



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 1, pp. 218–230  
<https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p218-230>

## Estudo comparativo entre tecnologias de armazenamento de energia para plataformas petrolíferas com microgeração distribuída

### *Comparative study of energy storage technologies for oil platforms with distributed microgeneration*

Henrique C. Costa<sup>1</sup>, Silvangela L. Barcelos<sup>2,\*</sup>, B. F. Santos Jr<sup>3</sup>, Walbermark M. dos Santos<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Curso de Graduação em Energia, Universidade Federal do Maranhão – UFMA, campus do Bacanga, MA, Brasil

<sup>2</sup> Professora do Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão – UFMA, campus do Bacanga, MA, Brasil

<sup>3</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica, Universidade Federal do Piauí – UFMA, campus Ministro Petrônio Portella, PI, Brasil

<sup>4</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade do Espírito Santo – Ufes, campus Goiabeiras, ES, Brasil

\*Autor para correspondência, E-mail: silvangela.barcelos@ufma.br

Received: 9 May 2024 | Accepted: 29 May 2024 | Published online: 5 June 2024

**Resumo:** Em plataformas de extração de petróleo há diversos sistemas, que atuam em conjunto, garantindo o bom funcionamento dos processos de perfuração, produção, armazenamento e transferência de petróleo, de forma a garantir o atendimento das cargas críticas. Mesmo em casos de falhas dos sistemas de geração, o processo não deve ser interrompido. Tal atendimento pode ser realizado através de um sistema de armazenamento de energia em banco de baterias associado ao mix de geração. Desta maneira, neste estudo, apresenta-se uma análise comparativa entre as tecnologias de baterias existentes no mercado, que podem ser consideradas como elegíveis para serem associadas ao mix de geração de uma plataforma do tipo Fixa. A fim de mensurar os resultados desta análise comparativa será utilizado o software Homer.

Palavras-chave: Plataformas Petrolíferas, mix de geração, armazenamento de energia, baterias eletroquímicas.

**Abstract:** On oil extraction platforms, several systems work together, ensuring the proper functioning of the drilling, production, storage, and oil transfer processes to guarantee the fulfillment of critical loads, even in cases of failure of the oil extraction systems. Generation cannot be stopped. This service can be provided through an energy storage system in a battery bank associated with the generation mix. The result of this study presents a comparative analysis of the technologies on the market, which can be considered eligible to be associated with the generation mix of a Fixed-type platform. The Homer software will be used to measure the results of this comparative analysis.

**Keywords:** Oil platforms, generation mix, energy storage, electrochemical batteries.

## 1 Introdução

Conforme definido pela Agência Nacional de Petróleo ANP (2007), plataformas marítimas apresentam diversos sistemas e processos industriais, tais como: os sistemas de produção, ancoragem e processamento de óleo e gás natural, de forma que as estruturas físicas para desenvolvimento das atividades relativas a cada um desses sistemas devem estar conforme o regulamento técnico do sistema de gerenciamento da segurança operacional das instalações marítimas de perfuração e produção de petróleo e gás natural.

O sistema elétrico de uma plataforma, convencionalmente, tem a turbogeração a gás como fonte principal de geração de energia, muito utilizada devido à eficiência e alto nível de confiabilidade apresentadas por essa alternativa de geração. Neste caso, há a possibilidade do fornecimento do gás proveniente da própria exploração da plataforma, eliminando assim, a necessidade de suprimento de gás a partir da costa para a geração de energia na plataforma Meneses (2011).

Em uma plataforma petrolífera, o sistema elétrico deve atender ao conjunto de cargas da mesma, garantindo condições normativas de confiabilidade e qualidade de energia elétrica (QEE) de acordo com a NR-37, que estabelece os requisitos mínimos de segurança, saúde, e condições de vivência no trabalho a bordo de plataformas de petróleo NR-37 (2022).

A associação de sistemas de armazenamento de energia em baterias eletroquímicas ao sistema elétrico de uma plataforma minimiza os riscos associados ao não atendimento das cargas críticas em casos de falha do sistema de geração de energia em uma plataforma. Nesses casos, o sistema emergencial de geração, que possui banco de bateria, é capaz de atuar alimentando algumas cargas (cargas críticas). Grande parte dos sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*) de plataformas petrolíferas geralmente consideram o uso de baterias chumbo-ácido, que embora possuam relação custo-benefício adequadas, apresentam desvantagens como: baixa densidade energética e curta vida útil Steele (2007).

Existem alguns subníveis de prioridade de fornecimento de energia no sistema elétrico de uma plataforma Casanova (2008). Em plataformas do tipo fixa, as baterias são usadas para suprir cargas de emergência em casos de falha das fontes que compõem o mix de geração de energia principal, do gerador auxiliar e do gerador de emergência; deixando as cargas normais, auxiliares e essenciais desenergizadas. No entanto, conforme descrito por Oliveira (2013), entende-se que é possível associar ao mix de geração da plataforma, sistemas de microgeração distribuída (MGD) a partir de fontes renováveis (geração solar e eólica) são elegíveis para tal finalidade, e de acordo com Monteiro et. al. (2022), em caso de falha dos geradores principais, geração auxiliar e de emergência, as fontes de MGD podem assegurar a alimentação das baterias, mantendo alguns circuitos da plataforma em funcionamento.

Análises de viabilidade da instalação de sistemas elétricos de plataformas petrolíferas com mix de geração possuindo geração dos tipos eólica e solar são apresentadas em (COX et al., 2006). Conforme descrito pelos autores, a partir de configurações deste tipo, torna-se possível atender um maior número de cargas. Os estudos realizados em Algalalawy et al. (2018) também se mostram favoráveis à implementação de sistemas eólicos e fotovoltaicos para melhor atender determinados tipos de cargas de redes elétricas de plataformas.

As energias do tipo eólica e solar podem ser associadas a redes elétricas especiais, por exemplo, às microrredes, sendo caracterizadas como sistemas de microgeração distribuída. A ANEEL (2012), através d Resolução Normativa 482/2012 define microgeração distribuída como sistemas que não ultrapassem os 100 kW. Conforme Matos (2014), caso haja um sistema de armazenamento, uma microrrede pode operar em modo isolado da fonte principal. No sistema elétrico de uma plataforma petrolífera, em situações operacionais limitantes, o uso de energia eólica e solar para assegurar o carregamento do sistema de armazenamento pode permitir novas funcionalidades ao próprio sistema de armazenamento, ou mesmo, modos de operação que favoreçam a alimentação de um número maior de cargas em condições adversas.

Neste sentido, neste artigo objetiva-se apresentar os resultados de um estudo comparativo entre as tecnologias de armazenamento de energia que podem ser associadas aos sistemas elétricos de plataformas petrolíferas do tipo fixa, e ainda, demonstra através de um estudo de caso, a contribuição, diante da associação de um sistema de armazenamento de energia, ao sistema elétrico de uma plataforma que considera o uso de MGDs.

