

Análise de Confiabilidade de um Sistema CAES de pequeno porte

Daniel Rodríguez ¹, Tales de Melo-Bezerra ², Manuel Perdomo-Ojeda ³, Jorge R. Henríquez ⁴

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. Email: danivd1188@gmail.com

² Departamento Acadêmico Cursos Técnicos, Coordenação Eletrotécnica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Brasil. Email: talesbezerra@recife.ifpe.edu.br

³ Departamento de Engenharia Nuclear, Instituto Superior de Tecnologias e Ciências Aplicadas, Cuba. Email: mperdomo@instec.cu

⁴ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. Email: jorge.guerrero@ufpe.br

Resumo

Dentre as diversas tecnologias de armazenamento de energia elétrica, o armazenamento de energia por ar comprimido (CAES), é um método promissor. Porém, a disponibilidade da fonte primária poderia afetar a confiabilidade dos sistemas CAES. Adicionalmente, as análises de confiabilidade destes sistemas não são muito abundantes na literatura. Portanto, no presente trabalho foi realizada uma análise de confiabilidade sobre um sistema CAES de pequeno porte que armazena energia elétrica de fontes renováveis de natureza intermitente, eólica ou solar fotovoltaica. O método de análise de modos de falhas e efeitos expandida (FMEAE) foi utilizado para avaliar a confiabilidade do sistema. Para aplicação deste método foi usada como referência o esquema de interconexão dos componentes de uma planta real. Os resultados mostraram a contribuição ao risco do sistema de componentes geralmente considerados menos importantes na literatura, como válvulas e interruptores, bem como o efeito da fonte primária de energia na confiabilidade do sistema.

Palavras-chave: sistema D-CAES; fonte primária de energia; análise de confiabilidade; FMEAE.

Abstract

Among the various electrical energy storage technologies, compressed air energy storage (CAES) is a promising method due to its high reliability, scalability, economic viability and low environmental impact. However, the availability of the primary source could affect the reliability of CAES systems. In addition, reliability analyses of this type of system are not very abundant in the literature. Therefore, in this study, a reliability analysis was carried out on a small CAES system which stores electricity from intermittent renewable sources, wind or solar photovoltaic. The expanded Failure Modes and Effects Analysis (FMEAE) method was used to assess the system's reliability. To apply this method, the components interconnection scheme of a real plant was used as a reference. The results showed the contribution to system risk of components generally considered less important in the literature, such as valves and switches, as well as the effect of the primary energy source on system reliability.

Keywords: D-CAES system; primary energy source; reliability analysis; FMEAE.

1. Introdução

Em redes elétricas com forte participação da geração a partir de fontes renováveis de energia com características intermitentes, como a eólica e solar fotovoltaica, o ajuste entre a oferta e a demanda de eletricidade costuma ser um dos principais desafios [1]. Uma possível solução a estes desafios são os sistemas de armazenamento de energia, ESS (do inglês, Energy Storage System), que permitem armazenar energia

elétrica quando a geração for superior à carga, e seu uso em períodos onde a situação se inverte. Isto garante uma reserva de energia que pode ser usada em momentos de alta demanda energética [2].

Conhecidos pela alta confiabilidade, escalabilidade, viabilidade econômica e baixo impacto ambiental os sistemas de Armazenamento de Energia por Ar Comprimido, CAES (do inglês, Compressed Air Storage Energy), são uma tecnologia promissora. Precisamente a confiabilidade de sistemas CAES tem

sido estudada no sentido de avaliar a garantia do fornecimento da energia armazenada [3]. Adicionalmente, a disponibilidade da fonte primária poderia afetar a confiabilidade dos sistemas CAES, principalmente se esta apresenta características estocásticas. Porém, ainda são poucos os estudos de confiabilidade de sistemas CAES relatados na literatura em comparação com outros tipos de análise, como as análises termodinâmicas e econômicas.

Bhattarai et al. [4] exploraram as aplicações viáveis e os benefícios da tecnologia CAES integrada com sistemas de geração eólica com restrições de transmissão. Neste trabalho foram desenvolvidos modelos abrangentes a partir de estratégias operacionais de geração e armazenamento, para avaliar os benefícios potenciais da tecnologia CAES como a confiabilidade do sistema, eficiência e objetivos ambientais.

Aslam et al. [5] apresentaram um método para integrar um novo modelo de confiabilidade de sistemas CAES na avaliação da confiabilidade de sistemas de transmissão. A partir desta integração os autores investigaram os benefícios quantitativos derivados do uso de um sistema CAES, considerando seu mecanismo de operação real, que armazena a energia de um parque eólico. Os resultados indicam que o CAES pode melhorar a confiabilidade geral do sistema. Observou-se que o barramento onde o sistema CAES foi conectado apresentou a maior melhoria na confiabilidade. Finalmente, foi demonstrado que o sistema de armazenamento não apenas melhora a confiabilidade, mas também pode aumentar a penetração da geração eólica.

