicos que determinam a deriva da embarcação e de propulsores que são controlados automaticamente para manter a posição geográfica. Nesse caso as únicas conexões da embarcação com o leito marinho são as linhas de produção, controle e injeção de água. A Figura 5 ilustra imagem de projeto de uma plataforma semi-submersível, com destaque ao tipo do casco que fica abaixo da linha d'água.

Figura 5 – Imagem de projeto de plataformas semi-submersível (adaptado de [10]).

A Figura 6 ilustra uma plataforma marítima semi-submersível instalada na Bacia de Campos, em área distante 120 km da costa e com profundidade de 1.670 metros. O sistema de produção nesse exemplo conta com 21 poços, dos quais 10 são produtores de petróleo e 11 injetores de água. A produção estimada desta unidade é de 100 mil barris de petróleo por dia. A capacidade instalada de geração de energia elétrica é de 100 MW e o sistema de compressão de gás natural é dimensionado para processar 6 milhões de metros cúbicos por dia. Existe acomodação para 200 pessoas e seu peso total é de 54.658 toneladas. Além do sistema de ancoragem, essa embarcação utiliza 79 *risers* para conectá-la ao sistema submarino (*Riser* é um duto que conecta o poço à plataforma e tem funções diversas como movimentação de fluidos e sistemas de controle e monitoramento).

Figura 6 – Fotografias da P-56 (adaptado de [11]).

2.1.3 Navios plataforma

Os navios plataforma, também conhecidos em língua inglesa como FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), são navios de produção com capacidade para processar, armazenar e realizar a transferência de petróleo. O conceito básico é que essa embarcação seja uma unidade flutuante estacionária, com sistema de ancoragem e casco de navio. Normalmente esse tipo de plataforma é resultado de conversão de navios tanque (petroleiros) desativados ou antigos. No convés do navio é instalada uma planta de processo, com separadores de água-gás-óleo, sistemas de facilidades, além de instalações de apoio como alojamentos, heliporto e outros [10].

O processo industrial é projetado para separar e tratar primariamente os fluidos produzidos pelos poços. Após a separação, o petróleo é armazenado nos tanques do próprio navio. Quando os tanques de armazenamento estão próximos de sua capacidade máxima, o petróleo é transferido para um navio aliviador. Em alguns casos é possível utilizar um oleoduto de conexão para outras plataformas. O gás natural produzido é comprimido para reinjeção nos reservatórios ou para o transporte até a costa. Esse tipo de embarcação normalmente tem grande capacidade de processamento, podendo produzir até 200 mil barris de petróleo por dia.

Uma vantagem desse tipo de plataforma, em comparação com o tipo fixa, é poder ser realocada em campos diferentes. Ou seja, não é necessário abandonar sua estrutura ao fim da vida útil do reservatório. Em uma comparação com as plataformas semi-submersíveis, uma vantagem relevante é a possibilidade de uso de plantas de processo de maior capacidade (mais pesadas) assim como baixo tempo de conversão (construção mais rápida e custo menor). Outro ponto forte é a maior reserva de estabilidade estática (naval), o que facilita a sua operação e transferência de lastro.

As desvantagens desse tipo de plataforma em relação à fixa e à semi-submersível estão relacionadas ao grande porte, ou seja, não é adequada à pequenos projetos; e à limitação de utilização em águas rasas.

A Figura 7 ilustra a fotografia de um navio plataforma instalado na Bacia de Campos, em área com profundidade de 1.400 metros e com sistema de ancoragem distribuída. O sistema de produção nesse exemplo conta com 17 poços, dos quais 11 são produtores de petróleo e gás natural, e 6 injetores de água. A produção de petróleo estimada da embarcação é de 180 mil barris por dia e capacidade de comprimir até 6 milhões de metros cúbicos diários de gás natural.

Figura 7 – Fotografia do FPSO P-54 (adaptado de [11]).

2.2 LOGÍSTICA E CONDIÇÕES AMBIENTAIS

A logística para unidades marítimas é um ponto relevante na avaliação do sistema de produção. As novas fronteiras exploratórias têm como característica a grande distância da costa (mais de 150 km). Dessa forma, a utilização dos modais marítimos (balsas e barcos de apoio) e aéreos (helicóptero) para transporte de trabalhadores, equipamentos e cargas são as opções disponíveis. Nesse contexto, todos os sistemas que fazem parte da cadeia de produção de petróleo e gás natural devem buscar alta confiabilidade e pouca necessidade de manutenção. Aos projetos de sistemas não críticos à segurança e à continuidade operacional não é desejável o incremento do custo logístico, que influencia o custo de operação e manutenção da plataforma. Ou seja, preconiza-se a utilização de equipamentos robustos e com tecnologia madura.

A utilização do modal aéreo depende de condições atmosféricas propícias para vôos seguros. Viagens noturnas e sob chuva intensa não são permitidas. As condições marítimas e atmosféricas são barreiras no transporte marítimo. Grandes ondas e ventos fortes não permitem a aproximação segura dos barcos à plataforma, assim como a operação segura dos guindastes.

As condições ambientais também influenciam de forma relevante a operação e segurança da produção e processamento primário do petróleo e gás natural. Em casos extremos como furacões e tornados, a produção pode ser paralisada e os poços fechados temporariamente. Equipamentos e sistemas devem ser projetados e construídos considerando essas situações críticas. A Figura 8 exibe fotografias de embarcações sob situações adversas em ambiente marítimo.

Figura 8 – Fotografias de embarcações sob condições marítimas adversas (arquivo pessoal).

2.3 SISTEMAS E PROCESSOS INDUSTRIAIS

As plataformas marítimas são compostas de diversos sistemas e processos industriais, que funcionam de forma integrada em um complexo sistema de gerenciamento operacional. Cada sistema ou processo cumpre um papel específico na operação da planta de processo e tem características próprias de criticidade, confiabilidade e operacionalidade. A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) determina que esses sistemas sejam descritos por instalação, conforme [13]. Cada sistema pode ser construído em módulos paralelos e depois serem integrados. A confiabilidade de alimentação de eletricidade para cada sistema depende de sua criticidade para o processo e segurança operacional. A Figura 9 exibe fotografia de instalação de navio plataforma, com destaque aos sistemas industriais e módulos de processo.

Figura 9 – Fotografia de instalação de sistemas industriais em um FPSO (acervo pessoal).

Os principais sistemas industriais encontrados em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural estão apresentados a seguir.

2.3.1 Utilidades e lastro

O sistema de utilidades é responsável em prover insumos para outros processos industriais, como água, vapor, ar comprimido entre outros. Os principais subsistemas encontrados nessa classe são:

- sistema de captação e distribuição de água salgada;
- sistema de água para resfriamento;
- sistema de água potável;
- sistema de ar comprimido;
- sistema de separação de água e óleo;
- sistema de ar condicionado e ventilação;
- sistema de tratamento de água e efluentes;
- sistema de geração de gases inertes;
- sistema de geração de vapor;
- sistema de óleo diesel.

O sistema de lastro é encontrado somente em plataformas flutuantes, e tem como objetivo estabilizar a embarcação através do equilíbrio do peso e centro de gravidade. A captação ou expurgo da água do mar para os tanques de lastro são as ações desse sistema [10]. O sistema de lastro também gerencia o sistema de tancagem, que considera armazenamento de água doce, rejeitos, óleo diesel e petróleo. Ou seja, todos os tanques da embarcação.

2.3.2 Salvatagem

A função do sistema de salvatagem é permitir a evacuação ou abandono da embarcação de forma segura por toda a tripulação a bordo. Esse sistema é composto das balsas infláveis, dos coletes salva-vidas, das baleeiras, do bote de resgate, do radar e do rádio sinalizador de emergência. A Figura 10 exibe fotografia de FPSO, onde a localização de baleeiras e balsas infláveis está destacada na elipse verde.

Figura 10 – Fotografia de FPSO com destaque para sistema de salvatagem (adaptado de [11]).

2.3.3 Ancoragem e posicionamento

O sistema de ancoragem ou de posicionamento dinâmico é responsável por manter a posição geográfica da embarcação em relação aos poços e conexões, assim como alinhá-la em relação à direção de ondas e correntes marítimas. Essa segunda função é muito importante para diminuir a amplitude de deslocamento vertical, que tem grande influência no funcionamento de equipamentos rotativos e processos de separação água e óleo [14].

2.3.4 Segurança, detecção e combate a incêndio.

Devido à característica de processamento e transporte de substâncias inflamáveis e potencialmente explosivas, o sistema de segurança, detecção e combate a incêndio é muito importante para mitigar possíveis acidentes e suas conseqüências. O seu objetivo é identificar focos iniciais de incêndio para combate imediato e desta forma evitar que estes adquiram proporções catastróficas, com danos materiais e humanos. Os subsistemas que o compõe são:

- sistema de detecção de fogo e gás;
- sistema de alarme de emergência (sonoro e luminoso);
- sistema de combate a incêndio.

2.3.5 Movimentação de carga e pessoal

Esse sistema é composto pelos guindastes (diesel, hidráulico ou elétrico) e pelo complexo do heliponto. A criticidade desse sistema é alta, pois impacta em todas as atividades de bordo. A capacidade de guindastes para a aplicação em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural varia de 5 a 50 toneladas. A Figura 11 exibe fotografia de FPSO, onde a localização dos guindastes está destacada nas elipses verdes.

Figura 11 – Fotografia de FPSO com destaque para sistema de movimentação de carga e pessoal (adaptado de [11]).

2.3.6 Comunicação

O sistema de comunicação é um dos sistemas mais importantes para salvaguarda e segurança operacional da unidade de produção. Esse sistema é responsável pelo envio de dados de produção e do reservatório para a costa, assim como pelo sistema interno de comunicação operacional. O segundo sistema é utilizado para veicular anúncios públicos, chamadas, mensagens de advertências, de emergências e programas audíveis a todas as pessoas a bordo. Esse sistema também é utilizado para assessorar as atividades operacionais, movimentação de carga, segurança, salvamento e comunicações entre a unidade marítima e estações costeiras, embarcações e aeronaves.

Os principais subsistemas encontrados nessa classe são:

- sistema de telefonia;
- sistema de endereçamento público;

- sistema de comunicação de rádio;
- sistema mundial de socorro e segurança marítima (GMDSS).

A Figura 12 exibe fotografia de plataforma de produção tipo SS em processo de construção, onde a localização da torre de comunicação está destacada pela elipse verde.

Figura 12 – Fotografia de plataforma SS com destaque para o sistema de comunicação (adaptado de[11]).

2.3.7 Produção

Esse sistema é o responsável pela extração dos hidrocarbonetos do reservatório em segurança, pela elevação do petróleo (ausência de surgência natural) e pela manutenção da pressão interna do reservatório. Esse sistema consome grande quantidade de energia elétrica, devido à utilização de grandes bombas e compressores. Também fazem parte desse sistema os equipamentos submarinos e seus respectivos controles (hidráulico e elétrico).

Os principais subsistemas encontrados nessa classe são:

- sistema de injeção de gás natural;
- sistema de injeção de água;
- árvores de natal molhada (ANM);

- válvula de segurança de subsuperfície (*Down Hole Safety Valve – DHSV*);
- sistema de transferência de óleo (*offloading*);
- sistema de queima por *flare*.

2.3.8 Processamento de óleo

O objetivo desse sistema é de separar o gás emulsionado e a água do óleo, e então tratar essas correntes de forma independente para especificá-las aos padrões de envio aos terminais e refinarias (óleo e água) e de descarte (água oleosa). Normalmente existem dois trens de processamento em paralelo para aumentar a confiabilidade. Cada trem é composto de estágios sequenciais, por exemplo, aquecimento, separadores atmosféricos, injeção química, separadores eletrostáticos e outros. O produto final desse sistema é o petróleo pronto para exportação. Os rejeitos são gás natural (que segue para o sistema de processamento de gás) e água oleosa (que segue para o sistema de tratamento de águas e efluentes).

2.3.9 Processamento de gás natural

Este sistema é responsável pela adequação e compressão do gás produzido para utilização no sistema de gás combustível (turbogeradores e turbocompressores), no sistema de elevação por *gas lift* e para exportação até a costa. Dependendo das características do gás, o trem de produção pode ser composto de separadores bifásicos, trocadores de calor, unidades desidratadoras, seqüestrantes, entre outros. Os rejeitos são o condensado (que retorna para o sistema de processamento de óleo) e a água oleosa (que segue para o sistema de tratamento de águas e efluentes). A Figura 13 exhibe fotografia de uma planta de processamento primário de óleo e gás natural, com o *flare* em funcionamento no último plano.

Figura 13 – Fotografia de sistema de processamento de óleo e gás (acervo pessoal).

2.3.10 Automação, controle e parada de emergência

A automação e controle da planta de processo e embarcação são realizados pela Estação Central de Operação e Supervisão – ECOS. Este sistema permite o monitoramento e inspeção da produção *offshore* na Sala de Controle Central. As variáveis de processo como fluxo, temperatura e pressão também são monitoradas e controladas na ECOS, assim como as variáveis dos sistemas de facilidades.

A função do sistema parada de emergências é garantir a interrupção segura da função dos equipamentos, proteção de instalações e pessoas, ao efetuar a parada de emergência controlada da unidade de produção *offshore*. Esse sistema de controle é constituído por todos os sistemas relacionados com a produção (processo, utilidades e equipamentos submarinos) e os sistemas relacionados com a navegação da embarcação.

O processo de parada é iniciado automaticamente através de sensores e sistemas automatizados (interruptores e transmissores) que detectam alguma anormalidade proveniente de variáveis de processo e de parâmetros dos equipamentos. Assim, atuam elementos finais de campo (também chamados de

dispositivos protetores) como válvulas de parada de emergências (SDVs), válvulas de *blowdown* (BDVs), válvulas de *shutoff* (XVs), painéis de controle locais, etc., isolando, aliviando e parando o equipamento ou o sistema operacional que causa ou está sujeito a perigo. Normalmente o sistema de bloqueio possui quatro níveis de parada de emergência (*Emergency Shutdown* - ESD):

- Nível 1 (ESD1): desligamento parcial dos sistemas industriais de processo ou equipamentos;
- Nível 2 (ESD2): desligamento dos sistemas industriais de processo sem afetar os equipamentos “essenciais”;
- Nível 3 (ESD3): desligamento parcial e total dos sistemas industriais de processo e de equipamentos “não essenciais”;
- Nível 4 (ESD4): depressurização automática da planta de processo e preparação para abandono se necessário.

Esse sistema é considerado a carga elétrica mais crítica da unidade estacionária de produção, e é exigida a maior confiabilidade possível.

2.4 SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico de plataformas marítimas deve atender requisitos de confiabilidade e projeto para cada sistema industrial apresentado anteriormente, enfatizando a continuidade e segurança operacional. Devido à característica de ambiente marítimo, as unidades industriais devem obedecer a requisitos de organizações técnicas e de organizações de classe.

As organizações técnicas normalmente atendidas são a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) entre outros. No âmbito das organizações de classe, devem ser atendidos os requisitos da Legislação Brasileira, do Departamento de Portos e Costas da Marinha (NORMAM), das normas regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), da Organização Marítima Internacional (IMO), das Sociedades Classificadoras e da Bandeira da

embarcação. O Apêndice A apresenta uma lista com as principais normas que balizam o projeto e operação de sistemas elétricos em plataformas marítimas.

Por exemplo, um requisito técnico é a necessidade de certificado de conformidade, no âmbito do Sistema Brasileiro de Certificação, de todos os materiais, peças, dispositivos, equipamentos e sistemas destinados à aplicação em instalações elétricas de ambientes com atmosferas potencialmente explosivas, segundo a série de normas ABNT NBR IEC 60079 – Atmosferas Explosivas.

Outro exemplo de requisito de classe é a obrigatoriedade dos os equipamentos elétricos, painéis e componentes serem especificados para operar dentro dos limites de inclinação estática e dinâmica especificados para cada tipo de sistema (sistema normal, essencial ou de emergência), segundo o MODU CODE da IMO e regras da Sociedade Classificadora (Apêndice A).

2.4.1 Geração e distribuição de energia elétrica

O sistema de geração de energia elétrica normalmente é do tipo isolado, ou seja, não está interconectado ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Devido a requisitos técnicos de peso e dimensões, e dependendo das necessidades de utilidades do processo industrial, os sistemas de geração de energia elétricos mais utilizados são [15]:

- Turbina a gás aero derivada (de 3 a 40MVA);
- Turbina a vapor (de 2 a 25MVA);
- Motor a combustão interna (de 0,3 a 20 MVA);
- Banco de baterias (até 350 kVA).

Normalmente os acionadores dos sistemas de geração elétrica são alimentados por gás natural e óleo diesel. O IMO MODU CODE determina requisitos especiais para o gerador de emergência em embarcações, por exemplo, ser refrigerado a ar, ter partida automática, estar instalado em local livre de inundação e próximo ao painel de distribuição de cargas de emergência, entre outros.

Para sistemas críticos, existem sistemas de corrente contínua e baterias, chamados de sistemas de alimentação ininterrupta de eletricidade (*Uninterruptible Power Supply* – UPS). Esse sistema é composto pelo módulo de geração de

eletricidade (baterias), painéis elétricos, módulo retificador, módulo inversor e chave de transferência.

A Figura 14 exibe imagem de projeto do módulo de geração de energia elétrica do navio plataforma P-50, composto por quatro turbogeradores principais de potência instalada de 25 MVA cada. Além disso, a embarcação conta com um motogerador auxiliar de 3,75 MVA e um motogerador de emergência de 2,5 MVA. Essas potências são típicas para navios plataforma (FPSO).

Figura 14 – Imagem de projeto do módulo de geração de eletricidade da P-50 (adaptado de [11]).

2.4.2 Classificação de cargas elétricas

O sistema elétrico de plataformas marítimas para produção de petróleo e gás natural é dividido e classificado de acordo com a importância da carga elétrica para a continuidade operacional e para a segurança da instalação e das pessoas. De acordo com esta classificação, a alimentação elétrica pode ser redundante em diversos níveis, de forma garantir o funcionamento dos equipamentos e sistema industrial em situações de emergência [16].

Os tipos de cargas elétricas são:

- Normais;
- Auxiliares;

- Essenciais;
- Emergência.

As cargas normais ou não-essenciais são os equipamentos elétricos que suportam processos considerados passíveis de interrupção sem risco operacional ou de segurança. Por exemplo, os motores elétricos que acionam bombas de injeção de fluidos nos poços de hidrocarbonetos, ou para transferência de fluidos para vasos separadores. Essas cargas são alimentadas somente pela barra de geração principal, com possibilidade de redundância de conexão. Caso o equipamento elétrico seja importante para o processo, podem ser instalados outros em paralelo, para o caso de falha. Essas cargas permanecem desligadas durante a ocorrência de uma parada tipo ESD1, ESD2 ou ESD3.

As cargas auxiliares são similares às normais, mas são importantes para a retomada da produção e/ou permitem produção parcial. Essas cargas são alimentadas pelo gerador auxiliar, usualmente parte integrante do barramento principal. O acionamento desse gerador ocorre quando os geradores principais estão em modo de falha.

As cargas essenciais são os equipamentos elétricos que suportam sistemas considerados essenciais para a unidade marítima de produção de hidrocarbonetos. Por exemplo, as cargas consideradas “carga de emergência” pelo IMO MODU CODE e regras das sociedades classificadoras. Essas cargas são alimentadas pelo barramento de emergência. Esse barramento é conectado ao barramento principal por no mínimo duas conexões. Essas cargas devem permanecer energizadas pelo gerador de emergência quando ocorrer desligamento tipo ESD1, ESD2 ou ESD3 e durante falha da geração principal.

As cargas de emergência são os equipamentos elétricos que suportam os sistemas críticos da unidade marítima de produção de hidrocarbonetos. Esses sistemas são necessários à salvaguarda da vida a bordo, e à segurança operacional dos poços e equipamentos críticos de processo. Essas cargas são alimentadas pelo barramento de emergência e também por um sistema ininterruptível de energia elétrica (UPS), baseado em um retificador, inversor e baterias. Essas cargas devem permanecer energizadas durante o tempo entre o desligamento da geração principal e a partida do gerador de emergência. Ou também, durante a falha do gerador de emergência. Os sistemas de emergência podem ser alimentados em 220 V em

corrente alternada e 12, 24, 48 e 125 V em corrente contínua. Os sistemas industriais críticos, considerados cargas de emergência são:

- Detecção de gás e incêndio;
- Combate a incêndio por água e CO₂;
- Parada de emergência;
- Iluminação de emergência;
- Luzes de auxílio a navegação;
- Luzes de obstáculo aéreo;
- Telecomunicações e intercomunicadores;
- Alarme manual e automático visual e sonoro;
- Painel de controle do gerador de emergência;
- Painel de controle da bomba de incêndio;
- Equipamentos que compõem o sistema de controle e intertravamento;
- Equipamentos que compõem a ECOS.

A Figura 15 exibe imagem de diagrama unifilar simplificado típico de plataforma fixa de produção de gás natural, onde é possível visualizar a classificação das cargas e o conceito de confiabilidade. Destaque para a filosofia de alimentação de alta confiabilidade, com mais de um cabo alimentador por barramento e possibilidade de várias configurações de energização. As cargas normais estão representadas em áreas limitadas por traços em verde, as auxiliares em azul, as essenciais em laranja e as de emergência em vermelho.

A disposição dos barramentos e cargas elétricas também depende dos tipos de sistemas industriais existentes na UEP, como por exemplo, sistema de injeção de água, sistema de injeção de glicol, entre outros.

Figura 15 – Imagem de diagrama unifilar típico de uma plataforma fixa de produção de gás natural.

2.4.3 Classificação de áreas

Os equipamentos e sistemas elétricos constituem possíveis fontes de ignição quando operando em atmosferas potencialmente explosivas. A ignição pode tanto ser ocasionada pelo centelhamento normal em operações de abertura e fechamento de contatos, quanto por temperatura elevada ou por altas correntes de defeito (curto-circuito) [17].

Dessa forma, em indústrias que manipulam materiais inflamáveis, devem ser utilizados equipamentos elétricos com proteção específica, de acordo com o mapa de classificação de áreas. Esse mapa determina o tipo de substância inflamável que pode estar presente no local, a probabilidade de presença, e a extensão geográfica dessa presença. As características de cada tipo de proteção são definidas na série de normas ABNT NBR IEC 60079 – Atmosferas Explosivas, com especificação de grupo de gases e temperatura.

A Figura 16 exibe imagem de mapa tridimensional de área classificada. Destaque para as semi esferas envolvendo cada grupo de moto bomba. Esse volume é determinado pelo tipo de substância inflamável e probabilidade de ocorrência no local. Qualquer equipamento elétrico instalado dentro desse volume deve atender as características de proteção da ABNT. Por exemplo, o motor elétrico que acionará a bomba deverá ser do tipo à prova de explosão (Exd).

Figura 16 – Imagem de mapa tridimensional de área classificada (adaptado de [18]).

3 ENERGIA RENOVÁVEL

A aplicação de soluções de energia renovável requer conhecimentos conceituais a respeito de fluxos energéticos, tipos de conversão e requisitos de projeto. Nesse capítulo serão apresentados esses conceitos, além de exemplos industriais de aplicação de fontes renováveis de energia elétrica.

A indústria de petróleo e gás natural é considerada uma grande consumidora de energia. A cadeia produtiva de energéticos provenientes de hidrocarbonetos é composta pela extração de recursos do subsolo, pelo processamento industrial, pela transformação em produtos de mercado, pelo transporte e pela distribuição ao consumidor final. Logo, grande quantidade de energia é necessária para alimentar essa complexa cadeia produtiva. Globalmente, a energia consumida por esse segmento industrial representa aproximadamente dez por cento de toda a produção de petróleo e gás natural, ou seja, cerca de 600 milhões de toneladas de óleo equivalente (Mtoe) por ano [19]. Estima-se que aproximadamente noventa por cento da energia primária consumida por esse segmento é proveniente dos próprios recursos explorados, sendo que metade dessa energia é procedente do gás natural.

A utilização e o tipo de recurso energético variam de acordo com as características do processo produtivo. Na etapa de produção, como plataformas de petróleo, por exemplo, o gás natural é transformado em calor, eletricidade e energia mecânica. Dessas aplicações, a conversão em energia elétrica é a mais significativa quantitativamente. A importância da eletricidade no acionamento de bombas, compressores e ventiladores nos processos industriais vislumbra uma oportunidade sustentável, ou seja, a possibilidade de substituir a energia primária proveniente dos hidrocarbonetos por fontes renováveis infinitas e não poluentes. Essa alternativa depende de criteriosa análise técnica, baseada na identificação dos fluxos energéticos disponíveis no ambiente e nas características dos consumidores finais.

3.1 CONCEITOS

Atualmente as expressões “fontes renováveis” e “fontes alternativas” são muito utilizadas tanto em artigos técnicos quanto em artigos publicitários para caracterizar a utilização de conversores de energia elétrica não usuais. Nesse trabalho será utilizado o conceito de energia renovável apresentado em [20], “Energia renovável é a energia obtida de fluxos energéticos naturais e persistentes que ocorrem imediatamente no ambiente”. São também consideradas sinônimas as expressões “energia renovável” e “energia verde”. Esse conceito reforça que a energia deve estar no ambiente de forma natural como uma corrente ou fluxo, e que algum dispositivo conversor pode transformá-la em eletricidade. Exemplos comuns desse tipo de energia estão presentes no vento, na radiação solar e na mudança das marés.

A definição antagônica de fontes renováveis são as fontes não renováveis. A conceituação apresentada em [20] define como “Energia não renovável é a energia obtida de reservatórios estáticos que permanecem sob o solo, a não ser que exista interação humana”. São também consideradas sinônimas as expressões “energia marrom” e “energia finita”. Esse conceito reforça que essa energia é inicialmente isolada (potencial), e somente a partir de uma ação externa pode ser capaz de ser convertida em eletricidade. Exemplos comuns desse tipo de energia estão presentes no petróleo, no gás natural, no carvão e nos elementos radioativos.

A Figura 17 ilustra através do desenho esquemático o conceito das energias renováveis e não renováveis, com destaque para o fluxo energético natural no meio ambiente (ABC) e para o fluxo de energia captada (DEF).

Figura 17 – Desenho esquemático conceitual de energia renovável e não renovável (adaptado de [20]).

As etapas A, B e C representam a presença do fluxo energético no ambiente, mas sem captação humana. Enquanto as etapas D, E e F representam o fluxo energético no ambiente sendo captado. Por exemplo, o vento que passa através de um moinho. Parte do fluxo energético do vento passará perto das pás, mas não será captado (B) e continuará no ambiente (C). Outra parte do fluxo energético do vento será captado pelas pás (D) e convertido em energia mecânica (E) para moer milho (F). A energia retorna ao ambiente (C) na forma de som, calor, atrito, entre outros.

De acordo com [21], existem cinco fontes primárias fundamentais da energia presente no meio ambiente:

- a) O Sol;
- b) O movimento potencial gravitacional entre Sol, Lua e Terra;
- c) Energia geotérmica do resfriamento, reações químicas e radiações naturais da Terra;
- d) Reações nucleares induzidas pelo homem;
- e) Reações químicas de fontes minerais.