## 2 Fundamentação teórica

Existem diferentes tipos de embarcações marítimas de extração de petróleo. Desse modo, algumas características ajudam determinar o tipo de plataforma compatível com as funcionalidades a serem desempenhadas. Em geral, essas plataformas podem ser de perfuração, de produção – utilizada em casos que se necessita da extração de petróleo e separação de óleo, água e gás –, armazenamento ou de transferência Casanova (2008). A Tabela 1 apresenta um resumo dos tipos de plataforma existentes, profundidades de perfuração e produção, bem como a lista de processos realizados nas mesmas.

No processo de instalação/construção das plataformas, cada sistema referente aos processos a serem realizados pode ser construído em módulos para sua integração, de forma que cada sistema apresenta seus protocolos de confiabilidade quanto ao fornecimento de energia, de acordo com sua criticidade e segurança operacional. Levando-se em consideração os tipos de plataformas existentes, a plataforma Fixa foi escolhida para desenvolvimento deste estudo, por conta da aplicabilidade deste tipo de plataforma e facilidade de acesso aos parâmetros técnicos e fatores tais como: características dos processos realizados na plataforma, disponibilidade de informações quanto ao mix de geração e tipos de cargas atendidas, sendo estes fatores cruciais na escolha pelo tipo de plataforma a ser estudada.

Tabela 1. Características das plataformas marítimas. Fonte: Petrobras (2014) e Faltinsen (1998).

Tipo de Plataforma	Profundidade de Perfuração	Processo realizado
Fixa	Até 300 m	Perfuração e Produção
Autoelevável	Até 150 m	Perfuração
Semissubmersível	Mais de 2000 m	Perfuração e/ou Produção
FPSO ( <i>floating, production, storage, and offloading</i> )	Mais de 2000 m	Produção e Armazenamento
FPSO Monocoluna	Mais de 2000 m	Produção e Armazenamento
TWLP	Até 1500 m	Perfuração e Produção
Navio Sonda	Mais de 2000 m	Perfuração

No processo de instalação/construção das plataformas, cada sistema referente aos processos a serem realizados pode ser construído em módulos para sua integração, de forma que cada sistema apresenta seus protocolos de confiabilidade quanto ao fornecimento de energia, de acordo com sua criticidade e segurança operacional. Levando-se em consideração os tipos de plataformas existentes, a plataforma Fixa foi escolhida para desenvolvimento deste estudo, por conta da aplicabilidade deste tipo de plataforma e facilidade de acesso aos parâmetros técnicos e fatores tais como: características dos processos realizados na plataforma, disponibilidade de informações quanto ao mix de geração e tipos de cargas atendidas, sendo estes fatores cruciais na escolha pelo tipo de plataforma a ser estudada.

## 2.1 O Sistema elétrico de uma plataforma fixa

Dentre os sistemas gerais de uma plataforma Fixa, destacam-se, devido ao grau de importância, o sistema de comunicação e o sistema de utilidade. O sistema de comunicação de uma plataforma Fixa é crucial para a segurança operacional e a produção em geral da plataforma, sendo responsável pelo sistema interno de comunicação operacional, auxiliando no acompanhamento em atividades operacionais, comunicação com unidades marítimas e aéreas (Oliveira, 2013). Através do sistema de Utilidades são garantidos os insumos para outros processos industriais, como vapor e água. Além disso, há o sistema de água para resfriamento, sistema de separação de água e óleo, sistema de óleo diesel, sistema de água potável, sistema de refrigeração dentre outros (Faltinsen, 1998).

Ações de gestão, controle e análise de tudo que ocorre na plataforma são realizadas pelo Sistema de Supervisão e Controle. Através deste sistema é possível monitorar os processos de produção, geração de energia, temperatura, pressão e outros. Esse sistema supervisor possui sensores e atuadores, rede de comunicação e estação remota, tornando possível controlar e vistoriar toda a embarcação. Conforme Casanova (2008), o cerne desse sistema é a Estação Central de Operação e supervisão (ECOS).

Através do Sistema de Parada de Emergência, a identificação, em caso de parada de algum sistema ou equipamento de uma plataforma, é realizada através da ECOS. Caso ocorra alguma anormalidade, o CLP (Controlador Lógico Programável) da ECOS possui ações pré-estabelecidas que podem variar entre alarmes sonoros, indicação nos computadores, interrupção ou não do sistema de gás e de geração principal de energia dentre outros. Os responsáveis por indicar as ações tomadas pelo CLP são os níveis de ESD, descritos a seguir:

- ESD1 (Nível 1): Interrupção parcial de um sistema ou equipamento;
- ESD2 (Nível 2): Interrupção total da produção e parcial das utilidades;
- ESD3 (Nível 3): Interrupção da geração principal (ESD3 Parcial) e interrupção da geração principal e de emergência (ESD3 Total);
- ESD4 (Nível 4): Interrupção de todos os sistemas da plataforma e início de protocolo de abandono.

O sistema elétrico de uma plataforma de extração de petróleo fixa, com representação em blocos ilustrada na Figura 1 contempla basicamente os sistemas de geração de energia, o sistema de distribuição, o sistema de armazenamento, que normalmente está associado ao sistema UPS e por fim, as cargas (motores, sensores, iluminação e outros). Em plataformas Fixas, convencionalmente, existem dois sistemas de geração de energia: o sistema de geração principal e o sistema de geração de emergência, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 1. O sistema de geração principal geralmente é composto por turbogeradores que funcionam à base de gás. Além disso, o diesel é usado como combustível alternativo. Em condições normais de operação, o gerador principal é o responsável por alimentar todas as cargas da plataforma.

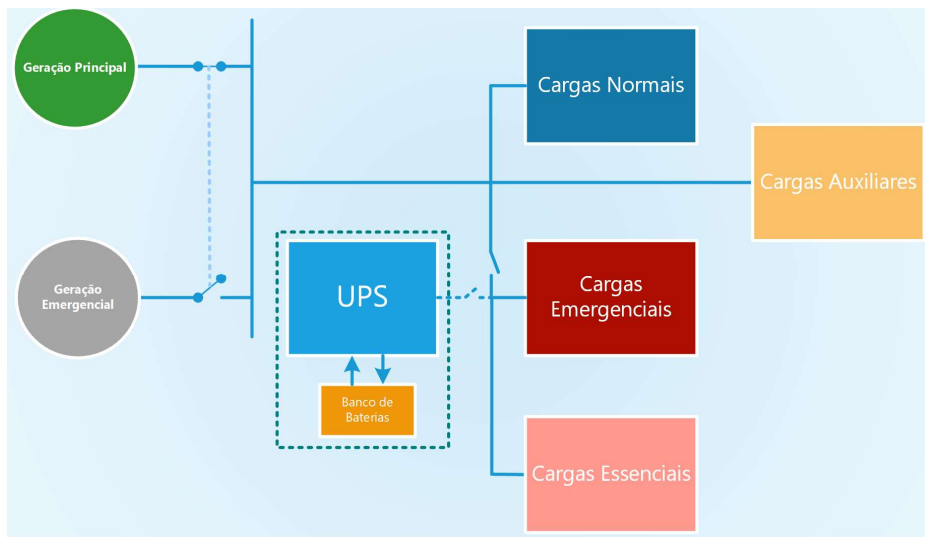


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema elétrico de uma plataforma fixa.

Conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 1, existem dois sistemas de geração de energia em uma plataforma Fixa: o sistema de geração principal e o sistema de geração de emergência. O sistema de geração principal é composto por turbogeradores a gás (Oliveira, 2013) e geradores à diesel são considerados para o atendimento de cargas essenciais em caso de falha da geração principal.

Um diagrama unifilar simplificado do sistema de distribuição de uma plataforma marítima do tipo fixa é apresentada na Figura 2. A Geração Principal é composta por geradores (GE-1A e GE-1B) com Tensão normalmente igual a 6,6 kV e alimentam o Centro de Distribuição de Cargas (CDC) principal da plataforma (PN-01). Em condições normais as cargas da plataforma são atendidas por um dos geradores e o outro permanece como reserva. O CDC alimentar as cargas de maior potência, com destaque para as bombas de injeção de água da plataforma. Deste painel sai o suprimento de energia para toda a plataforma. A geração de emergência (GE-2A e GE-2B) é composta por dois geradores que normalmente operam em 480 V. A geração de backup é conectada ao painel de cargas essenciais (PN-09) e as cargas emergenciais.

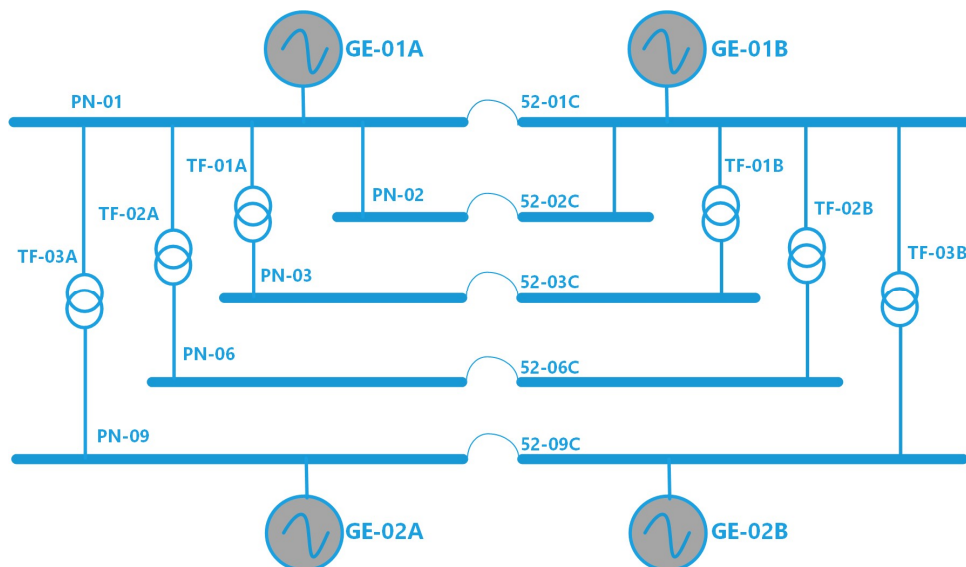


Figura 2. Diagrama unifilar simplificado do sistema de distribuição de uma plataforma marítima do tipo fixa. Fonte: Adaptado de Oliveira (2013).

O sistema de iluminação Essencial é alimentado através da geração de emergência e contempla a iluminação mínima exigida, de forma a proporcionar segurança aos tripulantes durante uma parada de nível ESD3. Quando o sistema de geração principal falha ou é interrompido, o sistema de iluminação Essencial fica desligado enquanto o sistema de geração de emergência não entra em funcionamento. Conforme descrito por Oliveira (2013), o sistema de iluminação Essencial Crítica é alimentado pelo sistema ininterrupto de energia ou UPS (Uninterruptible Power Supply), responsável por suprir as cargas enquanto os sistemas de geração não são reestabelecidos ou até descarga total do banco de baterias do UPS.

## 2.2 Síntese sobre sistemas de armazenamento de energia

De acordo com o levantamento feito por Fuchs (2012) e cujos resultados são sintetizados na Figura 3, os sistemas de armazenamento de energia elétrica podem ser divididos em 4 grandes grupos: elétricos, mecânicos, químicos e térmicos. Fuchs (2012) menciona que em plataformas petrolíferas, justifica-se a utilização de baterias eletroquímicas, tendo em vista que os sistemas elétricos de plataformas petrolíferas geralmente têm UPS associadas ao mix de geração, ou seja, ao conjunto de fontes. Neste tipo de rede elétrica, UPSs atendem as cargas críticas diante de situações em que haja falha das fontes principal e de emergência da plataforma. Uma UPS também pode operar numa plataforma atendendo parte da carga durante a comutação do gerador principal para o gerador de emergência.

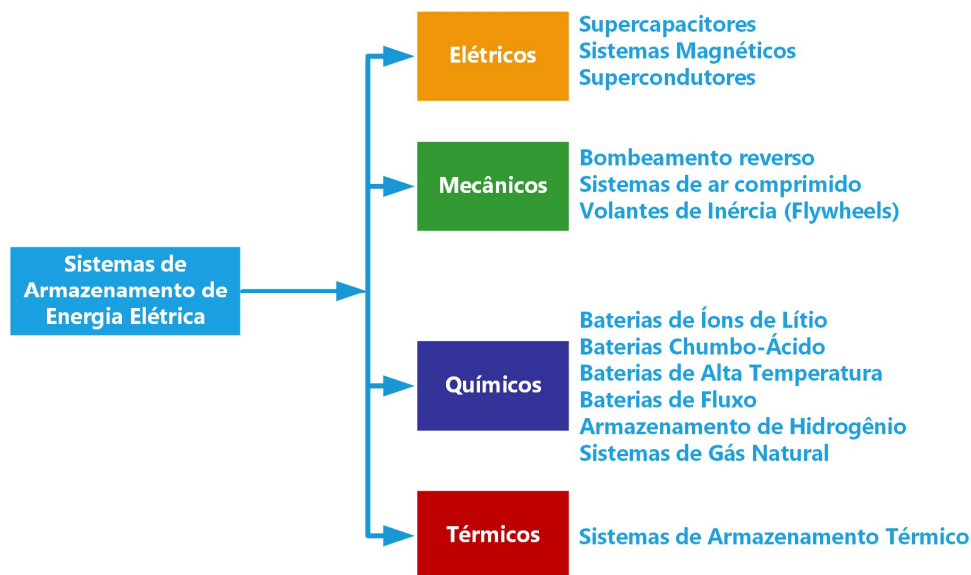


Figura 3. Tipos de sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica.