Diversas ferramentas de diagnóstico e análises do risco e da confiabilidade são utilizadas pelas equipes gestoras durante as ações de operação e manutenção de sistemas complexos em diferentes setores da indústria. Estas ferramentas são apresentadas estruturas qualitativas, semi-quantitativas e quantitativas, em função do objetivo de análise e do método aplicado [6,7].

Dentre as técnicas, ou metodologias, mais utilizadas o método de análises de modos de falhas e efeitos, FMEA (do inglês, Failure Modes and Effects Analysis), permite avaliar, qualitativamente, o risco de cada modo de falha provável para selecionar os modos de falha mais críticos e identificar as ações adequadas para reduzir o risco [8].

Mas o método FMEA apresenta várias limitações, como incapacidade de realizar análises de dependências. Precisamente, uma das causas mais frequentes de acidentes em instalações industriais complexas tem sido as falhas de causa comum e erros humanos, daí a importância de poder tratá-los adequadamente [9]. Portanto, frequentemente são realizadas modificações para fortalecer a estrutura deste método de análise.

Kang et al. [10] consideraram um método modificado de análise de modos de falha e efeitos (FMEA),

denominado FMEA-correlação, para realizar estudos de avaliação de risco em instalações eólicas offshore. Com base nas análises realizadas, foi possível constatar que as falhas em componentes estruturais apresentam menor probabilidade de ocorrência do que em componentes eletrônicos.

Neste sentido, a técnica semiquantitativa de análise de modos de falhas e efeitos expandida (FMEAE), foi desenvolvida para atender as limitações da técnica FMEA [11]. Através desta técnica o risco, ou a confiabilidade, do sistema analisado é estimado pelo parâmetro global Índice de Risco do Sistema (IRS), que representa uma medida do comportamento médio da capacidade funcional do sistema e está diretamente relacionado com sua confiabilidade.

O presente artigo se concentra nas análises de confiabilidade de um sistema CAES diabático (D-CAES) de pequeno porte, avaliando a relação funcional entre os componentes dos sistemas/subsistemas e seus efeitos sobre o risco da instalação, a partir do método semiquantitativo de análise de modos de falhas e efeitos expandida (FMEAE). Nestas análises também são considerados o efeito da fonte primária de energia acoplada para acionamento do compressor durante a etapa de carregamento e dos sistemas de apoio e suporte para operação da planta.

2. Metodologia

Em sistemas CAES o estágio de compressão e de expansão são desacoplados física e temporalmente para os processos de carregamento e descarregamento, respectivamente. No presente trabalho foi considerada uma configuração de sistema CAES de pequeno porte, com armazenamento de ar a volume constante com reaproveitamento de uma parcela da energia disponível nos produtos de combustão na saída da turbina. Fontes de geração eólica, ou solar fotovoltaica, fornecem a energia primária das configurações.

Para aplicação da técnica FMEAE na configuração estudada é necessário realizar uma análise detalhada das condições operacionais, a interconexão dos seus equipamentos e componentes, e das dependências funcionais com as interfaces. Logo, a configuração deve apresentar características similares a condições reais de operação, o que será discutido a seguir.

2.1. Descrição do sistema

A configuração estudada consiste em um sistema CAES convencional com reaproveitamento de uma parcela da energia residual disponível nos gases de descarga da turbina (Figura 1). Para as análises realizadas no presente trabalho foi utilizado como referência o esquema de interconexão de uma unidade real, a planta CAES McIntosh, instalada no estado de Alabama nos Estados Unidos [12].

Neste sistema ar comprimido no estágio de compressão (C), previamente resfriado através de um trocador de

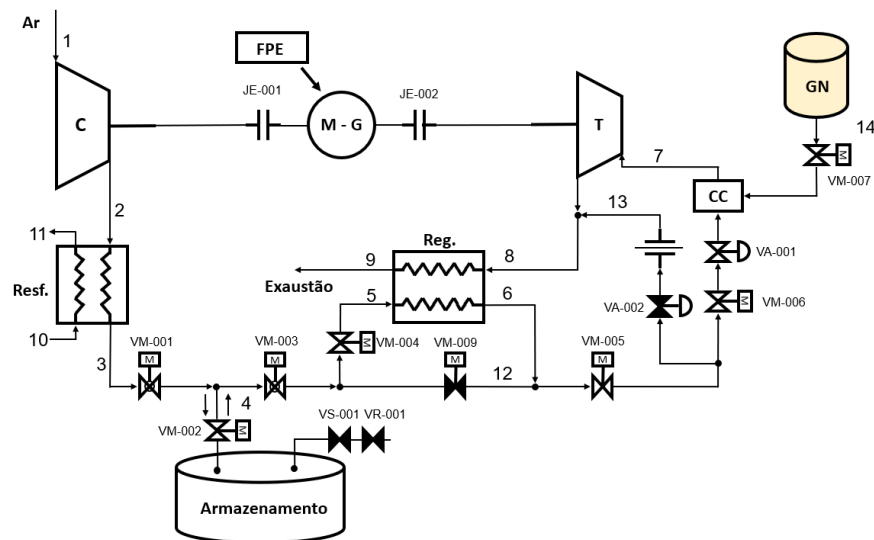


Figura 1. Esquema para análise FMEA da configuração CAES de referência, com recuperação do calor dos gases de exaustão. Fonte: elaboração própria.

calor (Resf.), é armazenado, durante 6 horas, em um reservatório de ar durante o processo de carregamento.