As energias renováveis derivam das fontes primárias “a”, “b” e “c”, enquanto as energias marrons derivam de “a” (combustíveis fósseis), “c” (lava quente), “d” e

“e”. A fonte primária mais significativa tanto para energias verdes quanto para energias marrons é o Sol. Estima-se que o fluxo de energia solar absorvido pela Terra seja $1,2 \times 10^{17}$ W [20]. Logo, representa uma potência teórica de 20 MW por pessoa. Experimentos indicam que a densidade de fluxo de energia solar (irradiância) máxima é cerca de 1 kWm^{-2} [22].

A Figura 18 apresenta em forma de desenho esquemático os fluxos energéticos renováveis contínuos presentes na Terra e as respectivas capacidades de potência teórica expressas em terawatts (10^{12} W), a partir das fontes primárias renováveis. Destaque para grande variação da ordem de grandeza dos fluxos energéticos ($1:10^5$) e a importância da radiação e calor solar como fonte primária de energia.

Figura 18 – Desenho esquemático das correntes de energia renováveis na Terra em terawatts (adaptado de [20]).

Os fluxos de energia renovável estão presentes no meio ambiente em formas e locais geográficos variados. Pode-se citar como exemplo o vento, as ondas, as marés, a irradiação solar, entre outros. Cada um desses fenômenos naturais ocorre de forma particular, dependendo da sua posição geográfica. Por exemplo, os ventos que ocorrem no nordeste brasileiro são diferentes dos ventos que ocorrem no leste europeu. Além disso, cada fluxo energético é quantificado de forma padronizada, dependendo de suas características físicas. No Apêndice B está apresentado em

forma de tabela informações de fluxos energéticos, como a relação de potência por tipo de fluxo energético, as variáveis relevantes, equações para quantificação e principais características.

3.2 PRINCÍPIOS DE APLICAÇÃO

Apesar da grande quantidade de energia renovável presente no meio ambiente, a conversão dessa energia para uma forma de uso final, como por exemplo, a eletricidade, não é elementar. O funcionamento dos dispositivos que captam a energia ambiente é influenciado por diversos fatores locais particulares, além da própria eficiência do método de conversão. Ou seja, o mesmo equipamento terá eficiência global diferente dependendo do local onde for instalado.

A utilização eficiente da energia verde requer o atendimento dos seguintes princípios [20]:

- **Presença natural no ambiente** – O fluxo energético não deve ser resultado de imposição de recursos ou alterações no ambiente. Como por exemplo, a inserção de criação de porcos para geração de estrume com vistas à geração de biogás.
- **Característica dinâmica da demanda** – Tanto o consumidor final quanto o fluxo energético renovável tem características dinâmicas próprias no tempo em relação à demanda consumida e gerada. Logo, para sucesso de uma aplicação, essas características devem ser compatíveis, de forma a garantir a continuidade de suprimento ao consumidor final.
- **Eficiência do processo de conversão** – O tipo de fluxo energético disponível no meio ambiente e o tipo do mecanismo conversor devem atender plenamente a demanda projetada. A Tabela 1 apresenta e compara as eficiências globais obtidas nos conversores energéticos atuais, ou seja, já estão consideradas as eficiências de conversão de energia mecânica para energia elétrica. As células coloridas em verde

representam alta eficiência, em amarelo média eficiência e em laranja baixa eficiência.

- **Dispersão dos equipamentos** – A densidade de fluxo energético na conversão de fontes renováveis é mais baixa do que em fontes finitas. Ou seja, existe a necessidade de mais espaço físico para o equipamento conversor. A energia marrom é mais fácil de produzir centralizadamente e cara para distribuir. A energia verde é mais fácil de produzir geograficamente dispersa e cara para concentrar. Enquanto o fluxo de energia renovável captada é cerca de 1kWm^{-2} , em fornos a captação da energia térmica é cerca de 100kWm^{-2} e em reatores nucleares na ordem de vários MWm^{-2} .
- **Complexidade sistêmica** – Dado que a corrente de energia renovável está presente no meio ambiente, a utilização da mesma para a produção de eletricidade determina a interação de vários fatores ambientais e multidisciplinares na engenharia de aplicação. Ou seja, o impacto ambiental do dispositivo conversor deve ser aceitável do ponto de vista dos fatores naturais.
- **Particularidades locais** – Nenhuma energia renovável pode ser aplicada de forma universal, para qualquer local e ambiente. A prospecção e utilização de energia verde devem considerar as particularidades locais de disponibilidade, densidade de fluxo energético e características de uso final.

Tabela 1 – Eficiências globais de conversão (adaptado de [20]).

Processo de conversão		Eficiência (%)
Mecânica	Vento	35
	Hidráulico	70-90
	Onda	50
	Maré	75
Calor	Combustão biomassa Coletor solar	35
Foton	Fotossíntese Fotoquímica	20-30

3.3 FATORES TÉCNICOS DE PROJETO

A utilização de energia renovável está balizada nos princípios apresentados anteriormente. Esses princípios determinam requisitos técnicos que devem ser atendidos na fase de projeto conceitual para o sucesso da aplicação. A prospecção no ambiente, requisitos de uso final, eficiência, o conceito energético do sistema e impacto ambiental são fatores técnicos importantes nessa fase inicial de projeto.

A etapa de prospecção no ambiente é baseada no histórico de dados meteorológicos específicos, com períodos de pelo menos dez anos. Contudo, na prática, os locais onde ocorre a prospecção ficam distantes de pontos meteorológicos existentes. A solução mais utilizada é a instalação de medidores meteorológicos para a variável específica em questão (altura das marés, velocidade do vento, irradiância solar, entre outros) durante alguns meses e realizar a extrapolação estatística dos dados para séries históricas sintéticas. O sucesso dessa técnica depende da qualidade dos dados e da adequação dos modelos estatísticos para o comportamento da variável específica [23].

Apesar de que a utilização de fontes verdes seja muito importante para a sustentabilidade, a inserção da mesma em um sistema ou instalação elétrico deve ser objeto de estudo técnico completo. Como por exemplo, a influência dos dispositivos conversores para a manutenção da estabilidade de frequência e de tensão em casos de distúrbios no sistema elétrico, com vistas a manter a qualidade e a continuidade requerida pela carga. Ou seja, os requisitos de uso final.

O aspecto de eficiência também deve ser objeto de estudo, com análise global de custos e utilização racional da eletricidade. A inserção de uma tecnologia verde de geração de eletricidade é uma oportunidade para alavancar projetos de eficiência da instalação baseados em substituição de tecnologias obsoletas por modernas mais eficientes. Como por exemplo, a utilização de motores de alto rendimento.

O conceito energético do sistema é um fator técnico importante, pois determina a forma de utilização da fonte renovável no sistema elétrico e o modo de controle a ser implementado. A seguir são detalhadas as opções de conceito energético mais usuais, ilustradas em forma de desenho esquemático na Figura 19.

- **Potência máxima** – A fonte renovável maximiza a produção de eletricidade para atendimento da carga. Nesse caso o dispositivo conversor atende a carga de forma plena, mas não está sobre dimensionado. Por exemplo, sistema de bombeamento com gerador eólico. As bombas irão funcionar somente quando a turbina disponibilizar energia elétrica, ou seja, quando a velocidade do vento se enquadrar entre os valores máximo e mínimo admissíveis para a turbina eólica.
- **Controlado** – O consumidor de uso final controla a potência de geração de eletricidade. Ou seja, não utiliza toda energia disponibilizada pela fonte verde e parte do fluxo energético captável é desperdiçado. Por exemplo, sistema de bombeamento com gerador eólico sobre dimensionado. As bombas irão funcionar somente quando a turbina disponibilizar energia elétrica, ou seja, quando a velocidade do vento se enquadrar entre os valores máximo e mínimo admissíveis para a turbina eólica. Contudo, o dispositivo conversor estará apto a captar mais energia do que requerido pelo sistema elétrico.
- **Reservatório** – O sistema é concebido juntamente com uma forma de estocagem energética. Esse reservatório é alimentado quando o consumidor de uso final não utiliza toda a energia disponibilizada pela fonte verde. Logo, o reservatório alimentará o sistema quando o consumidor de uso final consumir mais energia do que a fonte renovável disponibiliza. Por exemplo, sistema de iluminação alimentado por painel fotovoltaico e baterias. Durante o dia a energia solar alimenta as cargas elétricas e carrega as baterias (reservatório), enquanto à noite as baterias alimentam as cargas elétricas e são descarregadas.
- **Rede** – A fonte renovável é conectada à rede elétrica (sistema mais robusto), e permite-se a troca energética com a mesma. Nesse caso o consumidor de uso final tem a continuidade e confiabilidade de suprimento aumentada e pode negociar excedente de produção. Por exemplo, sistema comercial com geração eólica. O consumidor está conectado à concessionária e pode comprar energia elétrica quando não houver vento suficiente. E pode vender o excedente de eletricidade

gerado para a concessionária quando os ventos disponibilizarem mais energia do que o requerido para as cargas elétricas comerciais.

- **GLD** – O Gerenciamento pelo Lado da Demanda permite a maximização de utilização da energia elétrica gerada pela fonte renovável sem desperdício, sem necessidade de estocagem e sem necessidade de conexão à rede elétrica. Contudo, devem existir consumidores de uso final que aceitem a descontinuidade de suprimento. Por exemplo, sistema de estufas de secagem com resistores elétricos alimentados por gerador eólico. Quando os ventos forem mais fracos e o aerogerador disponibilizar pouca energia elétrica, alguns resistores são desconectados até que a carga elétrica seja compatível com a potência elétrica disponibilizada. Logo que houver aumento da velocidade dos ventos, e consequente acréscimo na potência elétrica disponibilizada, os resistores são religados até o aproveitamento máximo do fluxo energético renovável.

Os impactos sociais e ambientais da instalação do dispositivo captor e conversor de energia renovável devem ser objeto de estudo técnico específico. Dado que qualquer alteração em determinado local desdobra impactos positivos e negativos, o levantamento completo dos mesmos sob a ótica dos valores da sociedade orientará possíveis adaptações de projeto com vistas a minimizar os impactos negativos. Por exemplo, a utilização de geradores eólicos menos ruidosos em áreas residenciais e a instalação de painéis fotovoltaicos em telhados e estruturas de cobertura já existentes.

POTÊNCIA MÁXIMA

CONTROLADO

RESERVATÓRIO

REDE

GLD

Figura 19 – Desenhos esquemáticos de conceitos energéticos de sistema (Adaptado de [20]).

3.4 CONVERSÃO

A captação dos fluxos energéticos renováveis presentes no meio ambiente e a conversão para eletricidade é realizada por dispositivos próprios para esse fim, com funcionamento baseado em conceitos físicos. A potência final disponibilizada em cada dispositivo conversor depende de fatores específicos de cada fluxo energético e da tecnologia utilizada para tal. As principais fontes renováveis, fluxos energéticos, tecnologia de conversão e status tecnológico são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tecnologias de conversão (adaptado de [20] e [24]).

Fonte renovável	Insumo energético	Dispositivo conversor	Maturidade tecnológica da solução
Solar	irradiância solar	célula fotovoltaica	alta
		aquecedor solar	alta
		motor stirling	baixa
Biomassa	biogás	motor a combustão	média
	biocombustível	motor a combustão	alta
	hidrogênio	microturbina	média
Geotérmica	vapor d'água	turbina a vapor	alta
	água do mar fria e quente	OTEC	baixa
Hidráulico	água de rios / fluxo d'água	turbina	alta
Gravidade lunar	altura da maré	turbina	baixa
Ventos	velocidade do vento	turbina eólica	alta
	regime de ondas	turbina / sistemas diversos	baixa
Processo existente	hidrogênio	microturbina	média
	hidrogênio e outros	célula combustível	média
	força de eixo girante	<i>fly wheel</i>	média

3.5 SISTEMAS HÍBRIDOS E MINI-REDE

A utilização isolada de um único tipo de fonte renovável para suprimento de cargas elétricas dificilmente atende plenamente aos requisitos dos usuários. Dessa forma, aplicações com diversas fontes de geração elétrica de características distintas operando de forma integrada são mais utilizadas e são conhecidas como sistemas híbridos. Esses sistemas podem operar de forma isolada (mini-rede) ou interligados à rede elétrica, além de serem compostos de fontes renováveis ou finitas [25]. De acordo com o sistema de controle determinado pelo operador autônomo, as fontes são listadas em critério de prioridade e o despacho escalonado de acordo com a potência requisitada pelo consumidor.

Os sistemas mini-rede, ou *mini-grid* na língua inglesa, são do tipo isolado e operam de forma autônoma, controlando tensão, frequência e balanço de carga entre consumo e geração. Usualmente nessa tipologia os geradores elétricos estão fisicamente dispersos, logo o fluxo de potência é mais complexo e bidirecional ao longo do sistema de distribuição. A utilização de fontes renováveis nesse conceito resulta em intermitência na geração, onde o controle de despacho é mais complexo. Além disso, são utilizados inversores eletrônicos nos dispositivos conversores, resultando em diminuição da qualidade da energia elétrica e diferentes respostas dinâmicas das fontes. Outra característica dos sistemas mini-rede é o maior impacto do consumidor final no gerenciamento da geração, visto que as cargas são relativamente grandes quando comparadas a um sistema interligado.

A literatura científica disponível para sistemas híbridos e *mini-grid* é vasta, e pode ser dividida em tópicos de análise de viabilidade técnica e econômica, tópicos de sistemas de otimização e tópicos de sistemas de operação e desempenho.

Casos de análise de viabilidade técnica e econômica de aplicação de sistemas híbridos são apresentados em [26] baseado em casos norte-americanos considerados inviáveis com tecnologia de células combustíveis, eólica e fotovoltaica; em [27] baseado em avaliação de confiabilidade e determinação de energia não suprida de um sistema híbrido eólico-diesel-bateria; e em [28] baseado em conceitos de projeto de sistema híbrido fotovoltaico-diesel-bateria. A Figura 20 ilustra desenho

esquemático elétrico de um exemplo típico de sistema híbrido isolado com geradores eólicos, geradores a diesel e baterias.

Figura 20 – Desenho esquemático elétrico de sistema híbrido (Adaptado de [27]).

Métodos de otimização para sistemas híbridos podem ser baseados em diversos tipos de funções objetivo, como por exemplo, custo de operação e custo de instalação. Conceitos de métodos para suporte à decisão de utilização de tecnologias renováveis em instalações elétricas existentes são apresentados em [29] baseado nas dimensões econômico, técnica-operacional, ambiental, humana e política; em [30] baseado em custo, meio ambiente e confiabilidade para tecnologia eólica, fotovoltaica e baterias; e em [31] baseado em dimensões estratégicas para políticas nacionais e planejamento energético como segurança, impactos sociais, disponibilidade, infraestrutura atual e outros. Cabe ressaltar que os principais dados de entrada dos métodos de otimização são as variáveis ambientais (velocidade do vento, irradiância, etc.), custos (instalação e operação) e requisitos de demanda (usuário final).

O desempenho operacional de sistemas híbridos e o desenvolvimento de controles inteligentes são apresentados em [25] baseado em sistema híbrido eólico-diesel-bateria com desenvolvimento de controle supervisor inteligente para minimização de custo operacional; em [32] com desenvolvimento de sistema de controle para sistema híbrido fotovoltaico-eólico-bateria conectado à rede; em [33] e [34] baseado em avaliação de desempenho de pequeno sistema híbrido eólico-fotovoltaico-diesel-bateria isolado (100 kW); em [35] e [36] são demonstrados estudos de operação de sistema elétrico (estado-permanente) em sistemas híbridos distribuídos; em [37] e [38] são apresentados resultados de operação real de sistema híbrido eólico-fotovoltaico-bateria-célula combustível e outro eólico-

fotovoltaico-ondas; em [39] e [40] é utilizado o conceito de Lógica Fuzzy para gerenciamento de sistemas híbridos fotovoltaico-bateria-célula combustível; em [41] e [42] baseados em soluções para despacho de fontes renováveis em sistemas híbridos no curtíssimo prazo; em [43], [44] e [45] baseados em problemas operacionais causados por fontes renováveis em sistemas híbridos como queda de tensão, reserva de energia girante e disponibilidade.

A maioria dos trabalhos científicos sobre otimização de fontes renováveis em sistemas híbridos e simulação em regime permanente são desenvolvidos no programa computacional *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables* (HOMER), desenvolvido pelo Departamento Norte-Americano de Energia [46]. Este software de modelo energético permite projetar e analisar sistemas híbridos, a partir de fontes alternativas como turbinas eólicas, células fotovoltaicas, baterias, células combustíveis, biomassa, entre outras. Esse ambiente permite simulações isoladas ou conectadas à rede (sistemas distribuídos), otimização de variáveis de operação e análise de sensibilidade.

A análise de transitórios em sistemas híbridos é amplamente realizada pela comunidade científica a partir do programa computacional *Transient System Simulation Tool* (TRNSYS) [47]. Esse software permite simulações de sistemas elétricos e térmicos com interface gráfica avançada. O principal atrativo são os modelos multidimensionais personalizáveis de fontes alternativas e cargas industriais.

3.6 APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

A utilização de fontes renováveis em ambiente industrial ainda não é uma solução atrativa, devido ao alto custo de instalação dos dispositivos conversores de energia e devido aos exigentes requisitos de continuidade e qualidade de energia elétrica das cargas industriais (motores de indução e dispositivos com eletrônica de potência) [7].

Contudo, existem aplicações registradas na literatura técnico-científica com ênfase na indústria de petróleo e gás natural. Em [48] e [49] é apresentada uma solução renovável desenvolvida no Brasil de um sistema elétrico com geração verde

a partir da costa para alimentação de plataformas marítimas fixas de produção de petróleo. A Figura 21 exibe desenho esquemático desse sistema, com destaque para a geração eólica (três turbinas) em paralelo com a concessionária local, e para a curta distância das plataformas marítimas em relação à costa (30 km).

Figura 21 – Desenho esquemático de sistema híbrido conectado ao SIN (Adaptado de [48]).

A utilização de energia solar para produção de vapor, e conseqüente injeção em reservatórios de petróleo pesado como método de elevação e escoamento é apresentado em [8] e [50]. Essa solução utiliza cem acres de área geográfica, com instalação de sete mil espelhos para aquecer água em uma torre de cerca de 100 metros, com a potência de 29 MW no campo de Coalinga, Califórnia.

A utilização de sistema híbrido isolado com fontes fotovoltaica, eólica, diesel e banco de baterias para alimentação de sistemas de dessalinização da água em campos de produção de petróleo remotos é apresentada em [51]. No Brasil, o desempenho de sistema fotovoltaico (45,5 kW) conectado na rede da concessionária e alimentando sistemas industriais é apresentado em [52].

O desenvolvimento de protótipo de sistema híbrido para plataformas marítimas de produção de petróleo desabitadas no Golfo do México é discutido em [53]. O objetivo da aplicação é diminuir o consumo de gás natural e aumentar a confiabilidade do pequeno sistema elétrico (demanda total de 760 W), através da utilização de célula fotovoltaica e micro gerador a gás natural. Um ponto importante é a restrição para instalação de dispositivos conversores (painéis fotovoltaicos) em

área considerada livre, ou seja, não susceptível a atmosferas potencialmente explosivas (área classificada).

Um protótipo de sistema mini-rede instalado em plataforma marítima de produção de petróleo desabitada no Brasil é apresentado em [54]. A Figura 22 apresenta o desenho esquemático do sistema elétrico, que é baseado em geração eólica, fotovoltaica e banco de baterias. A demanda em potência do sistema é de 300 W, e as cargas têm características de iluminação, automação, controle e medição.

Figura 22 – Desenho esquemático de sistema elétrico mini-rede (Adaptado de [54]).

A certificação de equipamentos, sistemas e embarcações em ambiente marítimo é uma prática comum, principalmente para orientação de segurança de pessoas e equipamentos determinada pela IMO. Dessa forma, a utilização de dispositivos conversores de fontes renováveis tende a seguir certificação de

sociedades classificadoras. Em [55] é apresentada uma experiência pioneira na certificação de dispositivos conversores de energia das marés e das ondas. Essa proposta é um importante requisito para alavancar a utilização dessas tecnologias em âmbito mundial, e provavelmente terá impacto significativo para a indústria de petróleo e gás natural.

Uma metodologia para análise global de sustentabilidade em projetos relacionados a instalações de petróleo e gás natural é apresentada em [56]. Através dessa proposta é possível inserir requisitos de eficiência energética, emissões atmosféricas e fontes renováveis para novos projetos.

3.7 AMBIENTE INDUSTRIAL MARÍTIMO

Os fluxos energéticos renováveis contínuos presentes em ambiente industrial marítimo e adjacências podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os fluxos energéticos renováveis naturais são aqueles oriundos de fenômenos naturais, como por exemplo, a irradiância solar, os ventos e as ondas. Os fluxos energéticos renováveis artificiais são aqueles oriundos da ação do homem, e que estão presentes na operação normal do complexo industrial. Por exemplo, a biomassa de dejetos humanos, a comida descartada, os fluxos de água descartada, entre outros. Estão apresentados na Tabela 4 os fluxos energéticos renováveis presentes em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural, e classificados entre naturais e artificiais.

Tabela 3 – Fluxos energéticos renováveis em plataformas marítimas.

Fluxos energéticos renováveis	
Naturais	Irradiação solar
	Vento
	Ondas
	Gradiente de salinidade
	Gradiente térmico oceânico
Artificiais	Efluente sanitário
	Restos alimentares
	Água efluente vapor
	Água efluente líquida

4 CONVERSORES DE ENERGIA

A captação da energia de fluxos energéticos renováveis e a conversão para eletricidade pode ser realizada de várias formas. Nesse capítulo serão apresentadas as tecnologias passíveis de aplicação em plataformas de produção de petróleo e gás natural e suas adjacências. As vantagens e desvantagens de cada tecnologia também serão avaliadas com foco no ambiente marítimo.

Atualmente existe uma ampla variedade de tecnologias disponíveis para conversão de energia renovável em eletricidade. Essas tecnologias são aplicações dos únicos dois métodos físicos para gerar quantidade significativa de energia elétrica. O primeiro método foi descoberto por Michael Faraday em 1821, e requer um movimento relativo entre um campo magnético e um condutor, gerado por um acionador mecânico externo (turbina, por exemplo). O segundo método é o fotovoltaico, em que células solares ou fotovoltaicas produzem eletricidade através da radiação eletromagnética, especialmente a luz, sem requerer partes girantes ou acionador mecânico [20].

A captação e conversão de fluxos energéticos renováveis em eletricidade utilizam, em sua maioria, o primeiro método. Ou seja, a disponibilização da energia renovável em forma de torque em um eixo, para utilização de gerador de corrente alternada ou contínua. No caso de soluções para corrente alternada, a garantia da qualidade da frequência pode exigir a instalação adicional de dispositivos de eletrônica de potência.

As tecnologias conversoras têm aplicações distintas, com possibilidade de atuar em forma isolada ou integrada ao SIN. A utilização dos dispositivos conversores requer análise criteriosa do ponto de vista operacional, da maturidade tecnológica e de custos de instalação e manutenção.

Para a instalação de equipamentos marítimos próximos da plataforma de produção de petróleo e gás natural, devem-se respeitar as regras da NORMAM, e requisitos de segurança e operação. Como por exemplo, a existência de dutos e equipamentos submersos com material inflamável (hidrocarbonetos), e a área para

aproximação de barcos de apoio logístico. Dessa forma, a distância mínima de 500 metros é considerada adequada.

A seguir serão apresentados dispositivos conversores atualmente disponíveis para captação dos fluxos energéticos renováveis existentes em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural (conforme Tabela 4).

4.1 ENERGIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR

A energia irradiada pelo Sol pode ser dividida em dois fenômenos. O calor e a luz. Logo, existem dispositivos conversores específicos para cada fenômeno, mas que podem ser utilizados de forma integrada, com intuito de maximizar o aproveitamento da energia solar [57].

4.1.1 Termelétrica solar

O calor irradiado pelo Sol pode ser captado através orientação de painéis refletores e concentradores para um fluido. A conversão desse fluido em vapor, devido à transferência de calor proveniente dos coletores, permite a produção de eletricidade através de turbinas a vapor convencionais (ciclo termodinâmico Rankine).

A Figura 23 apresenta a fotografia de protótipo de termelétrica solar, construída apenas com materiais disponíveis no mercado nacional. Esta tecnologia utiliza concentradores cilíndrico-parabólicos para a captação de energia solar. Esses coletores funcionam refletindo a luz do Sol, que elevam a temperatura do fluido, gerando vapor e energia. Conforme [58], o rendimento médio dessa tecnologia é cerca de 4%. Ou seja, para a produção média de 400 W de potência elétrica, é necessária uma área de 10 metros quadrados de coletores solares, que corresponde a 10 kW de potência de irradiância solar. O custo médio para pequenas potências (abaixo de 1MW) varia de US\$ 12.000,00 a US\$ 16.500,00 por kW instalado. Existem outras tecnologias termelétricas, mas com diferenciação no fluido de

trabalho e tipo de coletor e concentrador de calor. Como por exemplo os captadores parabólicos.

Figura 23 – Fotografia de concentrador de calor solar (Adaptado de [59]).

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Possibilidade de sinergia com sistemas industriais de aquecimento e resfriamento de fluidos;
- Baixa poluição sonora;
- Alta resistência para ambientes agressivos (granizo, vento, temperatura, umidade e salinidade);
- Tecnologia madura;
- Fácil disponibilidade no mercado;
- Alto índice de nacionalização;
- Possibilidade de instalação distribuída ao longo da plataforma;
- Opera satisfatoriamente com sistemas híbridos em corrente contínua, principalmente com eólica de pequeno porte e baterias.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Baixa densidade energética (grande área de aplicação);
- Impacto na navegabilidade de helicópteros pelo reflexo dos painéis (NORMAM);
- Não pode ser instalado em área classificada ("Ex");

- Baixa previsão de produção, atenuada em embarcações com posicionamento variável;
- Baixo fator de continuidade, pois não produz energia elétrica à noite. Depende de sistema complementar;
- Alta frequência de manutenção.

4.1.2 Motor Stirling

O calor do Sol concentrado e captado através de coletores pode ser aplicado também a motores que utilizam o ciclo termodinâmico Stirling [60]. O princípio de funcionamento desse tipo de motor é a existência de um gás (fluido de trabalho) em circuito fechado, que a partir de uma fonte de calor quente é possível iniciar o ciclo termodinâmico de aquecimento isométrico e expansão isométrica. A partir de outra fonte de calor fria, finaliza-se o ciclo termodinâmico através do resfriamento isométrico e da compressão isométrica. Ou seja, a expansão e a compressão do fluido em uma câmara fechada permitem o movimento de um êmbolo, que conectado a um eixo transfere essa energia.

Existem diversos tipos de motores Stirling, com especificidades de estrutura, fluido de trabalho e combustível (fonte quente). As potências de saída são de 2 a 35 kW, contudo, a maioria dos motores está na fase de protótipo. Conforme [61], o rendimento médio dessa tecnologia é cerca de 8%. O custo médio do sistema para geração de eletricidade varia de US\$ 16.000,00 a US\$ 20.500,00 por kW instalado. A Figura 24 apresenta desenho esquemático sobre o conceito de funcionamento de um motor Stirling.

