

Relatório REP Grupo de Estudos - GES

Antonio Roberto Donadon (Coordenador), José Bione de Melo Filho,
Roberto José Gomes Ribeiro de Souza

Parte 1: Considerações Gerais

O Grupo GES avaliou 145 ITs e contou com 35 ITs aprovados para apresentação durante o XVIII SNPTEE, distribuídos pelos temas preferenciais, relatados a seguir:

Usina de Geração Eólica – 12 ITs

Usina de Geração Solar Fotovoltaica – 5 ITs

Geração de Energia com Hidrogênio – 7 ITs

Armazenamento de Energia – 9 ITs

Plantas Híbridas – 1 IT

Transferido – 1 IT - GD na área de concessão da CEMIG

Algumas linhas de investigação despertaram interesse especial entre os ITs aprovados como a aplicação de IA e modelos computacionais na operação e manutenção, gestão de ativos, avaliação de custos, operação e manutenção de armazenamento de energia conectado ao SEB para melhoria de qualidade e redução de impactos de fontes intermitentes.

Tecnologias de geração de hidrogênio, operação e avaliação de custos e aplicações como no transporte apresentaram abordagens e insights importantes.

Houve falta de ITs que abordassem avaliação da regulação na aplicação de soluções.

Como sugestão:

Sugere-se ajustar subtemas dos grandes temas com vistas a possibilitar geração ITs mais atualizados, pois REDs crescerão em importância e aplicação.

Parte2: Classificação dos Informes Técnicos

A seleção e classificação dos informes técnicos para o Grupo GES - Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e demais Recursos Energéticos Distribuídos, se deu inicialmente considerando o escopo e temas preferenciais do grupo de estudo e para construção da grade de apresentação buscou-se aglutinar temas base e similaridades dos desenvolvimentos apresentados nos ITs aprovados. Dessa maneira, optou-se pela classificação dos ITs pelos temas dominantes para definição dos blocos de apresentação.

Destaca-se que foram apresentados temas diversos alinhados ao temário do grupo, contudo, exigiu habilidade na montagem da grade de apresentações.

A seguir são listados os temas dominantes, assim como os títulos dos ITs pertencentes a cada período da Grade de Apresentação.

Geração Eólica

Tema 1: Modelos computacionais incluindo IA, operação e gestão dos ativos.

- EOLOSVIEW - ANÁLISE DE DESBALANCEAMENTO DE PÁS EÓLICAS POR VISÃO COMPUTACIONAL - ID 0372
- INOVAÇÃO EM O&M 4.0: DESENVOLVIMENTO DE CHATBOT COM I.A. NA CPFL UTILIZANDO GOOGLE CLOUD PARA EFICIÊNCIA OPERACIONAL – ID 927
- USO DE CURVAS DE CONFIABILIDADE E MANUTENIBILIDADE PARA A GESTÃO DE MANUTENÇÃO E DISPONIBILIDADE DE AEROGERADORES EM PARQUES EÓLICOS – ID 1900
- APLICAÇÃO DE MODELOS ESTATÍSTICOS E DE APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA ESTIMAR A VIDA ÚTIL RESTANTE DE AEROGERADORES – ID 1926
- METODOLOGIA APLICADA A MODELOS ORIENTADOS A DADOS VISANDO À DETECÇÃO DE ANOMALIAS EM TURBINAS EÓLICAS DO TIPO PMSG E DIRECT DRIVE COM O USO DE DEEP LEARNING
- EXTENSÃO DA VIDA ÚTIL DE ROLAMENTO PRINCIPAL DE TURBINA EÓLICA DIRECT DRIVE COM AÇÕES DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA E APOIO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO
- ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS VELOCIDADES DO VENTO EM DIVERSAS ESCALAS DE TEMPO E SUAS RELAÇÕES DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL E TEMPORAL COM OUTRAS FONTES RENOVÁVEIS
- ANÁLISE DE FALHA EM COMPONENTE DE AEROGERADOR
- COMBINAÇÃO DE MÉTODOS SUPERVISIONADOS E NÃO SUPERVISIONADOS DE MACHINE LEARNING, COM BASE EM DADOS DO SISTEMA SCADA, PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS DE COMPORTAMENTO DO MAIN BEARING EM AEROGERADORES
- ESTUDO DE CASO - FALHAS DO WYE-RING, SUAS CAUSAS E POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Tema 2: Plantas off shore

- CPE-OFFSHORE: MODELO DE ANÁLISE DE CONSTRUTIBILIDADE PARA PARQUES EÓLICOS OFFSHORE
- OFFSHORE WIND PLANT ASSESSMENT, THE LEVELIZED COST OF ENERGY UNDER SUSTAINABILITY AVALIAÇÃO DE USINAS EÓLICAS OFFSHORE, CÁLCULO DO CUSTO NIVELADO DA ENERGIA SOB

Hidrogênio

Dada a temática diversificada optou-se por agrupar o tema hidrogênio com similaridades

Tema 1: Tecnologias de produção e desafios da tecnologia

- DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA PRODUÇÃO BIOHIDROGÊNIO EM UM PROTÓTIPO DE CÉLULA DE ELETRÓLISE MICROBIANA
- PERSPECTIVA DE PRODUÇÃO DO BIO-HIDROGÊNIO NA AMAZÔNIA: POTENCIAL E DESAFIOS
- METODOLOGIA DE CAPACITAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS PARA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PLANTAS DE HIDROGÊNIO: EXPERIÊNCIA DO CENTRO AVANÇADO DE TECNOLOGIAS DE HIDROGÊNIO DO ITAIPU PARQUETEC APLICADO AO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.
- MODELAGEM DE SISTEMAS INTEGRADOS FORMADOS POR CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO E TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO EM ESTADO SÓLIDO VISANDO AO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR ELÉTRICO

Tema2: Avaliação de Custos, impactos e operação

- AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE H2 POR MEIO DE BOG ORIUNDO DE FSRU
- A UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE NO TRANSPORTE: AVALIAÇÃO DE CUSTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS

- OPERAÇÃO DE RETIFICADOR COM IGBTs PARA ELETROLISADOR TIPO PEM EM CONDIÇÃO DE FALTA DE FASE

Geração Solar Fotovoltaica

Tema 1: Projeto, operação e qualidade dos dados

- BOAS PRÁTICAS DE PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE USINAS AGRIVOLTAICAS
- ANÁLISE DE DEFEITOS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO ENSAIOS DE ELETROLUMINESCÊNCIA
- QUALIDADE DOS DADOS OBSERVADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR: UMA ANÁLISE DA REDE SOLARIMÉTRICA DOS PARQUES SOLARES E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Tema 2: Modelagem de dados, técnicas e IA

- IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE EVENTOS DE INEFICIÊNCIA EM PLANTAS FOTOVOLTAICAS CENTRALIZADAS
- SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ELEMENTOS DE UMA USINA FOTOVOLTAICA