De acordo com Ujjwal et. al. (2021), dentre as funções que podem ser desempenhadas por um BESS fazendo parte do mix de geração da rede elétrica da plataforma fixa de petróleo estão: Serviços auxiliares/estabilidade da rede, suporte/estabilização de tensão, sistemas de resposta a emergências e gerenciamento de demanda. Configurações básicas de BESSs incluem em sua composição baterias de íon de lítio, baterias de chumbo-ácido, baterias de fluxo e volantes. Cada tipo de bateria tem suas vantagens e desvantagens em desempenho, vida útil, custo e outros fatores conforme Nadeem et al. (2019), Argyrou et al. (2018), e Amado (2015).

## 3 Metodologia

Um fluxograma descrevendo a metodologia aqui proposta para o ranqueamento de baterias eletroquímicas é mostrado na Figura 4. Conforme pode ser observado neste fluxograma, a metodologia de ranqueamento consiste nos seguintes passos: seleção de tecnologia de armazenamento de energia, definição de parâmetros de bateria; estabelecimento de pesos, cálculo de notas parciais por parâmetros; cálculo da nota final por tipo de baterias e ranqueamento.

Existem vários tipos de baterias disponíveis no mercado e a escolha por um tipo específico deve ser feita, por exemplo com base no tipo de aplicação, em características elétricas, durabilidade e custo. O primeiro passo para ranqueamento de baterias trata-se da seleção por tipos de baterias adequadas às necessidades da rede elétrica de uma plataforma. Neste estudo, para fins de comparação entre tecnologias de baterias eletroquímicas que possam estar associadas a um BESS em uma plataforma petrolífera do tipo fixa, são considerados os seguintes parâmetros: densidade energética, densidade de potência, vida útil, viabilidade financeira e potência por área ocupada. Na Tabela 2 são observados os pesos definidos para cada um dos parâmetros a serem comparados, de acordo com as necessidades específicas da plataforma petrolífera do tipo fixa.

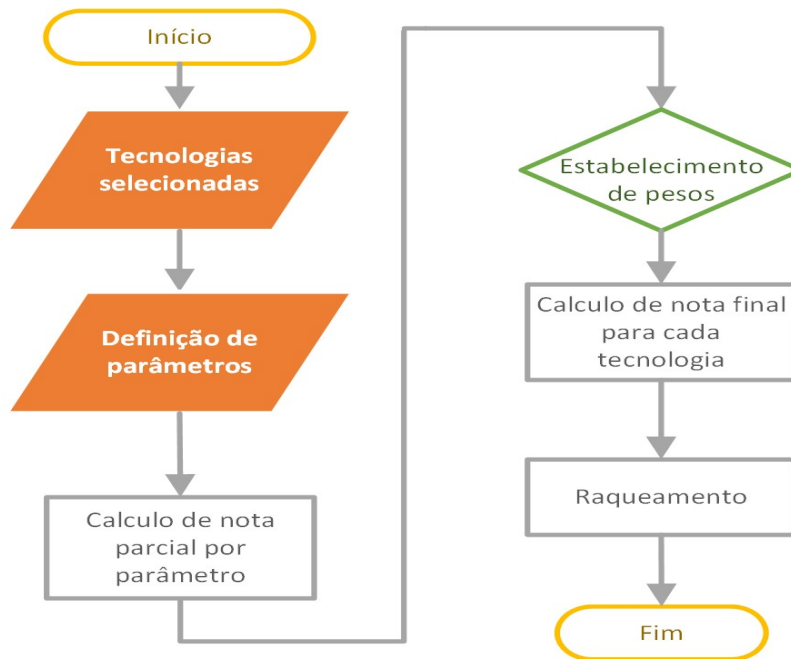


Figura 4. Fluxograma para ranqueamento de baterias eletroquímicas.

Tabela 2. Pesos estabelecidos para comparação de parâmetros de baterias eletroquímicas.

Parâmetro Analisado	Peso estabelecido
Densidade Energética (DE)	0,5
Densidade de Potência (DP)	0,5
Vida Útil (VU)	1,0
Viabilidade Financeira (VF)	1,0
Potência por Área Ocupada (PA)	2,0

No caso de uma plataforma petrolífera podem ser estabelecidos pesos mínimos, médios e elevados (0,5, 1 e 2). O parâmetro de maior peso é a potência por área ocupada, tendo em vista que há limitação de área e todos os espaços devem ser otimizados para alocação de equipamentos. Assim, quanto menor for o espaço ocupado pelo banco de baterias, maior a facilidade de instalação. Densidade energética e densidade de potência são estabelecidas com peso 0,5. A vida útil e viabilidade financeira foram estabelecidas com peso 1, levando em consideração a necessidade de manutenções periódicas e a importância de implementar um sistema com preço acessível. Uma vez estabelecidos os pesos para cada parâmetro de baterias, são calculadas as notas parciais para esses parâmetros (Passo 3 do fluxograma mostrado na Fig. 4). No Passo 4 do fluxograma proposto são estabelecidos os pesos a cada uma das notas parciais. Em seguida, no Passo 5 é feito o cálculo da nota final para cada tipo de tecnologia de armazenamento de energia, através da Eq. (1):

$$n_f = ((0,5*DE) + (0,5*DP) + (1,0*VU) + (1,0*VF) + (2,0*PA))/5 \quad (1)$$

Com base na média ponderada das notas atribuídas a cada parâmetro de bateria calculadas através da Eq. (1), é estabelecido o ranqueamento das baterias que podem ser associadas ao mix de geração de uma plataforma de extração de petróleo (Passo 6).

## 4 Resultados e discussões

Dentre as alternativas atualmente disponíveis no mercado, foram selecionadas (Passo 1 do fluxograma de ranqueamento) para esta análise baterias do tipo Chumbo-ácido, Níquel-Cádmio, Íon-Lítio, Sódio Enxofre e Hidreto Metálico de Níquel, a partir dos estudos realizados por Nadeem et al. (2019), Argyrou et al. (2018), e Amado (2015). Na Tabelas 3 são apresentados os valores de DE, DP, VU, VF e PA referentes a cada tipo de bateria (Passo 2 do fluxograma de ranqueamento). Na Tabela 4 são apresentadas as definições para as notas parciais atribuídas para diferentes tipos de baterias consideradas neste estudo. Trata-se no Passo 3 do fluxograma de ranqueamento. Neste caso, foram definidas faixas que determinam a nota parcial

da tecnologia de armazenamento correspondente ao parâmetro analisado. Na Figura 5 são apresentadas as notas parciais obtidas para cada um dos parâmetros das baterias selecionadas.

Tabela 3. Valores de DE, DP, VU, VF e PA referentes a cada tipo de bateria.