A etapa de descarregamento foi definida para entregar energia de volta à rede durante 12 horas. Neste período uma válvula reguladora de pressão (VM-002) mantém a pressão nas condições operacionais do estágio de expansão (T). O reaproveitamento do calor dos gases de exaustão é realizado no regenerador (Reg.), onde o ar é preaquecido antes de entrar na câmara de combustão (CC). Desta forma, é possível diminuir o consumo de combustível, neste caso gás natural (GN), na câmara de combustão (CC), o que produz um aumento na eficiência do sistema. Adicionalmente, no sistema são considerados outros equipamentos e componentes como válvulas pneumáticas (VA), válvulas motorizadas (VM), válvulas de segurança (VS), flanges e acoplamentos (JE). Estes componentes são acionados pelos sistemas de apoio/suporte, também conhecidos como interfaces. Geralmente os sistemas de apoio são divididos em subgrupos ou subsistemas, e entre eles é possível mencionar os subsistemas pneumático, elétrico, de instrumentação e controle (I&C), entre outros. Este último subsistema é considerado relevante em uma instalação, já que é a interface de acionamento de outros subsistemas.

No presente trabalho, o subsistema I&C foi estruturado para atender os subsistemas elétrico, pneumático e de lubrificação de componentes dinâmicos. O subsistema pneumático está encarregado do acionamento de componentes que precisam de ar comprimido para sua operação como válvulas. Já válvulas motorizadas, por exemplo, precisam da interface elétrica. No caso do subsistema lubrificação, as análises se concentram na bomba de óleo, devido à baixa influência do resto dos componentes à falha desta interface [14]. Finalmente, o gás natural para a câmara de combustão é

armazenado em um tanque nas condições operacionais exigidas pelo estágio de expansão.

A energia armazenada é proveniente de uma usina solar fotovoltaica ou de um aerogerador. Portanto, também foram desenhados sistemas de alimentação de energia elétrica em função da fonte primária que, através de um barramento, permite acionar o motor do compressor durante a etapa de carregamento. Durante a etapa de descarregamento, os interruptores na linha de alimentação são abertos e o gerador entrega, através do barramento, energia elétrica de volta para a rede.

2.2. Modelo de confiabilidade

De forma geral, as vantagens introduzidas no método FMEA permitem [11]:

- Incluir falhas de causa comum (FCC), que geralmente são preponderantes no risco em sistemas com alta redundância;
- Determinar as dependências funcionais entre os componentes dos sistemas frontais e seus sistemas de apoio (interfaces), o que permite detectar as dependências críticas entre eles;
- Analisar os resultados com base na aplicação do princípio de Pareto, tornando a tomada de decisão mais objetiva;
- Determinar a causa, ou as causas, com maior contribuição à indisponibilidade, ou ao risco, da instalação;
- Tipificar as ações corretivas para componentes similares (por exemplo, bombas, compressores, válvulas pneumáticas, etc.);
- Determinar os tipos de componentes que mais contribuem para a criticidade e, portanto, os tipos de componentes mais importantes.

O método de modos de falhas e efeitos expandida (FMEAe) estima o risco do sistema através da seguinte expressão:

$$IRS = \frac{\sum_{i=1}^n IRC_i}{n} \quad (1)$$

onde: IRS é o Índice de Risco do Sistema; n é total de componentes-modos de falha do sistema; IRC_i é o Índice de Risco do Componente-Modo de falha i , e fornece uma medida da importância de cada componente-modo de falha dentro da função do sistema de acordo com três tipos de efeitos:

- Efeito sobre a disponibilidade (ED);
- Efeito sobre a saúde (ES); e
- Efeito sobre o ambiente (EA).

As expressões para este índice de risco são aplicadas com base no objetivo do estudo. No caso específico do presente trabalho, o foco está nas análises de confiabilidade, portanto, a equação (2) é a expressão que se aplica nas análises realizadas.

$$IRCd_i = q_i \cdot ED_i \cdot FPM_i \quad (2)$$

onde: q_i é a probabilidade de falha, ou indisponibilidade, do componente-modo de falha i ; ED_i é o grau de gravidade do efeito sobre a disponibilidade provocado pelo modo de falha do componente i ; e FPM_i é o fator de ponderação (qualidade) que considera a forma na qual o equipamento que apresenta um modo de falha i é acionado.