Armazenamento de Energia

Tema 1: Qualidade e confiabilidade SEB

- IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA HÍBRIDO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA MELHORIA DA CONFIABILIDADE E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM SERVIÇO AUXILIAR DE SUBESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO DA ELETROBRAS CHESF
- APLICAÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA CORREÇÃO DE DISTÚRBIOS DE CONTROLE DE CARGA E FREQUÊNCIA.
- ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA ELÉTRICO NA PRESENÇA DE FONTES INTERMITENTES DE ENERGIA COM ARMAZENAMENTO
- ANÁLISE DE INVESTIMENTO PARA O BESS NO LRCAP 2025 UTILIZANDO A MÉTRICA DE RISCO CVAR.
- ANÁLISE DE VIABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA MITIGAÇÃO DE CONSTRAINED-OFF EM PARQUES EÓLICOS: UM ESTUDO DE CASO NO CONJUNTO EÓLICO TRAIRÍ
- INTEGRAÇÃO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO POR BATERIAS UTILITY SCALE À UM COMPLEXO HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO

Tema 2: Operação, controle e manutenção

- PRIMEIRO BESS (BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM) DE LARGA ESCALA INSTALADO NO BRASIL – EXPERIÊNCIA E DESAFIOS NA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO - CASO SE REGISTRO
- INTEGRAÇÃO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO POR BATERIAS UTILITY SCALE À UM COMPLEXO HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO
- PROTEÇÃO E CONTROLE EM BATERIAS DE SEGUNDA VIDA: UMA ABORDAGEM MULTISTRING

Plantas Híbridas

- ARQUITETURA DE AGENTES DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA PROSPECÇÃO OTIMIZADA DE RECURSOS EÓLICOS E SOLARES

IT transferido

Tema: Impacto técnico e econômico expansão da GD

- ANÁLISE DA EXPANSÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA ÁREA DE CONCESSÃO DA CEMIG – D NO PERÍODO DE 2017 A 2020

Parte 3 - Relatório sobre os Informes Técnicos

Abaixo estão os ITs por tema principal do grupo estudos – GES.

Tema: Usina de Geração Eólica – 12 ITs

Título: EOLOSVIEW - ANÁLISE DE DESBALANCEAMENTO DE PÁS EÓLICAS POR VISÃO COMPUTACIONAL - ID 0372

Trabalho desenvolvido pelo “NEPEN Núcleo de Estudos e Pesquisas do Nordeste” com o objetivo de propor um sistema automatizado e portátil que permita utilizar drones e visão computacional offline para detectar oscilações e desbalanceamento de pás eólicas com precisão e apoiar manutenção e ajustes de projeto, pois o desbalanceamento causa vibrações excessivas, desgaste prematuro paradas não programadas. Utiliza, testa e compara diferentes modelos para tratamento de dados e imagens como resultado preliminar tem-se a segmentação precisa das pás, o rastreamento suave e contínuo e métricas confiáveis extraídas.

Título: COMBINAÇÃO DE MÉTODOS SUPERVISIONADOS E NÃO SUPERVISIONADOS DE MACHINE LEARNING, COM BASE EM DADOS DO SISTEMA SCADA, PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS DE COMPORTAMENTO DO MAIN BEARING EM AEROGERADORES – ID 1789

Informe desenvolvido pela UFPE, IFPE e CPFL, destacou que a temperatura de componentes de aerogeradores desempenha um papel crucial no diagnóstico de falhas que acometem tais componentes. Nesse contexto, o IT teve por objetivo detectar mudanças no comportamento do main bearing de aerogeradores por meio de modelos de Machine Learning (ML) aplicados a dados operacionais de temperatura do main bearing registrados pelo sistema SCADA. Foram selecionados 11 aerogeradores para a construção das bases de treinamento e teste, sendo 5 aerogeradores para teste, representados por dados do sistema SCADA para um período de um ano. O processo de rotulação não supervisionada foi aplicado como um método de rotulação automática para os dados do sistema SCADA. Utilizando-se um framework de autoML, realizou-se o treinamento e teste de 7 diferentes tipos de classificadores. Os cinco melhores modelos treinados obtiveram valores de acurácia e AUC acima de 0,85. Em relação ao conjunto de teste, o modelo ET e Xgboost foram avaliados em dois aerogeradores de teste, apresentando uma acurácia geral acima de 0,85, mas com uma menor sensibilidade de acerto para aumentos de temperatura, indicando a necessidade de ajustes nos modelos treinados.

Título: CPE-OFFSHORE: MODELO DE ANÁLISE DE CONSTRUTIBILIDADE PARA PARQUES EÓLICOS OFFSHORE - ID 1488

Informe técnico elaborado pelo Lactec, caracterizou o crescimento global da energia eólica offshore, vantagens marítimas como ventos constantes maior velocidade e áreas disponíveis, bem como da necessidade de ferramentas para planejamento e decisão em projetos off shore. Nesse contexto, tratou do desenvolvimento de sistema computacional para auxílio à tomada de decisão e foi desenvolvido utilizando plugins e lógicas em Python

sendo compostos por diferentes módulos abrangendo desde a seleção de aerogeradores, passando por todas as fases de projeto como: Cabos e subestações, Portos, Estruturas e Fundações, Construtibilidade, Operação e Manutenção, Descomissionamento e Análise de Ciclo de Vida. Apresentou estudo de caso e conclusões

Título: ANÁLISE DE FALHA EM COMPONENTE DE AEROGERADOR – ID 1258

Informe técnico desenvolvido pelo Lactec apresentou estudo referente à análise de falha do rolamento de uma turbina eólica. Foram realizadas análises de inspeção visual, macrografia, metalografia, dureza e composição química das partes que compõem o conjunto, formado por anel externo e interno, esferas, gaiola e da graxa utilizada na lubrificação. Foi identificado a presença de desgaste abrasivo, pitting, escamamento e corrosão ao longo de todo perímetro do rolamento, bem como contaminação por sais na graxa utilizada. A caracterização dos materiais confirma que eles são adequados para a aplicação em questão (rolamento). Não há apenas uma causa associada diretamente à falha do rolamento, e sim um conjunto de hipóteses, que engloba a exposição à contaminantes externos e características de operação.

Título: INOVAÇÃO EM O&M 4.0: DESENVOLVIMENTO DE CHATBOT COM I.A. NA CPFL UTILIZANDO GOOGLE CLOUD PARA EFICIÊNCIA OPERACIONAL – ID 927

Informe técnico desenvolvido pela SantoDigital e a CPFL Energia, apresentou o ChatBot com aplicação de IA generativa desenvolvido para a CPFL, que moderniza o processo de manutenção corretiva de aerogeradores, oferecendo assistência em linguagem acessível para técnicos de campo e adaptando-se ao nível de conhecimento de cada usuário. Essa solução melhora drasticamente a qualidade dos dados registrados, padronizando o registro de falhas, e promove a disseminação de conhecimento entre as equipes, eliminando a dependência de listas fixas de troubleshooting e permitindo abordagens dinâmicas na resolução de problemas. Os impactos operacionais e sociais são significativos: observa-se um aumento na produtividade e agilidade do atendimento, com redução substancial do tempo de resolução de falhas, diminuindo a indisponibilidade dos aerogeradores. O ChatBot também empodera técnicos com menos experiência, ao fornecer orientações técnicas em uma linguagem ajustada à compreensão do usuário, reduzindo a curva de aprendizado para novos profissionais. A ferramenta integra-se às bases de dados da fabricante (Suzlon), ao sistema GMA e ao histórico de e-mails de resolução de falhas, garantindo acesso imediato a informações relevantes e a soluções já aplicadas anteriormente. Para sua implementação, foram utilizadas tecnologias como o DialogFlow CX, o Gemini Agent Builder e o Google Cloud Storage, oferecendo uma infraestrutura de IA na nuvem robusta e escalável. O projeto foi desenvolvido de forma colaborativa entre a, seguindo metodologias ágeis, o que permitiu alinhamento contínuo com as necessidades operacionais, acelerou a entrega de valor e reforçou a transformação digital nas operações de manutenção.