Tipo de Bateria	DE (Wh/kg)	DP (W/kg)	VU (Anos)	VF (US\$/kWh)	PA (kW/m <sup>2</sup> )
Chumbo-Ácido	Entre 30 e 50	De 200 a 400	Entre 5 e 15	800	1,87
Níquel-Cádmio	Entre 5 e 75	De 150 a 300	Entre 10 e 20	1500	8,65
Íon-Lítio	Entre 120 e 230	De 150 a 2000	Entre 20 e 25	932	8,0
Sódio-Enxofre	Entre 150 e 240	De 150 a 230	Entre 10 e 15	900	12,38
Hidreto Metálico de Níquel	Entre 60 e 80	De 150 a 460	Entre 5 10	1800	7,5

Tabela 4. Notas atribuídas aos parâmetros de baterias eletroquímicas.

Nota	DE (Wh/kg)	DP (W/kg)	VU (Anos)	VF (US\$/kWh)	PA (kW/m <sup>2</sup> )
1	0 a 50	0 a 100	0 a 4	2000 a 1601	0 a 3
2	51 a 100	101 a 200	5 a 8	1600 a 12001	4 a 6
3	151 a 150	201 a 300	9 a 12	1200 a 801	7 a 9
4	151 a 175	301 a 400	13 a 16	800 a 401	10 a 12
5	> 175	> 400	> 16	< 400	> 12

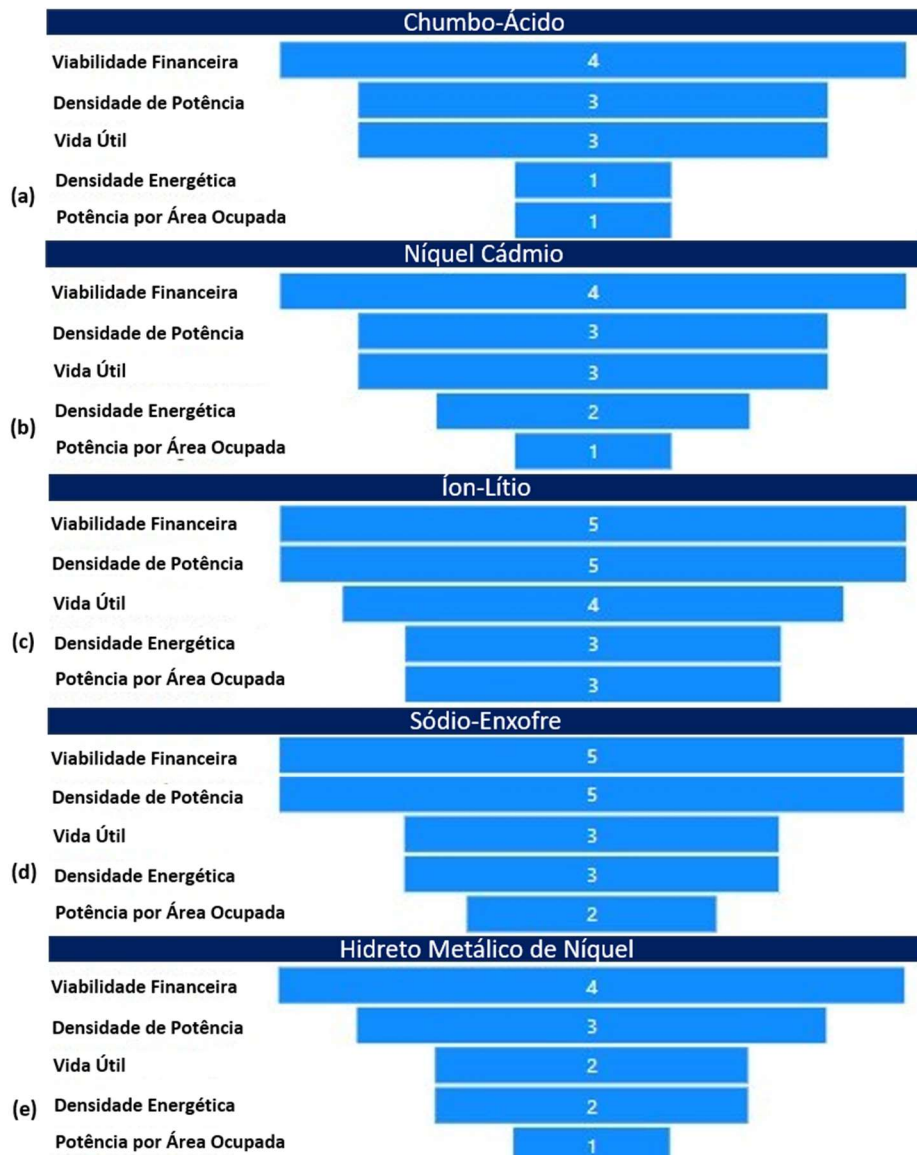


Figura 5. Notas atribuídas a cada um dos parâmetros das baterias selecionadas.

A nota final atribuída para cada tipo de bateria foi obtida com base na nota parcial extraída a partir da metodologia sintetizada na Tabela 3 e na associação de pesos para cada parâmetro de bateria (Passo 4). A partir das informações sintetizadas na Tabela 2, por exemplo, o parâmetro DE de uma bateria do tipo chumbo ácido tem nota parcial igual a 1 e o parâmetro DP para esse mesmo tipo de bateria tem nota igual a 3. A partir das notas finais calculadas através da Eq. (1), considerando todos os parâmetros considerados neste estudo e os respectivos pesos estabelecidos (Passo 5), foi possível ranquear as tecnologias de armazenamento de energia eletroquímica que podem ser associadas a um mix de geração em uma plataforma de extração de petróleo do tipo fixa. Na Figura 6 é apresentado o ranqueamento das tecnologias analisadas com base na densidade energética, densidade de potência, vida útil, viabilidade financeira e potência por área ocupada.

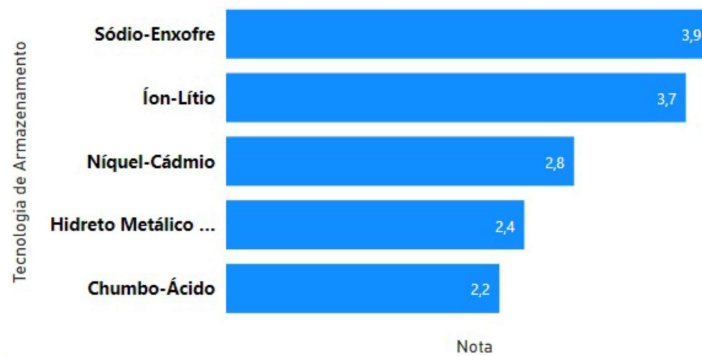


Figura 6. Ranqueamento das Tecnologias de Armazenamento de energia eletroquímica.