O Índice de Importância Relativa do Componente-Modo de Falha i (IIR_i), equação (3), permite saber quanto se desvia o valor IRC de um componente-modo de falha i do valor IRS , em excesso ou em defeito. Então, para a tomada de decisões é recomendável a combinação dos resultados de ambos os índices (IRC_i e IIR_i).

$$IIR_i = \frac{IRC_i}{IRS} \quad (3)$$

Assim, os componentes-modos de falha críticos, ou muito críticos, segundo os valores de IIR_i com desvios por excesso, importantes ou muito importantes, devem receber a maior prioridade na aplicação de medidas que diminuam sua criticidade [11].

Finalmente, os tipos, ou grupos, de componentes são avaliados com em função da sua criticidade através da equação (4). A partir deste critério, os tipos de componentes com maior contribuição ao risco podem ser identificados e, portanto, ações corretivas específicas para componentes semelhantes podem ser tipificadas, também podem ser propostas alterações no projeto.

$$IIC_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} IRC_i^k}{N_k} \quad (4)$$

onde: IIC_k é o Índice de Importância do tipo de Componente k ; N_k é o número total de modos de falha de componentes pertencentes ao grupo k , e IRC_i^k é o índice de risco do modo de falha do componente i pertencente ao grupo k .

2.3. Análise de Confiabilidade de Sistema

A modo de comparação, os resultados serão discutidos nas mesmas condições operacionais a partir de um método tradicional de análise qualitativa, a matriz de riscos e da técnica de análise semiquantitativa, FMEAe. Para as análises, a operação do sistema D-CAES é separada em duas etapas principais, carregamento e descarregamento respectivamente. Na Tabela 1 são apresentados os valores utilizados para avaliação da confiabilidade, ou do risco, de um sistema analisado em função do método utilizado, matriz de risco e FMEAe.

Para cada critério de avaliação corresponde uma cor, sendo possível um sistema apresentar desde uma confiabilidade muito baixa, ou risco de falha muito alto, até uma confiabilidade desejada, categorizada como muito alta, onde os riscos seriam tão baixos que poderiam ser assumidos. Este último critério, embora desejável, é dificilmente alcançado nas instalações reais.

Os resultados das análises são apresentados em estrutura de hierarquização, onde os componentes-modos de falha, ou tipo de componentes, são ordenados por tipo de importância. Logo, e com base no princípio de Pareto, aqueles com maior criticidade serão considerados como mais relevantes.

Tabela 1. Escala Qualitativa para avaliação da confiabilidade e do risco.

Cor	Avaliação	Matriz de Risco	FMEAe
	Confiabilidade Muito Baixa/	20	$1,0 \times 10^{-1}$
	Risco Muito Alto	16	$6,0 \times 10^{-2}$
	Confiabilidade Degrada/ Risco Médio	10	$3,0 \times 10^{-2}$
	Confiabilidade Alta/	6	$3,0 \times 10^{-3}$
	Risco Tolerável	3	$1,0 \times 10^{-3}$

Fonte: Adaptado de [15].

Para a aplicação do método FMEAe são necessários dados como tipo de componente, interface, função,

redundância, estado operacional, condições de trabalho, localização, código genérico, tipo de controle, modo de falha, causas da falha, frequência de ocorrência do evento e efeitos. Também são necessários dados de caráter estatístico, como taxas de falhas, tempos de reparação e observação, entre outros. No entanto, a disponibilidade de dados e informações específicas relacionadas com os sistemas CAES na literatura é baixa devido, principalmente, aos poucos estudos detalhados realizados sobre estes sistemas e às poucas plantas atualmente em operação. Portanto, foram considerados valores para os mesmos tipos de componentes, ou componentes análogos, sob condições e regimes de operação similares às esperadas na configuração CAES estudada. Estes valores foram levantados de registros disponíveis em bases de dados genéricas [14-17].

3. Resultados

Foram definidos 29 componentes-modos de falha para a etapa de carregamento considerando o acionamento do compressor a partir de uma usina solar fotovoltaica, e 26 componentes-modos de falha no caso do sistema acionado por uma turbina eólica de pequeno porte. A principal diferença na quantidade de componentes-modos de falha apurados está nas configurações das fontes primárias de energia consideradas. Sendo que o sistema acionado por uma fonte eólica apenas considera um único aerogerador, o que torna esta configuração mais simples quando comparada com a fonte solar fotovoltaica.

Ambas configurações foram avaliadas através dos métodos de matriz de riscos e FMEA e, em função do método de análise, o estado da confiabilidade de um sistema pode ser diferente. Por exemplo, a partir da aplicação da técnica de matriz de riscos, a confiabilidade do sistema é avaliada como “Alta”, ou com “Risco Tolerável” (Figura 2a e Figura 3a). No entanto, se considerado o método FMEA o sistema um apresenta um “Risco Alto”, ou “Baixa Confiabilidade” (Figura 2b e Figura 3b). Ou seja, o uso de parâmetros quantitativos de falhas e a caracterização das consequências permite obter resultados mais exaustivos a partir do método FMEA.