Título: OFFSHORE WIND PLANT ASSESSMENT, THE LEVELIZED COST OF ENERGY UNDER SUSTAINABILITY ASSUMPTIONS – ID 1783

Informe técnico foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Energia Elétrica CEPEL, contextualizou o trabalho a partir de compromissos assumidos, em 2023, mais de 130 países se comprometeram a triplicar a capacidade global de energia renovável até o final da década. Para instalações eólicas *offshore*, essa meta ambiciosa se traduz em aproximadamente 495 GW de capacidade instalada em todo o mundo. Nesse contexto, o mercado brasileiro de energia eólica *offshore* ainda está em fase inicial, em contraste com a tecnologia madura e bem estabelecida observada em regiões como a China e o Mar do Norte. No Brasil, atrasos em iniciativas de planejamento estratégico, incluindo o Planejamento Espacial Marinho e os estudos de Avaliação Ambiental Estratégica, introduziram desafios legais, sociais, ambientais e logísticos adicionais. Como resultado, os desenvolvedores são cada vez mais obrigados a realizar suas próprias avaliações estratégicas. Para os investidores, uma compreensão abrangente do desempenho econômico, social e ambiental dos projetos eólicos *offshore* é crucial. Esse conhecimento permite uma negociação mais eficaz de parcerias e maior competitividade em leilões. Este estudo aplica melhores práticas e ferramentas avançadas baseadas em SIG para otimizar o desempenho geral do projeto. O marco metodológico GIS-SPOWER-BR, complementado por ferramentas especializadas de otimização e modelagem de custo, foi utilizado para integrar princípios de sustentabilidade desde a fase de planejamento conceitual das usinas eólicas *offshore*. Essa integração teve por objetivo reduzir os riscos associados ao Custo Nivelado de Energia (LCOE). O estudo avaliou o desempenho de custos e o investimento total em três alternativas nos *hotspots* de recurso eólico *offshore* do Brasil, identificando os principais direcionadores de custos e insumos que influenciam significativamente a viabilidade financeira dos parques eólicos.

Título: ANÁLISE EXPLORATÓRIA DAS VELOCIDADES DO VENTO EM DIVERSAS ESCALAS DE TEMPO E SUAS RELAÇÕES DE DEPENDÊNCIA ESPACIAL E TEMPORAL COM OUTRAS FONTES RENOVÁVEIS – ID 1895

Informe técnico elaborado pela equipe pertencente a Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, tratou da variabilidade e a intermitência da geração eólica, que constituem um desafio para sua integração ao sistema. Uma capacidade inadequada de prever as suas produções nos diversos horizontes de tomada de decisão afeta adversamente o trade-off entre segurança, economicidade e mudanças do clima, sendo fundamental considerar as incertezas dessas fontes nas diferentes atividades da operação e da expansão do SIN, além da comercialização de energia. Uma etapa prévia e crucial nesse processo consiste em analisar e explorar as séries temporais (ou séries históricas) disponíveis nas diversas escalas temporais (horária, diária, mensal e anual), com o objetivo de compreender mais profundamente os dados, extraíndo padrões implícitos, identificando tendências, correlações e estruturas nos dados, e ainda possibilidades de agrupamento. Neste trabalho são empregadas técnicas de Análise Exploratória de Dados e Séries Temporais, para computar estatísticas descritivas para parques eólicos representativos de cinco regimes de ventos das regiões Nordeste e Sul do Brasil, incluindo médias, desvios-padrão e assimetrias das séries temporais de velocidades do vento, com granularidades mensais e horárias. São ainda investigados o grau de dependência temporal das velocidades do vento, a nível mensal e horário, para um conjunto de parques eólicos e da média das velocidades do vento de todos os parques eólicos conectados a uma mesma subestação agregadora. Também são analisadas a dependência espacial entre parques eólicos e as

respectivas subestações agregadoras. A dependência espacial entre as velocidades do vento e as vazões afluentes às hidrelétricas também é explorada. São utilizadas séries horárias de reanálise compreendendo 44 anos de dados.

Título: EXTENSÃO DA VIDA ÚTIL DE ROLAMENTO PRINCIPAL DE TURBINA EÓLICA DIRECT DRIVE COM AÇÕES DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA E APOIO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO – ID 1736

Informe técnico elaborado pela AQTech e CEMIG, tratou das turbinas eólicas direct drive que é tecnologia significativa na geração de energia eólica. Essa configuração reduz o número de componentes mecânicos sujeitos a falhas, resultando em menor necessidade de manutenção e menos tempo de parada. No entanto, para operar a baixas velocidades de rotação, os geradores das turbinas direct drive tendem a ser maiores e mais pesados, acarretando custos mais elevados em relação aos geradores de turbinas gearbox driven de mesma capacidade. Em caso de falha que exija a substituição de grandes componentes, os custos para as turbinas direct drive são geralmente superiores. Para mitigar esses custos, são comumente utilizados sistemas de monitoramento da condição (CMS). Tais sistemas identificam defeitos precocemente, permitindo um melhor planejamento das ações corretivas, e identificam condições operativas que reduzem o risco de operação, mesmo na presença de defeitos. Este trabalho apresenta um estudo de caso de extensão da vida útil do rolamento principal de uma turbina direct drive de 1.5MW através de rotinas de lubrificação e apoio do CMS. Em setembro de 2022, foi detectado um dano na pista interna do rolamento principal upwind. A rotina trimestral de lubrificação e o monitoramento de vibrações mostraram reduções na magnitude de vibração, mantendo a turbina em operação contínua sem limitações de carga ao longo de 21 meses.

Título: USO DE CURVAS DE CONFIABILIDADE E MANUTENIBILIDADE PARA A GESTÃO DE MANUTENÇÃO E DISPONIBILIDADE DE AEROGERADORES EM PARQUES EÓLICOS – ID 1900

Informe técnico elaborado por colaboradores da AQTECH ENGENHARIA E INSTRUMENTACAO S/A e AUREN ENERGIA, destacou que a energia eólica consolidou-se como a segunda maior fonte de geração elétrica no Brasil, com mais de 11 mil aerogeradores em operação. Além dos benefícios ambientais, ela contribui para a diversificação da matriz energética e impulsiona o desenvolvimento econômico e social. Contudo, o país enfrenta desafios relacionados à confiabilidade e flexibilidade do sistema elétrico. Nesse contexto, o estudo realizado teve por objetivo desenvolver métodos avançados de análise de dados para gerar curvas de confiabilidade e manutenibilidade de aerogeradores. A metodologia envolve a coleta e integração de dados de diferentes fontes (registros de manutenção, históricos de falhas e medições operacionais), aplicação de processos ETL para consolidação em um *data lake*, e análise estatística para calcular métricas como MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) e MTTR (Tempo Médio Para Reparo). A partir dessas métricas, são construídas visualizações que servem como base para o diagnóstico de longo prazo dos equipamentos, como por exemplos gráficos de Jack knife. A fase final inclui a visualização dos resultados permitindo identificar tendências e padrões de falha, facilitando a tomada de decisão. Como resultado, espera-se que estas análises ofereçam uma visão detalhada sobre taxas de falhas e eficiência das manutenções,

identificando padrões críticos de desgaste e pontos recorrentes de falha. Isso subsidiará práticas de manutenção preditiva, reduzindo custos, aumentando a disponibilidade dos aerogeradores e melhorando a eficiência energética.

