



Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias para Aplicações de Suporte à Rede de Distribuição – Operação via DERMS

Tema: Recursos Energéticos Distribuídos

Autores: Danilo Derick Silva Alves;

Co-Autores: Hortênsia Virgínia Américo; Wallace do Couto Boaventura; Leonardo Henrique de Melo Leite; João Paulo Assunção de Souza; Keverson de Almeida Carvalho; Franz de Cassias Strobel; Henrique Parreiras Couto; Nicolau Dantas

Empresa: Cemig Distribuição S. A.

Resumo

O objetivo do trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma Planta Piloto de Armazenamento de Energia por Baterias – SAEB, integrada ao COD – Centro de Operações da Distribuição e operada remotamente através de um sistema DERMS – Distributed Energy Resource Management System. São apresentadas as características e aplicações da Planta Piloto, bem como os resultados experimentais realizados no projeto. Os casos de uso avaliados foram o *Alívio de Carga – Despacho Instantâneo de Potência, Regulação de Tensão ao Longo do Alimentador, Peak Shaving, Previsão de Carga e Geração, e Ilhamento*. O trabalho foi realizado dentro do Projeto de PDI Cemig/Aneel PD – D0722/727 – Análise de Arranjo Técnico e Comercial Baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV.

1. Introdução

O sistema de distribuição vem passando por importantes transformações nos últimos anos. Um dos principais agentes desta mudança é, sem dúvida, a inserção massiva de Geração Distribuída (GD) de fontes intermitentes, em especial a fotovoltaica. Em janeiro de 2025, a potência instalada de geração distribuída no Brasil ultrapassava o patamar dos 35 GW, abrangendo mais de 3 milhões de unidades conectadas, segundo dados da Aneel [4].

Quando analisado o cenário nacional, verifica-se que a Cemig D é a concessionária de energia cuja área de concessão possui o maior número de conexões no Brasil. Em janeiro de 2025, a distribuidora apresentava 303.713 (9,66%) unidades de GD conectadas, totalizando 4,19 GW (11,8%) de capacidade instalada. Em termos de capacidade instalada, este patamar representa cerca de 70% da carga máxima verificada no sistema de média e baixa tensão da Cemig D. Este crescimento aconteceu de forma bastante acentuada nos últimos 6 anos, tendo atingido patamares superiores aos projetados pela ANEEL em suas projeções mais otimistas.

Uma característica técnica de altíssimo impacto, acarretada pela inserção de Recursos Energéticos Distribuídos - RED na rede elétrica, no caso do Brasil notadamente representados pelas fontes de Geração Distribuída Fotovoltaicas (GDFV), é o estabelecimento de fluxos multidirecionais de energia, em que os critérios tradicionais dos fluxos de energia vindos unicamente das usinas geradoras centralizadas até os

consumidores são completamente modificados. A crescente implementação de novas instalações de GDFV tem criado a necessidade de uma revisão profunda dos critérios de operação, planejamento e expansão das redes de distribuição. A metodologia tradicional, que privilegia o estudo da capacidade da rede de suportar as restrições físicas dos horários de pico, vem deixando de ser a única a ser empregada, em função da forte presença desses recursos.

A disseminação acelerada da geração distribuída nas redes de distribuição tem desafiado as áreas técnicas das empresas de distribuição em função dos impactos técnicos que vêm sendo gerados. A conexão massiva de GDs em regiões com pouca carga tem produzido a reversão dos fluxos de potência, podendo gerar mal funcionamento de equipamentos tradicionais de rede e até mesmo sobrecargas em redes e subestações de distribuição. Além do fluxo multidirecional, as sobretensões verificadas nas redes de média e baixa tensão, em função da expansão exacerbada das GDs, tem acarretado impactos relevantes na manutenção da qualidade do fornecimento, gerando a necessidade de obras volumosas para acomodar as GDs. Outros importantes desafios sistêmicos estão relacionados à redução da inércia do sistema elétrico e à necessidade de mudanças nas filosofias de proteção.