Figura 24 – Desenho esquemático de motor Stirling (Adaptado de [60]).

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Possibilidade de sinergia com sistemas industriais de aquecimento e resfriamento de fluidos;
- Baixa poluição sonora.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Baixa densidade energética (grande área de aplicação);
- Baixo índice de nacionalização;
- Baixa disponibilidade no mercado;
- Impacto na navegabilidade de helicópteros pelo reflexo dos painéis (NORMAM);
- Não pode ser instalado em área classificada ("Ex");
- Baixa previsão de produção, atenuada em embarcações com posicionamento variável;
- Baixo fator de continuidade, pois não produz energia elétrica à noite. Depende de sistema complementar;
- Manutenibilidade e confiabilidade desconhecidos.

4.1.3 Fotovoltaica

Geração elétrica fotovoltaica é realizada por radiação eletromagnética, em cargas elétricas positivas e negativas separadas presentes em materiais absorventes. Se um campo elétrico está presente, essas cargas podem produzir uma corrente para utilização em um circuito externo. Tais campos existem permanentemente em junções de silício com impurezas, e provêm força eletromotriz para produção de eletricidade. A geração é obtida quando as células são expostas a radiações com comprimento de onda do infravermelho ($\sim 10\mu\text{m}$) até o ultravioleta ($\sim 0,3\mu\text{m}$). Fótons solares em uma frequência de onda específica podem ser transformados em trabalho mecânico através de eletricidade com alta eficiência utilizando-se uma célula fotovoltaica adequada. Entretanto, na prática, não existe

tecnologia atual que consiga converter com máxima eficiência toda a grande variedade de frequências presentes no espectro solar. Logo eficiências de conversão entre 20 a 30% são consideradas ótimas [62].

Os campos elétricos presentes nas células fotovoltaicas produzem cerca de 0,5 V de diferença de potencial, e 400 Am^{-2} de densidade de corrente em um dia claro com radiação solar de 1 kWm^{-2} . Os dispositivos comerciais têm eficiência de conversão média de 10 a 22%. As células são construídas em painéis com combinações em série e paralelo, normalmente produzindo até 30 V por célula. O valor médio de produção estimada de energia elétrica por célula é de 0,5 a 1 $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{dia}^{-1})$, dado que a produção depende de fatores climáticos e da inclinação e posicionamento das células solares [63]. O custo médio para pequenas potências (abaixo de 1 MW) varia de US\$ 1.300,00 a US\$ 2.200,00 por kW instalado.

Os principais fatores ambientais que influenciam a potência de saída do dispositivo conversor são [32]:

- Irradiância: quanto maior a irradiância, maior a corrente disponibilizada e com tensão constante.
- Temperatura: quanto maior a temperatura, menor é a tensão disponibilizada.
- Ângulo de irradiância: quanto maior o ângulo em relação à superfície, maior a irradiância e conseqüentemente maior a corrente disponibilizada. Ao longo do dia esse ângulo varia, atingindo sua plenitude (90°) quando ocorre o zênite local.

A Figura 25 exibe gráfico que representa a variação da corrente e da tensão gerada em uma placa fotovoltaica com tensão nominal de 20 V, corrente nominal de 3 A e potência nominal de 40W durante o período de um dia. Logo, o formato de onda da energia elétrica entregue pelo módulo fotovoltaico não é constante, e para essa tecnologia, trabalha-se em quantidade de energia diária (Wh/dia).

Figura 25 – Gráfico de geração fotovoltaica (Adaptado de [62]).

Existem curvas específicas de funcionamento das células fotovoltaicas em relação ao tipo de carga que está conectada à mesma. Por exemplo, lâmpadas incandescentes, baterias chumbo-ácidas e motores de indução provocam comportamentos distintos na tensão e correntes de saída do módulo fotovoltaico. Esse fator deve ser considerado na fase de projeto de sistemas com geração elétrica fotovoltaica.

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Vida útil superior a 20 anos;
- Baixa manutenção;
- Isenta de poluição sonora;
- Alta resistência para ambientes agressivos (granizo, vento, temperatura, umidade e salinidade);
- Tecnologia madura;
- Fácil disponibilidade no mercado;
- Possibilidade de instalação distribuída ao longo da plataforma;
- Opera satisfatoriamente com sistemas híbridos em corrente contínua, principalmente com eólica de pequeno porte e baterias.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Baixa densidade energética (grande área de aplicação);
- Impacto na navegabilidade de helicópteros pelo reflexo dos painéis (NORMAM);
- Não pode ser instalado em área classificada ("Ex");

- Baixa previsão de produção em embarcações com posicionamento variável;
- Baixo fator de continuidade, pois não produz energia elétrica à noite. Depende de sistema complementar;
- Baixo índice de nacionalização [64].

4.2 ENERGIA DOS VENTOS

A extração da energia dos ventos com turbinas modernas e sistemas de conversão de energia eficientes é atualmente uma indústria consolidada. A energia dos ventos é a fonte renovável mais utilizada no mundo para conversão em eletricidade, depois da fonte hídrica [65]. Atualmente a capacidade instalada é cerca de 240 GW, com acentuado crescimento anual.

Existem diversos tipos de turbinas eólicas, com potências e eficiências diversas [66]. A principal diferenciação está no tipo de eixo, vertical ou horizontal, sendo a última a mais utilizada. A Figura 26 apresenta gráfico com a curva de eficiência versus a velocidade do vento por tipo de turbina.

Figura 26 – Gráfico com curvas de potência típicas (Adaptado de [20]).

Dependendo do tipo de turbina e requisitos da carga, a energia elétrica disponibilizada pode ser em corrente contínua ou alternada. Contudo, a maioria das aplicações é em corrente alternada e necessitam de equipamento conversor de frequência. As turbinas eólicas podem ser conectadas de forma distribuída ao sistema elétrico, ou de forma concentrada, denominadas usinas ou fazendas eólicas. Usualmente as usinas eólicas são constituídas de equipamentos de grande porte, como potência individual acima de 1 MW.

Atualmente, fazendas eólicas em ambiente marítimo estão instaladas de forma fixa em profundidades de até 30 metros. Sistemas totalmente flutuantes para profundidades de 120 a 700 metros estão em desenvolvimento, como o exemplo o projeto de 2,3 MW *Hywind* da *Statoilhydro* [67].

A principal variável para quantificação da energia eólica a ser convertida é a velocidade do vento. A potência disponibilizada pelo dispositivo conversor é diretamente proporcional à velocidade do vento elevada ao cubo, conforme apresentado no Apêndice B. Dessa forma, a caracterização do regime dos ventos é primordial para a escolha do dispositivo mais adequado para cada aplicação, e para a estimativa de produção de eletricidade [68]. Nessa etapa devem ser considerados altura, tipo de terreno, orientação, sazonalidade e tipo de distribuição de probabilidade. Além disso, as turbinas têm curvas características de produção de energia elétrica, com velocidades de vento mínimas e máximas de operação. A Figura 27 apresenta gráfico com a curva de potência disponibilizada pela turbina eólica em relação à velocidade do vento. Destaque para os pontos de velocidade de vento mínima e máxima, onde o gerador não disponibiliza energia elétrica. Ventos fracos com velocidade abaixo da mínima não justificam aproveitamento. Enquanto ventos fortes, com velocidades acima da máxima utilizada para gerar eletricidade, têm turbulência associada indesejável para a estrutura da máquina.

Figura 27 – Gráfico com a curva de potência para turbinas eólicas (Adaptado de [69]).

O custo médio para pequenas potências (abaixo de 100 kW) varia de US\$ 3.000,00 a US\$ 5.000,00 por kW instalado. Para potências maiores (acima de 1 MW) o custo varia de US\$ 900,00 a US\$ 1.400,00 por kW instalado. Aplicações marítimas são mais custosas, com variação de US\$ 1.600,00 a US\$ 3.300,00 por kW instalado [65].

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Média densidade energética;
- Médio índice de nacionalização;
- Médio fator de continuidade;
- Tecnologia madura;
- Não depende do alinhamento da embarcação em relação ao vento (geração multidirecional);
- Fácil disponibilidade no mercado;
- Possibilidade de instalação distribuída em diversos pontos da plataforma;
- Opera satisfatoriamente com sistemas híbridos em corrente contínua, principalmente com fotovoltaica e baterias.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Ruído elevado;
- Não pode ser instalado em área classificada ("Ex");
- Ventos fortes podem destruir dispositivo;

- Pouca disponibilidade de dados históricos de regime de vento nos locais de operação;
- Manutenção freqüente.

4.3 ENERGIA DAS ONDAS

A energia existente nas ondas pode ser considerada uma forma concentrada de energia solar, visto que as ondas são derivadas das correntes de ar presentes no ambiente. Que, por sua vez, são formadas por diferenciais de temperatura. A quantidade de energia transferida, que é representada no tamanho da onda, depende da velocidade do vento, tempo de exposição ao vento e a distância em relação ao vento. A literatura científica estima que níveis de insolação de 100 W/m^2 podem se tornar ondas marítimas com potência de até 1.000 kW por metro de comprimento de onda [69].

A potência existente em uma onda é diretamente proporcional ao quadrado da amplitude e do período do movimento (Apêndice B). Logo, ondas com longos períodos (cerca de dez segundos) e grandes amplitudes (cerca de dois metros) são consideradas de interesse para geração de energia elétrica, com fluxos energéticos estimados de 50 a 70 kW/m por metro de comprimento de onda [20]. Contudo, o regime das ondas é muito irregular, considerando as variáveis de amplitude, fase e direção. Tal característica, alinhada à probabilidade de ondas gigantes provenientes de furacões e tempestades, requer dispositivos de conversão capazes de captar vários tipos de regime de onda, e robustos para suportar grandes ondas catastróficas. Além disso, no caso de aplicações em corrente alternada, é necessário um conversor de freqüência, visto que a freqüência das ondas é cerca de 0,1 Hz.

Atualmente existem cerca de cem tipos de mecanismos captadores de energia das ondas em fase de teste e avaliação para comercialidade [69]. A classificação destes mecanismos é baseada no princípio físico de conversão:

- **Captura de massa** – a massa de água de altas amplitudes é capturada em reservatório flutuante. Quando a crista da onda é mais

alta que a parede do reservatório, a água é armazenada no mesmo. Quando o nível da onda é mais baixo que a saída do reservatório (crista de onda negativa), o mesmo é esvaziado e produz um fluxo de água. Ou seja, houve captura de massa da água presente na onda e consequente descarte para produzir eletricidade. Este tipo de dispositivo conversor fica flutuando na superfície marítima;

- **Coluna oscilante de água** – a variação da amplitude da onda “empurra” o ar para fora de uma câmara, localizada na costa. Esse fluxo de ar pode acionar uma turbina e gerar eletricidade. Este dispositivo deve ser fixo em relação à superfície da água, por isso é usualmente construída nas encostas junto ao mar;
- **Ponto de absorção** – uma bóia na superfície da onda faz movimentar um êmbolo submerso sob energia resistiva e preso no leito marinho através de ancoragem. Esse movimento embolar permite gerar eletricidade. Este tipo de dispositivo conversor fica flutuando na superfície marítima;
- **Perfil de onda** – um dispositivo longo e articulado bóia na superfície e a diferença de altura entre as articulações fazem movimentar êmbolos internos. Ou seja, o equipamento descreve o movimento da crista da onda e provoca movimento entre suas articulações. Esse movimento embolar permite gerar eletricidade. Este tipo de dispositivo conversor fica flutuando na superfície marítima.

A Figura 28 exibe imagens de projeto e fotografias dos tipos de dispositivos conversores de energia das ondas. Destaque para a diferença construtiva de cada dispositivo e local de instalação.

Devido ao caráter experimental dos dispositivos de conversão e à grande variedade em desenvolvimento, o custo ainda não tem uma referência sólida. A literatura científica estabelece valores de US\$ 1.100,00 até US\$ 27.000,00 por kW instalado. A confiabilidade e manutenibilidade são pontos importantes que ainda estão sendo avaliados nos protótipos [67].

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Alta densidade energética;

- Alto fator de continuidade;
- Baixo impacto ambiental;
- Não utiliza infraestrutura existente da plataforma;
- Previsibilidade média de dois dias sobre o regime das ondas.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Dispositivos em caráter experimental (protótipos);
- Baixo índice de nacionalização;
- Ondas em regime de tempestade podem danificar o dispositivo;
- Manutenibilidade e confiabilidade desconhecidos;
- Eficiência depende do alinhamento do dispositivo conversor em relação às ondas.

Figura 28 – Imagens de projeto e fotografias de dispositivos conversores de energia das ondas (Adaptado de [67] e [69]).

4.4 ENERGIA DO GRADIENTE SALINO

A diferença de salinidade entre duas correntes de água separadas por uma membrana semi-permeável permite a ocorrência do fenômeno osmose. Esse fenômeno é um processo físico-químico que faz a água se movimentar de um meio hipotônico (menos concentrado em soluto) para um meio hipertônico (mais concentrado em soluto), buscando o equilíbrio químico entre as soluções. Um requisito é que os poros da membrana permitam somente a passagem de moléculas de água [70].

A ocorrência desse fenômeno, através do movimento da água, gera energia que pode ser captada e convertida em energia elétrica. Atualmente existem dois métodos para captar essa energia em desenvolvimento. A osmose a pressão retardada (*pressure retarded osmosis* – PRO) e a eletrodialise reversa (*reverse electro-dialysis* - RDE). O primeiro método capta energia através da diferença de pressão hidrostática gerada pelo acúmulo de água no recipiente hipertônico, e o segundo método capta energia através da diferença de concentração química, representada nos íons positivos e negativos gerados durante a osmose [71]. A Figura 29 exhibe diagrama esquemático de funcionamento do método PRO para geração de energia elétrica.

Figura 29 – Desenho do diagrama funcional do método PRO. (Adaptado de [70]).

Teoricamente, $1 \text{ m}^3/\text{s}$ de fluxo de água poderia produzir 1 MW de eletricidade. Atualmente, as membranas podem produzir cerca de $1,0 \text{ W/m}^2$, mas experimentos em laboratório já alcançaram a marca de $5,0 \text{ W/m}^2$ [70]. A primeira usina que

produz eletricidade através da osmose foi inaugurada em 2009, na Noruega, com 2.000 m² de membranas, equivalente a uma potência instalada de 2 kW. Não existe avaliação de custo disponível na literatura acadêmica. Apesar desta tecnologia não ser disponível no mercado para aplicações industriais, pode-se avaliar preliminarmente seus atributos para utilização na indústria de petróleo e gás natural.

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás são:

- Alto fator de continuidade (teórico 100%);
- Baixo impacto ambiental.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Dispositivos em caráter experimental (protótipos);
- Baixo índice de nacionalização;
- Baixa densidade energética;
- Manutenibilidade e confiabilidade desconhecidos;
- Necessidade de adequação na infraestrutura da embarcação (equipamentos pesados e volumosos);
- Ruído elevado (bombas);
- Necessidade de sistema adicional para dessalinizar a água.

4.5 ENERGIA DO GRADIENTE TÉRMICO OCEÂNICO

Define-se a energia de gradiente térmica, em inglês: *Ocean Thermal Energy Conversion* – OTEC, a energia armazenada na diferença de temperatura entre as águas da superfície dos oceanos, aquecidas pelo sol, e as águas geladas profundas. Nas regiões tropicais do planeta a diferença entre a temperatura da água na superfície e as águas profundas é de 20°C, valor mínimo para o funcionamento de processos termodinâmicos. Para máquinas térmicas, a máxima eficiência de conversão é cerca de 35%, contudo, os sistemas OTEC não alcançam 10% de eficiência [20] e [67].

Teoricamente, uma potência elétrica de 200 kW pode ser obtida através da captação da energia térmica presente em 1 km² de mar tropical, ou seja, o equivalente a 0,07% da irradiância solar nessa superfície. Estima-se que fluxos de bombeamento de água de 6 m³/s podem produzir um MW de eletricidade. Na prática, a energia de gradiente térmico pode ser convertida através de sistemas com ciclos fechado, aberto ou híbrido.

Um sistema de ciclo fechado usa a água superficial do oceano para vaporizar um fluido de trabalho, que tem um baixo ponto de ebulição, como a amônia. O vapor de amônia se expande e aciona uma turbina. A turbina então ativa um gerador para produzir eletricidade. A água profunda do mar é usada para resfriar o líquido de trabalho num condensador e reiniciar o ciclo.

Um sistema de ciclo aberto esquentar a água do mar até sua ebulição, utilizando baixas pressões, produzindo um vapor que aciona uma turbina. A Figura 30 exibe os diagramas esquemáticos de funcionamento de ciclo fechado e aberto do sistema OTEC.

Figura 30 – Diagramas esquemáticos de ciclos fechado e aberto de OTEC (Adaptado de [76]).

Os sistemas OTEC existem desde 1880, mas os maiores desenvolvimentos ocorreram na década de 1970-79 [72] e [73]. Atualmente, existem algumas plantas experimentais OTEC, gerando de 90 kW a 120 kW, mas nenhum sistema chegou à escala comercial. As plantas podem ser conceitualmente *onshore* ou *offshore*, e consomem de 50 a 85% da eletricidade gerada para alimentar bombas e periféricos.

Existem muitos desafios para uso generalizado, sendo o bombeamento eficiente da água a partir de grandes profundidades o principal. Os custos estimados para esta tecnologia iniciam em US\$ 10.000,00 por kW instalado [74] e [75].

A Figura 31 exibe fotografia de planta piloto de OTEC instalada no Havaí em 1993, e fotografia de protótipo de módulo de OTEC.

Figura 31 – Fotografias de sistemas OTEC (Adaptado de [76]).

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Alto fator de continuidade (teórico 100%);
- Permite re-utilização de fluxo energético para ar condicionado e da água captada em ebulição para dessalinização e utilização humana (sendo a água marinha o fluido de trabalho);
- Médio índice de nacionalização.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Necessidade de adequação na infraestrutura da embarcação (equipamentos pesados e volumosos);
- Baixa densidade energética;

- Ruído elevado (bombas);
- Dispositivos em caráter experimental (protótipos);
- Manutenção freqüente;
- Ausência de tecnologia de tubulação para captação em águas profundas;
- Não pode ser instalado em área classificada (“Ex”).

4.6 ENERGIA DE EFLUENTES SANITÁRIOS E RESTOS ALIMENTARES

A decomposição de matéria orgânica, como dejetos humanos e restos alimentares, através da ação de bactérias anaeróbicas, produz o biogás. Essa mistura de gases é composta principalmente por metano (cerca de 60 a 80%) e dióxido de carbono. Em menores proporções, são encontrados o gás sulfídrico e o nitrogênio [77]. Dessa forma, essa mistura de gases tem poder calorífico significativo que pode ser convertido em eletricidade.

O processo de produção de biogás depende de muitos parâmetros, como, por exemplo: temperatura ambiente, umidade, presença de substâncias tóxicas e nutrientes cuja presença ou ausência são determinantes na atividade bacteriana. Além disso, fatores como tipo e dimensões do biodigestor, carga diária e período para retenção são fatores que impactam na infraestrutura necessária para produção e armazenamento do biogás.

Os biodigestores podem produzir de 0,35 a 0,60 metros cúbicos de biogás por metro cúbico de biomassa, e o tempo de retenção necessário para degradação da matéria orgânica pode variar de 20 a 50 dias. Estima-se que 1 metro cúbico de biogás pode gerar 1,4 kWh de energia elétrica [77].

Outro subproduto da biodigestão são os compostos orgânicos sólidos que podem ser utilizados como fertilizantes. No caso de aplicações em ambiente marítimo, esses compostos não podem ser descartados diretamente no oceano, ou seja, devem ser tratados como efluentes ou transportados para o continente.

A conversão do biogás em eletricidade é realizada através de micro turbinas a gás. Esses equipamentos são disponíveis comercialmente em soluções integradas

com geradores em corrente alternada, com potência média de 30 kW. O custo médio de instalação desse sistema (biodigestor e micro turbina a gás) é cerca de U\$ 4.000,00/ kW [78]. A Figura 32 exibe fotografia de sistema de geração elétrica com micro turbina a gás.

Figura 32 – Fotografia de sistema de geração de eletricidade através de micro turbina a gás (Adaptado de [78]).

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Alto fator de continuidade (teórico 100%);
- Baixa poluição sonora;
- Baixa manutenção.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Necessidade de adequação na infraestrutura da embarcação (equipamentos pesados e volumosos);
- Baixa densidade energética;
- Foco de proliferação de doenças;
- Grande área para biodigestor;
- Baixo índice de nacionalização;
- Resíduos devem ser transportados para o continente.

4.7 ENERGIA DA ÁGUA EFLUENTE VAPOR

A utilização de água em estado gasoso (vapor) para geração de eletricidade é um processo amplamente conhecido e consolidado. Este é o mecanismo de conversão utilizado em usinas termelétricas, através do aquecimento da água em caldeiras até atingir o estado vapor, utilizando-se combustíveis fósseis ou nucleares, e conseqüente captação da energia através de turbina a vapor. A definição de sistemas, turbinas e rendimento desse processo de conversão da energia do vapor em energia mecânica, e conseqüentemente em energia elétrica, depende de fatores como a temperatura, pressão e vazão mássica do vapor [79]. As turbinas a vapor podem ser do tipo ação, reação ou uma combinação de ambos.

Para aplicações de pequeno porte (micro turbina a vapor), os sistemas comercialmente disponíveis requerem vazões mássicas de 1,8 a 20 ton/h, pressões de 830 a 2.200 kPa e temperaturas de 180 a 320 °C para potência elétrica de saída de 3 a 300kW. O custo médio de instalação de micro turbina a vapor é cerca de US\$ 2.000,00/ kW. A Figura 33 exibe fotografia de sistema de geração elétrica com micro turbina a vapor.

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Média densidade energética;
- Pequeno porte dos equipamentos.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Intermitência do vapor efluente;
- Grande variação nas características do vapor;
- Baixo índice de nacionalização;
- Necessidade de caldeira estabilizadora.

Figura 33 – Fotografia de sistema de geração de eletricidade através de micro turbina a vapor (Adaptado de [80]).

4.8 ENERGIA DA ÁGUA EFLUENTE LÍQUIDA

A utilização de água em estado líquido para geração de eletricidade também é um processo amplamente conhecido e consolidado. Este é o mecanismo de conversão utilizado em usinas hidroelétricas, com base na energia potencial de uma massa de água e que através de um desnível, converte a energia potencial para energia cinética (velocidade do fluxo d'água). A existência desse fluxo e permite a captação de energia por uma turbina hidráulica. A quantidade de energia presente na água é definida pela diferença de altura do reservatório para a turbina [81].

Existem diversos tipos de turbinas hidráulicas, com aplicações distintas para altura, vazão e pressão da água. As turbinas tipo Francis são as mais utilizadas para geração de eletricidade no Brasil, seguido pela turbina tipo Pelton. Com menor escala de aplicação existe a turbina tipo Kaplan e a tipo Bulbo.

Para aplicações de pequeno porte (micro turbina hidráulica), utiliza-se a turbina tipo Banki, para uma vazão mínima de 213 litros por segundo e um desnível mínimo de 2 metros. A potência elétrica de saída varia de 1 a 350 kW. O custo médio de instalação de micro turbina hidráulica é cerca de U\$ 1.000,00/ kW. A Figura 34 exibe fotografia de sistema de geração elétrica com micro turbina hidráulica tipo Banki de 40 kW.

Figura 34 – Fotografia de sistema de geração de eletricidade através de micro turbina hidráulica (Adaptado de [82]).

As vantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Tecnologia madura;
- Média densidade energética;
- Fácil disponibilidade no mercado;
- Alto índice de nacionalização;
- Alta continuidade;
- Aproveitamento de energia de água descartada;
- Pequeno porte dos equipamentos.

As desvantagens para aplicação desse tipo de tecnologia para plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural são:

- Dependência de captação d'água;
- Médio ruído;
- Não pode ser instalado em área classificada ("Ex");
- Média frequência de manutenção.

5 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

Atualmente a utilização de fontes renováveis não é considerada em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural, nas etapas de projeto, construção e montagem. Uma análise superficial sobre continuidade e confiabilidade das tecnologias e soluções energéticas com fontes renováveis induz a um falso conceito de incompatibilidade com sistemas industriais marítimos. De toda forma, qualquer aplicação de tecnologias verdes, tanto com fins residenciais, comerciais ou industriais, quanto em situações isoladas ou conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) deve ser objeto de estudo criterioso, baseado em metodologia de projeto.

Com foco no projeto de construção das plataformas marítimas para desenvolvimento de produção de petróleo e gás natural nos campos do pré-sal e da cessão onerosa, o objeto desse trabalho é propor uma metodologia para avaliação de utilização de fontes renováveis de energia elétrica em sistemas elétricos industriais marítimos.

Nesse capítulo será apresentada e detalhada a metodologia de avaliação de adoção de fontes renováveis em plataformas de petróleo, assim como a descrição da metodologia multicritério para ranqueamento das tecnologias disponíveis.

5.1 FLUXOGRAMA DE PROCESSO

O fluxograma de processo reflete os princípios de aplicação e os fatores técnicos de projeto apresentados no Capítulo 3, e deve ser utilizado na fase de projeto conceitual do desenvolvimento de um campo de produção de petróleo e respectivas plataformas. As etapas que foram determinadas representam pontos chaves na elaboração de projeto, como a prospecção de energia renovável no ambiente, que depende das características geográficas do local e dos dados

meteorológicos; a verificação dos dispositivos conversores disponíveis comercialmente, considerando estado-da-arte, detalhes técnicos e custos; a verificação dos requisitos de uso final (consumidores), como a qualidade da energia elétrica e fator de continuidade; a avaliação de alternativas segundo valores e percepções de especialistas da indústria de petróleo e gás natural, de forma a captar a experiência de projetos regressos; a definição do conceito energético do sistema industrial, em que a utilização do fluxo energético renovável deve ser compatível com as configurações do sistema; e finalmente, a análise de impacto ambiental da solução proposta e a quantificação dos gases poluentes não emitidos.

As etapas estão descritas detalhadamente, de forma a manter o fluxo de trabalho e as atividades definidas, como por exemplo o levantamento de dados e as análises necessárias. Essas atividades foram determinadas com base em requisitos específicos, oriundos da experiência de projetistas dessa área do conhecimento, a indústria de petróleo e gás natural. O registro dessa expertise e transformação em fluxograma de processo configura uma metodologia de trabalho. Com base nesse fluxograma, permite-se alinhar as oportunidades de utilização de fontes renováveis de energia elétrica em plataformas marítimas de petróleo e gás natural com o processo clássico de projeto dessas unidades, o qual depende da ação de profissionais multidisciplinares.

A metodologia proposta segue o fluxograma de processo ilustrado na Figura 35, e segue a ordem das etapas conforme lógica dos numerais em ordem crescente. Essa metodologia está alinhada com as práticas de projeto de plataformas marítimas no Brasil [83], e com as recomendações para avaliação de soluções verdes [20] e [23]. Ou seja, a contribuição dessa proposta é um aprimoramento às atuais práticas de projeto. Cada etapa do fluxograma de processo está detalhada nos itens a seguir.