Título: APLICAÇÃO DE MODELOS ESTATÍSTICOS E DE APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA ESTIMAR A VIDA ÚTIL RESTANTE DE AEROGERADORES – ID 1926

Informe técnico elaborado por colaboradores da AQTECH ENGENHARIA E INSTRUMENTACAO S/A e AUREN ENERGIA, destacou o crescimento do uso de energias renováveis intermitentes, especialmente das fontes eólicas, trouxe desafios de Operação e Manutenção (O&M) ao setor elétrico. Desta forma, a confiabilidade dos aerogeradores tornou-se um fator extremamente importante a ser considerado, uma vez que ajuda a evitar paradas não planejadas. Com o objetivo de evitar manobras inesperadas, técnicas baseadas em ciência de dados vêm sendo amplamente utilizadas, principalmente com base em métodos estatísticos e em *machine learning*. Essas técnicas auxiliam as equipes de O&M a planejar manutenções preventivas, prolongando a vida útil dos equipamentos. Desta forma, o estudo em questão aplica métodos baseados em ciência de dados com o intuito de encontrar o método mais adequado na estimativa do *Remaining Useful Life* (RUL). As abordagens foram aplicadas utilizando dados reais de 25 turbinas eólicas de um complexo no nordeste do Brasil, comparando os resultados para identificar a abordagem mais eficaz na estimativa da vida útil restante.

Título: ESTUDO DE CASO - FALHAS DO WYE-RING, SUAS CAUSAS E POSSÍVEIS SOLUÇÕES – ID 1936

Informe técnico desenvolvido pela ENGIE tratou da “ANÁLISE DE FALHA DAS CONEXÕES DOS ROTORES DE GERADORES DFIG PARA APLICAÇÃO EÓLICA”. Foram detectadas trincas recorrentes nas soldas e nas barras de conexão do bobinado dos rotores dos geradores eólicos, ocasionando múltiplas paradas operacionais nos aerogeradores de uma das frotas da Engie e mesmo tendo sido reparadas conforme o procedimento técnico original, as falhas reapareceram, evidenciando a necessidade de revisão dos métodos aplicados ou da adoção de uma solução mais robusta e durável. O tipo de gerador da frota é o Gerador Assíncrono DFIG (Double Fed Induction Generator) — também conhecidos como geradores de indução com rotor bobinado. Esses equipamentos são controlados por conversores de frequência, permitindo operação em velocidade variável e com maior eficiência na conversão da energia eólica em energia elétrica. Foram realizadas análise de falhas e proposta solução para mitigar os pontos críticos de falha identificados, foi definida e adotada a técnica de brasagem com vareta de prata, que apresenta vantagens significativas em relação à solda TIG para esta aplicação. Houve comprovação da metodologia desenvolvida com mais de 12 geradores foram recuperados com sucesso utilizando brasagem com vareta de prata, sem registro de recorrência de falhas.

Título: METODOLOGIA APLICADA A MODELOS ORIENTADOS A DADOS VISANDO À DETECÇÃO DE ANOMALIAS EM TURBINAS EÓLICAS DO TIPO PMSG E DIRECT DRIVE COM O USO DE DEEP LEARNING – ID 1991

Informe técnico foi desenvolvido ELETROBRAS CHESF, SENAI CIMATEC e UNIVERSIDADE DE SURREY.

A crescente demanda por fontes de energia limpa e a rápida expansão da energia eólica no Brasil e no mundo têm ampliado os desafios associados à operação e manutenção de turbinas de aerogeradores. Este trabalho propõe a aplicação de modelos de Inteligência Artificial (IA) para detecção automática de falhas em turbinas eólicas do tipo PMSG e direct drive, com base em dados operacionais extraídos do sistema SCADA do Parque Eólico de Casa Nova A, pertencente à Eletrobras Chesf. Duas abordagens distintas foram adotadas: a primeira utilizando a técnica de Machine Learning Random Forest (RF) e a segunda baseada em Deep Learning com o modelo Multi-Layer Perceptron (MLP). O processo envolveu etapas de pré-processamento dos dados, normalização, treinamento supervisionado, validação cruzada e análise das principais métricas de avaliação, como Accuracy, Precision, Recall, F1-score, Specificity e ROC AUC. Os resultados indicaram desempenho robusto de ambos os modelos, com destaque para o MLP, que alcançou acurácia de 100% e altos índices de sensibilidade e especificidade, apresentando também estabilidade ao longo do treinamento. O modelo RF demonstrou excelente capacidade discriminativa, evidenciada pelo seu alto valor de ROC AUC (0,9986), embora com maior taxa de falsos positivos. A análise dos resultados reforça o potencial de aplicação das ferramentas de IA como suporte à manutenção preditiva em sistemas eólicos, contribuindo para o aumento da disponibilidade, confiabilidade e eficiência na gestão dos ativos energéticos.

Tema: Usina de Geração Solar Fotovoltaica

Título: ANÁLISE DE DEFEITOS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO ENSAIOS DE ELETROLUMINESCÊNCIA - ID 20

Título: IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE EVENTOS DE INEFICIÊNCIA EM PLANTAS FOTOVOLTAICAS CENTRALIZADAS – ID 855

Trabalho desenvolvido pelo com o Radix Engenharia e Desenvolvimento de Software e Enel Green Power tratou e informou que a disponibilidade de inversores em usinas fotovoltaicas é alta, entretanto, analisar os equipamentos da planta do ponto de vista energético é fundamental para garantir a maior eficiência possível, maximizando a geração renovável. Operar um grande quantitativo de plantas solares, como é o caso da Enel Green Power, é um desafio complexo, uma vez que as ineficiências de cada planta precisam ser identificadas e prontamente endereçadas. Usando o AVEVA PI System, foi possível acelerar a identificação de falhas e auxiliar na resposta à manutenção. Sete plantas foram padronizadas, de acordo com a hierarquia de ativos já implementada e os objetivos da equipe de Operação e Manutenção (O&M), utilizando dashboards para mostrar eventos e indicadores importantes. A ideia foi criar telas com visualização rápida de dados brutos, indicadores de indisponibilidade e falha de comunicação de equipamentos em tempo real, uma comparação direta entre a potência ou energia da planta e o produzível e por fim, uma visão estratégica de ocorrências de falha. Foi também desenvolvido um sistema de classificação automática de ineficiências de maneira a integrar os sistemas já utilizados pela Enel Green Power, fornecendo informações de causa sugerida para cada ineficiência através de regras de negócio já validadas pela empresa. A classificação automática hoje

gira em torno de 90% para cada planta, trazendo um ganho operacional significativo. Estima-se que as perdas anuais evitadas sejam superiores a um dia inteiro de produção ótima no Complexo de São Gonçalo, uma das maiores plantas fotovoltaicas em território brasileiro.