Uma das alternativas para lidar com os esses impactos é o armazenamento de energia. Considerando o fato de que a tecnologia de armazenamento de energia por baterias é consolidada e que o uso dessa tecnologia pode fornecer serviços para a rede de distribuição, tanto do ponto de vista da concessionária de distribuição, quanto do ponto de vista dos consumidores, os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (SAEB) vêm se tornando um ativo importante da rede de distribuição, trazendo benefícios para a o planejamento e operação da rede.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta os resultados do desenvolvimento de plantas de armazenamento de energia por baterias para diversas aplicações de suporte à rede de distribuição, notadamente, a operação ilhada, controle de tensão, peak-shaving e o alívio de carga em situações de manobras. O trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projeto de PDI Cemig/Aneel PD – D0722/727 – *Análise de Arranjo Técnico e Comercial Baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV.*

2. Desenvolvimento

2.1 Visão Geral da Planta

A proposta do projeto contemplou a concepção, implantação e execução de testes experimentais de uma planta piloto de armazenamento de energia, para realização de avaliações técnicas, econômicas, regulatórias e ambientais. A Figura 1 apresenta a arquitetura geral da planta piloto.

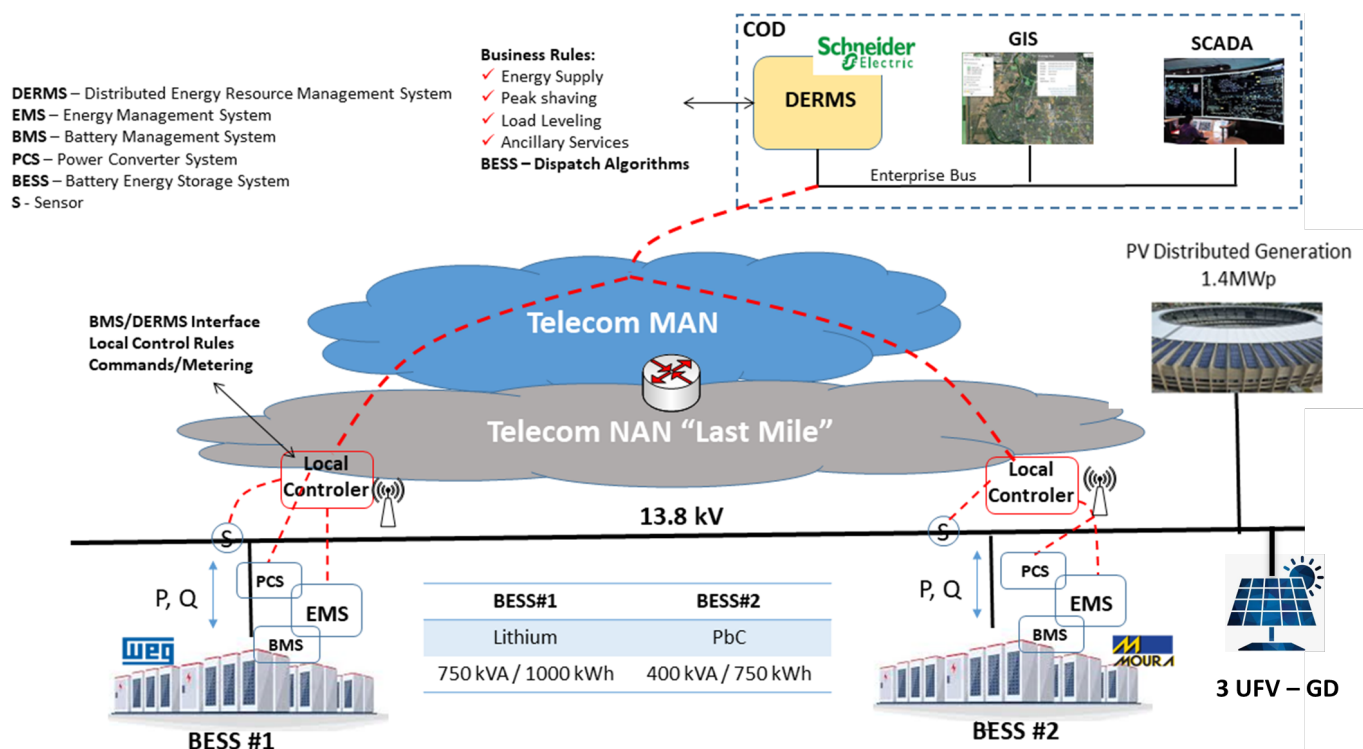


Figura 1 – Planta Piloto – Arquitetura Geral

O cenário de experimentação consiste em um alimentador de média tensão (13,8 kV), localizado no município de Belo Horizonte – MG, ao qual estão conectados dois SAEB - Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias, uma usina fotovoltaica (Estádio Mineirão), unidades de micro e minigeração distribuída (aproximadamente 500 kWp) e um conjunto de unidades consumidoras totalizando uma carga de 6,5 MVA. Esses ativos estão integrados ao Centro de Operações da distribuidora através de uma infraestrutura de telecomunicações. A operação da planta é realizada através de um sistema DERMS – Distributed Energy Resources Management System, a partir da sala de controle da Cemig D.