Figura 35 – Fluxograma da metodologia proposta.

5.1.1 Caracterização do meio ambiente e tipologia da plataforma

A primeira etapa da metodologia consiste na identificação do meio ambiente onde a fonte renovável será instalada e as características da unidade de produção (plataforma). Ou seja, levantamento de dados técnicos que subsidiarão as avaliações e projeções energéticas. Esse levantamento de dados pode ser realizado através de medições diretas na localização em estudo, ou através de estudos e documentos específicos para esse fim. Como o caso do Atlas do Potencial Eólico

Brasileiro [84] e do Atlas da Irradiação Solar do Brasil [85]. O registro histórico e a extrapolação probabilística do comportamento desses dados permite uma avaliação mais robusta na etapa seguinte do projeto. Para o meio ambiente, são necessários os seguintes dados:

- Geográficos: posição (latitude e longitude) e clima típico (regime de temperatura e chuvas);
- Irradiância solar: ângulo de incidência, sazonalidade e quantificação de potência por metro quadrado;
- Regime dos ventos: velocidade, altura, direção, rugosidade do solo, obstáculos, relevo, densidade do ar e representação estatística;
- Regime das ondas: altura, período, picos, altura da lâmina d'água e densidade da água;
- Ambiente marinho: temperatura e salinidade a diferentes profundidades, tipos de massas d'água (correntes), contaminação e presença de nutrientes.

Para a tipologia da plataforma, são necessários os seguintes dados:

- Tipo: fixa, semi-submersível ou FPSO;
- Dimensões: Altura, comprimento, largura, calado, quantidade de níveis (*decks*) e disposição de módulos.
- Sistema ancoragem: tipo centralizado (*turret*) ou distribuído (*spread mooring*);
- Sistemas industriais: tipo de tratamento de óleo e gás natural e seus equipamentos, tratamento de efluentes, facilidades elétricas e não elétricas, e consumo energético;
- Sistemas submarinos: quantidade de poços, distâncias e funções, tipos de equipamentos e consumo energético.

5.1.2 Fluxos energéticos

A segunda etapa da metodologia consiste na determinação qualitativa e quantitativa dos fluxos energéticos presentes no local. Ou seja, a determinação do

potencial teórico dos fluxos energéticos presentes no meio ambiente e no processo industrial. De acordo com a Tabela 3, os fluxos energéticos renováveis em ambiente industrial marítimo podem ser classificados como naturais e artificiais. Os fluxos naturais podem ser qualificados no espaço físico da plataforma e também nas áreas contíguas oceânicas, principalmente para energia dos ventos e das ondas. A quantificação desses fluxos é realizada através da análise dos dados disponibilizados na etapa anterior.

Para os fluxos artificiais, a qualificação e quantificação dependem de dados específicos do sistema da plataforma, sendo eles:

- Sistema de efluente sanitário;
- Sistema de efluente alimentar;
- Sistemas que utilizam água vaporizada;
- Sistemas que utilizam água líquida.

O resultado dessa etapa deve descrever os fluxos energéticos presentes no projeto, suas localizações e respectivas quantificações.

5.1.3 Tecnologia dos conversores

A terceira etapa da metodologia consiste na identificação dos conversores disponíveis no mercado para captação dos fluxos energéticos renováveis determinados na etapa anterior. Ou seja, para cada tipo de fluxo e quantidade energética devem ser verificadas as alternativas de conversores existentes comercialmente.

Os dados necessários nessa etapa são:

- Especificações técnicas: tipo, dimensões, peso, tipo e quantidade de potência elétrica disponibilizada, parâmetros de operação, requisitos de instalação, normas e certificações (atmosfera explosiva por exemplo);
- Estado da arte: maturação tecnológica e casos de aplicação em condições similares à desse projeto;
- Manutenção: frequência, disponibilidade de sobressalentes e de assistência técnica especializada;

- Custos: custos de instalação, operação e manutenção;
- Sistemas auxiliares: necessidade de sistemas de resfriamento, de lubrificação e de conversores/inversores eletrônicos;
- Índice de nacionalização: fabricação interna nacional, montagem ou importação, assistência técnica nacional.

5.1.4 Tipologia da demanda

A quarta etapa da metodologia consiste na identificação da tipologia do sistema elétrico da plataforma marítima e dos requisitos de continuidade das cargas elétricas. Ou seja, identificar a localização dos barramentos principais, auxiliares e de emergência, sistemas de corrente contínua, quantificar seus respectivos consumidores e compreender o modo de operação do sistema elétrico.

Os dados necessários nessa etapa são:

- Desenhos técnicos: diagrama unifilar geral, detalhamento do barramento essencial e de sistemas de emergência;
- Cargas críticas: lista de cargas com potência, tensão e tipo de corrente;
- Fontes principais, auxiliar e emergência: tipo de acionador, tipo e quantidade de potência elétrica disponibilizada, parâmetros de operação, normas e especificações técnicas;
- Sistemas de corrente contínua: função, nível de tensão, consumidores e potência das fontes.

5.1.5 Avaliação oferta e demanda

A quinta etapa da metodologia é a mais importante e consiste na análise das características dos consumidores com as características dos conversores de cada fluxo energético renovável. Ou seja, na comparação quantitativa e qualitativa entre a energia elétrica requerida e a energia elétrica a ser disponibilizada pelas fontes

verdes. Nessa etapa também são analisadas as opções de arranjo elétrico dessas fontes e impactos na operação do sistema elétrico. O resultado dessa análise é a identificação dos possíveis conversores a serem instalados e definição das alternativas de localização elétrica dos mesmos.

Esta etapa é dividida em três atividades distintas. A primeira atividade é a verificação de locais físicos onde os conversores identificados na terceira etapa podem ser instalados na Unidade de Produção. Além disso, faz parte dessa atividade a quantificação de unidades de conversores e respectivas potências instaladas. A segunda atividade consiste na verificação de locais elétricos onde os conversores identificados na atividade anterior podem ser conectados, além de qualificação da energia elétrica. Ou seja, se são necessários ou não a utilização de acessórios como transformadores, inversores e retificadores para conectar à instalação elétrica. A terceira atividade é a comparação de diversos aspectos de oferta e demanda e, através de metodologia multicritério desenvolvida para esse fim, priorizar as alternativas mais vantajosas ao projeto.

Essa metodologia está detalhada no item 5.2. O resultado dessa etapa é uma lista dos dispositivos conversores de fluxos renováveis factíveis de aplicação no projeto, priorizados de acordo com os valores e percepções dos projetistas modelados nos atributos.

5.1.6 Determinação dos conversores

A sexta etapa da metodologia consiste na determinação dos conversores de fluxos energéticos renováveis a serem instalados na plataforma marítima de produção de petróleo e gás natural. Ou seja, baseado na avaliação realizada na etapa anterior, o responsável pelo projeto (decisor) define quais tecnologias serão utilizadas, a potência a ser instalada e conceito energético do sistema elétrico para atendimento das cargas industriais. Além da avaliação multicritério para priorização das soluções verdes disponíveis para o projeto, o decisor deve considerar outros aspectos que influenciam na implantação do projeto, como prazo, políticas e valores da empresa.

Os dados resultantes dessa etapa são:

- Tipo de tecnologia;
- Quantidade a ser instalada;
- Localização física;
- Localização elétrica;
- Custo de instalação;
- Conceito energético;
- Filosofia de operação.

5.1.7 Potencial real

A sétima e última etapa da metodologia consiste na determinação do potencial real. Ou seja, a partir dos dados de instalação e dados técnicos dos conversores (quantidade de energia captada e eficiência de conversão), estima-se o real atendimento aos consumidores pelas fontes renováveis, com projeção de energia elétrica gerada e potencial de emissão de CO₂ evitado.

No final dessa etapa, após análise dos resultados e de acordo com a percepção dos projetistas, pode-se reavaliar as alternativas propostas com base em sistemáticas de otimização e ajustes de projeto através de realimentação para a quinta etapa, de Avaliação de Oferta e Demanda. Essa possibilidade de realimentação permite análises de sensibilidade e simulação de qualificação e valoração dos atributos.

5.2 METODOLOGIA MULTICRITÉRIO

A atividade de comparação de aspectos subjetivos e deterministas de oferta e demanda de energia elétrica pode ser realizada através de metodologia multicritério. Esse tipo de metodologia é utilizado como suporte à decisão de problemas complexos, ou seja, problemas com grande amplitude de variáveis envolvidas no

processo de seleção de alternativas, diversos critérios e restrições, e objetivos múltiplos e conflitantes [86].

A análise multicritério oferece uma abordagem estruturada e organizada para a tomada de decisão. O objetivo desse tipo de análise é buscar uma conciliação entre todos os fatores, dado que não é possível satisfazer a todos os critérios e restrições ao mesmo tempo através de uma simples análise. Uma das grandes vantagens dos modelos multicritérios para apoio à decisão é estabelecer um método formal e objetivo para análise das alternativas. Eles permitem captar praticamente quaisquer preocupações ou questões que os agentes considerem importantes. O envolvimento dos agentes permite assegurar que os objetivos sejam apropriadamente explicitados e que o modelo esteja bem estruturado e reflita os valores e preferências dos decisores [87].

Existem diversas metodologias matemáticas que abordam aspectos multicritérios para suportar o processo decisório, incluindo em seu escopo a importância relativa de cada variável quantitativa e qualitativa [88]. Cada metodologia abrange aspectos inerentes ao tipo de problema e nível de decisão.

Em função dos diferentes tipos de dados e da abordagem, os problemas multicritérios podem ser classificados em dois tipos principais: tomada de decisão multicritério (*Multiple Criteria Decision Making* – MCDM), também conhecida por tomada de decisão multi-atributo (*Multiple Attribute Decision Making* - MADM), e tomada de decisão multiobjetivo (*Multiple Objective Decision Making* - MODM). O enfoque MCDM é aplicado para o ponto de vista da avaliação, o qual é geralmente associado aos julgamentos das preferências entre um número limitado de alternativas determinadas antecipadamente e descritas por seus critérios (ou atributos). Ou seja, usualmente é aplicado para os problemas de classificação, ordenamento e seleção das alternativas [89].

Os métodos para tratamento dos problemas tipo MCDM podem, genericamente, ser divididos em métodos da teoria da utilidade multicritério (*Multiple Criteria Utility Theory* – MCUT) ou utilidade multiatributo (*Multiple Attribute Utility Theory* – MAUT).

O enfoque do MODM considera como premissa que as alternativas não são dadas prontas para análise. Ou seja, essa abordagem proporciona um modelo para a determinação de um conjunto de alternativas para a tomada de decisão. A MODM é adequada para problemas com características de planejamento e com modelagem

baseada no valor. Ou seja, procura descrever e selecionar as alternativas em função dos sistemas de valores dos decisores e verifica quanto essas alternativas satisfazem a meta e os objetivos, considerando suas interações com as restrições do problema [90].

Neste trabalho será utilizado o enfoque MCDM, em que as alternativas de conversores renováveis factíveis de instalação no projeto são previamente definidas, de acordo com a terceira etapa do fluxograma de processo da metodologia de aplicação de energia renovável em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural (item 5.1.3). A metodologia multicritério a ser aplicada é a Teoria da Utilidade Multicritério (MAUT), pois permite captar a experiência dos projetistas da indústria de petróleo e gás natural através do modelamento quantitativo de atributos qualitativos. Esses diversos atributos, que representam características específicas, formam a utilidade da alternativa. Ou seja, através de diversos critérios, define-se um valor de utilidade.

5.2.1 Teoria da utilidade multicritério

A Teoria da Utilidade Multicritério (MAUT) determina as preferências dos decisores a partir de uma estrutura hierárquica de objetivos e critérios, onde um determinado critério é transformado em uma função que mensura o desempenho local de uma alternativa para os decisores, em relação ao aspecto considerado. Os valores locais são combinados e agregados por meio de uma função de utilidade ponderada, que incorpora as preferências dos decisores para atribuir uma pontuação global a cada alternativa disponível. A ordenação dessas pontuações permite obter uma ordenação para determinação da melhor alternativa. Ou seja, ao determinar a importância atribuída a um critério em relação a outro, torna-se possível a priorização de alternativas a partir da construção de uma função matemática. Neste contexto, se um determinado critério for pouco importante diante de outros critérios, ele terá um peso atribuído menor, em comparação aos atribuídos aos demais critérios [91].

A Equação (1) apresenta a formulação da Teoria da Utilidade Multicritério, em que o valor de cada atributo ou aspecto é ponderado de acordo com a percepção do

decisor, e a soma total desses valores ponderados refletem o valor da função Utilidade da alternativa em questão.

$$U = \sum p_i A_{ij} \quad (1)$$

Onde:

U = Função Utilidade (adimensional)

p = peso do conjunto de atributos

A = valor do atributo

i = número do conjunto de atributos

j = número do atributo

Através do valor da função Utilidade de cada alternativa, as mesmas são ranqueadas em ordem crescente. Ou seja, a alternativa com maior valor de função Utilidade é a melhor em relação aos valores e percepções do decisor. Também é possível realizar comparações entre as utilidades das alternativas consideradas e análises de sensibilidade por aspecto.

5.2.2 Proposta multicritério

A metodologia multicritério proposta para avaliação das alternativas de conversores renováveis para plataformas de produção de petróleo e gás natural abrange diversos atributos fundamentais, que estão divididos em cinco aspectos de interesse. Esses aspectos abrangem atributos com características distintas, baseados na experiência de projetistas dessa área do conhecimento e refletem aspectos de operação e manutenção de lições aprendidas de projetos regressos. A ordenação dos atributos em aspectos foi baseada nas características afins, como por exemplo, dimensões físicas e particularidades de estrutura naval estão ordenados no aspecto “Estrutural”. Enquanto risco ambiental e quantificação de ruído estão ordenados no aspecto “Ambiental”. Os requisitos da área de petróleo e gás natural, como confiabilidade, manutenibilidade, requisitos legais e normativos podem ser modelados nos atributos, de acordo com o aspecto correspondente. A

seguir são apresentados os cinco aspectos fundamentais, com suas principais características:

- **Elétrico:** abrange características elétricas dos dispositivos conversores;
- **Estrutural:** abrange características a respeito de características físicas dos conversores e reforços estruturais necessários para instalação;
- **Técnico:** abrange características relacionadas à manutenção e operação dos dispositivos conversores;
- **Econômico:** abrange características de custos dos dispositivos conversores;
- **Ambiental:** abrange características de risco ambiental dos dispositivos conversores.

O mapa da arborescência, com a relação detalhada dos aspectos e seus respectivos atributos está disposto na Figura 36. O peso dos aspectos foi modelado de acordo com as percepções e valores de projetistas, operadores e mantenedores de unidades marítimas de produção de petróleo e gás natural e está detalhado na Tabela 4. Por exemplo, os atributos do aspecto tipo “Econômico” tem peso vinte. Enquanto os atributos do aspecto tipo “Técnico” tem peso trinta. Ou seja, o aspecto “Técnico” é mais relevante que o aspecto “Econômico” nessa modelagem.

Esses valores podem ser modificados, de acordo com a utilidade definida pelo responsável pelo projeto. Por exemplo, caso o projeto tenha limitações severas em relação à estrutura naval, ou seja, não são admitidos reforços, o aspecto “Estrutural” pode ter o peso aumentado em relação aos demais aspectos, de forma a modelar esse valor conceitual. Contudo deve-se respeitar distribuição dos pesos entre os aspectos, em que a soma precisa representar o número cem.

A metodologia é válida com novos valores prospectados em função da mudança de cenários, pois é flexível o suficiente para modelar valores de cada projeto. E mesmo com a modelagem estática, ou seja, igual para valores prospectados diferentes de projetos distintos, permite a comparação entre eles da atratividade das soluções renováveis em cada UEP.

Tabela 4 – Pesos dos aspectos para determinação da função utilidade.

Aspecto	Peso
Elétrico	20
Estrutural	20
Técnico	30
Econômico	20
Ambiental	10
Total	100

A qualificação de cada atributo também foi modelada baseada na expertise dos profissionais que atuam da indústria de petróleo e gás natural e está valorada de acordo com a escala de qualificação apresentada na Tabela 5. Por exemplo, se para determinado atributo a qualificação for do tipo “Ótimo”, o valor do atributo será representado pelo número dez. Enquanto a qualificação do tipo “Ruim” representa o valor número três. Ou seja, essa modelagem prioriza altos valores para atributos com influência considerada positiva para a instalação.

Tabela 5 – Valoração da qualificação dos atributos.

Qualificação	Valor
Ótimo	10
Bom	7
Moderado	5
Ruim	3
Péssimo	0

Figura 36 – Desenho esquemático do mapa de arborescência da metodologia multicritério.

A partir da determinação desses dois números, o peso e valor do atributo, aplica-se a Equação (1) para quantificar a Utilidade da alternativa (tipo do dispositivo conversor). Ou seja, a maximização da função utilidade nessa modelagem prioriza alternativas com altos valores ponderados de atributos. Cabe ressaltar que o valor da função utilidade é adimensional e não necessariamente linear. A representação das alternativas consideradas no estudo podem apresentar valores variados, com valor máximo representado pela qualificação máxima dos atributos.

As descrições dos atributos dos aspectos “Elétrico”, “Estrutural”, “Técnico”, “Econômico” e “Ambiental” estão apresentadas, respectivamente, na Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11. As regras de qualificação para cada atributo estão dispostas no Apêndice C, ordenadas por aspecto.

Tabela 6 – Qualificação dos atributos do aspecto “Elétrico”.

ELÉTRICO	Descrição
Nível de potência individual	Potência elétrica instalada individual do dispositivo conversor
Nível de potência total	Potência elétrica instalada de solução integrada de vários dispositivos
Continuidade	Capacidade de manter a geração elétrica durante um dia
Variação na geração	Capacidade de manter a geração elétrica num mesmo patamar
Qualidade frequência	Resposta a variações de frequência em relação à nominal
Qualidade tensão	Resposta a variações de tensão em relação à nominal
Sistema emergência	Compatibilidade para atender uma carga de emergência (tensão e tipo de corrente)
Sistema essencial	Compatibilidade para atender uma carga essencial (tensão e tipo de corrente)
Sistema normal	Compatibilidade para atender uma carga normal (tensão e tipo de corrente)

Tabela 7 – Qualificação dos atributos do aspecto “Estrutural”.

ESTRUTURAL	Descrição
Peso	Peso individual do dispositivo
Dimensão	Tamanho individual do dispositivo em metros cúbicos
Localização	Locais com possibilidade de instalação na plataforma
Reforço	Necessidade de reforço estrutural
Relação potência / peso	Relação entre a potência e o peso individual do dispositivo

Tabela 8 – Qualificação dos atributos do aspecto “Técnico”.

TÉCNICO	Descrição
Operação	Facilidade e flexibilidade de operação
Manutenção	Frequência e facilidade de manutenção
Assistência técnica	Existência de assistência técnica rápida e nacional
Conteúdo nacional	Percentual do equipamento fabricado e montado no Brasil
Sobressalentes	Facilidade do processo de compra
Atm Ex	Certificado para utilização em área potencialmente explosiva
Maturidade tecnológica	Grau de maturidade da tecnologia
Densidade energética	Nível de densidade energética do dispositivo W/m^2
Sistemas auxiliares	Necessidade de sistemas auxiliares
Previsibilidade	Previsibilidade na geração
Risco segurança	Potencialidade de dano operacional à plataforma devido a falha do equipamento
Integração	Possibilidade de trabalhar com vários módulos de mesma natureza
Fluxo energético	Dependência do fluxo em relação aos processos industriais

Tabela 9 – Qualificação dos atributos do aspecto “Econômico”.

ECONÔMICO	Descrição
Custo estrutural	Valor de custo estrutural
Custo instalação	Valor de custo de instalação
Custo manutenção	Valor de custo de manutenção anual
Custo operação	Valor de custo de operação anual
Vida útil	Vida útil estimada do dispositivo conversor
Relação custo/pot	Relação entre o custo instalação e a potência instalada
Relação custo manut e op / pot	Relação entre a soma dos custos de manutenção e operação com a potência instalada

Tabela 10 – Qualificação dos atributos do aspecto “Ambiental”.

AMBIENTAL	Descrição
Ruído	Nível de ruído do dispositivo em decibéis
Resíduos	Quantidade de resíduos gerados em metro cúbico
Risco ambiental	Potencialidade de risco ambiental devido a falha do equipamento

O modelamento dos atributos, assim como determinação do peso dos aspectos é extremamente flexível. De acordo com a necessidade do responsável pelo projeto, surgimento de novas lições aprendidas, novas percepções de mercado e requisitos regulatórios, novos atributos podem ser criados, substituídos e até mesmo eliminados. Por exemplo, atualmente o nível de nacionalização é um atributo relevante na elaboração de novos projetos. Caso esse cenário se modifique através de orientação para mínimo custo independente da origem do equipamento, o atributo “Conteúdo Nacional” pode ser excluído do aspecto “Técnico” e o atributo “Custo Instalação” do aspecto “Econômico” pode ter o peso aumentado.

Essa flexibilidade é uma característica importante da MAUT, representada pela determinação da utilidade de acordo com o decisor. E o consequente ranqueamento das alternativas dispostas, refletindo fielmente o valor da utilidade conforme visão de especialistas.

6 ESTUDO DE CASO

A avaliação da metodologia apresentada no capítulo anterior será realizada através da aplicação em duas plataformas marítimas de produção de hidrocarbonetos distintas. A primeira plataforma é do tipo fixa e produz somente gás natural e condensado. Enquanto a segunda plataforma é do tipo FPSO, produz petróleo e gás natural, e representa a arquitetura típica das unidades de produção planejadas para a área do pré-sal e cessão onerosa. A seguir serão apresentadas as etapas da metodologia executadas conforme o fluxograma apresentado na Figura 35.

6.1 PLATAFORMA FIXA

As plataformas fixas têm como características a proximidade relativa em relação à costa, a pequena lâmina d'água, a ausência de tanques de armazenamento de petróleo e a ausência de sistema de ancoragem.

6.1.1 Caracterização do meio ambiente e tipologia da plataforma marítima

A plataforma fixa considerada está na posição geográfica (Latitude 24°21'9,66"/ Longitude 44°22'56,45") [92], em lâmina d'água de 172 metros e está ilustrada na Figura 4. Essa plataforma existe, foi construída no Brasil e iniciou a produção de gás natural no ano de 2011. Nesta região o clima é tropical, apresentando verões úmidos e invernos secos. O mar na Bacia de Santos é caracterizado, principalmente, pela presença de três tipos de massas d'água: Água Costeira (AC), Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS), cada uma

com características próprias de salinidade e temperatura, que permitem diferenciá-las. Os estudos realizados indicam que a qualidade da água na região oceânica da área de influência do empreendimento é do tipo não contaminado e pobre em nutrientes.

Não existe avaliação solarimétrica para esta posição geográfica, cerca de 130 Km da costa do município de São Sebastião, no estado de São Paulo. Dessa forma, a média diária de irradiância solar considerada é de 5.478 Wh/m^2 , conforme estimado na base anual para a região Sudeste do Brasil em [85]. A temperatura média da superfície do oceano na localização da plataforma e adjacências é cerca de 27°C , de acordo com [93] e está ilustrado em forma de mapa termográfico mundial na Figura 37 e detalhado para a localização da plataforma na Figura 38.

Figura 37 – Imagem de mapa termográfico mundial (adaptado de [93]).

Figura 38 – Imagem de mapa termográfico para localização da plataforma fixa (adaptado de [93]).

O regime dos ventos na localidade foi determinado com base em [84], em referência a 50 metros de altura. A distribuição probabilística considerada é do tipo Weibull (fator de forma com valor igual a 2,1), velocidade média anual de 6,5 m/s e direção predominante leste. Os valores de velocidade medidos no período de um ano oscilam de 4 a 17 m/s.

O regime de ondas está representado na forma de gráfico de potência na Figura 39, em média diária durante o ano (base histórica de onze anos) e detalhado em direção, período e altura em [94].

Figura 39 – Gráfico anual de potência média das ondas em W/m (adaptado de [94]).

Esta plataforma produz somente gás natural e condensado, com capacidade para quinze milhões de metros cúbicos por dia. Devido às características desse campo, é necessário um sistema industrial pouco complexo, com processamento primário de gás natural e condensado, e planta de injeção e regeneração de mono-etileno-glicol (MEG) para evitar entupimento das linhas de produção. Essa plataforma é constituída de quatro decks principais, e de cinco módulos (produção, facilidades, acomodações, turbogeradores e tratamento de gás natural).

As dimensões estruturais são 56 metros de largura, 60 metros de comprimento e 56 metros de altura. Durante a operação normal, são previstas de 100 a 130 pessoas a bordo. A produção de gás natural é proveniente de sete poços, com afastamento médio de 20 km. Os sistemas industriais relevantes são o processamento de gás natural e condensado, geração elétrica e captação de água do mar.

6.1.2 Determinação dos fluxos energéticos

Os fluxos energéticos renováveis contínuos presentes na plataforma fixa em estudo estão dispostos na Tabela 11, classificados em fluxos naturais e artificiais. Esses fluxos foram quantificados com base nos dados levantados na etapa anterior e nos modelos energéticos clássicos representados por equações no Apêndice B, referenciados em [20] e [23]. O Apêndice D apresenta detalhamento dos cálculos da Tabela 11.

Tabela 11 – Fluxos energéticos em plataforma fixa.

Fluxos energéticos renováveis			Potencial Teórico (kW)
Naturais	Irradiação solar	0,457 kW/m ²	1.534
	Vento	630 W/m ²	378
	Vento adjacências		630.000
	Ondas	3,5 kW/m	210
	Ondas adjacências		70.000
	Gradiente salino	10 m ³ /s	100
	Gradiente salino adjacências		9.900
	Gradiente térmico oceânico	$\Delta T=5^{\circ}\text{C}$	10
	Gradiente térmico oceânico adjacências		190
Artificiais	Efluente sanitário	40 m ³ /dia	0,75
	Restos alimentares	40 kg/dia	3,1
	Água efluente vapor	10 ton/dia	0,10
	Água efluente líquida	800 m ³ /h	25,3
Plataforma			2.261
TOTAL			712.351

Nessa etapa, destaca-se a particularidade dos fluxos energéticos renováveis provenientes dos ventos, das ondas, do gradiente salino e do gradiente térmico, que também podem ser captados nas adjacências da plataforma. Essa quantificação na região de entorno está demonstrada separadamente do potencial teórico na área das dimensões físicas da plataforma. O potencial teórico, proveniente de fluxos energéticos renováveis para a área da plataforma, foi estimado em 2.261 kW de

potência média. Considerando as adjacências, esse valor aumenta para 712.351 kW. Essa diferença foi motivada pela área adicional considerada, de um quilômetro quadrado no entorno da localização geográfica de referência. Ou seja, a área no entorno da plataforma tem potencial energético significativo, pois a quantidade de energia é proporcional à área considerada. Quanto maior a área para captação, maior será a quantidade de energia elétrica gerada.