Título: QUALIDADE DOS DADOS OBSERVADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR: UMA ANÁLISE DA REDE SOLARIMÉTRICA DOS PARQUES SOLARES E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS – ID 1222

Trabalho desenvolvido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, caracterizou o Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual é um sistema de dimensões continentais e sua matriz possui uma capacidade instalada de mais de 235 GW, sendo 90% de fontes renováveis, dos quais cerca de 46% são hidráulicas e cerca de 44% das demais fontes renováveis (eólica, solar supervisionada, micro e minigeração distribuída e biomassa). Em relação a geração supervisionada, a solar fotovoltaica representa 7% e a fonte eólica 14%. Estes números revelam a importância dos dados meteorológicos na operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) e que tende a aumentar nos próximos anos, considerando a expansão da fonte solar dessas fontes de geração. O objetivo principal deste trabalho foi realizar uma análise comparativa entre os dados horários de irradiação solar provenientes da rede solarimétrica dos parques supervisionados pelo ONS e da rede de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e avaliar a qualidade destas medições em relação a valores nulos, repetidos e aos limites mínimo de 0W/m^2 e máximo de 1366 W/m^2 . O período analisado foi de 2020 a 2024, onde foram selecionados parques com no mínimo 2 anos de operação. A seleção das estações meteorológicas foi baseada na distância máxima de 40 km em relação aos parques. Desta forma, foram selecionados 121 parques solares e 19 estações meteorológicas, distribuídas em oito estados da federação das Regiões Nordeste e Sudeste. Em ambas as redes, a falha mais frequentemente encontrada são de dados nulos, correspondendo a 18% na rede solarimétrica dos parques e 26% na rede do INMET. Em segundo lugar, são os dados negativos nas estações do INMET, com 6%, e os dados repetidos nos parques, também com 6%.

Título: BOAS PRÁTICAS DE PROJETO E IMPLANTAÇÃO DE USINAS AGRIVOLTAICAS – ID 1442

A CEMIG, EPAMIG e CPQD estão desenvolvendo o projeto “P&D-169_2023 - D0671 Desenvolvimento de Sistema de Produção Integrada de Energia Elétrica Fotovoltaica e Alimentos – Agrivoltaico”. Este artigo trata dos desafios de projeto e instalação deste tipo de usinas em áreas de uso compartilhado entre as atividades agrícolas e de geração de energia, como foco especial nos requisitos técnicos estruturais.

Título: SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS DEVIDO A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM ELEMENTOS DE UMA USINA FOTOVOLTAICA – ID 1973

Informe técnico elaborado pela MV Power aborda os efeitos de transitórios eletromagnéticos causados por descargas atmosféricas em elementos da usina

fotovoltaica Pongaí I, utilizando simulações computacionais. A modelagem da usina foi realizada com o software ATPDraw (Alternative Transients Program), onde incluíram-se os módulos solares, inversores, transformador de potência, cabos de conexão, sistema de aterramento e o equivalente da rede concessionária. Modelos disponíveis no software de simulação foram utilizados para simular descargas atmosféricas e analisar os transitórios eletromagnéticos. Os resultados indicam que o transformador é um dos vulneráveis, apresentando picos de tensão e correntes elevadas que podem causar danos significativos, caso o nível básico de isolamento seja ultrapassado. Para mitigar esses efeitos, realizou-se a instalação de um dispositivo supressor de surtos (para-raios) no ramal de entrada da usina para visualizar o efeito da inserção deste equipamento nos demais componentes da usina. Este estudo destaca a importância de medidas de proteção eficazes para garantir a operação segura e contínua de usinas fotovoltaicas, contribuindo para a confiabilidade da geração solar.

Tema: Geração de Energia com Hidrogênio

Título: AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE GERAÇÃO DE H₂ POR MEIO DE BOG ORIUNDO DE FSRU – ID 816

Informe técnico elaborado pela Radix Engenharia e Software, evidenciou que as mudanças climáticas observadas ao longo dos anos impulsionaram um processo de transição energética a fim de reverter os indesejáveis efeitos do acúmulo de carbono na atmosfera. Nesse cenário, o gás natural surge como um agente estratégico de transição, por possuir uma queima menos intensa em carbono quando comparada a outros combustíveis fósseis. Esse trabalho tem como foco a utilização do boil-off gas (BOG) gerado por uma unidade de armazenamento e regaseificação flutuante (FSRU) como matéria prima para a geração de hidrogênio azul, uma vez que o CO₂ é capturado. Nesse sentido, um estudo de viabilidade econômica foi conduzido visando a implantação de uma planta de reforma a vapor de metano (SMR) dentro da FSRU utilizando a metodologia empregada na norma técnica da EPE sobre o hidrogênio azul. A partir dos resultados, foi constatado que a quantidade de BOG gerada não consegue gerar uma balança comercial favorável para implantação dessa instalação em uma FSRU. Todavia, a criação de hubs voltados para esse tipo de situação pode ser uma situação mais atrativa financeiramente.

Título: PERSPECTIVA DE PRODUÇÃO DO BIO-HIDROGÊNIO NA AMAZÔNIA: POTENCIAL E DESAFIOS – ID 1220

Informe técnico desenvolvido pela eAmazônia - Energia Sustentável e Inovação evidenciou que a transição energética global demanda soluções sustentáveis e, o hidrogênio, especialmente o bio-hidrogênio produzido a partir de biomassa, surge como um vetor estratégico para a descarbonização. A Amazônia, com seu vasto potencial renovável e abundância de resíduos florestais, agrícolas e urbanos, apresenta condições ideais para produção de bio-hidrogênio. Tecnologias como gaseificação, pirólise e fermentação escura permitem a conversão eficiente desses resíduos em energia limpa, com potencial para

substituir o diesel em comunidades isoladas e reduzir emissões de carbono. No entanto, desafios como logística, infraestrutura e custos elevados ainda limitam a implementação em larga escala. Este estudo, baseado em revisão bibliográfica e análise de dados, explora o potencial técnico e as oportunidades do bio-hidrogênio na Amazônia, destacando a importância de políticas públicas, parcerias locais e inovações tecnológicas para viabilizar uma transição energética justa e sustentável na região

Título: METODOLOGIA DE CAPACITAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS PARA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE PLANTAS DE HIDROGÊNIO: EXPERIÊNCIA DO CENTRO AVANÇADO DE TECNOLOGIAS DE HIDROGÊNIO DO ITAIPU PARQUETEC APLICADO AO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO - ID 597

Informe técnico desenvolvido pelo Itaipu Parquetec, tratou da experiência do centro de tecnologias de hidrogênio aplicado ao setor elétrico brasileiro. Destacou que os Diversos setores da economia devem estar preparados para a inserção das tecnologias do hidrogênio (Novos modelos de negócio) , que a Integração do setor elétrico brasileiro apresenta demanda crescente por soluções mais limpas e flexíveis o que demanda a possibilidade de novos empregos/perfis profissionais e, portanto, existe a necessidade de capacitação técnica especializada. Apresenta metodologia e cursos de formação necessários combinando teoria e prática em planta real, garantindo formação sólida em hidrogênio. Esta iniciativa responde à crescente demanda do setor elétrico brasileiro por profissionais qualificados. O modelo de capacitação fortalece indicadores de impacto social e de qualificação profissional do PEQuI. A experiência adquirida pode ser replicada em outras iniciativas de produção e aplicação de hidrogênio. A formação técnica qualificada é decisiva para o sucesso da transição energética no Brasil.

Título: DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DA PRODUÇÃO BIOHIDROGÊNIO EM UM PROTÓTIPO DE CÉLULA DE ELETRÓLISE MICROBIANA – ID 1444

Informe técnico desenvolvido pelo IFSC, Instituto Federal de Santa Catarina e UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina.