As Figuras 2 e 3 apresentam os sistemas de armazenamento. O SAEB #1, mostrado na Figura 2, possui uma potência de 750 kVA e capacidade de 1000 kWh em baterias de lítio. O SAEB #2, mostrado na Figura 3, é composto por baterias de chumbo-carbono (PbC), possui uma potência de 500 kVA e capacidade líquida de 750 kWh.



Figura 2 – SAEB #1 – 750 kVA / 1000 kWh / Baterias de Lítio



Figura 3 – SAEB #2 – 500 kVA / 750 kWh / Baterias de PbC

A Figura 4 apresenta as usinas fotovoltaicas conectadas ao alimentador. A usina de maior porte possui 1400 kWp e está localizada na cobertura do Estádio Mineirão. Outras três usinas estão localizadas em prédios localizados dentro do campus universitário da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, sendo UFV CAD 1 (130 kWp), UFV CAD 2 (230 kWp) e UFV CAD 3 (150 kWp).



Figura 4 – UFVs – Mineirão (1400 kWp) / CAD 1 (130 kWp) / CAD 2 (230 kWp) / CAD 3 (150 kWp)

A infraestrutura de comunicação é composta por links dedicados de fibra ótica, com velocidade de 1 Mbps, protocolo de comunicação DNP3 e firewalls de proteção de rede instalados em cada SAEB. A Figura 5 apresenta a vista geográfica superior da planta e o encaminhamento do link de comunicação para o SAEB #1.



Figura 5 – Planta Piloto - Vista Geográfica Superior / Encaminhamento do Link de Comunicação para o SAEB #1.

Um sistema de supervisão e controle de recursos energéticos distribuídos (DERMS – Distributed Energy Resources Management System), utilizando diversas interfaces, foi implementado no COD da Cemig D. Este sistema é capaz de monitorar e gerenciar os recursos distribuídos, incluindo os SAEB, e permite consultar tanto os dados cadastrais de REDs quanto as leituras obtidas em tempo real diretamente nos dispositivos. Para isso, foram modelados no ambiente do DERMS quatro alimentadores reais da rede de distribuição da Cemig D (principal e adjacentes), incluindo seus equipamentos correspondentes, como chaves, religadores, SAEB e UFVs. Além disso, foi realizado um trabalho de integração completa entre o DERMS, os SAEB, o sistema SCADA da Cemig D e serviços meteorológicos, possibilitando a execução de diversos algoritmos avançados do DERMS para o controle dos SAEB e suas interações com a rede elétrica. A Figura 6 apresenta a tela do DERMS com a modelagem da planta piloto.