Conforme pode ser observado no ranqueamento obtido comparando-se os parâmetros supracitados, a tecnologia que melhor se adapta às características esperadas para um sistema de armazenamento em plataformas de extração de petróleo é a bateria de sódio-enxofre. Observa-se que a nota obtida para este tipo de bateria ficou bem próxima da nota obtida para a bateria Íon-Lítio. Caso fosse considerado o parâmetro temperatura de operação, o resultado do ranqueamento poderia ser decisivo quanto a adoção, por exemplo de baterias de íon de Lítio, tendo em vista que baterias de sódio-enxofre apresentam maior temperatura de operação que baterias de Íon-Lítio, justificando o uso de um sistema de refrigeração mais complexo

Serão apresentados os resultados da simulação de um caso modelado no software Homer Pro, com base na análise comparativa realizada. Neste estudo, um BESS é associado ao mix de geração de plataforma petrolífera do tipo Fixa de maneira a contribuir para o fornecimento de energia para uma parcela das cargas do sistema de iluminação, conforme especificações consideradas por Casanova (2008) para uma plataforma P37 com consumo do sistema de iluminação de 150 kW. A análise aqui realizada objetiva atender apenas uma parcela das cargas referentes à iluminação. Esta limitação ocorre em decorrência da dificuldade em encontrar espaços físicos na plataforma. Espaços físicos disponíveis na plataforma, permitem que associado ao mix de geração haja um sistema fotovoltaico (também denominado como PV) de 55 kW e um BESS de 33,6 kWh com baterias de sódio-enxofre. Além disso, há um gerador a gás de 500 kW. O diagrama esquemático da rede elétrica da plataforma P-37 modelada no software Homer para avaliação da contribuição de um BESS com baterias de sódio-enxofre é mostrado na Figura 7.



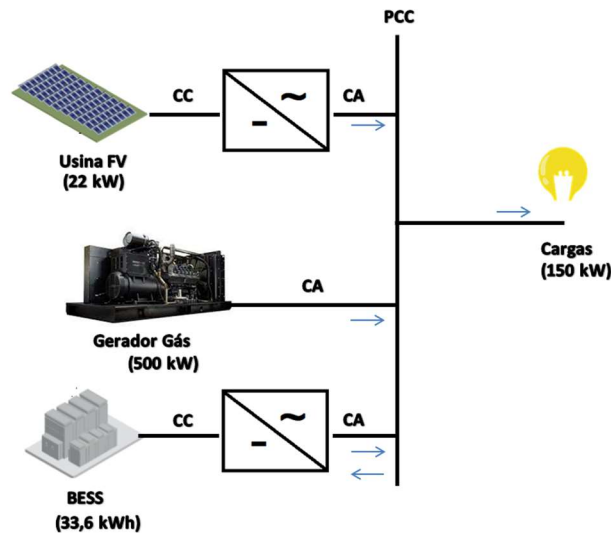


Figura 7. Diagrama esquemático da rede elétrica da plataforma P-37 modelada no software Homer.

O perfil de consumo definido para este caso de estudo considera uma carga industrial com consumo médio durante a noite de aproximadamente 150 kW e durante o dia, 120 kW. A representação do primeiro cenário de rede elétrica da plataforma P-37, simulado no Homer, é ilustrada na Figura 8. Neste cenário, o BESS funciona como seguidor de rede, modo de operação descrito em Serra et. al. (2022) e a forma de controle selecionada foi “acompanhamento de carga”, em que o gerador produz a energia necessária para atender a carga, podendo haver diminuição na demanda sob o gerador à diesel em decorrência da produção de energia do PV. Ressalta-se que com esta forma de controle, a demanda total será igual a somatória de potência da carga e potência de carregamento do BESS. Na Figura 9 são apresentados os resultados dessa simulação, em termos das potências fornecidas pelas fontes de energia da plataforma e do estado de carga (SOC – *State of Charge*) do BESS.

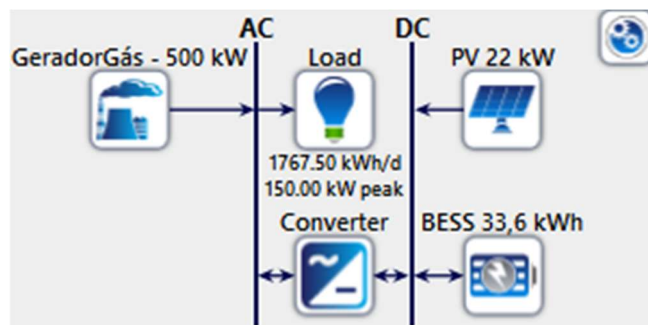


Figura 8. Esquematização da microrrede para o cenário 1.

Conforme é possível perceber na Figura 9, enquanto o SOC total não é atingido, o gerador fornece energia à carga e ao BESS. No instante em que o BESS atinge 100% de carga, o gerador é desligado, o BESS passa a contribuir com o fornecimento de energia à carga da plataforma. Embora o sistema PV tenha pequena proporção de entrega de potência se comparado ao gerador a gás, sua implementação aumenta a autonomia do BESS em momentos de descarga, sendo também de grande importância ao sistema. Para este cenário, a participação por fonte de geração da plataforma ao longo do ano corresponde a 95,9% de Geração a gás e 4,1 de PV.

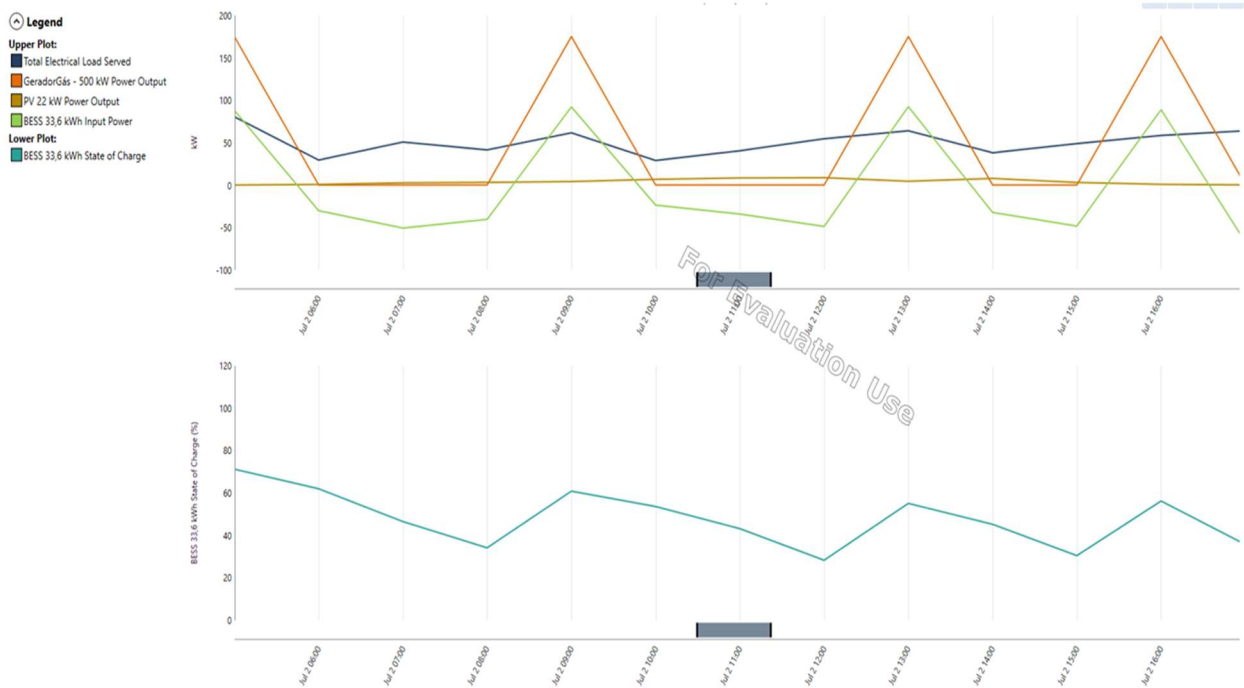


Figura 9. Resultados obtidos a partir da simulação do cenário 1: participação das fontes para atendimento da carga.