O Acordo de Paris catalisou o processo de transição energética, neste sentido o hidrogênio emerge como vetor energético ou mesmo como rota ou meio junto ao mercado global de carbono. A produção de hidrogênio é classificada pelo teor de carbono associado a sua produção e uma rota tecnológica inovadora é a biodegradação que material biológico para produção de hidrogênio. Essa tecnologia é o foco deste artigo, a *Microbial Electrolysis Cell* (MEC). A MEC produz hidrogênio a partir do tratamento de efluentes urbanos e agroindustriais. Dessa forma, este artigo apresenta o desenvolvimento e a análise da produção biohidrogênio em um protótipo laboratorial. Para tanto, a MEC é apresentada através dos aspectos construtivos e dos equipamentos de suporte e monitoramento da produção de hidrogênio. O protótipo operou de forma estável ao longo de 215 dias com elevada eficiência na remoção de matéria orgânica (>85%) e produção de H₂ a partir do suprimento de 1,0 V por meio de fonte controlada. A geração de H₂ apresentou eficiência e estabilidade em tensões superiores a 1,0 V, mas também é constatado um aumento das perdas energéticas em tensões mais elevadas aplicadas ao protótipo ou um desgaste do catalisador metálico.

Título: OPERAÇÃO DE RETIFICADOR COM IGBTs PARA ELETROLISADOR TIPO PEM EM CONDIÇÃO DE FALTA DE FASE – ID 515

Informe técnico desenvolvido pelo INSTITUTO GNARUS, UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, CPFL, PS SOLUÇÕES.

O hidrogênio de baixo carbono tem se tornado um dos principais ativos requisitados pelo mercado como forma de se atingir os objetivos de descarbonização da economia em diversos países. Os eletrolisadores empregados para a obtenção de hidrogênio operam através de tensões contínuas, e necessitam de altas correntes para poderem efetuar o processo de quebra das moléculas de água. Devido ao alto investimento envolvido na instalação de uma planta de geração de hidrogênio, é necessário se garantir que o eletrolisador opere com a menor quantidade de interrupções possíveis, o que reduz o tempo de retorno do investimento. Como forma de aumentar a resiliência, a robustez e a confiabilidade da planta, esse trabalho propõe a aplicação de um retificador com IGBTs para aplicação em eletrolisadores do tipo PEM com a capacidade de operação mesmo com a perda de uma das fases na alimentação do retificador. Nessa situação o equipamento passa a operar com uma potência reduzida, no entanto é possível manter a produção de hidrogênio, minimizando assim as perdas relacionadas à parada total da operação durante um evento na rede ou durante uma manutenção programada nos circuitos de uma das fases da planta. O trabalho apresenta o desenvolvimento do método proposto, assim como simulações que demonstram a operação do equipamento tanto em sua situação nominal como no momento da perda de uma das fases.

Título: MODELAGEM DE SISTEMAS INTEGRADOS FORMADOS POR CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO E TANQUE DE ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO EM ESTADO SÓLIDO VISANDO AO AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SETOR ELÉTRICO – ID 889

Informe técnico desenvolvido pelo Itaipu Parquetec, Centro Avançado de Tecnologias do Hidrogênio (CATH).

Dada a relevância das tecnologias voltadas à geração, cogeração e aproveitamento energético – especialmente diante do crescente interesse por soluções sustentáveis, como o hidrogênio (H_2) –, este trabalho tem como principal motivação a geração de dados que contribuam para a otimização da eficiência energética de um sistema integrado formado por células a combustível do tipo óxido sólido (SOFCs) e um tanque de estocagem de H_2 em estado sólido. Inserido no contexto de um projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da ANEEL (PDI-0394-2134/2021), o presente trabalho busca avaliar tecnicamente a integração entre uma pilha (*stack*) de SOFCs e um reservatório de hidrogênio na forma de hidreto metálico (MH), com foco no aproveitamento do calor residual proveniente das células para promover a dessorção do hidrogênio e, dessa forma, aumentar a eficiência energética global. Para isso, modelos representativos de partes de uma configuração de sistema integrado foram implementados em softwares comerciais com o propósito de efetuar simulações. Como resultados, determinou-se a máxima potência de uma célula, bem como as taxas de calor gerado, em função da densidade de corrente. Observou-se que o aumento da densidade de corrente causa um aumento da geração de rejeito térmico em

uma SOFC, o que sugere uma oportunidade de uso de sistemas de cogeração visando o aproveitamento energético. Adicionalmente, considerando a utilização apenas do hidrogênio remanescente das SOFCs (sem recuperação do rejeito térmico), foram determinadas as cargas térmicas e as potências elétricas de componentes do sistema integrado, bem como os perfis temporais de grandezas relevantes associadas ao tanque de estocagem do H₂ como MH também presente no sistema.

Tema: Armazenamento de Energia

Título: ANÁLISE DE INVESTIMENTO PARA O BESS NO LRCAP 2025 UTILIZANDO A MÉTRICA DE RISCO CVAR – ID 490

Informe técnico desenvolvido pelo ONS e UPE.

O Sistema Interligado Nacional (SIN) enfrenta desafios operacionais devido à crescente integração de fontes renováveis variáveis (energia eólica e fotovoltaica). O Plano da Operação Energética (PEN 2024) [1] prevê aumento da demanda noturna e necessidade de geração térmica, além de risco de não atendimento da reserva operativa mínima a partir de novembro de 2024. Em contrapartida, há previsão de sobra de oferta em horários de carga mínima até 2028, impulsionada pela geração distribuída. Diante desse cenário, o Leilão de Reserva de Capacidade (LRCAP) 2025 foi proposto para atender às necessidades previstas nos Planos Decenais de Expansão de Energia (PDEs) e cumprir os critérios de garantia de suprimento estabelecidos pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Neste sentido, o uso de sistemas de armazenamento por baterias (BESS) apresenta-se como uma solução promissora. Este estudo analisa a viabilidade econômica atual de um BESS de 200 MW e 1.600 MWh, com baterias de íon-lítio (LFP) com eficiência superior a 90% e vida útil de 6.000 ciclos. A análise utiliza um comparativo entre simulações baseadas no histórico do PLD no período entre 2018 e 2024 e um fluxo de caixa descontado estocástico, com simulações de Monte Carlo, aplicando a métrica de risco CVaR. Considerou-se como requisito o despacho de 200 MW por 4 horas diárias para atendimento ao leilão, sendo que, qualquer geração adicional para outras finalidades é uma prerrogativa do empreendedor. As receitas analisadas incluem a Receita Fixa (RF), arbitragem de energia, serviços ancilares e um novo serviço de "contra-curtailment". Os resultados indicam que a RF é essencial para a viabilidade do projeto, enquanto outras fontes de receita, embora relevantes, têm impacto menor na análise econômica.