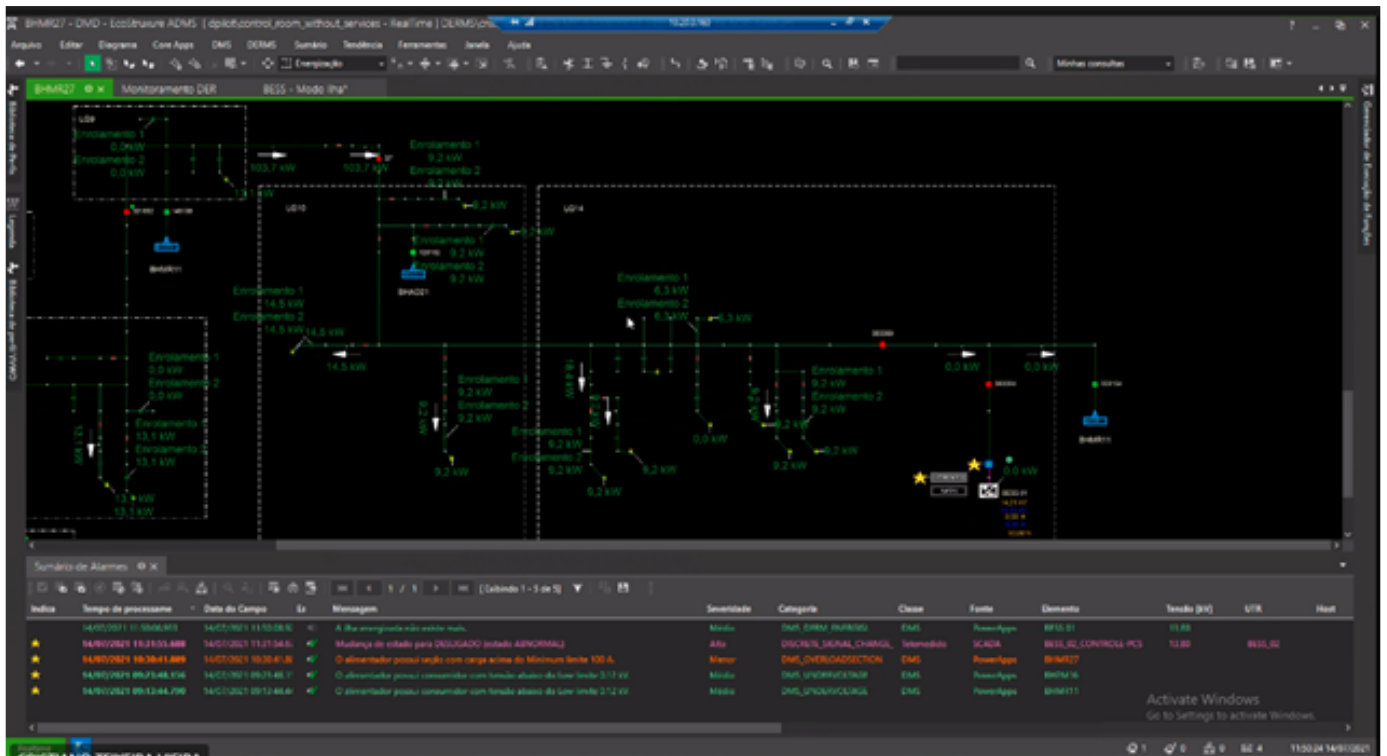


Figura 6 – Modelagem da Planta Piloto no Sistema DERMS.

A Figura 7 apresenta o diagrama com as integrações entre DERMS, UFV SAEB e os sistemas técnicos da Cemig D.