Destaca-se a capacidade de captação de água do mar, na ordem de 1.100 m³/h, em que 800 m³/h são descartadas na forma líquida na superfície do mar. Essa água é utilizada em sistemas de resfriamento e para consumo tipo doméstico através de método de dessalinização por evaporação. Os restos alimentares, que são triturados em partes menores que 25 mm e lançados ao mar, atendendo às especificações determinadas na convenção MARPOL (IMO), podem ser misturados com efluente sanitário para geração de biogás.

6.1.3 Avaliação de dispositivos conversores

A partir da determinação da natureza dos fluxos energéticos disponíveis no ambiente da plataforma marítima de produção de hidrocarbonetos, são verificados quais dispositivos conversores energéticos existem no mercado. A instalação e o funcionamento desses dispositivos dependem das informações apresentadas na primeira etapa da metodologia, em conjunto com suas respectivas especificações técnicas. Para irradiação solar, nesse caso da plataforma fixa, podem-se utilizar as três tecnologias apresentadas no Capítulo 4 (termelétrica, motor Stirling e painel fotovoltaico). A aplicação dessas tecnologias é restrita pela existência de áreas classificadas e de áreas que podem atrapalhar a navegabilidade do piloto de helicóptero durante a aproximação, como o heliponto e locais de reflexo solar (NORMAM). Também não são admitidas estruturas que dificultem ou obstruam o acesso às rotas de fuga.

Para captação da energia dos ventos, existem três possibilidades de aplicação. A primeira possibilidade é a utilização de pequenas turbinas eólicas (até 500 W) de forma distribuída na área da plataforma, em corrente contínua. A segunda possibilidade é a utilização de turbinas eólicas de médio porte (até 10 kW) também

de forma distribuída, mas em corrente alternada. A terceira opção é a utilização de turbinas eólicas de grande porte (até 5 MW) com aplicação tipo *grid* em corrente alternada.

Para utilização da energia das ondas, devido à distância da costa, orienta-se a aplicação de conversores baseados no mecanismo tipo perfil e no mecanismo tipo ponto absorção. A energia proveniente do gradiente de salinidade pode ser aproveitada, contudo a conversão da energia de gradiente térmico oceânico nessa região não é tecnicamente viável, pois a lâmina d'água não é profunda (172 metros) e o gradiente térmico máximo de 5°C. Esse valor torna inviável a troca térmica mínima admissível, mesmo com altas vazões de água.

A conversão da energia dos efluentes sanitários, para formação de biogás e conseqüente geração de eletricidade é viável tecnicamente, mas necessita de grande área para a realização do processo biodigestor. A conversão da energia de restos alimentares, também para formação de biogás e conseqüente geração de eletricidade é viável tecnicamente, mas necessita de grande área para realização de compostagem. Um ponto de atenção aos resíduos provenientes do processo de decomposição dos alimentos, o qual não pode ser despejado ao mar e deve ser removido para a costa. A energia utilizada para transporte desses resíduos é significativa e pode tornar negativo o balanço energético desse dispositivo conversor. Ou seja, seria utilizada mais energia para transportar os resíduos do que a quantidade de eletricidade gerada pela tecnologia.

A conversão da energia de água efluente em estado de vapor é viável tecnicamente através da aplicação de pico turbinas a vapor. Contudo, o baixo potencial teórico desse fluxo energético (100 W) e a variabilidade no estado vapor são pontos desfavoráveis a esse aproveitamento, conforme discutido em [79].

A conversão de energia da água efluente líquida é viável tecnicamente, mas restrita à operação das bombas de captação. Ou seja, em situações de emergência ESD3 não haverá esse fluxo energético disponível. Destaque para alta maturidade tecnológica de conversão de energia hidráulica em eletricidade e a necessidade de turbina adequada para água salgada. A turbina adequada para aplicação é do tipo Banki, e a geração elétrica pode ser do tipo corrente contínua ou alternada.

O Apêndice E apresenta especificações técnicas existentes no mercado para alguns conversores passíveis de utilização nos fluxos energéticos identificados anteriormente.

6.1.4 Tipologia da demanda

O sistema elétrico da plataforma fixa é do tipo isolado, alimentado por três turbo geradores principais de 4,375 MVA, que podem utilizar como combustível o gás natural proveniente da produção ou óleo diesel. Em condições normais, dois geradores são suficientes para suprir a demanda da plataforma, e o terceiro gerador permanece desligado em modo *stand-by*. A planta industrial possui ainda um gerador auxiliar e um gerador de emergência para as cargas essenciais e de emergência. Esses equipamentos são similares, com 1,328 MVA de potência e utilizam óleo diesel.

A instalação elétrica é composta por um setor principal em 4,16 kV, que alimenta dois transformadores de três enrolamentos de 3,2 MVA (4,16/0,48-0,48kV), dois transformadores de 1,25 MVA (4,16/0,48kV) e motores de grande porte são conectados diretamente ou através de inversor de frequência. O sistema elétrico da plataforma fixa está representado em forma de diagrama unifilar na Figura 15. A Tabela 12 apresenta o quantitativo de potência ativa, reativa, total e fator de potência por tipo de carga (normal, auxiliar, essencial e emergência). Conforme descrito no item 6.1.1, esses dados são de uma plataforma real, com início de operação recente. A filosofia de projeto desse sistema elétrico respeita os requisitos normativos descritos no Apêndice A, e considera lições aprendidas de projetos regressos.

Tabela 12 – Demanda detalhada de plataforma fixa.

Cargas	kW	kvar	kVA	cos ϕ
Normal	3.035	1.825	3.527	0,86
Auxiliar	644	295	713	0,90
Essencial	303	251	391	0,77
Emergência	525	366	641	0,82
Total	4.507	2.736	5.272	0,85

As cargas normais estão alocadas em Centros de Distribuição de Cargas (CDC) e Centro de Controle de Motores (CCM), em tensões de 110 V, 220 V, 480 V e 4,16 kV. Essas cargas são na sua maioria do tipo motóricas abaixo de 75 kW, que são utilizadas para bombear fluidos e acionar ventiladores. As grandes cargas normais em 4,16 kV são as bombas de injeção de MEG (com VSD) e bombas de captação de água, com cerca de 250 kVA cada. Destaque para o aquecedor de 450kW em 480 V. As cargas normais exigem alta continuidade, variação de tensão de até 10% e variação de frequência até 5%. A Distorção Harmônica Total desse sistema deve obedecer aos limites estabelecidos na IEEE Std 519 (máximo 5 %).

As cargas auxiliares estão alocadas em CDCs e CCMs, em tensões de 110 V, 220 V e 480 V. Destaque para algumas cargas em 220 V que estão conectadas à UPS (periféricos de grandes motores). As cargas auxiliares são similares às cargas normais e usualmente são redundantes em função operacional na planta de processo. Os requisitos de qualidade de energia também são similares.

As cargas essenciais estão alocadas em CDCs e CCMs, em tensões de 110 V, 220 V e 480 V. Destaque para motores de ar comprimido em 480 V (instrumentação) e para os sistemas de ar condicionado e iluminação essencial (iluminação mínima exigida para garantir a segurança na realização dos trabalhos quando da ocorrência de uma parada de emergência nível ESD3). As cargas essenciais exigem altíssima continuidade, variação de tensão de até 6% e variação de frequência até 5%. A Distorção Harmônica Total do sistema deve obedecer aos limites estabelecidos na IEEE Std 519 (máximo 5 %). Abaixo estão listados os sistemas essenciais:

- Sistema reserva de ar condicionado das salas de controle, rádio e telecomunicações;
- Sistema de combate a incêndio (água/CO₂);
- Guincho para embarcação salva-vidas e embarcação de salvamento;
- Guindaste para uso em caso de evacuação de pessoal;
- Insuflamento/exaustão das salas que abriguem serviços essenciais (CA e CC);
- Sistemas de controle e auxiliares dos serviços essenciais (controle de poços, bombas de combate a incêndio, geradores e outros).

As cargas de emergência estão alocadas em CDCs em tensões de 24, 125 e 220 V_{DC}; e 220V_{AC}. Essas cargas de emergência são necessárias à salvaguarda da vida a bordo, à segurança operacional dos poços e dos equipamentos críticos de processo. Destaque para o sistema de parada de emergência e sistema de iluminação de emergência (iluminação mínima exigida para garantir a segurança na realização do abandono da plataforma e/ou na realização dos trabalhos durante a fase de transição entre a parada do gerador de energia elétrica principal e o de emergência). As cargas de emergência não admitem descontinuidade, variação de tensão de até 6% e variação de frequência até 5%. A Distorção Harmônica Total do sistema deve obedecer aos limites estabelecidos na IEEE Std 519 (máximo 5 %). O detalhamento das cargas que utilizam sistemas de baterias por nível de tensão, tipo de corrente e potência está apresentado no Apêndice F. Abaixo estão listados os sistemas de emergência:

- Sistema de detecção de gás/incêndio;
- Circuito interno de TV;
- Sistema de parada de emergência;
- Iluminação de emergência;
- Iluminação de heliponto;
- Luzes de auxílio a navegação;
- Luzes de obstáculo aéreo;
- Buzinas de nevoeiro;
- Telecomunicações e intercomunicadores;
- Sistema de alarmes manuais e automáticos (visuais e sonoros);
- Painel de controle do gerador de emergência;
- Painel de controle das bombas de incêndio;
- Sistema de Controle e Instrumentação de Processo;
- Projetor para iluminação da área de descida da embarcação salva-vidas;
- Holofote de busca e salvamento;
- Portas estanques a água (acionamento/controle).

6.1.5 Avaliação de oferta e demanda:

A avaliação do potencial teórico de energia renovável presente no local da plataforma fixa, com base na demanda média projetada para a mesma, permite concluir que, quantitativamente, pode-se suprir metade da energia elétrica por fontes verdes. Ou seja, seria possível reduzir pela metade o consumo de combustíveis fósseis. Considerando as adjacências, essa avaliação extrapola para 158 vezes a demanda média projetada. Ou seja, a captação dos fluxos energéticos renováveis nesse caso permite a exportação de excedente significativo para outro sistema elétrico.

6.1.5.1 Localização física dos dispositivos conversores

A possível localização dos dispositivos conversores depende de fatores como tamanho, peso, tipo de fluxo energético e certificação para atmosferas potencialmente explosivas. Para captação de energia solar, estão disponíveis os locais no último nível da plataforma, “Topdeck” e “Helideck”. A Figura 40 exibe imagem de desenho de projeto com o patamar mais alto da plataforma fixa, onde a incidência de raios solares é mais intensa (ausência de obstáculos), com destaque à área classificada, hachurada em vermelho. O norte geográfico está apontado com uma seta vermelha, e sugere que a área imediatamente contígua ao heliponto sofrerá ação de sombras.

Figura 40 – Desenho de projeto de plataforma fixa.

Através da análise da disposição de equipamentos não transponíveis no “Topdeck” e “Helideck” (canhões de água, antenas de telecomunicações, áreas com sombra e tanques de combustível), foram estimados 266 m² para instalação de captadores solares, motor Stirling ou células fotovoltaicas na área construída da plataforma (4 locais) e mais 35 m² para células fotovoltaicas em estrutura a ser instalada de forma suspensa e inclinada, apoiada na face norte, abaixo do “Helideck”.

A captação de energia eólica é viável somente para áreas não classificadas. Os locais disponíveis para instalação de pequenos geradores (400 W) são a torre de comunicação (4) e vértices da face norte da plataforma (2). Para gerador eólico de médio porte, somente um local é passível de instalação, na torre de comunicação. Aerogeradores *offshore* podem ser instalados a uma distância de 500 metros da plataforma, de forma a não obstruir a rota do helicóptero e a rota dos navios de apoio. Ou seja, foram determinados quatro locais possíveis de instalação ao redor da plataforma.

A captação de energia das ondas somente é viável para áreas adjacentes plataforma, pois a instalação de dispositivo conversor próximo dos *risers* de

produção configura alto risco de segurança operacional. Dispositivos conversores tipo ponto de absorção (bóia) podem ser instalados em muitos locais, de forma dispersa ao redor da plataforma. Enquanto dispositivos conversores tipo perfil de onda podem ser instalados nos mesmos locais dos aerogeradores *offshore*.

Dispositivos captadores de energia proveniente de gradiente salino, de efluentes sanitários, de restos alimentares e de água efluente em estado vapor podem ser instalados em local próximo ou pertencente à área industrial da plataforma. A energia proveniente de água efluente deve ser captada no nível mais baixo da plataforma, com intuito de maximizar a altura de queda do fluido de trabalho. Nesse caso, somente um local é viável no “Lower Deck”.

No Apêndice G estão dispostos os tipos de dispositivos conversores considerados, quantificação, possível localização física e potência.

6.1.5.2 Localização elétrica dos dispositivos conversores

As fontes renováveis têm como características mais relevantes a baixa previsibilidade e a baixa continuidade. Ou seja, para instalações elétricas industriais essas características são incompatíveis com os altos requisitos de qualidade e disponibilidade de energia elétrica. Contudo, quando a aplicação dos dispositivos conversores de fluxos energéticos renováveis é integrada com outras fontes de eletricidade, existe possibilidade de ganhos de confiabilidade.

A plataforma fixa, que tem o seu sistema elétrico do tipo isolado, quando a ocorrência de falha na geração principal, o gerador auxiliar assume as cargas auxiliares, as cargas essenciais e as cargas de emergência. Ou seja, as cargas normais ficam desenergizadas. Se o gerador auxiliar também falhar, o gerador de emergência assume as cargas essenciais e de emergência, enquanto a alimentação das cargas auxiliares é descontinuada. Se o gerador de emergência também falhar, somente permanecerão energizadas as cargas de emergência, alimentadas por sistemas de UPS e baterias. Ou seja, permanecerão funcionando até o esgotamento da capacidade da bateria.

Caso o sistema elétrico seja projetado para funcionar com microgeração distribuída, proveniente de fontes renováveis, a disponibilidade dos sistemas críticos

pode ser incrementada. Em casos de emergência, com falha dos geradores principais, auxiliar e de emergência, a capacidade das UPS e baterias podem ser mantidas por painéis fotovoltaicos, aerogeradores, energia das ondas, entre outros. Em operação normal, a microgeração distribuída pode assumir cargas críticas e, na descontinuidade do fluxo renovável, a geração principal, auxiliar, de emergência, a UPS e as baterias são capazes de manter a continuidade e a qualidade da energia elétrica requerida pelo sistema crítico.

A microgeração distribuída permite maximizar a utilização de fontes renováveis, através do conceito operacional tipo “Rede”, conforme apresentado no Capítulo 3. Apesar de ser um sistema isolado, o conceito operacional é válido quando se assume a rede como sendo o sistema de geração principal. Esse conceito permite a utilização de um reservatório conectado à rede, nesse caso representado pelas baterias.

Baseando-se nessa filosofia, os dispositivos conversores podem ser instalados em qualquer ponto elétrico. Entretanto, com foco nas restrições de instalação e projetos para plataformas marítimas de produção e petróleo e gás natural, os dispositivos devem ser alocados em pontos com maior compatibilidade de parâmetros elétricos sem necessidade de acessórios (transformador, retificador, inversor, entre outros).

No Apêndice G estão dispostos os tipos de dispositivos conversores, com possíveis locais elétricos para instalação e requisitos de acessórios (transformador, retificador, inversor, entre outros).

6.1.5.3 Ranqueamento dos dispositivos conversores

A metodologia multicritério, apresentada anteriormente no item 5.2, foi aplicada para comparar os diversos aspectos de oferta e demanda. O objetivo principal foi priorizar as alternativas mais vantajosas ao projeto. O resultado da priorização está disposto na Tabela 13, com detalhe de pontuação para cada aspecto.

Tabela 13 – Ranqueamento de dispositivos conversores para plataforma fixa.

Rank	Dispositivo Conversor	Total Ponderado	Aspecto				
			Elétrico	Estrutural	Técnico	Econômico	Ambiental
1	Fotovoltaica	52,3	53	43	100	64	30
2	Ondas absorção	46,8	71	50	72	32	20
3	Água Líquida	46,5	77	27	102	50	14
4	Eólica pequeno	46	37	87	61	61	22
5	Eólica offshore	45,6	68	50	88	23	18
6	Ondas perfil	43,4	71	50	58	22	20
7	Eólica médio	43,2	66	23	87	52	20
8	Água vapor	40,7	77	19	80	41	17
9	Ondas perfil	39,3	58	50	55	18	20
10	Termelétrica	38,6	64	18	78	41	22
11	Stirling	32,1	57	18	51	34	17
12	Gradiente térmico	31,4	73	6	70	23	17
13	Efluentes sanitários restos alimentares	30,1	77	9	62	26	3
14	Gradiente salinidade	28,4	68	8	52	19	17

6.1.6 Determinação dos dispositivos conversores e da tipologia de alimentação elétrica

A determinação de instalação dos dispositivos conversores no âmbito de projeto é decisão do projetista, baseado no ranqueamento apresentado na etapa anterior. Para o caso em estudo, serão consideradas as quatro primeiras soluções: painel fotovoltaico, bóia geradora, turbina hidráulica e turbina eólica de pequeno porte. A Figura 41 exibe fotografias e desenhos dessas soluções.

Figura 41 – Fotografias e desenho de dispositivos conversores para plataforma fixa (Adaptado de [82], [95] e [96]).

A proposta de tipologia de alimentação elétrica é aumentar a disponibilidade das cargas críticas, sem utilizar equipamentos acessórios. Ou seja, distribuir as fontes renováveis na instalação elétrica no mesmo barramento de sistemas críticos, sem utilizar transformadores, inversores e retificadores. O aumento da disponibilidade para algumas cargas críticas é representado na multiplicidade de fontes energéticas disponíveis.

Os painéis fotovoltaicos utilizados nesse caso foram projetados para alimentar o sistema de navegação, e o controle da bomba de incêndio A. A tensão de alimentação é 24 V em corrente contínua. O conceito energético aplicado será o tipo “Rede” com reservatório, ou seja, enquanto existir potência disponível, a fonte renovável alimenta as cargas, sendo que o excesso disponibilizado para a rede ou é alocado no banco de baterias. Operacionalmente essa energia renovável é prioritária na escala de geração. A utilização do reservatório (baterias) se dará em último caso, na indisponibilidade das outras fontes de energia elétrica consideradas neste sistema híbrido. A Tabela 14 apresenta a quantidade de painéis a serem utilizados e os respectivos locais elétricos. O detalhamento desse cálculo está no Apêndice D. A localização física está representada no Apêndice H.

Tabela 14 – Lista de sistemas críticos alimentados por painéis fotovoltaicos.

Painel Fotovoltaico				
Local	Quantidade de painéis	Potência Instalada (W)	Área (m ²)	Circuito
1	35	8.575	61	Controle bomba de incêndio A
2	35	8.575	61	Sistema de navegação
3	35	8.575	61	Sistema de navegação
4	20	4.900	35	Controle bomba de incêndio A
5	11	2.695	19	Sistema de navegação
Total	136	33.320	237	

O dispositivo conversor de energia proveniente das ondas mais adequado para esse caso é o tipo ponto de absorção, ou tipo monobóia. Devido à possibilidade de instalação de diversos dispositivos dispersos no perímetro da plataforma, foi estimada a instalação de vinte equipamentos com capacidade de 150 kW interligados e conectados ao barramento essencial em 480 V. O conceito energético é do tipo “Rede”, com prioridade máxima na ordem de despacho.

A utilização da energia proveniente da água líquida efluente é considerada através de instalação de turbina Banki, com potência instalada de 20 kW. O dispositivo gera eletricidade em corrente alternada de 480 V e está conectado ao barramento essencial. O conceito energético é do tipo “Rede”, com segunda prioridade na ordem de despacho.

A instalação de turbinas eólicas de pequeno porte foi determinada para quatro locais. Esses locais são os quatro vértices da torre de comunicações, a uma altura de 30 metros em relação ao piso na qual está a base da torre e 63 metros acima do nível do mar. Cada gerador eólico tem potência instalada de 400 W e está conectado ao sistema de navegação, em 24 V corrente contínua. O conceito energético é do tipo “Rede”, com segunda prioridade na ordem de despacho, para que seja maximizada a produção de energia elétrica das células fotovoltaicas, mais vantajosas para esse caso conforme a Tabela 13.

A Figura 42 exibe desenho de projeto “Topside” da plataforma fixa, com indicação da localização somente na área da UEP, dos dispositivos conversores representados por retângulos vermelhos.

Figura 42 – Desenho de projeto “Topside” de plataforma fixa.

A Figura 43 exibe desenho de projeto da plataforma fixa, com destaque de simulação de localização de monobóias. Está representada por elipses amarelas a localização dos outros dispositivos conversores considerados nessa etapa (aerogeradores, painéis solares e turbina hidráulica).

O diagrama unifilar elétrico, com a tipologia de distribuição das fontes renováveis está representado na Figura 44. As localizações das fontes renováveis estão destacadas em quadros vermelhos. A distribuição dos dispositivos conversores, potência instalada e circuito elétrico estão dispostos na Tabela 15.

Figura 43 – Desenho de projeto de plataforma fixa.

Tabela 15 – Distribuição e potência dos dispositivos conversores.

Dispositivos Conversores					
Tipo	Quantidade	Potência Instalada (kW)	Custo (U\$)	Tensão	Circuito
Fotovoltaico	55	13,5	23.650	24 V _{DC}	Controle Bomba de Incêndio A
Fotovoltaico	70	17,2	30.100	24 V _{DC}	Sistema de navegação
Fotovoltaico	11	2,7	4.730	24 V _{DC}	Sistema de navegação
Bóia	20	3.000	1.600.000	480 V	Barramento essencial
Hidráulica	1	20	10.000	480 V	Barramento essencial
Eólica	4	1,6	6.400	24 V _{DC}	Sistema de navegação
Total	161	3.055	1.674.880

Figura 44 – Imagem de digrama unifilar de plataforma fixa com fontes renováveis.

6.1.7 Determinação do potencial real

A determinação do potencial real de energia elétrica a ser gerada pelos dispositivos conversores de fontes renováveis depende da qualidade dos dados ambientais do local de instalação e dados técnicos dos fabricantes dos equipamentos. A Tabela 16 apresenta a estimativa de energia elétrica gerada pelos dispositivos conversores de fluxos energéticos renováveis, em base diária e anual. O detalhamento dos cálculos está apresentado no Apêndice D.

Tabela 16 – Potenciais reais dos dispositivos conversores para plataforma fixa.

Fluxo energético	Energia diária (kWh)	Energia anual (kWh)
Eólica	13	4.867
Fotovoltaica	192	70.247
Hidráulica	480	175.200
Ondas	21.600	7.884.000
Plataforma	686	250.314
Total	22.286	8.384.628

A energia das ondas representa 97% da energia renovável convertida em eletricidade disponibilizada para utilização na plataforma fixa. Esse resultado é justificado pela maior abrangência física para captação de fluxos energéticos para esse tipo de tecnologia. Pode-se inferir que a utilização da energia contida no oceano em sistemas industriais marítimos tem importância relevante em relação aos outros fluxos energéticos renováveis.

Em relação à demanda, a totalização da energia elétrica renovável disponibilizada representa cerca de 20% do consumo diário / anual da UEP. O potencial real das tecnologias que devem ser utilizadas na estrutura da plataforma representa somente 0,6% da energia elétrica total requerida. Contudo, a aplicação em sistemas críticos representa ganho de disponibilidade em casos de emergência. Sistemas de salvaguarda e de garantia da vida a bordo com altíssima disponibilidade são valores prioritários em projetos de plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural.

A estimativa de emissão de CO₂ evitado é baseada na eficiência dos geradores principais. Nesse caso os geradores são turbinas a gás, e o combustível utilizado é o gás natural proveniente do reservatório em produção. A emissão média de CO₂ para essas turbinas é 0,87 kg/kWh [97]. Logo, a quantidade de emissão de carbono evitado durante um ano de utilização de fontes renováveis na plataforma fixa é estimada em 7.077 toneladas. Desse montante, 218 toneladas são referentes à utilização de geração elétrica através das tecnologias eólica, fotovoltaica e hidráulica.

6.2 PLATAFORMA FPSO

As plataformas tipo FPSO têm como características a grande distância de instalação em relação à costa (de 200 a 300 km), operação em lâmina d'água de 1.000 a 2.500 metros, a existência de tanques de armazenamento de petróleo e sistema de ancoragem. Outra característica relevante é a necessidade de operações de transferência para navios aliviadores, que requerem alto nível de segurança e limitam a utilização da região adjacente para geração de eletricidade.

6.2.1 Caracterização do meio ambiente e tipologia da plataforma marítima

A plataforma tipo FPSO considerada está na posição geográfica (Latitude 25°41'13,25"/ Longitude 43°10'29,605") [92], em lâmina d'água de 2.118 metros. A imagem de projeto da plataforma está disposta na Figura 45. Essa plataforma ainda não existe, está sendo construída no Brasil e o início de sua produção está planejado para o ano de 2016. Ou seja, essa unidade está em fase de projeto e montagem, etapas que ainda permitem modificações para instalação de dispositivos conversores de fluxos energéticos renováveis.

Nesta região o clima é tropical, apresentando verões úmidos e invernos secos. O mar na Bacia de Santos é caracterizado, principalmente, pela presença de três tipos de massas d'água: Água Costeira (AC), Água Tropical (AT) e Água Central do Atlântico Sul (ACAS), cada uma com características próprias de salinidade e temperatura, que permitem diferenciá-las. Os estudos realizados indicam que a qualidade da água na região oceânica da área de influência do empreendimento é do tipo não contaminado e pobre em nutrientes.

Figura 45 – Imagem de projeto de plataforma tipo FPSO (Adaptado de [3]).

Não existe avaliação solarimétrica para esta posição geográfica, cerca de 300 Km da costa do município do Rio de Janeiro, no estado do Rio de Janeiro. Dessa forma, a média diária de irradiância solar considerada será de 5.478 Wh/m^2 , conforme estimado na base anual para a região Sudeste do Brasil em [84]. A temperatura média da superfície do oceano na localização da plataforma e adjacências é cerca de 27°C , de acordo com [93].

O regime dos ventos na localidade foi determinado com base em [84], em referência a 50 metros de altura. A distribuição probabilística considerada é do tipo Weibull (fator de forma com valor igual a 2,1), velocidade média anual de 7 m/s e direção predominante leste.

O regime de ondas não está mapeado para a localização em estudo, e o valor de potência médio será considerado 10% maior do que o apresentado na Figura 39, devido à maior distância da costa.

Esta plataforma FPSO pode produzir petróleo e gás natural. Devido às características desse campo, é necessário um sistema industrial muito complexo, com processamento primário de petróleo, processamento de água produzida, processamento de gás natural e sistema especial de remoção de CO₂.

Essa plataforma é constituída de um casco (tanques de lastro, de petróleo, sistemas críticos, entre outros) um deck principal, dois andares e de dezessete módulos com processos industriais. As dimensões estruturais são 54 metros de largura, 320 metros de comprimento e 67 metros de altura. Durante a operação normal, são previstas de 100 a 110 pessoas a bordo. O sistema de ancoragem é do tipo *spread mooring*, ou seja, a plataforma se movimenta pouco em relação do seu ponto de referência e não influencia na captação de energia solar. A produção de petróleo e gás natural é estimada para utilização de cinco a sete poços, com afastamento médio de 20 km da plataforma FPSO. Também estão previstos poços para injeção de água e gás carbônico. Os sistemas industriais relevantes são o processamento de gás natural e petróleo, sistema de injeção de água, sistema de injeção de CO₂, geração elétrica e captação de água do mar.