Título: PRIMEIRO BESS (BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM) DE LARGA ESCALA INSTALADO NO BRASIL – EXPERIÊNCIA E DESAFIOS NA OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO - CASO SE REGISTRO – ID 1825

Informe técnico desenvolvido pela ISA ENERGIA BRASIL, tratou e relatou resultados do primeiro BESS de grande escala instalado no Brasil. O sistema foi instalado na subestação Registro, da ISA Energia Brasil, em novembro de 2022 se tornou o primeiro BESS de grande porte do Brasil em operação, com capacidade líquida de 60 MWh, marcando um importante passo na modernização do sistema elétrico nacional. Este artigo analisa os desafios e aprendizados da operação e manutenção deste sistema inovador, o maior do Brasil e um dos maiores da América Latina, em seus primeiros anos. O BESS de Registro

tem a função principal de Peak Shaving, aliviando o carregamento das linhas de transmissão fontes do litoral sul de São Paulo durante os feriados, quando a carga aumenta significativamente, sobretudo no réveillon. Tratou da definição de métodos e momentos de carga/descarga, a forma de operar fora dos feriados, a quantidade de ciclos por ano, variáveis a serem supervisionadas, integração de um sistema diferente dos padrões de transmissão para os operadores de tempo real são alguns dos desafios operacionais enfrentados e superados. Desenvolvemos procedimentos internos baseados em manuais dos fabricantes e nos resultados de testes de campo, sendo o período de comissionamento de grande valia neste processo. No período da instalação e do comissionamento, ou nos primeiros 3 meses de operação, durante a chamada curva da banheira e mais recentemente outros já por desgaste, diferentes situações que necessitaram manutenção foram encontradas. Em todos os casos utilizamos a metodologia de Eliminação de Causa Raiz (ECR) para evitar recorrência e temos obtido sucesso, aprimorando os procedimentos elaborados e colocando-os em prática, o que vem garantindo um ótimo desempenho do sistema, cumprindo seu papel para confiabilidade energética da região.

Título: INTEGRAÇÃO DE SISTEMA DE ARMAZENAMENTO POR BATERIAS UTILITY SCALE À UM COMPLEXO HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO – ID 1949

Informe técnico desenvolvido pelo Aeroespacial Tecnologias em Energia e Sistemas Renováveis, Universidade Federal de Pernambuco (UPE) e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), avalia a integração de sistemas de armazenamento por baterias (BESS) a um complexo híbrido eólico-fotovoltaico localizado na Bahia, com potência instalada de 490 MW e limite de escoamento de 294 MW. A partir de dados horários de geração e PLD ao longo de 20 anos, foram simulados diferentes dimensionamentos de BESS visando à redução de perdas por clipping. O ponto ótimo técnico foi identificado em 35 MW de potência, com perdas totais de 2,13%. A análise econômica aponta que, para valores de CAPEX abaixo de R\$ 250 mil/MW, o projeto torna-se viável. A participação do BESS em leilões de capacidade também é analisada, evidenciando a viabilidade para valores contratuais acima de R\$ 350 mil/MW/ano.

Título: PROTEÇÃO E CONTROLE EM BATERIAS DE SEGUNDA VIDA: UMA ABORDAGEM MULTISTRING – ID 1382

Informe técnico desenvolvido pela Unioeste e Itaipu Parquetc onde foi caracterizado que com o aumento acelerado por demanda de sistemas de armazenamento de energia, principalmente em baterias eletroquímicas, diversas instituições governamentais e privadas vêm discutindo como realizar a correta destinação desse passivo ao fim de sua vida útil. Neste contexto, as baterias veiculares de tração elétrica devem ser substituídas com cerca de 80% de sua capacidade nominal, o que representa um alto valor agregado na bateria ao fim de sua vida útil. Baterias de segunda vida são aquelas retiradas de sua aplicação primária por se tornarem inadequadas para seu uso original, sendo então empregadas em outra finalidade, como armazenamento para sistemas energia renovável, backup, entre outros. Muitas vezes, essas baterias precisam ser reorganizadas em novas configurações, o uso de múltiplas strings oferece flexibilidade para ajustar a tensão e a

capacidade conforme a necessidade da nova aplicação. Este artigo apresenta o desenvolvimento e a validação experimental de um Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS) multistring, projetado especificamente para baterias de sódio de segunda vida com proteção independente por string. Os algoritmos de proteção e controle foram testados experimentalmente em um protótipo simulando diferentes condições operacionais e verificando a funcionalidade do sistema. Os testes se concentraram na proteção contra sobrecorrente com e sem presença de rede CA, avaliando a capacidade do BMS de gerenciar múltiplas strings. Os resultados demonstraram que o BMS multistring se adapta bem a diferentes condições operacionais, com a capacidade de realizar a proteção de múltiplas strings, qualidades essenciais para sua aplicação em sistemas de armazenamento de energia estacionária.

Título: ANÁLISE DE VIABILIDADE E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA MITIGAÇÃO DE CONSTRAINED-OFF EM PARQUES EÓLICOS: UM ESTUDO DE CASO NO CONJUNTO EÓLICO TRAIRÍ – ID 1241

Informe técnico desenvolvido pela Universidade de Fortaleza – UNIFOR, caracterizou o constrained-off que gera perdas econômicas significativas para os geradores, gera incerteza regulatória, desencorajando novos investimentos devido à imprevisibilidade da política de curtailment, ineficiência operacional e subutilização do potencial renovável constituindo desafio crescente para a expansão das fontes renováveis intermitentes no sistema elétrico. Aponta como solução o uso de sistemas de armazenamento de energia elétrica, pois é possível armazenar a energia excedente que seria perdida durante o constrained-off sendo dl ponto de vista de operação/uso realizar a injeção da energia armazenada na rede quando não houver mais restrições e/ou a demanda for maior. O IT também aponta os benefícios e apresenta o Estudo de Caso do Parque Eólico Trairí, realiza análise econômica e conclusões.

Título: APLICAÇÃO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA NA CORREÇÃO DE DISTÚRBIOS DE CONTROLE DE CARGA E FREQUÊNCIA – ID 1698

Informe técnico desenvolvido pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

Os sistemas elétricos de potência (SPA) têm tradicionalmente contado com geração centralizada, com grandes usinas localizadas distantes dos centros de consumo para se beneficiarem de economias de escala. No entanto, nos últimos anos, o setor passou por uma mudança de paradigma devido a preocupações técnicas, ambientais, sociais e de saúde, levando à expansão de fontes variáveis de energia renovável (VRES), como energia eólica e solar. A natureza flutuante desses recursos apresenta desafios técnicos, principalmente com a estabilidade da rede devido a desequilíbrios entre geração e demanda. Este trabalho propõe uma metodologia para controle de frequência em EPS com alta integração VRES, utilizando rejeição de carga e geração e integração de baterias. Um problema de otimização é formulado, considerando as especificidades dos geradores eólicos, características de queda dos geradores despacháveis e carga/descarga da bateria. Propõe-se também uma estratégia de Controle de Frequência de Carga (LFC) para armazenamento de energia, usando armazenamento de energia de bateria (BESS), usando um controlador derivativo integral proporcional de ordem fracionária (FOPID) e

comparando-o com um controle PID clássico usual. O modelo LFC considera fatores não lineares, como zonas mortas do regulador e restrições de taxa de geração. As simulações mostram como o BESS incorpora a resposta à demanda para controle aprimorado em redes interconectadas.

Título: IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA HÍBRIDO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA MELHORIA DA CONFIABILIDADE E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM SERVIÇO AUXILIAR DE SUBESTAÇÃO DE TRANSMISSÃO DA ELETROBRAS CHESF – ID 1340

Informe técnico desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura (ITEMM), pelo Itaipu Parquetec, pela Escola Politécnica de Pernambuco, pela Universidade de Pernambuco (UPE) e pela Companhia Hidrelétrica de São Francisco (Chesf).