No cenário 1, com o mix de geração contemplando também o sistema PV, o BESS e a carga, o Homer dimensionou um consumo médio de 884 m<sup>3</sup>/dia. Neste caso, o Homer estimou 36,6 % de eficiência do gerador a gás e uma vida útil para o BESS de aproximadamente 5 anos.

A fim de mensurar a eficácia da instalação do BESS com bateria de sódio-enxofre, simulou-se o mesmo cenário sem a instalação das baterias, sendo o mix de geração composto apenas por gerador e sistema PV para atender carga de 150 kW. Para este caso, a participação por fonte de geração da plataforma ao longo do ano corresponde a 98% de Geração a gás e 2% de PV. Nesta situação, o consumo médio de gás seria de 1778 m<sup>3</sup> / dia, mais que o dobro se comparado ao sistema com o BESS integrado. Além disso, o gerador atua com menor eficiência, de aproximadamente 30%.

Um segundo cenário simulado (Cenário 2) considerou o BESS operando como seguidor de rede e a forma de controle selecionada foi “Despacho Preditivo”. Assim, o Homer maximiza o autoconsumo, permitindo que a bateria descarregue antecipadamente em momentos que a potência entregue pelo sistema PV for maior que a demanda. Diferentemente do cenário 1, onde foram considerados todos os 150 kW do sistema de iluminação, neste cenário em determinados momentos a geração do PV supera a carga, justificando o uso deste controle. A esquematização do cenário 2 é mostrado na Figura 10.

Os resultados de simulação do cenário 2, em termos das potências fornecidas pelas fontes e do estado de carga do BESS, são apresentados na Figura 11. Conforme é possível perceber graficamente, a autonomia da bateria é bem maior neste caso se comparada à autonomia do caso 1, podendo chegar a suprir as cargas por mais de 24h. Além desse benefício, a diminuição de ciclos de funcionamento, prolonga a vida útil do banco de baterias. De acordo com o Homer, neste cenário, a vida útil estimada do BESS é de 15 anos, 3 vezes superior ao caso 1.

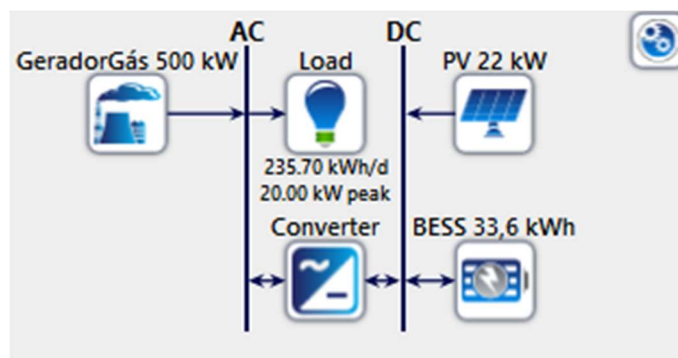


Figura 10. Esquematização da microrrede para o cenário 2.

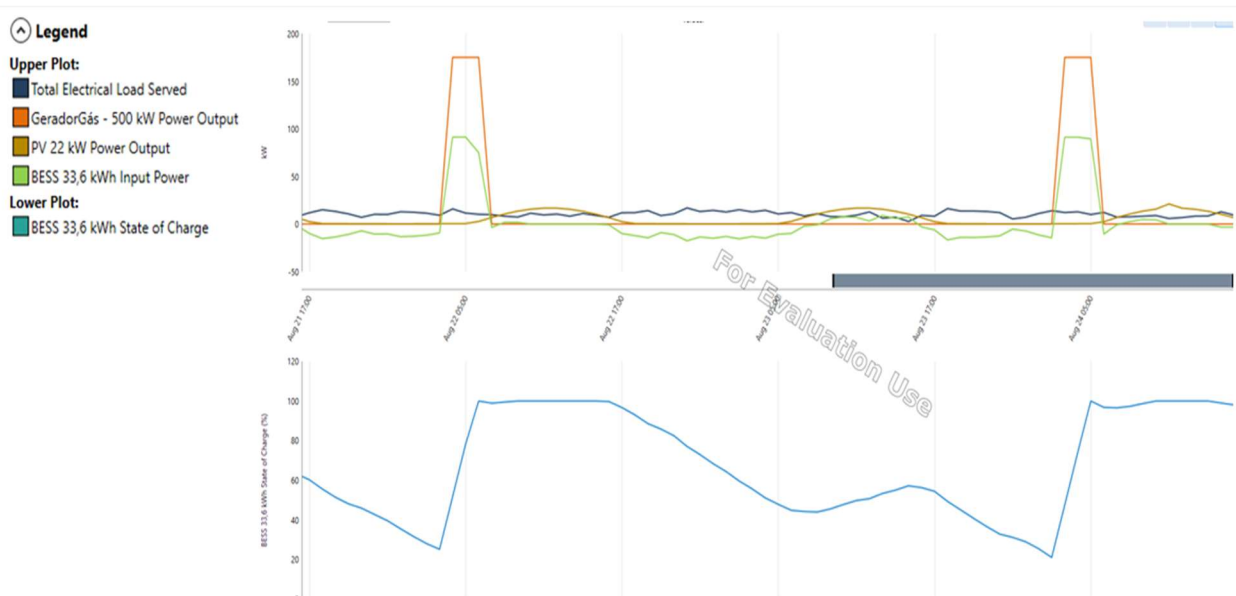


Figura 11. Resultados obtidos a partir da simulação do cenário 2: participação das fontes para atendimento da carga.

Conforme é possível perceber na Figura 10, o BESS pode ser carregado de duas maneiras, através do gerador a gás ou através do sistema PV. No instante em que o BESS se encontra totalmente carregado, o gerador é desligado e o BESS passa suprir a demanda de carga. A grande vantagem da forma de controle utilizada é o poder de suprir a carga nos momentos em que a geração for superior e, além disso, carregar o BESS. Dessa maneira, aumenta a autonomia do sistema. A participação por fonte de geração da plataforma ao longo do ano corresponde a 84,7% de Geração a gás e 15,3 de PV. Neste cenário, a participação do PV é bem maior se comparada ao cenário 1 (4,1%).