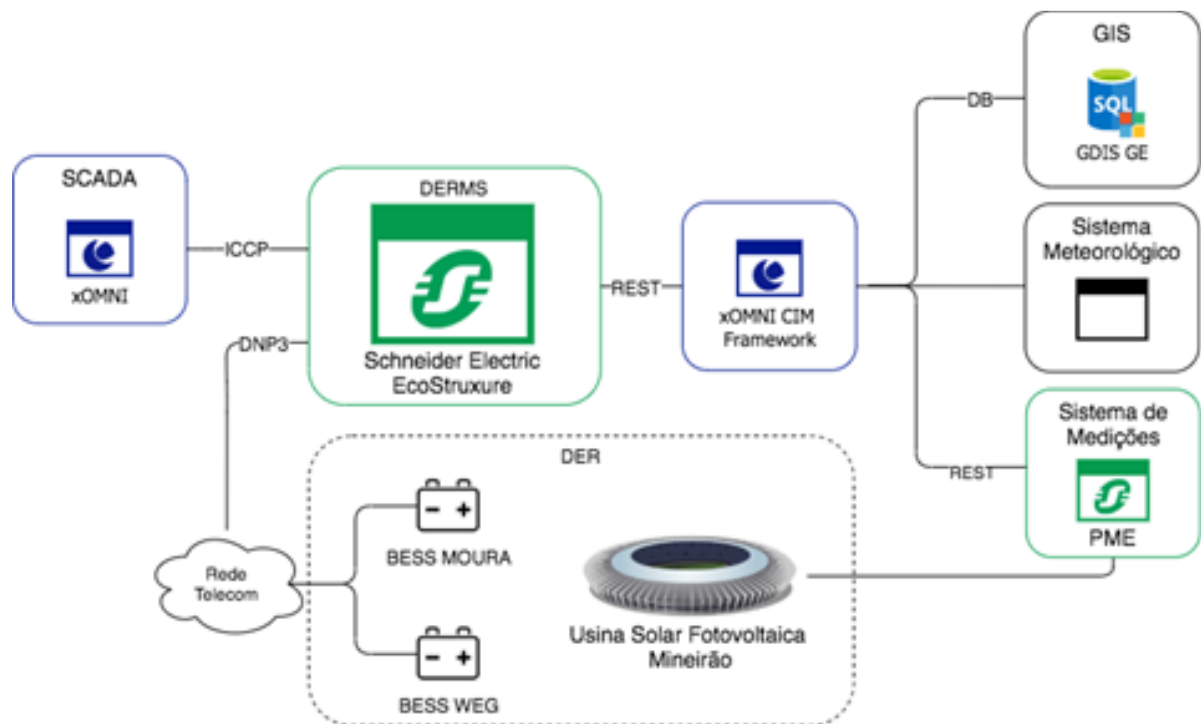


Figura 7 – Planta Piloto - Integrações.

2.2 Testes e Resultados

Para o comissionamento da planta foram essenciais a realização de testes de integração em várias áreas, visando confirmar o funcionamento adequado da infraestrutura elétrica de conexão com a rede, dos sis-

temas de armazenamento, infraestrutura de telecomunicações, e da troca de dados e comandos entre os sistemas. Foi também conduzido um conjunto de testes de aceitação em campo do DERMS para verificar o correto funcionamento da aplicação, assim como das integrações e suas funcionalidades avançadas. Esses testes incluíram a integração do DERMS com o serviço meteorológico, os SAEB e o sistema técnicos da CEMIG, além das funcionalidades e casos de uso.

Com a planta comissionada e disponível para operação, foram realizados os testes experimentais com o objetivo de avaliar a operação dos sistemas de armazenamento como suporte à rede de distribuição através dos casos de uso definidos. Os resultados são apresentados a seguir.

2.2.1 Alívio de Carga – Despacho Instantâneo de Potência

O teste da funcionalidade de Alívio de Carga – Despacho Instantâneo de Potência foi realizado para avaliar a eficácia do sistema de realizar o despacho de potência de forma automatizada, aliviando a carga instantaneamente. Esta funcionalidade pode ser utilizada para garantir a operação adequada da rede em situações de alta demanda ou falhas/manobras no sistema. O DERMS identifica a sobrecarga e define o despacho dos sistemas de armazenamento promovendo o alívio. A Figura 8 apresenta a tela do sistema para a condição em que o SAEB#1 está fornecendo cerca de 600 kW de potência, reduzindo o fluxo de potência da rede.

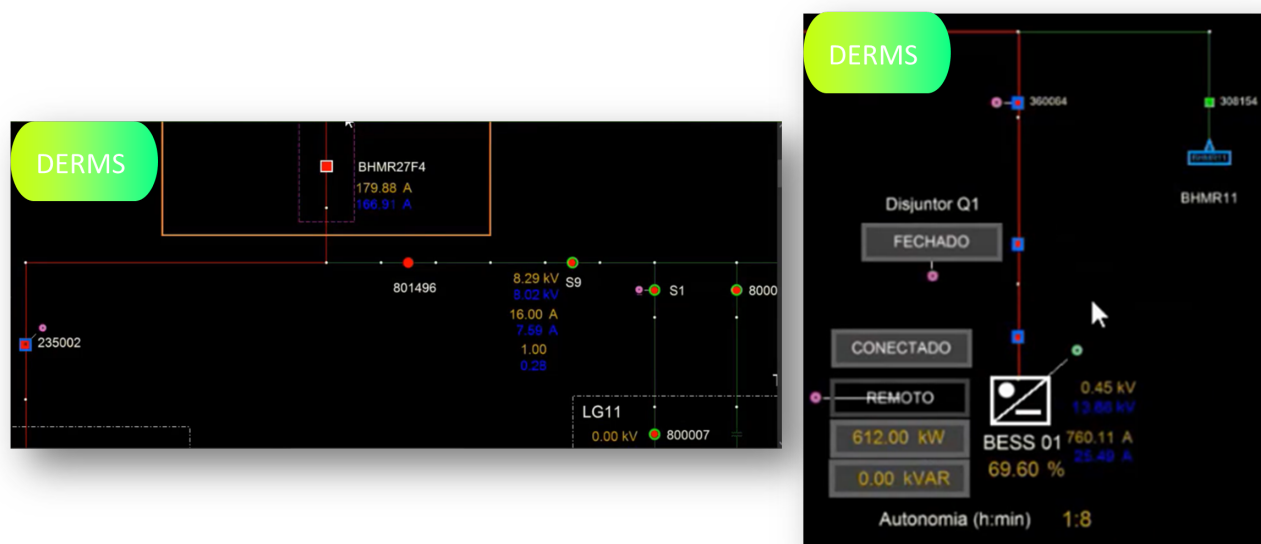


Figura 8 – Alívio de carga – Despacho Instantâneo de Potência.