6.2.2 Determinação dos fluxos energéticos

Os fluxos energéticos renováveis contínuos presentes na plataforma FPSO em estudo estão dispostos na Tabela 17, classificados em fluxos naturais e artificiais. O detalhamento dos cálculos está apresentado no Apêndice D. O potencial teórico, proveniente de fluxos energéticos renováveis para a área da plataforma, foi estimado em 11.646 kW. Considerando as adjacências, esse valor aumenta para 721.338 kW. Essa diferença foi motivada pela área adicional considerada, de um quilômetro quadrado no entorno da localização geográfica de referência.

Tabela 17 – Fluxos energéticos em plataforma FPSO.

Fluxos energéticos renováveis			Potencial Teórico (kW)
Naturais	Irradiação solar	0,457 kW/m ²	7.888
	Vento		2.016
	Vento adjacências	630 W/m ²	630.000
	Ondas		1.120
	Ondas adjacências	3,5 kW/m	70.000
	Gradiente salino		533
	Gradiente salino adjacências	10 m ³ /s	9.467
	Gradiente térmico oceânico		75
	Gradiente térmico oceânico adjacências	$\Delta T=20^{\circ}\text{C}$	225
	Efluente sanitário	40 m ³ /dia	1
Artificiais	Restos alimentares	40 kg/dia	3
	Água efluente líquida	300 m ³ /h	9
Plataforma			11.646
TOTAL			721.338

6.2.3 Avaliação de dispositivos conversores

Conforme realizado para a plataforma fixa, nessa etapa são verificados quais dispositivos conversores energéticos existem no mercado para captação dos fluxos energéticos disponíveis. Para o caso de FPSO, além dos requisitos das classificadoras navais, existem duas características que limitam a utilização dos dispositivos conversores. A primeira característica é o tipo de ancoragem. Caso a embarcação mude sua posição constantemente, a previsibilidade de captação de vento e energia solar é prejudicada. A outra característica é a altura da lâmina d'água da localização em estudo, ou seja, a profundidade do leito marinho. Se essa profundidade for maior que 200 metros, torna inviável a utilização de dispositivos ancorados, pois ainda não foram testados nessa condição.

Para irradiação solar, nesse caso da plataforma FPSO, podem-se utilizar as três tecnologias apresentadas no Capítulo 4 (termelétrica, motor Stirling e painel fotovoltaico). A aplicação dessas tecnologias é restrita pela existência de áreas classificadas e de áreas que podem atrapalhar a navegabilidade do piloto de helicóptero durante a aproximação, como o heliponto e locais de reflexo solar (NORMAM). Também não são admitidas estruturas que dificultem ou obstruam o acesso às rotas de fuga.

Para captação da energia dos ventos, existem duas possibilidades de aplicação. A primeira possibilidade é a utilização de pequenas turbinas eólicas (até 500 W) de forma distribuída na área da plataforma, em corrente contínua. A segunda possibilidade é a utilização de turbinas eólicas de médio porte (até 10 kW) também de forma distribuída, mas em corrente alternada. As turbinas eólicas de grande porte (até 5 MW) com aplicação *offshore* em corrente alternada não são disponíveis para aplicação nessa profundidade (2.118 metros). Por esse motivo também não são tecnicamente viáveis a instalação de dispositivos conversores da energia das ondas.

A energia proveniente do gradiente de salinidade pode ser aproveitada, assim como a conversão da energia de gradiente térmico oceânico. No último caso, existe a possibilidade de captação de água até 2.000 metros. Quanto mais profunda for a captação, mais fria é a água e melhor a eficiência na troca de calor (mais energia elétrica gerada). Entretanto, maior será a quantidade de eletricidade e equipamentos auxiliares (bombas e motores elétricos) requeridos para elevação da água ao nível da plataforma.

A conversão da energia dos efluentes sanitários, para formação de biogás e conseqüente geração de eletricidade é viável tecnicamente, mas necessita de grande área para a realização do processo biodigestor. A conversão da energia de restos alimentares, também para formação de biogás e conseqüente geração de eletricidade é viável tecnicamente, mas necessita de grande área para realização de compostagem.

A conversão de energia da água efluente líquida é viável tecnicamente, mas restrita à operação das bombas de captação. Ou seja, em situações de emergência ESD3 não haverá esse fluxo energético disponível. Destaque para alta maturidade tecnológica de conversão de energia hidráulica em eletricidade e a necessidade de turbina adequada para água salgada. A turbina adequada para aplicação é do tipo Banki, e a geração elétrica pode ser do tipo corrente contínua ou alternada.

6.2.4 Tipologia da demanda

O sistema elétrico de uma plataforma de produção do tipo FPSO é isolado, ou seja, não existe conexão com outro sistema elétrico de potência. A unidade é alimentada por quatro turbogeradores principais de 31,25 MVA, que podem utilizar como combustível o gás natural proveniente da produção ou óleo diesel. Em condições normais, três geradores são suficientes para suprir a demanda da plataforma, e o quarto gerador permanece desligado em modo *stand-by*. A planta industrial possui ainda um gerador auxiliar e um gerador de emergência para as cargas essenciais e de emergência. Esses equipamentos são similares, com 2,25 MVA de potência e utilizam óleo diesel.

A instalação elétrica, cujo diagrama unifilar é representado na Figura 46, possui um barramento principal em 13,8 kV, aonde são conectados os geradores principais. Este painel alimenta dois transformadores de três enrolamentos de 3,5 MVA (13,8/0,48-0,48 kV), dois transformadores de três enrolamentos de 4,5 MVA (13,8/0,48-0,48 kV), dois transformadores de 2,5 MVA (13,8/0,48 kV), dois transformadores de 13,5 MVA (13,8/4,16 kV) e motores de grande porte, que são conectados diretamente ou através de conversores de frequência. A Tabela 18 apresenta o quantitativo de potência ativa, reativa, total e fator de potência por tipo de carga (normal, auxiliar, essencial e emergência).

Tabela 18 – Demanda detalhada de plataforma FPSO.

Cargas	kW	kvar	kVA	cos ϕ
Normal	66.440	37.020	76.057	0,87
Auxiliar	1.752	897	1.968	0,89
Essencial	1.396	736	1.578	0,88
Emergência	785	547	957	0,82
Total	70.372	38.652	80.042	0,88

Figura 46 – Imagem de digrama unifilar de plataforma FPSO.

As cargas normais estão alocadas em Centros de Distribuição de Cargas (CDC) e Centro de Controle de Motores (CCM), em tensões de 220 V, 480 V, 4,16 kV e 13,8 kV. Essas cargas são na sua maioria do tipo motóricas abaixo de 75 kW, que são utilizadas para bombear fluidos e acionar ventiladores. As grandes cargas

normais em 13,8 kV são os compressores (11 MW) e as bombas de injeção de água (5,9 MW). As bombas de carga, de 590 kW, são alimentadas em 4,16 kV. Das cargas alimentadas em 480 V, destaca-se o aquecedor de 630 kW, unidade de remoção de sulfato. As cargas normais exigem alta continuidade, variação de tensão de até 10% e variação de frequência até 5%. A Distorção Harmônica Total do sistema deve obedecer aos limites estabelecidos na IEEE Std 519 (máximo 5 %).

As cargas auxiliares estão alocadas em CDCs e CCMs, em tensões de 220 V e 480 V. Um exemplo de cargas auxiliares são os sistemas auxiliares dos geradores principais. Este tipo de carga é similar às cargas normais e usualmente são redundantes em função operacional na planta de processo. Os requisitos de qualidade de energia também são similares.

As cargas essenciais estão alocadas em CDCs e CCMs, em tensões de 220 V e 480 V. Destaque para motores de ar comprimido em 480 V (instrumentação) e para os sistemas de ar condicionado e iluminação essencial (iluminação mínima exigida para garantir a segurança na realização dos trabalhos quando da ocorrência de uma parada de emergência nível ESD3). As cargas essenciais exigem altíssima continuidade, variação de tensão de até 6% e variação de frequência até 5%. A Distorção Harmônica Total do sistema deve obedecer aos limites estabelecidos na IEEE Std 519 (máximo 5 %). Abaixo estão listados alguns exemplos de cargas essenciais:

- Compressores de ar de instrumento e serviço;
- Bomba de lastro da sala de máquinas;
- Bomba de elevação de emergência;
- Sistema de iluminação essencial.

As cargas de emergência estão alocadas em CDCs em tensões de 24, 125 e 220 V_{DC}; e 220 V_{AC}. Essas cargas de emergência são necessárias à salvaguarda da vida a bordo, e à segurança operacional dos poços e equipamentos críticos de processo. Destaque para o sistema de parada de emergência e sistema de iluminação de emergência (iluminação mínima exigida para garantir a segurança na realização do abandono da plataforma e/ou na realização dos trabalhos durante a fase de transição entre a parada do gerador de energia elétrica principal e o de emergência). As cargas de emergência não admitem descontinuidade, variação de tensão de até 6% e variação de frequência até 5%. A Distorção Harmônica Total do

sistema deve obedecer aos limites estabelecidos na IEEE Std 519 (máximo 5 %). O detalhamento das cargas que utilizam sistemas de baterias por nível de tensão, tipo de corrente e potência está apresentado no Apêndice F. Abaixo estão listadas algumas das cargas de emergência:

- Painel de controle dos geradores de emergência e auxiliar;
- Sistema de parada de emergência;
- Iluminação de emergência;
- Painel de controle e partida das bombas de incêndio;
- Sistema de navegação;
- Sistema de Controle e Instrumentação de Processo (ECOS/ESC);
- Sistema de detecção de gás/incêndio;
- Circuito interno de TV.

6.2.5 Avaliação de oferta e demanda

A avaliação do potencial teórico de energia renovável presente no local da plataforma FPSO, com base na demanda média projetada para a mesma, permite concluir que, quantitativamente, pode-se gerar cerca de quinze por cento da energia elétrica por fontes verdes. Considerando as adjacências, essa avaliação extrapola para nove vezes a demanda média projetada. Ou seja, a captação dos fluxos energéticos renováveis nesse caso permite a exportação de excedente significativo para outro sistema elétrico.

6.2.5.1 Localização física dos dispositivos conversores

A possível localização dos dispositivos conversores depende de fatores como tamanho, peso, tipo de fluxo energético e certificação para atmosferas potencialmente explosivas. Para captação de energia solar, estão disponíveis os locais no último nível da plataforma, na parte superior dos edifícios de acomodação e da subestação (“E-House”), onde a incidência de raios solares é mais intensa

(ausência de obstáculos). A Figura 47 exibe imagem de desenho de projeto com o patamar mais alto da plataforma fixa, onde o círculo com o número um representa o edifício de acomodação e o círculo com o número dois representa o edifício da subestação. O norte geográfico está apontado com uma seta vermelha, e sugere que a área imediatamente contígua à subestação sofrerá ação de sombras no período da tarde.

Figura 47 – Desenho de projeto de plataforma fixa.

Através da análise da disposição de equipamentos não transponíveis nas áreas de interesse, foram estimados 1.170 m^2 para instalação de captadores solares, motor Stirling ou células fotovoltaicas na área construída da plataforma (2 locais) e mais 35 m^2 para células fotovoltaicas em estrutura a ser instalada de forma suspensa e inclinada, apoiada na face norte, abaixo do “Helideck”.

A captação de energia eólica é viável somente para áreas não classificadas. Os locais disponíveis para instalação de aerogeradores de pequeno (400 W) e médio porte (10 kW) são os mesmos locais para instalação de captadores solares, ou seja, na parte superior dos edifícios de acomodação e da subestação.

Dispositivos captadores de energia proveniente de gradiente salino, de efluentes sanitários, de restos alimentares e de água efluente em estado vapor podem ser instalados em local próximo ou pertencente à área industrial da plataforma. A energia proveniente de água efluente deve ser captada no nível mais baixo da

plataforma, com intuito de maximizar a altura de queda do fluido de trabalho. Nesse caso, somente um local é viável. Ou seja, a casa de máquinas do navio no interior do casco.

No Apêndice G estão dispostos os tipos de dispositivos conversores considerados, quantificação, possível localização física e potência.

6.2.5.2 Localização elétrica dos dispositivos conversores

A plataforma FPSO, que tem o seu sistema elétrico do tipo isolado, quando a ocorrência de falha na geração principal, o gerador auxiliar assume as cargas auxiliares, e o gerador de emergência assume as cargas essenciais. Ou seja, as cargas normais ficam desenergizadas. Se o gerador auxiliar também falhar, o gerador de emergência pode assumir as cargas auxiliares, além das cargas essenciais. Se o gerador de emergência falhar, o gerador auxiliar pode assumir as cargas essenciais, além das cargas auxiliares. Se o gerador auxiliar e o gerador de emergência falharem, somente permanecerão energizadas as cargas de emergência, alimentadas por sistemas de UPS e baterias. Ou seja, permanecerão funcionando até o esgotamento da capacidade da bateria.

No Apêndice G estão dispostos os tipos de dispositivos conversores aptos tecnicamente a serem instalados na plataforma tipo FPSO , com possíveis locais elétricos para instalação e requisitos de acessórios (transformador, retificador, inversor, entre outros).

6.2.5.3 Ranqueamento dos dispositivos conversores

A metodologia multicritério, apresentada anteriormente, foi aplicada para comparar os diversos aspectos de oferta e demanda. O objetivo principal foi priorizar as alternativas mais vantajosas ao projeto. O resultado da priorização está disposto na Tabela 19, com detalhe de pontuação para cada aspecto.

Tabela 19 – Ranqueamento de dispositivos conversores para plataforma FPSO.

Rank	Dispositivo Conversor	Total Ponderado	Aspecto				
			Elétrico	Estrutural	Técnico	Econômico	Ambiental
1	Fotovoltaica	52,3	53	43	100	64	30
2	Eólica pequeno	46,3	48	40	85	59	22
3	Eólica médio	43,8	63	27	87	52	20
4	Água Líquida	43	74	18	100	50	14
5	Termelétrica	36,4	53	18	78	41	22
6	Gradiente Térmico	30,8	70	6	70	23	17
7	Stirling	30,5	46	20	51	34	17
8	Efluentes sanitários e restos alimentares	29,5	74	9	62	26	3
9	Gradiente Salinidade	27,8	65	8	52	19	17

6.2.6 Determinação dos dispositivos conversores e da tipologia de alimentação elétrica

A determinação de instalação dos dispositivos conversores no âmbito de projeto é decisão do projetista, baseado no ranqueamento apresentado na etapa anterior. Para o caso estudo, serão consideradas as quatro primeiras soluções: painel fotovoltaico, turbina eólica de pequeno porte, turbina eólica de médio porte e turbina hidráulica. A Figura 48 exibe fotografias dessas soluções.

Figura 48 – Fotografias de dispositivos conversores para plataforma FPSO [81] e [95].

A proposta de tipologia de alimentação elétrica é a mesma utilizada na plataforma fixa, com objetivo de aumentar a disponibilidade das cargas críticas sem utilizar equipamentos acessórios. Ou seja, distribuir as fontes renováveis na instalação elétrica no mesmo barramento de sistemas críticos, sem utilizar transformadores, inversores e retificadores.

Os painéis fotovoltaicos utilizados nesse caso foram projetados para alimentar o sistema de navegação, os sistemas de controle e partida dos geradores auxiliar e de emergência, e das bombas de incêndio A e B. A tensão de alimentação é 24 V em corrente contínua. Apesar da aplicação dessa tecnologia em vários sistemas de corrente contínua, o potencial para instalação de painéis solares não foi totalmente utilizado. Com intuito de maximizar a utilização de fontes renováveis, os painéis fotovoltaicos também foram conectados aos sistemas de controle de processo industrial A e B através de inversor, disponibilizando energia elétrica em 220 V em corrente alternada. O conceito energético aplicado será o tipo “Rede” com reservatório, ou seja, enquanto existir potência disponível, a fonte renovável alimenta as cargas, sendo que o excesso disponibilizado para a rede ou é alocado no banco de baterias. Operacionalmente essa energia renovável é prioritária na escala de geração. A utilização do reservatório (baterias) se dará em último caso, na indisponibilidade das outras fontes de energia elétrica consideradas neste sistema híbrido. Os painéis fotovoltaicos serão instalados na parte superior do edifício do casario (233 m²) e do edifício da subestação (500 m²).

A instalação de turbinas eólicas de pequeno porte foi determinada para quatro locais. Esses locais estão próximos aos painéis solares na parte superior dos edifícios da acomodação e da subestação, a uma altura de 5 metros em relação ao piso na qual está a base da torre e 40 metros acima do nível do mar. Cada gerador eólico tem potência instalada de 400 W e está conectado ao sistema de navegação, em 24 V corrente contínua. O conceito energético é do tipo “Rede”, com segunda prioridade na ordem de despacho, para que seja maximizada a produção de energia elétrica das células fotovoltaicas, mais vantajosas para esse caso.

A instalação de turbinas eólicas de médio porte foi determinada para dois locais, também próximos aos painéis solares, mas em dois vértices do edifício da subestação. Esses dispositivos conversores serão instalados a uma altura de 10 metros em relação ao piso na qual está instalada a base da torre, e a 45 metros do nível do mar. Cada gerador eólico tem potência instalada de 10.000 W e estão

conectados ao barramento que provê eletricidade à sala de controle central, em 220 V corrente alternada. O conceito energético é do tipo “Rede”, com primeira prioridade na ordem de despacho.

A utilização da energia proveniente da água líquida efluente é considerada através de instalação de turbina Banki, com potência instalada de 20 kW. O dispositivo gera eletricidade em corrente alternada de 480 V e está conectado ao barramento essencial. O conceito energético é do tipo “Rede”, com primeira prioridade na ordem de despacho.

A Figura 49 exibe desenho de projeto da proa da embarcação, com indicação da localização dos dispositivos conversores. Os retângulos vermelhos representam painéis solares, enquanto as figuras de “cata-vento” representam os geradores eólicos de médio e pequeno porte, em suas respectivas escalas. Dependendo da posição do Sol e da disposição de instalação dos aerogeradores, existe a possibilidade de sombras nas células fotovoltaicas. Esse fato reduz a produção de eletricidade das fontes renováveis.

Figura 49 – Desenho de projeto da proa de plataforma FPSO.

A Figura 50 exibe desenho de projeto da plataforma FPSO, representando todos os locais onde foram determinados a instalação de dispositivos conversores (retângulos vermelhos). Destaque para a concentração de dispositivos na proa da embarcação e somente uma aplicação para a sala de máquinas no interior do casco.

Figura 50 – Desenho de projeto de plataforma FPSO.

O diagrama unifilar elétrico, com a tipologia de distribuição das fontes renováveis está representado na Figura 51. As localizações das fontes renováveis estão destacadas em quadros vermelhos. A distribuição dos dispositivos conversores, potência instalada e circuito elétrico estão dispostos na Tabela 20.

Tabela 20 – Distribuição e potência dos dispositivos conversores.

Dispositivos Conversores					
Tipo	Quantidade	Potência Instalada (W)	Custo (U\$)	Tensão	Circuito
Fotovoltaico	50	12.250	21.500	24 V _{DC}	Sistema de navegação
Fotovoltaico	20	4.900	8.600	24 V _{DC}	Controle gerador de emergência
Fotovoltaico	10	2.450	4.300	24 V _{DC}	Sistema partida gerador de emergência
Fotovoltaico	20	4.900	8.600	24 V _{DC}	Controle gerador auxiliar
Fotovoltaico	10	2.450	4.300	24 V _{DC}	Sistema partida gerador auxiliar
Fotovoltaico	10	2.450	4.300	24 V _{DC}	Controle Bomba de Incêndio A
Fotovoltaico	10	2.450	4.300	24 V _{DC}	Controle Bomba de Incêndio B
Fotovoltaico	145	35.525	62.350	220 V	Sistema de controle de processo industrial e telecom A
Fotovoltaico	145	35.525	62.350	220 V	Sistema de controle de processo industrial e telecom B
Eólica pequeno	4	1.600	6.400	24 V _{DC}	Sistema de navegação
Eólica médio	2	20.000	14.000	220 V	Sala de controle central
Hidráulica	1	20.000	10.000	480 V	Barramento Essencial
Total	427	144.500	211.000

Figura 51 – Imagem de digrama unifilar de plataforma FPSO com fontes renováveis.

6.2.7 Determinação do potencial real

A determinação do potencial real de energia elétrica a ser gerada pelos dispositivos conversores de fontes renováveis depende da qualidade dos dados ambientais do local de instalação e dados técnicos dos fabricantes dos equipamentos. A Tabela 21 apresenta a estimativa de energia elétrica gerada pelos dispositivos conversores de fluxos energéticos renováveis, em base diária e anual. O detalhamento dos cálculos está apresentado no Apêndice D.

Tabela 21 – Potenciais reais dos dispositivos conversores para plataforma FPSO.

Fluxo energético	Energia diária (kWh)	Energia anual (kWh)
Fotovoltaica	588	214.681
Eólica pequeno	13	4.867
Eólica Médio	333	121.667
Hidráulica	240	87.600
Total	1.175	428.814

A energia proveniente dos painéis fotovoltaicos representa metade da energia renovável convertida em eletricidade disponibilizada para utilização na plataforma FPSO. Esse resultado é justificado pela maior abrangência física para captação de fluxos energéticos para esse tipo de tecnologia. Pode-se inferir que em projetos de plataformas tipo FPSO, a existência de edifícios e de estruturas que permitam a instalação de painéis fotovoltaicos como coberturas permite aumentar significativamente a disponibilidade de energia verde na própria área da plataforma.

Em relação à demanda, a totalização da energia elétrica renovável disponibilizada representa cerca de 0,7% do consumo diário / anual da UEP. Esse valor é muito inferior ao caso anterior da plataforma fixa, pois não foi possível aproveitar a energia das ondas.

A estimativa de emissão de CO₂ evitado é baseada na eficiência dos geradores principais. Nesse caso os geradores são turbinas a gás, e o combustível utilizado é o gás natural proveniente do reservatório em produção. A emissão média de CO₂ para essas turbinas é 0,87 kg/kWh [97]. Logo, a quantidade de emissão de carbono evitado durante um ano de utilização de fontes renováveis na plataforma tipo FPSO é estimada em 773 toneladas.

7 CONCLUSÃO

O problema da aplicação de fontes renováveis de energia elétrica em plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural foi abordado neste trabalho, através da proposta de fluxograma de trabalho para projetos, a qual incorpora metodologia de análise multicritério. As particularidades da indústria de petróleo e gás natural, mais especificamente das plataformas marítimas de produção, foram revisadas, assim como o estado da arte dos dispositivos conversores de energia renovável em energia elétrica.

A determinação de fluxograma de trabalho para projetos permite uma análise metodológica e sequencial das variantes da problemática, com mapeamento prévio dos dados necessários e definição de escopo de cada etapa, de forma a tornar a análise mais robusta e com a participação de equipe multidisciplinar. A existência desse fluxograma permite compatibilizar a oportunidade de inserção de fontes alternativas com o planejamento do desenvolvimento de produção de campos de petróleo e gás natural. Nessa proposta, destacam-se as etapas de identificação dos fluxos energéticos e a determinação do potencial energético teórico do caso em estudo; a etapa de análise e avaliação multicritério dos dispositivos conversores aplicáveis ao caso em estudo; a etapa de definição da localização elétrica e física desses conversores; e por fim, a etapa de quantificação da energia elétrica real a ser produzida por esses conversores.

O fluxograma proposto também permite reavaliar as alternativas disponíveis, de acordo com as necessidades do responsável pelo projeto. Ou seja, é passível de aplicação de sistemáticas de otimização, além de possibilitar análises de sensibilidade, simulações de qualificação e valoração dos atributos.

A metodologia multicritério desenvolvida para ordenar as alternativas permite modelar a experiência de projetos regressos, e ainda adicionar novos requisitos. Essa flexibilidade também permite representar fielmente os valores de projeto, nos quais o decisor baliza as orientações de detalhamento conceitual. Contudo, o sucesso da aplicação dessa metodologia está baseado no adequado modelamento dos aspectos e atributos relevantes para o projeto. Ou seja, o modelo proposto

nesse trabalho pode não representar os valores de outro projeto, e se utilizado sem as devidas modificações, o resultado seria incompatível com os valores dos projetistas.

A aplicação do fluxograma de projeto e da metodologia multicritério em duas plataformas marítimas diferentes permitiu a identificação da solução renovável mais adequada conforme as percepções multicritério de especialistas. Devido à modelagem idêntica de aspectos e atributos, os resultados de ordenamento para plataforma fixa e FPSO foram similares. Porém, as características de localização e tipo de plataforma restringiram a aplicação de diferentes dispositivos conversores. Esse fato validou a necessidade da etapa de avaliação dos dispositivos conversores (terceira etapa), quando são identificados aqueles disponíveis comercialmente para os respectivos fluxos energéticos previamente identificados.

Apesar da baixa densidade energética, as tecnologias de painéis fotovoltaicos e de pequenos aerogeradores tiveram utilidade mais relevante do que as outras fontes alternativas. Os atributos de peso, tamanho, ruído, custo estrutural e facilidade de integração influenciaram positivamente para a valoração da utilidade no modelo aplicado para o estudo de caso. A restrição de instalação de dispositivos conversores na área industrial, devido à característica de atmosfera potencialmente explosiva, concentrou a aplicabilidade dos mesmos nas áreas próximas ao casario e heliporto, fato que desabonou tecnologias como gradiente de salinidade e gradiente térmico.

Os resultados obtidos nos estudos de caso para plataforma fixa e FPSO permite concluir que os fluxos energéticos presentes no mar são extremamente significantes no desenvolvimento de projeto de UEP. O adequado aproveitamento desses fluxos energéticos de alta densidade permite que grande parte, ou totalmente em alguns casos, do consumo elétrico industrial seja suprido por fonte renovável. Ou seja, possibilidade de emissão zero de gás carbônico para geração de eletricidade. Entretanto, a utilização do mar como fonte energética primária deve observar restrições de regulamentações técnicas no entorno da plataforma, além da configuração dos sistemas submarinos e a necessidade de aproximação de barcos e navios para suprimento e descarregamento de petróleo.

Atualmente a restrição mais relevante para instalação de dispositivos conversores no mar é a grande profundidade (lâmina d'água entre 1.000 a 2.500 metros) na instalação de UEP para os novos campos de produção de petróleo e gás

natural. Nessas profundidades o regime de ondas é mais turbulento e a embarcação está mais sujeita a condições ambientais adversas. Esse fato inviabiliza economicamente dispositivos conversores ancorados e inviabiliza tecnicamente eólica *offshore*.