Com o objetivo de aumentar a confiabilidade e a segurança elétrica dos serviços auxiliares da subestação Messias da Eletrobras Chesf, em Alagoas, foi implementado um sistema híbrido composto por geração fotovoltaica e um Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias Híbrido (HBESS). O HBESS combina duas tecnologias de baterias – PbC (Chumbo–Carbono) e LFP (Íon de Lítio – Fosfato de Ferro) – operando em microgrid nos modos on-grid e off-grid. A implementação do sistema híbrido PV + HBESS trouxe melhorias significativas na qualidade e confiabilidade da energia fornecida aos serviços auxiliares. Este trabalho apresenta os resultados do sistema em operação e o impacto na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) antes e após sua aplicação, avaliando o atendimento aos requisitos técnicos mínimos de QEE definidos pela ANEEL, além de aspectos operacionais de desempenho. Foram realizados testes de campo para validar funcionalidades como backup, controle de demanda, correção do fator de potência, controle Volt–Var e suavização de potência. Os resultados demonstraram melhorias relevantes na QEE. O uso da tecnologia híbrida no sistema de armazenamento permitiu que a transição do modo on-grid para off-grid ocorresse em tempo muito inferior ao previsto, em conformidade com os critérios de controle do BESS. Essa configuração mostrou-se recomendada para esse tipo de aplicação, apresentando vantagens em relação aos sistemas tradicionalmente utilizados em subestações. As melhorias observadas refletem o sucesso da solução em garantir maior resiliência e autonomia energética, especialmente em condições de operação ilhadas e durante contingências.

Título: ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA ELÉTRICO NA PRESENÇA DE FONTES INTERMITENTES DE ENERGIA COM ARMAZENAMENTO – ID 1981

Informe técnico desenvolvido pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

A crescente demanda por energia renovável tem impulsionado a expansão de usinas solares fotovoltaicas em escala global. No Brasil, o período entre janeiro e setembro de 2023 registrou o maior incremento histórico de capacidade solar centralizada, enquanto a Califórnia atingiu mais de 49,4 GW de capacidade instalada, representando 30% de sua matriz energética até o segundo trimestre de 2024. Nesse cenário, a adoção de sistemas de armazenamento de energia (SAE) tem se consolidado como solução para mitigar variações e falhas na rede, suavizando os impactos da intermitência da geração solar. Este estudo analisou o desempenho de uma usina fotovoltaica conectada à rede, com potência

instalada de 3,247 MWp, localizada em Bebedouro/SP, em dois cenários: sem e com a integração de um SAE baseado em baterias. Através de simulações no software PVsyst, foi avaliado o comportamento do sistema em condições reais de irradiação e perfis de carga, considerando um ciclo diário de armazenamento e descarregamento. Os resultados indicaram que, sem armazenamento, a limitação da rede resultou em 1,61% de perdas de energia, enquanto o uso de baterias reduziu significativamente essas perdas, aumentando a energia injetada em 0,8%, mesmo com as perdas associadas ao ciclo de carga e descarga. Além de melhorar o índice de performance (PR) da usina, o sistema de baterias proporcionou benefícios econômicos, como a redução de penalidades por ultrapassagem de demanda e maior estabilidade na rede. A integração de SAE demonstrou ser uma estratégia eficaz para maximizar o aproveitamento da geração solar e promover confiabilidade do fornecimento energético.

Tema: Plantas Híbridas

Título: ARQUITETURA DE AGENTES DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA PROSPECÇÃO OTIMIZADA DE RECURSOS EÓLICOS E SOLARES – ID 1519

Informe técnico desenvolvido por colaborador da ELETROBRÁS.

A transição energética global impulsiona a busca por fontes renováveis, tornando crucial a identificação eficiente de locais ótimos para projetos eólicos e solares. Este processo, contudo, é complexo, exigindo a análise integrada de vastos volumes de dados meteorológicos, geoespaciais, ambientais, fundiários e técnicos. As abordagens tradicionais frequentemente enfrentam limitações em termos de custo, tempo e capacidade de lidar com a heterogeneidade e a escala dos dados, especialmente na fase inicial de prospecção. Este trabalho propõe uma arquitetura inovadora baseada em Sistemas Multiagentes (MAS) de Inteligência Artificial (IA) para automatizar e otimizar a prospecção de recursos eólicos e solares no contexto brasileiro. A arquitetura modular é composta por seis agentes especializados: Coletor (aquisição de dados), Pré-processador (garantia de qualidade e consistência dos dados), Modelador (estimativa de potencial eólico e solar, e análise de complementaridade usando Machine Learning e modelos físicos), Analista Espacial (mapeamento de restrições e adequação do terreno via SIG e Análise de Decisão Multicritério - MCDA), Otimizador (identificação de locais ótimos usando meta-heurísticas como Algoritmos Genéticos e Otimização por Enxame de Partículas, considerando múltiplos objetivos) e Visualizador (apresentação interativa dos resultados). Espera-se que esta abordagem aprimore significativamente a precisão e a eficiência na identificação de locais, reduza custos e tempo de análise, e forneça uma ferramenta robusta para o planejamento energético e a tomada de decisão, considerando de forma integrada a viabilidade técnica, econômica, ambiental e a complementaridade das fontes renováveis no Brasil.

Tema: IT TRANSFERIDO

Título: ANÁLISE DA EXPANSÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA ÁREA DE CONCESSÃO DA CEMIG – D NO PERÍODO DE 2017 A 2020 – ID 1856

Informe técnico desenvolvido por colaborador da CEMIG DISTRIBUIÇÃO.

Nos últimos anos, tem sido cada vez mais perceptível a propagação da micro e minigeração distribuída, destacando-se a geração solar, o que tem trazido benefícios para vários consumidores e levantado diversas discussões no setor. Do ponto de vista do consumidor que possui sua própria micro ou minigeração, ou faz parte de consórcios ou cooperativas de geração distribuída, o benefício é a redução de sua conta de energia elétrica. Já do ponto de vista do sistema de distribuição de energia elétrica, é possível que o atual modelo regulatório esteja incorrendo justamente na antecipação de investimentos nesses sistemas para solucionar diversas questões relativas ao excesso de geração com relação à carga, o que ocorre com as modalidades de geração remota. Com o objetivo de verificar essa situação, o presente trabalho analisa as Solicitações de Acesso de minigerações distribuídas na CEMIG-Distribuição S.A (CEMIG-D), por meio do acompanhamento regionalizado da quantidade de Solicitações de Acesso nos anos de 2017 a 2020 e das obras necessárias para a conexão das usinas, chegando à conclusão de que, por ter se concentrado em locais com baixa densidade de carga, a geração distribuída incorreu na necessidade de antecipação de investimentos no sistema de distribuição visando propiciar a conexão das centrais geradoras no sistema de distribuição cumprindo os requisitos de qualidade e segurança dispostos na regulação vigente.

PARTE4: Tópico para Debate

Aplicação em escala dos desenvolvimentos realizados

Avaliação econômica e resultados reais e mensuráveis

Aplicações com IA – Agentes gerados e condições de validação

Lembra da regulação vigente – soluções levam em conta a regulação?

PARTE 5: Constatações GES

Bons ITs apresentados com relação direta aos temas pertencentes ao GES e que contribuem para avanços no setor elétrico. Vários ITs careceram de resultados de aplicação em campo como aplicação de IA. Temas cada vez mais transversais interrelacionados com tendência de crescimento de REDs e H2.

Problemas e dificuldades detectadas na escrita (português)

Necessidade de ajustes nos subtemas do GES