2.2.2 Regulação de Tensão ao Longo do Alimentador

A regulação de tensão ao longo do alimentador foi realizada através da funcionalidade de suporte de tensão do DERMS (VVWO – Volt Var Watt Optimization). Quando o valor da tensão se desvia da faixa definida, o SAEB é despachado para fornecer ou absorver potência reativa, de modo a melhorar o perfil de tensão da rede. Para o caso avaliado, em uma condição na qual um determinado número de consumidores se encontrava fora da faixa adequada de tensão (subtensão), o SAEB #1 foi despachado em 750 kVAr, trazendo esses consumidores para dentro da faixa (Figura 9).

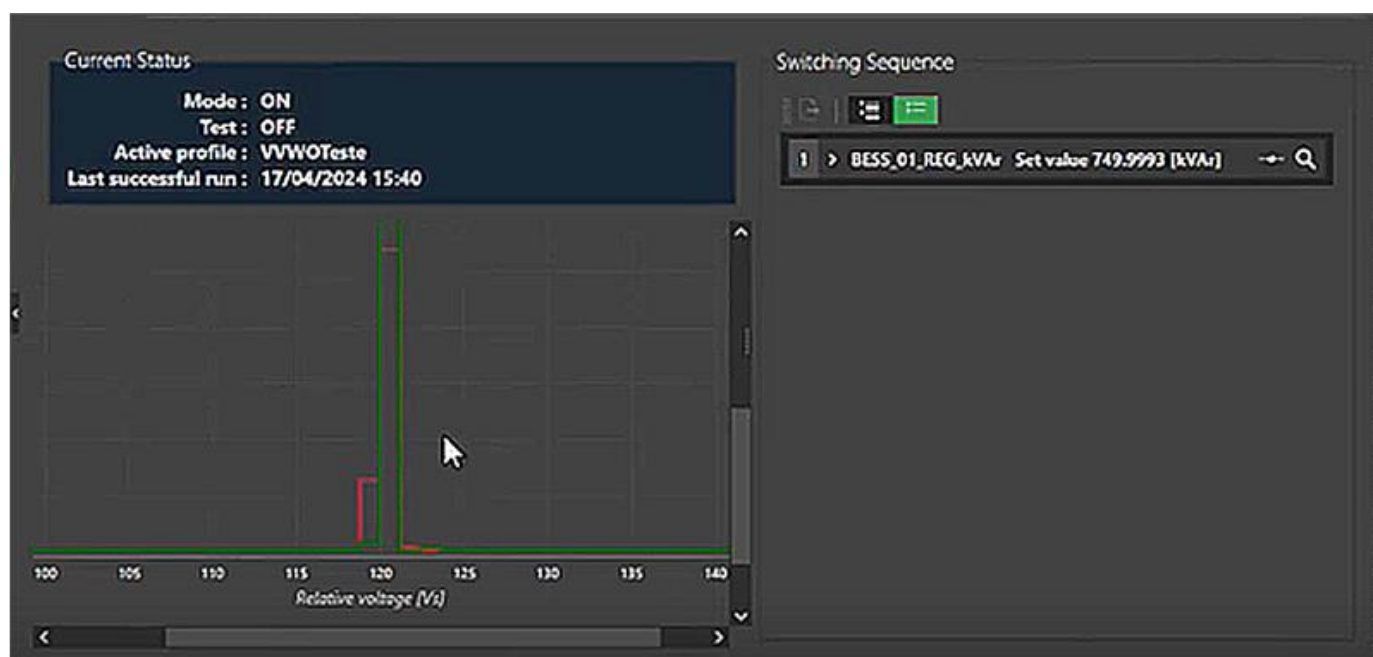


Figura 9 – Regulação de Tensão ao Longo do Alimentador.