A extrapolação dos resultados obtidos na etapa de determinação do potencial real da plataforma tipo FPSO, para o planejamento de desenvolvimento do pré-sal (cerca de quarenta plataformas), sinaliza uma produção estimada de energia elétrica proveniente de fontes renováveis cerca de 50 MWh diários. Essa estimativa requer a instalação de dois mil dispositivos conversores, com potência total instalada cerca de 6 MW. O custo total estimado para a instalação desses equipamentos seria de U\$15.000.000,00. Ou seja, o esforço para inserção de fontes alternativas de energia elétrica nas novas plataformas custaria cerca de 0,01% do orçamento provisionado para o desenvolvimento dos campos do pré-sal [4]. Contudo, essa energia representaria somente 3% da energia elétrica a ser consumida pelas plataformas marítimas.

Caso seja utilizada a energia das ondas ao redor das plataformas, conforme apresentado para a plataforma fixa, juntamente com a tecnologia OTEC, a estimativa de produção de energia elétrica pode alcançar 1 GWh diários, enquanto seriam necessários instalar três mil conversores. A capacidade instalada total seria cerca de 120 MW, a um custo de U\$200.000.000,00. O desenvolvimento de tecnologias para captação da energia das ondas e da energia dos ventos na área ao redor das plataformas em águas profundas e ultra profundas podem tornar essas UEP independentes de combustíveis fósseis.

A utilização de soluções energéticas de grande porte tipo rede com vários consumidores e geradores de eletricidade deve ser considerada no planejamento de desenvolvimento de grandes campos de produção de petróleo e gás natural, que concentrem mais de uma plataforma. Os ganhos técnicos para esse tipo de utilização abrangem a otimização energética, o aumento de confiabilidade e a diminuição de emissões poluentes.

A integração de fontes renováveis com outras fontes não renováveis já consideradas no projeto de UEP pode conceitualmente aumentar a confiabilidade e continuidade para sistemas críticos de emergência. Ou seja, quando não houver irradiância solar, pode haver vento; na falta dos dois, pode haver ondas; na falta dos três pode haver água; na falta dos quatro pode haver gás natural; na falta dos cinco,

pode haver óleo diesel; e na falta dos seis, existirá a bateria. Contudo, a operação de diversas fontes pode ser mais complexa e requerer controle eletrônico avançado.

A compatibilidade das características técnicas (tensão, tipo de corrente e potência elétrica) dos dispositivos conversores disponíveis no mercado com as características dos consumidores deve ser observada, com intuito de minimizar a necessidade de utilização de transformadores e equipamentos conversores de frequência. Essa análise permite o aumento da confiabilidade devido à diminuição da instalação de equipamentos em série.

O desenvolvimento da tecnologia OTEC para utilização em UEP sinaliza-se atrativo. Esse sistema permite a geração de eletricidade, e aproveitamento de corrente fria para refrigeração de sistemas industriais e ar condicionado. O desenvolvimento de um sistema para captação de águas profundas é atualmente a maior dificuldade para aplicação da tecnologia. Contudo, a grande maioria dos equipamentos utilizados (bombas, turbina e tubulação) pode ser fabricada e adquirida no mercado nacional.

A logística nas áreas marítimas de produção de petróleo e gás natural é uma desvantagem relevante para a utilização e teste de tecnologias renováveis que demandem manutenção intensiva. O custo de transporte via modal aéreo e marítimo é alto, e a viabilidade técnica dessa logística depende das condições meteorológicas.

A indústria nacional ainda não produz dispositivos conversores de energia renovável para aplicação imediata na indústria de petróleo e gás natural, em especial na área de pequenas turbinas eólicas, células fotovoltaicas e de energia das ondas. Para um país com grande irradiação solar, bons ventos e vasta costa marítima, a quantidade de projetos de desenvolvimento de tecnologias verdes ainda é tímida. A necessidade de utilização de conteúdo nacional mínimo na construção de novas plataformas de produção marítimas é uma grande oportunidade para desenvolvimento da indústria verde no Brasil.

A análise da dimensão ambiental da proposta desse trabalho é atenuada pelo grande impacto de uma plataforma de produção de petróleo e gás natural no ambiente marítimo. Ou seja, o impacto ambiental da utilização de tecnologias verdes para produção de eletricidade é irrelevante em ambiente que já exista planta industrial. A quantificação de emissão de CO₂ evitado permite a utilização de créditos de carbono e aplicação em Mecanismos de Desenvolvimento Limpo. A

inserção de fontes renováveis em plataformas de petróleo e gás natural permite a diminuição de consumo de combustíveis fósseis, e conseqüentemente à diminuição de emissão de poluente e maior disponibilidade de hidrocarbonetos para o mercado nacional.

7.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A estimativa dos potenciais teóricos dos fluxos energéticos renováveis e a determinação do potencial real foram elaboradas com dados ambientais abrangentes. A instalação de medidores ambientais e estações meteorológicas nos locais de interesse aumentaria a precisão desses cálculos.

A variedade de soluções energéticas renováveis para aplicação em plataformas marítimas incorre dificuldades de paralelismo e operação de sistemas distribuídos. Estudos para avaliação de controle operacional (frequência e tensão) do funcionamento conjunto de tecnologias diversas para geração de eletricidade são necessários para garantia de atendimento aos consumidores, conforme qualidade requerida pelos consumidores.

O modelo multicritério proposto neste trabalho pode ser avaliado de maneira mais robusta, através de técnicas especializadas em suporte à decisão.

A comparação de modelos e ponderações diferentes dos atributos permitirá análise de sensibilidade para verificação da fiel representação dos valores de projetos de profissionais experientes da indústria de petróleo e gás natural.

A análise do atual arcabouço regulatório para o desenvolvimento de novos campos de produção de hidrocarbonetos, do ponto de vista econômico-ambiental, permitirá a proposição de medidas de estímulo pra iniciativas de instalação de fontes renováveis de energia elétrica nos novos projetos.

A avaliação da cadeia produtiva nacional de equipamentos conversores de energia renovável em eletricidade, em conjunto com associações industriais específicas, permitirá identificar detalhadamente os equipamentos e sistemas mais atrativos para desenvolvimento de fabricação no Brasil. Assim como a utilização de cidadãos locais para composição de corpo técnico especializado para instalação, operação e manutenção desses equipamentos.

8 REFERÊNCIAS

- [1] IEA. Key World Energy Statistics 2010. In: *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2010. Disponível em: <www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf>. Acesso em 12/04/2011.
- [2] IEA. Medium-Term Oil & Gas Markets 2010. In: *INTERNATIONAL ENERGY AGENCY*, 2010. Disponível em: <www.iea.org/papers/2011/mtogm2010.pdf>. Acesso em 20/07/2011.
- [3] Petrobras. Disponível em: <<http://portalpetrobras.petrobras.com.br//minisite/presal/perguntas-respostas/index.asp>>. Acesso em 10/12/2011.
- [4] Petrobras. Plano de Negócios 2010-2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia-corporativa/downloads/pdf/plano-negocios.pdf>>. Acesso em 22/07/2011.
- [5] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. In: *International Panel Climate Change*. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm>. Acesso em 13/10/2010.
- [6] Thomas, J. E.; Triggia, A. A.; Correia, C. A.; Filho, C. V.; Xavier, J. A. D.; Machado, J. C. V.; Filho, J. E. S.; Paula, J. L.; Rossi, N. C. M.; Pitombo, N. E. S.; Gouvea, P. C. V. M.; Carvalho, R. S. e Barragan, R.V. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001.
- [7] K. Malmedal; P. K. Sen e J. Candelaria, Electrical Energy and the Petro-Chemical Industry: Where are we going?, In: *"IEEE 58th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference"*, Toronto, 2011.
- [8] Woody, T., A Solar-Powered Oil Field?, Green Inc. Blog-NYTimes.com, 2009. Disponível em: <<http://greennc.blogs.nytimes.com/2009/09/4/a-solar-powered-oil-field>>. Acesso 14/11/2011.

-
- [9] Leffler, W. L.; Pattarozzi R. e Sterling G. Deepwater: Petroleum Exploration & Production. A non-technical guide. 1 ed. Tulsa: Pennwell Publishing Company, 2003.
- [10] Faltinsen, O.M. Ocean Technology Series – Sea Loads on Ships and Offshore Structures. 1 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [11] Petrobras. Blog fatos e dados. Disponível em: <<http://fatosedados.blogspot.com.br>>. Acesso em 10/12/2011.
- [12] Hyne, N. J. Nonthechnical Guide to Petroleum Geology, Exploration, Drilling and Production. 2 ed. Tulsa: Pennwell Publishing Company, 2001.
- [13] Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. ANP. Regulamento Técnico do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional das Instalações Marítimas de Perfuração e Produção de Petróleo e Gás Natural. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/?dw=603>>. Acesso em 30/11/2011.
- [14] Marquesin, M. e Freitas, T. Relatório de Projeto. Floating Production Storage and Offloading (FPSO). Engenharia Naval e Oceânica, UFRJ. 2011. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2011/NathalieThiago/relat1>. Acesso em 08/04/2012.
- [15] Lora, E. E. S. e Nascimento, M. A. R. Geração Termelétrica: Planejamento, Projetos e Operação. 1 ed. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2004.
- [16] Petrobras. Requisitos para projeto de sistema elétrico. Diretrizes de engenharia de produção E&P. Instalação de produção marítima. Rio de Janeiro, 2011.
- [17] Jordão, D. M. Manual de Instalações Elétricas em Indústrias Químicas, Petroquímicas e de Petróleo. 3 ed. Rio de Janeiro: Qualimark Ed., 2002.
- [18] Oliveira, M. F e Queiroz, A. R. S. Curso de equipamentos elétricos para áreas potencialmente explosivas. Apostila. Santos: Ed. Petrobras, 2008.

-
- [19] Chauvin, D.; Depraz, S. e Buckley, H. Saving Energy in the Oil and Gas Industry. In: *"Record of 2008 SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production"* (SPE 111937), Nice, abril, 2008.
- [20] Twidell, J. e Weir, T. Renewable Energy Resources, 2 ed. Londres: Ed. Taylor and Francis, 2006.
- [21] Boyle, G. Renewable Energy, 2 ed. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [22] Johansson, T. J., Kelly, H., Reddy, A. K. N, Williams, R. H. Renewable Energy: Sources for fuels and electricity, Londres: UN Solar Energy Group of Environment and Development, 1993.
- [23] Jackson, T. Renewable Energy: Prospects for implementation, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993.
- [24] Goldemberg, J. e Lucon, O. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento, 3 ed. São Paulo: Ed. Edusp, 2008.
- [25] Bolaños, J. R. M. Controlador supervisor inteligente para sistemas híbridos eólico-diesel-bateria de pequeno porte. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica). Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, 2007.
- [26] Cox, C.; Duggirala S. e Li Z. Case Studies on the Economic Viability of Renewable Energy. In: *"Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting"*, Montreal, 2006.
- [27] Liu, X.; Chowdhury, A.A.; Koval, D. O. e Islam, S. Reliability Evaluation of a Wind-Diesel-Battery Hybrid Power System. In: *"Proceedings of IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference"*, Florida, 2008.
- [28] Badr, M. A., Abed, K. A., El-Mallah, A. e El Anwar, M. I. Optimal Design of Hybrid Energy Systems with Battery Storage. In: *Anais do 4th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference*, Athens, 2008.
- [29] Rudduck, N.; Khurana, A.; Adelaide, U.; Congreve, M. e Lourens, J. Multi-Objective Decision Making: A Critical Analysis of the Applicability of Renewable Energy Technologies. In: *"Record of 2006 SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition"* (SPE 101770), Adelaide, setembro, 2006.

-
- [30] Wang, L. e Singh, C. PSO-Based Multi-Criteria Optimum Design of a Grid-Connected Hybrid Power System With Multiple Renewable Sources of Energy. In: *"Proceedings of IEEE Swarm Intelligence Symposium"*, Honolulu, 2007.
- [31] Wang, B.; Kocaoglu, D. F. e Yang, J. A Decision Model for Energy Resource Selection In China. In: *"IEEE PICMET 2009 Proceedings"*, Portland, 2009.
- [32] Jeon, J.; Kim, S.; Cho, C.; AHN, J. e Kim, J. Power Control of a Grid-Connected Hybrid Generation System with Photovoltaic/Wind Turbine/Battery Sources. In: *"Proceedings of IEEE 2007 International Conference on Power Electronics"*, Daegu, 2007.
- [33] Broe, A.; Betancur, S.; Connick, R.; Rattinhe, K. V. e Berte, J. The Belgian Antarctic Research station runs on wind and sun. In: *"Proceedings of European Wind Energy Conference & Exhibition EWEC 2008"*, Bruxelas, 2008.
- [34] Arribas, L.; Cano, L.; Cruz, I.; Mata, M. e Llobet, E. PV-wind hybrid system performance: a new approach and a case study. *Renewable Energy*, Vol. 35, Issue 1, pag. 128-137, Ed. Elsevier, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810900295X>>. Acesso em 03/05/2011.
- [35] Gupta, A. Saini, R. P. e Sharma, M. P. Steady-state modeling of hybrid energy system. In: *"Record of IEEE Third International Conference on Electrical Engineering"*. Lahore, 2009.
- [36] Canova, A. Giaccone, L. spertino, F. e Tartaglia, M. Electrical impact of photovoltaic plant in distributed network. In: *"IEEE Transactions on Industry Applications"*, Vol. 45, 2009.
- [37] Kyriakarakos, G.; Mohamed, E.S. e Papadakis, G. Realization and Testing of a Hybrid Renewable Energy Polygeneration System. In: *"Proceedings of 4th European Conference on PV-hybrid systems and Mini-grids"*, Athens, 2008.
- [38] Wakao, S.; Ando, R.; Minami, H.; Shinomiya, F.; Suzuki, A.; Yahagi, M.; Hirota, S.; Ohhashi, Y. e Ishii, A. Performance analysis of the PV/Wind/Wave hybrid power generation system. In: *"Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion"*. Osaka, 2003.

-
- [39] Hajizadeh, A. e Golkar, M. A. Fuzzy neural control of hybrid fuel cell/battery distributed Power generation system. In: IET Renewable Power Generation, 2008.
- [40] Lagorse, J.; Simões, M. G. e Miraoui, A. A multiagent Fuzzy-Logic based energy management of hybrid systems. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 45, No. 6, 2009.
- [41] Psychogiopoulos, E.; Tsikalakis, A. and Hatziargyriou, N. Short-Term Scheduling of Desalination Loads in Hybrid Systems. Disponível em: <http://www.storiesproject.eu/docs/Scheduling_of_Desalination_Plants_in_HHybri_Systems.pdf>. Acessado em: 05/03/2009.
- [42] Tsikalakis, A. and Hatziargyriou, N. A software for the short-term operation of isolated power systems with high Renewable Energy Sources penetration. In: *Proceedings of 4th European Conference on PV-hybrid systems and Mini-grids*, Athens, 2008.
- [43] Lu, M.; Chang, C.; Lee, W. and Wang, L. Combining the Wind Power Generation System with Energy Storage Equipment. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 45, No. 6, 2009.
- [44] Hirose, K.; Murai, H.; Fukui, A. e Matsumoto, A. Development of multiple power quality supply system. In: *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 5, Issue 5, Pag. 523-530, 2010.
- [45] Giacomini, M.; Grillo, S. Marigo, L.; Massucco, S.; Torti, C. e Silvestro, F. Coordinated micro-generation and load management for energy saving policies. In: *IEEE Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, Guthenburg, 2010.
- [46] HOMER. Energy Modeling Software for Hybrid Renewable Energy Systems. Disponível em: <<http://www.homerenergy.com> Acesso em 04/10/2009>.
- [47] TRNSYS. Transient System Simulation Tool for Hybrid Systems. Disponível em: <<http://www.trnsys.com>>. Acesso em 12/11/2009.
- [48] Filho, E. N., "Perspectivas para o Aproveitamento Econômico da Energia Eólica nas Instalações de Produção de Petróleo e Gás Natural no Rio Grande do Norte", IV Seminário Petrobras de Conservação de Energia, Rio de Janeiro, 1997.

-
- [49] UNFCCC CDM Executive Board, Petrobras Wind Power Project for Oil Pumping at Macau, Clean Development Mechanism - Simplified Project Design Document for Small-Scale Project Activities (SSC-CDM-PDD) Brazil, 2006. Disponível em: <http://www.dnv.com/focus/climate_change/Upload/PDD%20Macau%2027_04.pdf>. Acesso em 23/01/2011.
- [50] Helman, C., Oil from the Sun, FORBES.com Magazine, 2011. Disponível em: <<http://www.forbes.com/forbes/2011/0425/features-glasspoint-greenhouses-green-energy-oil-from-sun.html>>. Acesso em: 18/02/2011.
- [51] Barrufet, M. A. e Mareth, B. C. Evaluation of Renewable Energy as a Source of Power for Desalination of Remote-Oilfield Brines. In: *"Records of Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference"*, Cartagena de Indias, 2009.
- [52] Rüther, R., Silva, A. J. G., Montenegro, A. A., Salamoni, I. T. e Araújo, R. G. The Petrobras 45.5kWp, grid-connected PV system: a comparative study of six thin-film module types operating in Brazil. In: *Records of 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2002*, New Orleans, 2002.
- [53] Galarza, R. G.; Grajales, H. R. J. e Villamar, J. M. H., Hybrid electrical generation stand-alone systems application in offshore satellite oil platforms in Mexico. In: *"Records of 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2008"*, San Diego, 2008.
- [54] Oliveira, M. F.; Saidel, M. A.; Queiroz, A. R. S. e Filho, E. N. Renewable Sources at Offshore Petroleum and Gás Production Platforms. In: *"IEEE 59th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference"*, Nova Orleans, 2012.
- [55] Bittencourt, C. e Flinn, J. The first experiences of certification of marine energy converters. In: *"Records of Offshore Technology Conference, 2010"*. Houston, 2010.
- [56] Pacheco, J. M. L.; Santos, A. e Junior, W. E. F. Análise de Sustentabilidade em Instalações de Produção de Petróleo. In: *"Records of Rio Oil & Gás Expo and Conference, 2012"*. Rio de Janeiro, 2010.
- [57] M.M.M. Daud, Nor, N. B. M e Ibrahim, T. Novel Hybrid Photovoltaic and Thermoelectric Panel. In: *"2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2012)"*, Melaka, 2012.

-
- [58] Feucht, D. L. Solar Thermoelectric Technology. Disponível em: <http://www.analogzone.com/col_0305.htm>. Acesso em 12/09/2012.
- [59] CEFET-MG. Disponível em: <<http://www.cefetmg.br/noticias/2009/06/noticia0043>>. Acesso em 12/09/2012.
- [60] Silva, J. C. e Hoffmann, R. O uso do ciclo Stirling no aproveitamento de fontes térmicas. Disponível em: <http://coralx.ufsm.br/cenergia/arquivos_discussao/stirling.pdf>. Acesso em 12/09/2012.
- [61] Minassians, A. D. e Sanders, S. R. Stirling Engines for Distributed Low-Cost Solar-Thermal-Electric Power Generation. In: Journal of Solar Energy Engineering, ASME, 2011. Disponível em: <http://power.eecs.berkeley.edu/publications/minassians_Stirling_Engines_for_Distributed_Solar.pdf>. Acesso em 19/06/2012.
- [62] Solar Terra. Energia Solar Fotovoltaica – Guia Prático. Disponível em: <<http://www.solarterra.com.br>>. Acesso em 10/04/2010.
- [63] Da Silva, A. J. G. Investimento de empresas de petróleo em energia fotovoltaica: o caso da BP Solar e motivações da Petrobras. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, 2006.
- [64] Fabiana, K. O. M. V. Estimativa do índice de nacionalização dos sistemas fotovoltaicos no Brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Planejamento Energético). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2009.
- [65] WWEA. Quarterly Bulletin March 2012. In: *WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION*, 2012. Disponível em: <http://www.wwindea.org/webimages/WWEA_Quarterly_Bulletin.pdf>. Acesso em 12/06/2012.
- [66] Manwell, J. F., McGowan J. G. e Rogers, A. L. Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, 1 ed. Massachusetts: Ed. Wiley, 2002.

-
- [67] Cavaliere, C. A. C e Esposte J. L. D. Análise de novos equipamentos e tecnologias em sistemas elétricos para UEPS. Rio de Janeiro, Ed. Petrobras, 2011.
- [68] Varão, L. R. Avaliação de desempenho de um sistema de geração eólica integrada a um sistema de potência utilizando algoritmos genéticos. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, 2008.
- [69] WEC. 2010 Survey of Energy Resources. In: *World Energy Council*, 2012. Disponível em: <<http://www.worldenergy.org/publications/3040.asp>>. Acesso em 04/06/2012.
- [70] Gerstandt, K.; Peinemann, K-V.; Skilhagen, E. S.; Thorsen, T. e Holt. T. Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant. In: “*11th Aachen Membrane Colloquium*”, Aachen, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916408000325>>. Acesso em 19/06/2012.
- [71] Machado, M. B. Avaliação do Processo de Eletrodialise Reversa no Tratamento de Efluentes de Refinaria de Petróleo. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2008.
- [72] Mitsui, T., Ito F., Seya, Y. e Nakamoto, Y. Outline of 100kW OTEC pilot plant in the Republic of Nauru. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 9, Setembro, 1983.
- [73] Vining, J. G. e Muetze, A. Economic factors and incentives for Ocean Wave Energy Conversion. In: *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 54, march-april, 2009.
- [74] Cohen, R. An Overview of Ocean Thermal Energy Technology, Potential Market Applications, and Technical Challenges. In: “*Record of Conference Papers 2009 Offshore Technology Conference*”, Houston, 2009.
- [75] Marti, J. A., Plocek, T. J., Laboy, M. A. e Ruiz, O. E. Ocean Thermal Energy Conversion: Strategies for system integration and implementation using commercially available components and technology. In: “*Record of Conference Papers 2010 Offshore Technology Conference*”, Houston, 2010.

-
- [76] Fachina, V. e Melo A. The new OTEC system – a numerical simulation. Anais do ASME 2012, 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rio de Janeiro, 2012.
- [77] Moreira, A. P. Controle de Vazão de Biogás com Baixa Pressão para Produção Descentralizada de Eletricidade. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Ceará, UFCE, 2011.
- [78] Ecogeo. Micro turbina a gás. Disponível em: <http://www.ecogeo.com.br/parceria_entre_biolatina_e_biosol_traz_nova_tecnologia_de_microturbina_para_o_brasil.html>. Acesso em 19/06/2012.
- [79] Batista, J. C. Microgeração de Energia Elétrica (abaixo de 100kW) Utilizando Turbina Tesla Modificada. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista, 2009.
- [80] TGM Turbinas. Micro turbina a vapor. Disponível em: <http://www.grupotgm.com.br/arquivos/produtos/TGM-TURBINE-TG_pt.pdf>. Acesso em 19/06/2012.
- [81] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance, “Studies Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 167-179, 1992.
- [82] Betta Hidroturbinas. Micro turbina hidráulica. Disponível em: <<http://www.bettahidroturbinas.com.br/produto/mch-banki>>. Acesso em 10/09/2012.
- [83] Petrobras. Gerenciamento Automatizado e Unificado das Diretrizes para Projetos de Instalações do E&P – GAUDI. Rio de Janeiro, 2011.
- [84] Amarante, O. A. C.; Brower, M.; Zack, J. e Sá, A. L. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro&cid=1>>. Acesso em: 05/03/2012.
- [85] Colle, S. e Pereira, E. B. Atlas de irradiação solar do Brasil. Brasília, 1998. Disponível em: <http://www.lepten.ufsc.br/pesquisa/solar/atlas_de_irradiacao.pdf>. Acesso em: 05/03/2012.

-
- [86] Ramos, M. B. Utilização da Abordagem Multicritério para Priorização do Portfólio de Projetos de Investimento. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Administração). IBMEC, 2010.
- [87] Kim, T.; Kwak, S. e Yoo, S. Applying multi-attribute utility theory to decision making in environment planning: a case study of the electric utility in Korea. In: *Journal of Environment Planning and Management*, v. 41, p. 597-609, 1998.
- [88] Malczewski, J. *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, 1 ed. Nova Iorque: Ed. John Wiley and Sons, 1999.
- [89] Hwang, C. L. e K. Yoon. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey*, 1 ed. Nova Iorque: Ed. Springer-Verlag, 1981.
- [90] Mussoi, F. L. R. Modelo de Decisão Integrado para a Priorização Multiestágio de Projetos de Distribuição Considerando a Qualidade de Energia Elétrica. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 2012.
- [91] Ensslin, L.; Montibeller, G. H. e Noronha, S. M. Apoio à decisão: Metodologia para Estruturação de Problemas e Avaliação Multicritério de alternativas, 1 ed. Florianópolis: Ed. Insular, 2001.
- [92] Petrobras. Atividade de Produção de Gás e Condensado no Campo de Mexilhão, Bacia de Santos, São Sebastião, 2010. Disponível em: <http://www.saosebastiao.sp.gov.br/finaltemp/proj_mexilhao/II.2.1%20ao%20.3_caracterizacaoda_atividade.pdf>. Acesso em: 05/03/2012.
- [93] U.S. Department of Commerce. Earth System Research Laboratory. Disponível em: www.esrl.noaa.gov. Acesso em: 05/03/2012.
- [94] Pianca, C.; Mazzini, P. L. F. e Siegle, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. In: *Brazilian Journal of Oceanography*, Vol. 58, No1, São Paulo, 2010. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-87592010000100006&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>. Acesso em: 05/03/2012.
- [95] Silentwind turbines. Soluções híbridas com turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos. Disponível em: <<http://www.silentwindgenerator.com/index.php>>. Acesso em 19/06/2012.

-
- [96] Ocean Power Technologies. Dispositivos conversores de energia das ondas. Disponível em: <<http://www.oceanpowertechnologies.com>>. Acesso em 20/11/2012.
- [97] Petrobras. Relatório de Impacto Ambiental – RIMA. Atividade de Perfuração, Produção e Escoamento de Gás e Condensado, no Campo de Mexilhão e Adjacências, Bacia de Santos – SP. Disponível em: <http://www.ilhabela.org/mexilhao/mexilhao_maritimo_rima.pdf>. Acesso em 28/11/2011.

APÊNDICE A: NORMAS TÉCNICAS

As normas técnicas nacionais que orientam o projeto e construção de plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural estão listadas abaixo:

- INMETRO Portaria 179/2010 – Certificação de equipamentos para uso em atmosferas explosivas;
- NORMAM, Normas da Autoridade Marítima Brasileira – DPC;
- NR-10 – Segurança em Instalações Elétricas e Serviços em Eletricidade;
- NR-17 – Ergonomia;
- NR-26 – Sinalização de Segurança;
- NR-30 – Segurança e Saúde no Trabalho Aquaviário;
- ABNT NBR IEC 61892-2 - Unidades marítimas fixas e móveis – Instalações elétricas Parte 2: Projeto de sistemas elétricos;
- ABNT NBR IEC 60079 - Atmosferas Explosivas (Série).