Figura 2. Avaliação do risco do sistema D-CAES acionado por uma fonte de geração solar fotovoltaica, a) Matriz de Risco; b) FMEA



Figura 3. Avaliação do risco do sistema D-CAES acionado por uma fonte de geração solar fotovoltaica, a) Matriz de Risco; b) FMEA

Resultados similares se observam se analisada a importância de cada componente–modo de falha em relação à função que realizam no sistema, mensurada através do índice de risco do componente (IRC_i). As criticidades dos componentes-modos de falha segundo o método de análise são detalhadas, em forma de gráfico de setores. Nestes gráficos é possível apreciar como alguns componentes críticos para a confiabilidade do sistema resultam transparentes para o método de análise tradicional, a matriz de riscos (Figura 4-Figura 7). A principal diferença nos resultados está dada pelo fato de que, diferente da matriz de riscos, o método FMEA considera um peso qualitativo que pondera a causa de um determinado modo de falha.

Adicionalmente, vale ressaltar que o sistema CAES acionado por uma usina solar fotovoltaica concentra menos componentes com criticidade “Alta” ou “Muito Alta”, 20,7% (Figura 6) que a mesma configuração acionada por um aerogerador de pequeno porte, 26,9% (Figura 7).

As diferenças entre os métodos não significa, necessariamente, que uma metodologia, ou técnica, é melhor que outra. Apenas permite estabelecer comparações que possibilitam escolher uma ferramenta em relação ao sistema proposto, aos riscos associados e aos objetivos perseguidos, entre outros aspectos.

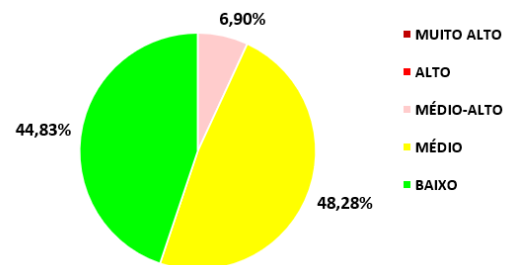


Figura 4. Criticidade dos componentes (IRC_i) do sistema D-CAES, acionado por uma fonte de geração solar fotovoltaica (Matriz de Risco). Fonte: elaboração própria.

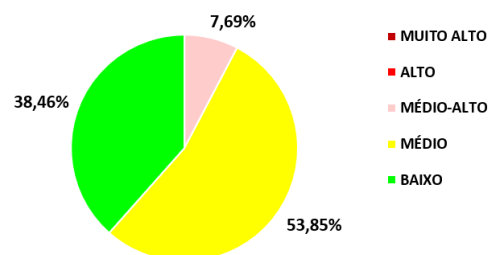


Figura 5. Criticidade dos componentes (IRC_i) do sistema D-CAES acionado por um aerogerador (Matriz de Risco). Fonte: elaboração própria.

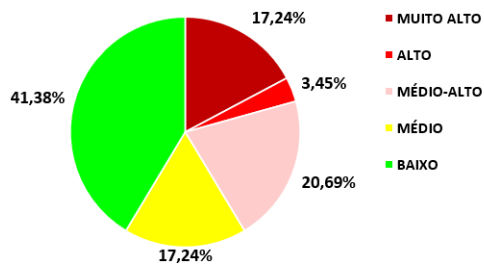


Figura 6. Criticidade dos componentes (IRC_i) do sistema D-CAES acionado por uma fonte de geração solar fotovoltaica (FME Ae). Fonte: elaboração própria.

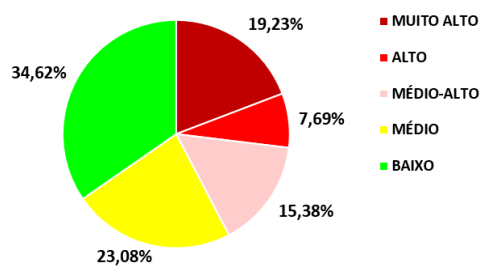


Figura 7. Criticidade dos componentes (IRC_i) do sistema D-CAES acionado por um aerogerador (FME Ae). Fonte: elaboração própria.

Por exemplo, através de ambas as técnicas, a configuração CAES com fornecimento de energia eólica durante a etapa de carregamento apresentou menor confiabilidade. Vale destacar que uma turbina eólica apresenta maior número de componentes dinâmicos e rotativos. Adicionalmente, no estudo realizado, a falha da fonte primária de energia considerando a geração eólica depende de um único componente global, a turbina eólica. Entretanto, no sistema solar fotovoltaico, as maiores contribuições às falha estão relacionadas com fatores de degradação dos módulos, sombreamento e falhas gerais que, geralmente, não representam uma indisponibilidade absoluta.