Com o sistema completo (gerador, PV, BESS e carga), o Homer dimensionou um consumo médio do gerador de 147 m<sup>3</sup> / dia. De maneira análoga ao realizado no cenário 1, visando mensurar a eficácia da instalação do BESS de sódio-enxofre, simulou-se o mesmo cenário de componente sem a instalação das baterias, sendo o mix de geração composto apenas por gerador a gás e sistema PV para atender carga. Para este caso, a participação por fonte de geração da plataforma ao longo do ano corresponde a 98,5% de Geração a gás e 1,5% de PV. De acordo com o resultado obtido com a simulação deste caso, o gerador atua com menor eficiência, aproximadamente 30%.

## 5 Conclusões

O sistema elétrico de uma plataforma petrolífera está sujeito a diversos sinistros (não comuns em outras plantas) que podem levá-lo a uma parada. Entretanto, a queda de energia em uma plataforma, principalmente se persistir por algum tempo, pode colocar em risco o processo de produção de petróleo, a integridade da plataforma e os trabalhadores embarcados.

Desta maneira, um sistema acumulador de energia torna-se atrativo, porém esbarra em fatores como: limitação de espaço e risco de incêndios (uma plataforma possui um risco elevado de sinistro por fogo). Neste trabalho foi analisado somente a viabilidade técnica da acomodação de um sistema de armazenamento de energia em uma plataforma, cujos resultados mostraram-se viáveis em alguns cenários.

Entretanto a viabilidade financeira, a análise de segurança das baterias e a otimização do espaço para alocá-las não foram considerados, requerendo então estudos futuros. Destaca-se também que fatores como a autodescarga das baterias, sofrem influência das condições ambientes a que são submetidas e interferem na vida útil das baterias e controle de carga e descarga, não tendo sido considerado neste estudo. O que certamente quando inseridos nas análises resultarão em resultados mais refinados que os apresentados.

Com a expansão da extração de petróleo no mundo, surgiu a necessidade de obter-se melhora nos sistemas que prospectam tal recurso natural não renovável. Desse modo, as partes que integram o sistema elétrico das plataformas petrolíferas necessitam estar em constante desenvolvimento, bem como os sistemas de armazenamento de energia que as compõem.

Neste sentido, o estudo comparativo acerca de tecnologias de armazenamento eletroquímicas realizado neste trabalho é capaz de contribuir de maneira significativa no cenário de extração de petróleo, no que diz respeito aos seguintes pontos:

- a) Apresentação de características e funcionalidades que diferenciam a aplicação de sistemas de armazenamento em plataformas petrolíferas que apresentam, por exemplo, limitação de espaços físicos para instalação das baterias e possíveis fontes de geração renováveis que podem integrar o mix de geração;
- b) Apresentação de solução para armazenamento de energia em sistemas elétricos de plataformas petrolíferas, evidenciando a partir deste estudo que baterias de sódio-enxofre se destacam para essa aplicação;
- c) A bateria de Íon-lítio também obteve destaque na análise comparativa realizada, obtendo a segunda colocação. Cabe ressaltar que, em estudos futuros características como a temperatura de operação serão consideradas para aumentar a gama de parâmetros necessários para a realização de uma segunda etapa de análise comparativa entre baterias eletroquímicas para plataforma petrolíferas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio e colaboração oferecidos pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e pelo Instituto de Energia Elétrica (IEE/UFMA), pela Universidade Federal do Piauí (UFPI) e Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes).

## Referências bibliográficas

- Algabalawy, MA, Abdelaziz, AY, Mekhamer, SF, Aleem, SHA(2018) ‘Considerations on optimal design of hybrid power generation systems using whale and sine cosine optimization algorithms’, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, v. 5, pp. 312-325. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2018.03.004>
- Amado, KSQL (2015) *Análise do efeito de implementação de armazenamento térmico em banco de gelo e armazenamento elétrico em baterias Sódio-Enxofre (NaS) sobre o custo de exploração de edifícios de serviços*. Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- ANEEL (2012) *Resolução Normativa 482/2012*. [online] Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> (acesso 15 abril 2024).
- ANP (2007) *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*. [online] Disponível em: <http://https://www.gov.br/anp/pt-br> (acessado em 7 janeiro de 2022).
- Argyrou, MC, Christodoulides, P, Kalogirou, SA (2018) ‘Energy storage for electricity generation and related processes: Technologies appraisal and grid-scale’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, pp. 804-821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.044>
- Casanova, RAP, Guimarães, W. G. (2008) *Análise do sistema elétrico de uma unidade de produção de petróleo*. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Cox, C, Duggirala, S, Li, Z (2006) ‘Case studies on the economic viability of renewable energy’, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709252>
- Datta, U, Kalam, A, Shi, J (2021) ‘A review of key functionalities of Battery energy storage system in renewable energy integrated power systems’, *Energy Storage*, v. 3, n. 5, p. 245. <https://doi.org/10.1002/est2.245>
- Faltinsen, OM (1998) *Ocean Technology Series – Sea Loads on Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Matos, JG (2014) *Controle de Potência em Microrredes CA Isoladas com Aerogeradores e Bancos de Baterias Distribuídos*. Tese, Universidade Federal do Maranhão, Maranhão.
- Meneses, EL (2011) *O uso de turbinas gás para geração de energia elétrica em plataformas*. Monografia, Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro.
- Monteiro, DM, Costa, HC, Barcelos, SLSL (2000) ‘Estudo Comparativo da Implementação de um Mix de Geração de Energia em Plataformas Petrolíferas Utilizando Fontes Renováveis’, *11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás*, [online]. Disponível em: <https://www.portalabpg.org.br/11pdpetro/> (acessado em 12 julho de 2015).

Nadeem, F, Hussain, SMS, Tiwari, PK, Goswami, AK, Ustun, TS (2019) ‘Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems,’ *IEEE Access*, v. 7, pp. 4555-4585. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2888497>

NR-37 (2022) *Segurança e Saúde em Plataformas de Petróleo* Portaria MTP n.º 90/2022. [online] Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-37-atualizada-2022-1.pdf> (acessado em 13 maio de 2023)

Oliveira, MF (2013) *Metodologia para Aplicação de Fontes Renováveis de Energia Elétrica em Plataformas Marítimas*. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Petrobras (2014) *Tipos de Plataformas*. [online] Disponível em: <https://petrobras.com.br/infograficos/tipos-de-plataformas/desktop/index.html> (acesso 25 abril 2022).

Serra, AW, Rocha, AD, Santos, PS, Barcelos, SL, Saavedra, OR, Bento, RG (2022) ‘Analysis of Scenarios for the Operation of a University Campus Microgrid using PSCAD/EMTDC’, *2022 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ROPEC55836.2022.10018806>

Steele, R (2007) ‘The story of a new light source’, *Nature Photonics*, [e-journal]. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nphoton.2006.44> (acessado em 15 novembro 2017).