As normas técnicas internacionais que orientam o projeto e construção de plataformas marítimas de produção de petróleo e gás natural estão listadas abaixo:

- API-RP-14F *Design Installation and Maintenance of Electrical Systems for Fixed and Floating Offshore Petroleum Facilities for Unclassified and Class 1, Division 1 and Division 2 Locations*;
- API-RP-505 *Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1 and Zone 2*;
- API RP 2003 *Protection Against Ignitions Arising out of Static, Lightning, and Stray Currents*;
- ASTM F 1166-07 *Standard Practice for Human Engineering Design for Marine Systems, Equipment, and Facilities*;
- IEC 60034 *Rotating electrical machines, parts 1, 12, 17, 25*;
- IEC 60073 *Basic and Safety Principles for Man-Machine Interface, Marking and Identification Coding Principles for Indicators and Actuators*;
- IEC 60092 *Electrical installations in Ships, parts 325, 376, 401, 502*;

-
- IEC 60146 *Transformers and reactors for semiconductor convertors*;
 - IEC 60331 *Tests for Electric Cables under Fire Conditions - Circuit Integrity*;
 - IEC 60332-1 *Tests on electric and optical fiber cables under fire conditions*, parts 1, 2, 3;
 - IEC 60439-1 *Low-voltage switchgear and controlgear assemblies*;
 - IEC 60533 *Electrical and electronic installations in ships – Electromagnetic compatibility*;
 - IEC 60076-11 *Dry-type power transformers*;
 - IEC 60754 *Test on gases evolved during combustion of electric cables*, parts 1, 2;
 - IEC 60896-22 *Stationary lead-acid batteries - Valve regulated types requirements*;
 - IEC 60947 *Low voltage switchgear and controlgear*;
 - IEC 61034-2 *Measurement of smoke density of cables burning under defined conditions – Test procedure and requirements*;
 - IEC 61378-1 *Convertor Transformers - Transformers for Industrial Applications*;
 - IEC 61892 *Mobile and fixed offshore units – Electrical installations*, parts 1, 2, 3, 4, 6, 7;
 - IEC 62040 *Uninterruptible Power Systems (UPS)*, parts 1-2, 2, 3;
 - IEC 62271-200 *High-voltage switchgear and controlgear - AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV*;
 - IEEE 242 *Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*;
 - IEEE 519 *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*;
 - IEEE 1584 *Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*;
 - IEEE C37.20.2 *Standard for Metal-Clad Switchgear*;
 - IEEE C37.91 *Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers*;
 - IEEE C37.96 *Guide for AC Motor Protection*;
 - IEEE C37.102 *Guide for AC Generator Protection*;

-
- IEEE C57.110 *Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*;
 - IMO MODU CODE - *Code for the Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Unit*;
 - ISA RP 12.2.02 *Recommendations for the Preparation, Content, and Organization of Intrinsic Safety Control Drawings*;
 - ISO 8528-5 *Reciprocating Internal Combustion Engine Driven Alternating Current Generating Sets - part 5 – Generating Sets*;
 - NEMA MG-1 *Motors and Generators*;
 - NFPA 110 *Standard for Emergency and Standby Power Systems*;
 - NFPA 780 *Standard for the installation of lightning protection systems*;
 - NFPA 70E *Standard for Electrical Safety in the Workplace*.

APÊNDICE B: CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

A tabela apresentada neste Apêndice B foi baseada em [20].

Sistema	Períodos principais	Principais variáveis	Relação de potência	Característica	Maturidade tecnológica
Insolação direta	12h	Irradiância do raio solar G (Wm^{-2}) Ângulo do raio com o plano vertical θ_z	$P \propto G \cos \theta_z$ $P_{\max} = 1 kWm^{-2}$	Ocorre somente durante o dia	Consolidado e em constante avanço
Insolação difusa	12h	Presença de nuvens ou poluição atmosférica	$P \ll G$ $P \leq 300 Wm^{-2}$	Mudança significativa de energia ao longo do dia	Consolidado e em constante avanço
Biocombustível	sazonal	Condição do solo, insolação, água, espécies de plantas, resíduos	Energia armazenada $\sim 10 MJkg^{-1}$	Diversos tipos de substâncias químicas e planta de origem. Influenciado pelo tipo de agricultura e fatores climáticos. Tipo de energia armazenável.	Consolidado e em constante avanço
Vento	24h, sazonal	Velocidade do vento u Altura da nacele em relação ao solo z Altura do anemômetro h	$P \propto u^3$ $u_z/u_h = (z/h)^b$	Grande variabilidade de energia $b \sim 0,15$	Consolidado e em constante avanço
Ondas	24h, sazonal	Altura significativa da onda H_s Período da onda T	$P \propto H^2 T$	Alta densidade relativa de potência $\sim 50 kWm^{-1}$	Experimental
Hidráulico	24h, sazonal	Altura do reservatório de água H Fluxo de água Q	$P \propto HQ$	Tecnologia amplamente utilizada	Consolidada
Maré	12h 25min fases da Lua	Variação da maré R Área represada A Comprimento do estuário L Profundidade h da corrente da maré Pico de corrente u_0 Densidade da água do mar $\rho (\sim 1000 \text{ x ar})$	$P \propto R^2 A$ $P \propto \rho u^3$	Depende de possibilidade de instalação do dispositivo conversor	Consolidada e em avanço para aplicações específicas
Conversão de energia térmica oceânica	Constante	Diferença de temperatura entre a água da superfície e a água profunda ΔT	$P \propto (\Delta T)^2$	Alguns locais na zona tropical tem $\Delta T \sim 20^\circ C$, potencialmente captável mas com baixa eficiência	Experimental

APÊNDICE C: DESCRIÇÃO E QUALIFICAÇÃO DOS ATRIBUTOS

As tabelas apresentadas neste Apêndice C foram elaboradas como fruto do desenvolvimento da metodologia proposta, com base na experiência e boas práticas de engenharia e projeto de plataformas de produção de petróleo e gás natural.

ELÉTRICO	Descrição	Péssimo	Ruim	Moderado	Bom	Ótimo
Nível de potência individual	Potência elétrica instalada individual do dispositivo conversor	0 a 50 W	51 a 200 W	201 a 1000 W	1,001 a 1000kW	acima de 1000kW
Nível de potência total	Potência elétrica instalada de solução integrada de vários dispositivos	1 a 50 W	51 a 200 W	201 a 1000 W	1,001 a 1000kW	acima de 1000kW
Continuidade	Capacidade de manter a geração elétrica durante um dia	0 a 4 horas	5 a 8 horas	9 a 12 horas	13 a 20 horas	21 a 24 horas
Variação na geração	Capacidade de manter a geração elétrica num mesmo patamar	61 a 100% de variação	31 a 60 % de variação	11 a 30% de variação	1 a 10% de variação	fixo
Qualidade frequência	Resposta a variações de frequência em relação à nominal	31 a 100%	16 a 30%	11 a 15%	6 a 10%	0 a 5%
Qualidade tensão	Resposta a variações de tensão em relação à nominal	32 a 100%	17 a 30%	12 a 15%	7 a 10%	1 a 5%
Sistema emergência	Compatibilidade para atender uma carga de emergência (tensão e tipo de corrente)	incompatível	com eletrônica de potência e transformador	com eletrônica de potência	com transformador	sem acessórios
Sistema essencial	Compatibilidade para atender uma carga essencial (tensão e tipo de corrente)	incompatível	com eletrônica de potência e transformador	com eletrônica de potência	com transformador	sem acessórios
Sistema normal	Compatibilidade para atender uma carga normal (tensão e tipo de corrente)	incompatível	com eletrônica de potência e transformador	com eletrônica de potência	com transformador	sem acessórios

ESTRUTURAL	Descrição	Péssimo	Ruim	Moderado	Bom	Ótimo
Peso	Peso individual do dispositivo	acima de 5001 kg	251 a 500 kg	101 a 250 kg	21 a 100 kg	0 a 20 kg
Dimensão	Tamanho individual do dispositivo em metros cúbicos	acima de 10 m ³	3 a 10 m ³	1 a 3 m ³	0,6 a 1 m ³	0 a 0,5 m ³
Localização	locais com possibilidade de instalação na plataforma	1 local	2 locais	3 locais	4 locais	mais de 4 locais
Reforço	Necessidade de reforço estrutural	inserção de vigas e colunas	rearranjo estrutural	suporte complexo	suporte simples	nenhum
Relação potência / peso	Relação entre a potência e o peso individual do dispositivo	0 a 5 W/kg	6 a 100 W/kg	101 a 300 W/kg	301 a 1000 W/kg	acima de 1000 W/kg

TÉCNICO	Descrição	Péssimo	Ruim	Moderado	Bom	Ótimo
Operação	Facilidade e flexibilidade de operação	inflexível e operação complexa	inflexível e operação fácil	flexível e operação complexa	flexível e operação pouco complexa	muito flexível e fácil operação
Manutenção	Frequência e facilidade de manutenção	muito frequente e complexa	frequente e complexa	frequente e simples	pouco frequente e complexa	pouco frequente e simples
Assistência técnica	Existência de assistência técnica rápida e nacional	remota e estrangeira	local e estrangeira	remota e nacional	rápida e nacional	imediata e nacional
Conteúdo nacional	Percentual do equipamento fabricado e montado no Brasil	Fabricado e Montado no Exterior	Fabricado no Brasil e Montado no Exterior	Montado no Brasil	Algumas peças fabricadas no Brasil e montado no Brasil	fabricado e montado no Brasil
Sobressalentes	Facilidade do processo de compra	importado	importado mas com estoque no Brasil	nacional sem estoque	nacional e com estoque	nacional e com estoque imediato
Atm Ex	Certificado para utilização em área potencialmente explosiva	não tem	em processo de certificação	somente uma marca tem certificação	poucas marcas tem certificação	tem certificação
Maturidade tecnológica	Grau de maturidade da tecnologia	experimental acadêmico	protótipo	teste em aplicações industriais	maduro	maduro e com aplicações industriais
Densidade energética	Nível de densidade energética do dispositivo W/m ²	0 a 1 kW/m ²	1,001 a 5 kW/m ²	5,001 a 10 kW/m ²	10,001 a 50 kW/m ²	acima de 50 kW/m ²
Sistemas auxiliares	Necessidade de sistemas auxiliares	necessidade de conversor eletrônico e sistema de bombeamento	necessidade de sistema de bombeamento	necessidade de conversor eletrônico e transformador	necessidade de conversor eletrônico	sem necessidade
Previsibilidade	Previsibilidade na geração	0 a 10%	11 a 20%	21 a 40%	41 a 60%	acima de 60%
Risco segurança	Potencialidade de dano operacional à plataforma devido a falha do equipamento	imenso	grande	moderado	pequeno	nulo
Integração	Possibilidade de trabalhar com vários módulos de mesma natureza	não integra	integra parcialmente	integra com grandes adaptações	integra com médias adaptações	não precisa de adaptações
Fluxo energético	Dependência do fluxo em relação aos processos industriais	depende totalmente	depende muito	depende moderadamente	depende pouco	independente

ECONÔMICO	Descrição	Péssimo	Ruim	Moderado	Bom	Ótimo
Custo estrutural	Valor de custo estrutural	acima de U\$30.000,00	U\$15.000,01 a U\$30.000,00	U\$5.000,01 a U\$15.000,00	U\$1.000,01 a U\$5.000,00	até U\$1.000,00
Custo instalação	Valor de custo de instalação	acima de U\$30.000,01	U\$15.000,01 a U\$30.000,00	U\$10.000,01 a U\$15.000,00	U\$5.000,01 a U\$10.000,00	até U\$5.000,00
Custo manutenção	Valor de custo de manutenção anual	acima de U\$2.000,01	U\$1.500,01 a U\$2.000,00	U\$1.000,01 a U\$1.500,00	U\$500,0 a U\$1.000,00	até U\$500,00
Custo operação	Valor de custo de operação anual	acima de U\$2.000,01	U\$1.500,01 a U\$2.000,00	U\$1.000,01 a U\$1.500,00	U\$500,0 a U\$1.000,00	até U\$500,00
Vida útil	Vida útil estimada do dispositivo conversor	até 1 ano	1 a 5 anos	6 a 10 anos	11 a 15 anos	acima de 16 anos
Relação custo/pot	Relação entre o custo instalação e a potência instalada	acima de 10.000,01 U\$/kW	4.000,01 a 10.000,00 U\$/kW	2.000,01 a 4.000,00 U\$/kW	1.000,01 a 2.000,00 U\$/kW	até 1.000,00 U\$/kW
Relação custo manut e op / pot	Relação entre a soma dos custos de manutenção e operação com a potência instalada	acima de 1.000,01 U\$/kW	400,01 a 1.000,00 U\$/kW	200,01 a 400,00 U\$/kW	100,01 a 200,00 U\$/kW	até 100,00 U\$/kW

AMBIENTAL	Descrição	Péssimo	Ruim	Moderado	Bom	Ótimo
Ruído	Nível de ruído do dispositivo em decibéis	acima de 90 dB	71 a 90 dB	51 a 70 dB	31 a 50 dB	0 a 30 dB
Resíduos	Quantidade de resíduos gerados em metro cúbico	acima de 6 m ³	4 a 5 m ³	2 a 3 m ³	1 a 2 m ³	0 m ³
Risco ambiental	Potencialidade de risco ambiental devido a falha do equipamento	gravíssimo	grave	moderado	leve	nulo

APÊNDICE D: CÁLCULOS

Nesse apêndice estão detalhados os cálculos mais relevantes deste trabalho, apresentados de forma cronológica e referenciados pela Lista de Tabelas.

Tabela 11:

Fluxos energéticos renováveis	Dado	Fórmula	Potencial Teórico (kW)
Irradiação solar	5,478 kWh/m ²	área total plataforma * dado / 12h	1.534
Vento	8 m/s	densidade do ar * dado ³ * área perfil plataforma	378
Vento adjacências		densidade do ar * dado ³ * área perfil adjacências plataforma	630.000
Ondas	3,5 kW/m	dado * comprimento plataforma	210
Ondas adjacências		dado * comprimento adjacências plataforma	70.000
Gradiente salino	10 m ³ /s	estimativa baseada em protótipos	100
Gradiente salino adjacências		estimativa baseada em protótipos	9.900
Gradiente térmico oceânico		estimativa baseada em usina existente	10
Gradiente térmico oceânico adjacências	$\Delta T=5^{\circ}\text{C}$	estimativa baseada em usina existente	190
Efluente sanitário	40 m ³ /dia	dado * 0,35 (produção biogás) * 1,25 (kWh) / 24 horas	0,75
Restos alimentares	40 kg/dia	dado * 1,43 (produção biogás) * 1,25 (kWh) / 24 horas	3,1
Água efluente líquida	800 m ³ /h	7,6 * (dado / 3600) * altura main deck e descarte	25,3
Plataforma			2.261
TOTAL			712.351

Tabelas 14, 15 e 20:

O custo de cada painel fotovoltaico foi estimado em US\$430,00; de cada bóia em US\$80.000,00; da turbina hidráulica em US\$10.000,00; de cada pequeno aerogerador em US\$1.600,00 e de cada médio aerogerador em US\$7.000,00.

Tabela 16:

Fluxo energético	Fórmula	Energia diária (kWh)	Energia anual (kWh)
Eólica	potência turbina * 24 horas * coeficiente de potência (0,33) * quantidade de equipamentos	13	4.867
Fotovoltaica	Irradiação solar * eficiência conversão (0,147) * área	192	70.247
Hidráulica	potência turbina * 24 horas	480	175.200
Ondas	potência conversor * fator de capacidade * 24 horas * quantidade equipamentos	21.600	7.884.000
Plataforma		686	250.314
Total		22.286	8.384.628

Tabela 17:

Fluxos energéticos renováveis	Dado	Fórmula	Potencial Teórico (kW)
Irradiação solar	5,478 kWh/m ²	área total plataforma * dado / 12h	7.888
Vento	8 m/s	densidade do ar * dado ³ * área perfil plataforma	2.016
Vento adjacências		densidade do ar * dado ³ * área perfil adjacências plataforma	630.000
Ondas	3,5 kW/m	dado * comprimento plataforma	1.120
Ondas adjacências		dado * comprimento adjacências plataforma	70.000
Gradiente salino	10 m ³ /s	estimativa baseada em protótipos	533
Gradiente salino adjacências		estimativa baseada em protótipos	9.467
Gradiente térmico oceânico		estimativa baseada em usina existente	75
Gradiente térmico oceânico adjacências	ΔT=5°C	estimativa baseada em usina existente	225
Efluente sanitário	40 m ³ /dia	dado * 0,35 (produção biogás) * 1,25 (kWh) / 24 horas	1
Restos alimentares	40 kg/dia	dado * 1,43 (produção biogás) * 1,25 (kWh) / 24 horas	3
Água efluente líquida	300 m ³ /h	7,6 * (dado / 3600) * altura main deck e descarte	9
Plataforma			11.645
TOTAL			721.337

Tabela 21:

Fluxo energético	Fórmula	Energia diária (kWh)	Energia anual (kWh)
Fotovoltaica	Irradiação solar * eficiência conversão (0,147) * área	588	214.681
Eólica pequeno	potência turbina * 24 horas * coeficiente de potência (0,33) * quantidade de equipamentos	13	4.867
Eólica Médio	potência turbina * 24 horas * coeficiente de potência (0,33) * quantidade de equipamentos	333	121.667
Hidráulica	potência conversor * fator de capacidade * 24 horas * quantidade equipamentos	240	87.600
Total		1.175	428.814

APÊNDICE E: DESCRIÇÃO TÉCNICA DE DISPOSITIVOS CONVERSORES

A tabela apresentada neste Apêndice E foi elaborada com base em dados de mercado para os conversores disponíveis à época desse estudo (ano 2012).

Fluxos energéticos renováveis	Conversores	Potência	Tensão	Tipo corrente	Inversor	Tamanho (m)	Peso (kg)	Custo (US\$)	Índice de nacionalização	Maturidade tecnológica
Irradiação solar	Termelétrica	400 W	220 V	CA	Não	10x10x3	400	16.000	Médio	Médio
	Stirling	300 W	12 - 24 V	CC	Não	0,6x0,8x0,5	50	15.000	Baixo	Baixo
	Célula fotovoltaica	245 W	12-24 V	CC	Não	1,66x1,00x0,05	21	430	Baixo	Alto
Vento	aerogerador pequeno porte	400 W	12-24 V	CC	Não	0,74x0,37x0,22	10	1.600	Baixo	Alto
	aerogerador médio porte	10 kW	220 V	CA	Sim	1,64x1,5x0,99	100	5.000	Baixo	Alto
	aerogerador <i>offshore</i>	1,5 a 7 MW	qualquer em kV	CA	Sim	164x15x100	138.000	63.000.000	Baixo	Médio
Ondas	Ponto de absorção	0,3- 150kW	5 a 300 V	CA e CC	Não	4x0,6x0,6	10.000	80.000	Baixo	Médio
	Perfil de onda	250-750kW	480 V	CA	Não	150x3,5x3,5	700.000	4.133.333	Baixo	Baixo
Gradiente salino	turbina a vapor	2 kW	110 V	CA	Não	10x10x3	500	6.000.000	Baixo	Baixo
Gradiente térmico oceânico	OTEC	10MW	480 V	CA	Não	25x25x35	15.000.000	90.000.000	Médio	Baixo
Efluente sanitário	Microturbina a gás	30 kW	480 V	CA	Não	0,76x1,5x1,8	600	80.000	Baixo	Médio
Restos alimentares	Microturbina a gás	30 kW	480 V	CA	Não	0,76x1,5x1,9	600	80.000	Baixo	Médio
Água efluente vapor	turbina a vapor	45 kW	480 V	CA	Não	2x1,5x2	600	60.000	Baixo	Médio
Água efluente líquida	Microturbina hidráulica	7-500 kW	12 a 480 V	CA e CC	Não	4x2x1,5	500	10.000	Alto	Alto

APÊNDICE F: CARGAS ELÉTRICAS ALIMENTADAS POR BATERIAS EM PLATAFORMA FIXA E FPSO

As tabelas apresentadas neste Apêndice F foram elaboradas com base na experiência e boas práticas de engenharia e projeto de plataformas de produção de petróleo e gás natural.

Lista de cargas típicas de plataforma fixa com sistema de baterias				
Tipo da Carga	Tensão	Potência		
		kW	kVAr	kVA
Sistema de navegação	24 V _{DC}	7	4	8
Controle do gerador auxiliar	24 V _{DC}	9	5	10
Sistemas periféricos do gerador auxiliar	24 V _{DC}	10	6	12
Controle Bomba de Incêndio A	24 V _{DC}	3	2	4
Controle Bomba de Incêndio B	24 V _{DC}	4	3	5
Sistema periférico do gerador A	125 V _{DC}	13	8	15
Sistema periférico do gerador B	125 V _{DC}	13	8	15
Sistema periférico do gerador C	125 V _{DC}	13	8	15
Iluminação de emergência A	220 V _{DC}	85	53	100
Iluminação de emergência B	220 V _{DC}	72	45	85
Sistema de controle de processo industrial e telecom A	220 V	157	118	196
Sistema de controle de processo industrial e telecom B	220 V	140	106	176
Processo industrial normal	220 V	31	23	38

Lista de cargas típicas de plataforma FPSO com sistema de baterias				
Tipo da Carga	Tensão	Potência		
		kW	kVAr	kVA
Sistema de navegação	24 V _{DC}	5	3	6
Controle do gerador de emergência	24 V _{DC}	2	1	2
Sistemas partida do gerador de emergência	24 V _{DC}	1	0	1
Controle do gerador auxiliar	24 V _{DC}	2	1	2
Sistemas partida do gerador auxiliar	24 V _{DC}	1	0	1
Controle bomba de incêndio A	24 V _{DC}	1	1	2
Controle bomba de incêndio B	24 V _{DC}	1	1	2
Sistema de partida da bomba de incêndio A	24 V _{DC}	1	1	2
Sistema de partida da bomba de incêndio B	24 V _{DC}	1	1	2
Iluminação de emergência A	220 V _{DC}	31	20	37
Iluminação de emergência B	220 V _{DC}	32	24	40
Sistema de controle de processo industrial e telecom A	220 V	213	161	267
Sistema de controle de processo industrial e telecom B	220 V	213	160	266
Processo industrial normal	220 V	282	212	352

APÊNDICE G: AVALIAÇÃO DE OFERTA E DEMANDA PARA PLATAFORMA FIXA E FPSO

Plataforma Fixa						
Fluxos energéticos renováveis	Dispositivo Conversor	Local Físico	Quantidade	Potência	Tensão	Ponto Elétrico e Acessórios
Irradiação solar	Termelétrica	"Topdeck" e "Helideck" - 266m ²	1	400 W	220 V	Normal e Essencial 220 V - sem acessórios Normal 480 V - transformador Essencial e Emergência CC - retificador
	Stirling	"Topdeck" e "Helideck" - 266m ²	4	300 W	12 - 24 V	Essencial e Emergência CC - sem acessórios Normal e Essencial CA - inversor
	Célula fotovoltaica	"Topdeck" e "Helideck" - 266m ² Suspenso "Helideck" - 35m ²	136	245 W	12-24 V	Essencial e Emergência CC - sem acessórios Normal e Essencial CA - inversor
Vento	Aerogerador pequeno porte	Torre comunicação Vértices 2 - Face Norte	6	400 W	12-24 V	Essencial e Emergência CC - sem acessórios Normal e Essencial CA - inversor
	Aerogerador médio porte	Torre comunicação	2	10 kW	220 V	Normal e Essencial 220 V - sem acessórios Normal 480 V - transformador Essencial e Emergência CC - retificador
	Aerogerador <i>offshore</i>	Em forma de quadrado ao redor da plataforma, com distância mínima de 500 m	4	2,3 MW	qualquer em kV	Normal e Essencial 480 V - transformador Normal 4,16 kV - transformador
Ondas	Ponto de absorção	Dispostos de forma dispersa ao redor da plataforma, com distância mínima de 500 m	20	150 kW	5 a 300 V	Normal e Essencial 480 V - transformador
	Perfil de onda	Em forma de quadrado ao redor da plataforma, com distância mínima de 500 m	4	750kW	480 V	Normal e Essencial 480 V - transformador
Gradiente salino	Turbina a vapor	Planta de processo	1	2 kW	220 V	Normal e Essencial 220 V - sem acessórios Normal 480 V - transformador Essencial e Emergência CC - retificador
Gradiente térmico oceânico	OTEC	Planta de processo	1	1 MW	480 V	Normal e Essencial 480 V - sem acessórios
Efluente sanitário	Microturbina a gás	Planta de processo	1	30 kW	480 V	Normal e Essencial 480 V - sem acessórios
Restos alimentares	Microturbina a gás	Planta de processo	1	30 kW	480 V	Normal e Essencial 480 V - sem acessórios
Água efluente vapor	Turbina a vapor	Planta de processo	1	1 kW	480 V	Normal e Essencial 480 V - sem acessórios
Água efluente líquida	Microturbina hidráulica	"Lower Deck"	1	20 kW	12 a 480 V	Essencial e Emergência CC - sem acessórios Normal e Essencial CA - sem acessórios

Plataforma FPSO						
Fluxos energéticos renováveis	Dispositivo Conversor	Local Físico	Quantidade	Potência	Tensão	Ponto Elétrico e Acessórios
Irradiação solar	Termelétrica	Acomodação - 559 m ² "E-house" - 611 m ²	2	1 kW	220 V	Auxiliar e Essencial 220 V - sem acessórios Normal, Auxiliar e Essencial 480 V - transformador Emergência CC - retificador
	Stirling	Acomodação - 559 m ² "E-house" - 611 m ²	4	200 W	12 - 24 V	Emergência CC - sem acessórios Normal, Auxiliar e Essencial CA - inversor
	Célula fotovoltaica	Acomodação - 559 m ² "E-house" - 611 m ² Suspensão "Helideck" - 35m ²	725	245 W	12-24 V	Emergência CC - sem acessórios Normal, Auxiliar e Essencial CA - inversor
Vento	Aerogerador pequeno porte	Acomodação - 559 m ² "E-house" - 611 m ²	10	400 W	12-24 V	Emergência CC - sem acessórios Normal, Auxiliar e Essencial CA - inversor
	Aerogerador médio porte	Acomodação - 559 m ² "E-house" - 611 m ²	4	10 kW	220 V	Auxiliar e Essencial 220 V - sem acessórios Normal, Auxiliar e Essencial 480 V - transformador Emergência CC - retificador
Gradiente salino	Turbina a vapor	Planta de processo	1	2 kW	220 V	Normal e Essencial 220 V - sem acessórios Normal 480 V - transformador Essencial e Emergência CC - retificador
Gradiente térmico oceânico	OTEC	Planta de processo	1	2 MW	480 V	Auxiliar e Essencial 480 V - sem acessórios Normal 13,8kV - transformador
Efluente sanitário	Microturbina a gás	Planta de processo	1	30 kW	480 V	Auxiliar e Essencial 480 V - sem acessórios
Restos alimentares	Microturbina a gás	Planta de processo	1	30 kW	480 V	Auxiliar e Essencial 480 V - sem acessórios
Água efluente líquida	Microturbina hidráulica	Casa de máquinas	1	20 kW	12 a 480 V	Essencial e Emergência CC - sem acessórios Auxiliar e Essencial CA - sem acessórios

APÊNDICE H: DISPOSIÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS EM PLATAFORMA FIXA