Embora os resultados destaquem uma maior contribuição ao risco da configuração considerando a fonte eólica, é necessário definir quais componentes são os mais relevantes. Logo, considerando a sensibilidade do modelo de confiabilidade FME Ae, a seleção dos componentes-modos de falha mais importantes, ordenados segundo o princípio de Pareto serão apresentados considerando este método.

3.1. Etapa de carregamento

Considerando os mesmos componentes-modos de falha definidos para a etapa de carregamento do sistema acionado por uma usina solar fotovoltaica, ou por um aerogerador, estes são listados segundo sua criticidade específica. Esta criticidade é calculada a partir do índice de risco do componente i (IRC_i), e permite observar como componentes que, geralmente

apresentam menor relevância nas análises presentes na literatura, resultam mais contribuintes à confiabilidade do sistema. Tal é o caso das válvulas motorizadas e da própria fonte primária de energia, que representam uma maior relevância no risco de falha do sistema do que componentes dinâmicos comumente mais considerados, como o compressor, o motor-gerador e as bombas.

No entanto, é recomendável que as ações e programas de manutenção devam estar focados em conjuntos de equipamentos/componentes agrupados por tipo, ou seja, é necessário realizar a tipificação da manutenção. Portanto, a partir do índice de importância por tipo de componente (IIC_k) a confiabilidade do sistema é avaliada a partir da contribuição de componentes mesmo tipo. Logo, e com base nos gráficos da Figura 8 e da Figura 9, aqueles grupos de componentes avaliados com maior índice de importância poderão ser priorizados nas estratégias de manutenção.

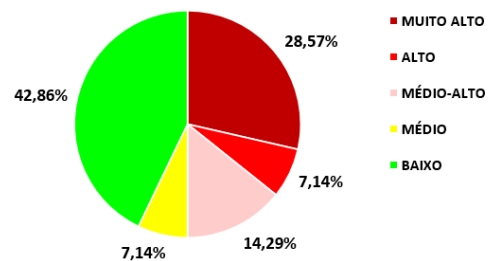


Figura 8. Índice IIC_k dos componentes do sistema D-CAES com FPE solar fotovoltaica. Fonte: elaboração própria.

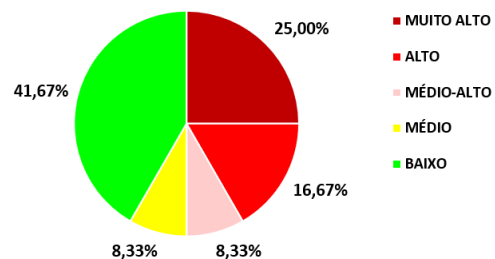


Figura 9. Índice IIC_k dos componentes do sistema D-CAES convencional com FPE eólica. Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 2 são hierarquizados e detalhados os tipos de componentes mais importantes para a confiabilidade da etapa de carregamento, considerando o acionamento do sistema a partir de uma fonte solar fotovoltaica (UFV) e uma fonte eólica. Nessa lista, componentes como válvulas e interruptores, também são fundamentais para a confiabilidade do sistema.

Tabela 2. Hierarquização dos tipos de componentes mais importantes na etapa de carregamento segundo o índice IIC_k .

Nº	Componente-Modo de Falha	
	FPE: UFV	FPE: Eólica
1	Válvula Motorizada	Válvula Motorizada
2	Compressor	Compressor
3	Interruptor Elétrico	Fonte Primária
4	Fonte Primária	Bomba de óleo (Lubríf.)
5	Bomba de óleo (Lubríf.)	Embreagem
6	Inversor CC/CA	I&C
7	Embreagem	Trocadores de Calor
8	I&C	Motor-Gerador

Fonte: elaboração própria.

Crítérios de desenho como redundância e diversidade dos componentes iguais, ou similares, são uma solução a estes problemas, incluindo a manifestação de eventos associados às falhas por causas comuns. Os compressores também se destacam como componentes que precisam especial atenção. Mas este tipo de equipamentos geralmente é atendido por planos de manutenção com base em métodos e ferramentas de análise do tipo preditivo. O sistema de instrumentação e controle (I&C) também é relevante em instalações com variações constantes nos seus estados operacionais. As bombas de óleo para lubrificação do sistema são importantes para garantir as condições operacionais durante a etapa de carregamento. Adicionalmente, o efeito da fonte primária de energia influencia diretamente sobre o processo de armazenamento de energia, já que a confiabilidade do processo dependerá diretamente da disponibilidade desta fonte. Ou seja, o desenho de uma planta CAES no depende apenas dos critérios associados à própria usina, mas também de fatores externos.

3.2. Etapa de descarregamento

A fonte primária de energia não tem impacto direto sobre a confiabilidade do sistema CAES durante a etapa de descarregamento, pois ela somente interage com o sistema de armazenamento durante a etapa de carregamento. Portanto, os perfis de riscos do sistema acionado por fontes solar fotovoltaica e eólica apresentam as mesmas características nesta etapa. As análises realizadas na etapa de descarregamento partem da definição de um maior número de componentes-modos de falha, 38, quando comparada com a etapa de carregamento. Ainda considerando critérios de redundância e diversidade de componentes, até 26,3% destes apresentam um nível de criticidade “Alto” ou “Muito Alto” (Figura 10) segundo a contribuição de cada componente ao risco do sistema. Este resultado é pouco desejado para a operação

confiável de um sistema, pois vários componentes demandam atenção especial, tornando os processos mais complexos e aumentando os custos de manutenção. Devido à quantidade de componentes com elevada criticidade é realizada a avaliação através do índice de importância por tipo de componente, o IIC_k , (Figura 11).

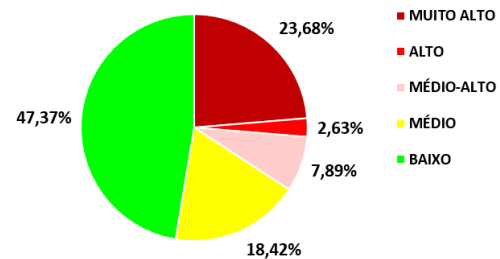


Figura 10. Perfil de riscos do sistema D-CAES na etapa de descarregamento segundo a criticidade dos componentes (IRC_i). Fonte: elaboração própria.

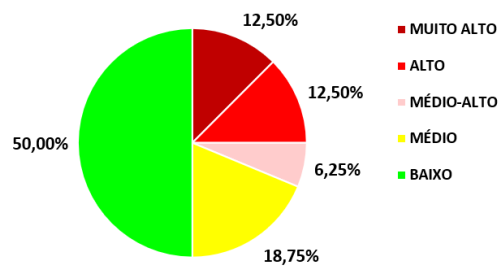


Figura 11. Perfil de riscos do sistema D-CAES na etapa de descarregamento segundo o Índice de importância por tipo de componente (IIC_k). Fonte: elaboração própria.

A partir da hierarquização dos tipos de componentes com maior criticidade as válvulas motorizadas e pneumáticas, a câmara de combustão, a turbina e a bomba de óleo para lubrificação dos equipamentos rotativos resultam mais importantes. De forma análoga à etapa de carregamento, o monitoramento contínuo e critérios de redundância adicional resultam necessários para diminuir a exposição aos riscos e, portanto, aumentar a confiabilidade no processo de descarregamento.

Finalmente, os grupos de componentes/equipamentos são listados de maior a menor relevância na Tabela 3 considerando sua importância funcional (IIC_k). Além da importância das válvulas, motorizadas e pneumáticas, e dos equipamentos rotativos, também se destaca o sistema de instrumentação e controle, responsável pelo controle e acionamento de componentes durante a operação. Portanto, as falhas associadas a esta interface se expressam nos mecanismos de atuação, sinalização errônea, sinais espúrios, entre outros.

Tabela 3. Hierarquização dos tipos de componentes mais importantes na etapa de descarregamento segundo o índice IIC_k .

Nº	Componente-Modo de Falha
1	Válvula Motorizada
2	Válvula Pneumática
3	Turbina
4	Bomba de óleo (Lubrif.)
5	Embreagem
6	I&C
7	Trocadores de Calor
8	Interruptor Elétrico

Fonte: elaboração própria.

Nesta etapa, as válvulas motorizadas e pneumáticas também resultam mais contribuintes à criticidade do sistema do que equipamentos considerados, geralmente, mais importantes, como é o caso da turbina, as bombas e a embreagem. Isto se reforça pelo fato de que, além das características de desenho deste tipo de componentes, também são tratados com políticas de operação e manutenção mais exigentes devido, principalmente, aos elevados custos e impactos associados às falhas.

4. Conclusões

No presente trabalho foram realizadas análises de confiabilidade sobre a configuração de um sistema CAES de pequeno porte, acionado por uma fonte solar fotovoltaica ou por uma fonte eólica. Para estas análises foi considerada a técnica de análise de modos de falhas e efeitos expandida (FMEAe). O impacto da fonte primária de energia, dos sistemas de apoio e das interfaces foi avaliado nas etapas de carregamento e descarregamento. Os efeitos de equipamentos menos considerados na literatura também foram estudados, e resultaram relevantes para a confiabilidade do sistema CAES.

Foi testada a sensibilidade do modelo de confiabilidade semiquantitativo FMEAe, em comparação com uma técnica qualitativa mais tradicional, a análise por matriz de riscos. Os resultados obtidos mediante estas técnicas permitiram determinar que componentes mais importantes para a criticidade do sistema resultam transparentes para a técnica qualitativa.

As análises realizadas para a etapa de carregamento de ressaltam a importância de componentes como válvulas e interruptores para a confiabilidade do sistema. Embora o compressor seja um equipamento importante, geralmente recebe maior atenção por parte do pessoal de operação e manutenção, devido às consequências que sua indisponibilidade representa. Portanto, equipamentos comumente considerados menos importantes também devem entrar nas prioridades da manutenção. O efeito da fonte primária de energia também resulta relevante para a

confiabilidade durante a etapa de carregamento. Sendo o sistema acionado por um aerogerador a configuração que apresenta maior contribuição ao risco.

Os resultados obtidos através das análises realizadas durante a etapa de descarregamento também destacaram a importância de componentes frequentemente menos atendidos. Por exemplo, válvulas motorizadas e pneumáticas, resultam mais relevantes para a confiabilidade que equipamentos amplamente abordados como a turbina e as bombas. Estes últimos, componentes mais observados pelas equipes de operação e manutenção devido, principalmente, aos seus elevados custos e altos impactos quando experimentam falhas ou indisponibilidades.

5. Agradecimentos

Este estudo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Brasil - Código Financeiro 001. Os autores são gratos à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio para participação neste evento, e à CAPES pela bolsa de doutorado concedida ao primeiro autor. O quarto autor também agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Produtividade (Proc.316482/2023-4).

6. Referências

- [1] Q. Hassan, S. Algburi, A. Z. Sameen, H. M. Salman, and M. Jaszczur, "A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications," *Results Eng.*, vol. 20, no. November, p. 101621, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101621.
- [2] J. Mitali, S. Dhinakaran, and A. A. Mohamad, "Energy storage systems: a review," *Energy Storage Sav.*, vol. 1, no. 3, pp. 166–216, 2022, doi: 10.1016/j.enss.2022.07.002.
- [3] A. R. Razmi and M. Janbaz, "Exergoeconomic assessment with reliability consideration of a green cogeneration system based on compressed air energy storage (CAES)," *Energy Convers. Manag.*, vol. 204, no. October 2019, p. 112320, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112320.
- [4] S. Bhattarai, R. Karki, and P. Piya, "Reliability and economic assessment of compressed air energy storage in transmission constrained wind integrated power system," *J. Energy Storage*, vol. 25, no. July, p. 100830, 2019, doi: 10.1016/j.est.2019.100830.
- [5] O. A. Ansari, S. Bhattarai, R. Karki, and C. Y. Chung, "Reliability evaluation of bulk power system considering compressed air energy storage," *2017 IEEE Electr. Power Energy Conf. EPEC 2017*, vol. 2017-Octob, pp. 1–6, 2017, doi:

- 10.1109/EPEC.2017.8286234.
- [6] M. Saghafi and M. B. Ghofrani, "Accident management support tools in nuclear power plants: A post-Fukushima review," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 29, no. 6, pp. 1196–1202, 2016, doi: 10.1016/j.pnucene.2016.06.006.
- [7] E. B. Abrahamsen, H. B. Abrahamsen, M. F. Milazzo, and J. T. Selvik, "Using the ALARP principle for safety management in the energy production sector of chemical industry," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 169, no. August 2017, pp. 160–165, 2018, doi: 10.1016/j.res.2017.08.014.
- [8] K. O. Kim and M. J. Zuo, "General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 169, no. September 2017, pp. 321–329, 2018, doi: 10.1016/j.res.2017.09.010.
- [9] C. Spreafico, D. Russo, and C. Rizzi, "A state of the art review of FMEA/FMECA including patents," *Comput. Sci. Rev.*, vol. 25, pp. 19–28, 2017, doi: 10.1016/j.cosrev.2017.05.002.
- [10] J. Kang, L. Sun, H. Sun, and C. Wu, "Risk assessment of floating offshore wind turbine based on correlation-FMEA," *Ocean Eng.*, vol. 129, no. 154, pp. 382–388, 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.11.048.
- [11] M. Perdomo, J. Rivero, and J. Salomón, "Reliability Engineering. Methods and Applications. Expanded Failure Modes and Effects Analysis. A different approach for system reliability assessment," in *CRC Press*, 1st ed., M. Ram, Ed. Florida, USA: CRC Press, 2020, pp. 305–336.
- [12] M. Nakhamkin *et al.*, "AEC 110 MW CAES Plant: Status of Project," *J. Eng. Gas Turbines Power*, vol. 114, no. 4, pp. 695–700, 1992, doi: 10.1115/1.2906644.
- [13] A. G. Ter-Gazarian, *Energy Storage for Power Systems*, 2nd ed. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2011.
- [14] O. P. OREDA, *OREDA: Offshore Reliability Data Handbook*. SINTEF Industrial Management, 2002.
- [15] M. Perdomo and J. Salomón, "MANUAL DEL USUARIO DEL PROGRAMA INFORMÁTICO ASeC 1.2 (2007-2015)," vol. 2. Havana, Cuba, 2015.
- [16] CCPS, *Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables*, 1st edition. New York, USA, 1989.
- [17] IAEA, "Component reliability data for use in probabilistic safety assessment," Viena, Austria, 1988.