2.2.3 Peak Shaving

O teste de Peak Shaving foi realizado para avaliar a eficácia do SAEB para suprir picos de demanda em alimentadores. No caso específico, o teste foi realizado para suprir um pico de demanda causado pelo grande público presente no Estádio Mineirão para a final do campeonato mineiro entre Cruzeiro e Atlético, no dia 07/04/2024. Uma das principais aplicações desta funcionalidade visa o adiamento da necessidade de recapacitação da rede de distribuição com consequente postergação de investimentos. No caso específico, o SAEB #1 e SAEB #2 foram despachados com potência em torno de 1MW, promovendo o corte da carga do alimentador, conforme mostrado na Figura 10.

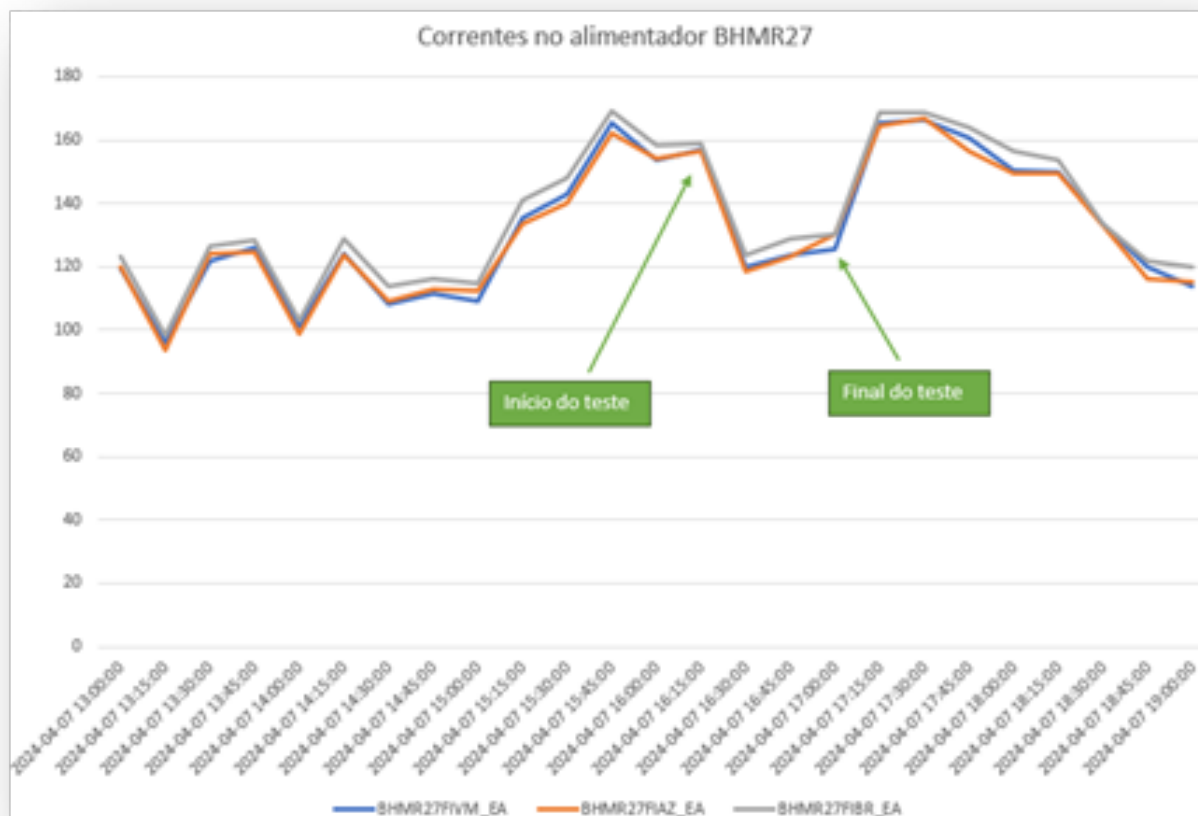


Figura 10 – Peak Shaving.

2.2.4 Previsão de Carga e Geração

A funcionalidade de previsão de carga e geração utiliza um modelo baseado em dados históricos e meteorológicos para calcular as previsões de demanda de carga e geração. A partir disso, o sistema consegue decompor o fluxo de potência, promovendo maior visibilidade da rede e permitindo maior precisão nas decisões de operação. A Figura 11 ilustra o caso de um dia específico, com as curvas projetadas das potências gerada, injetada e consumida no circuito.

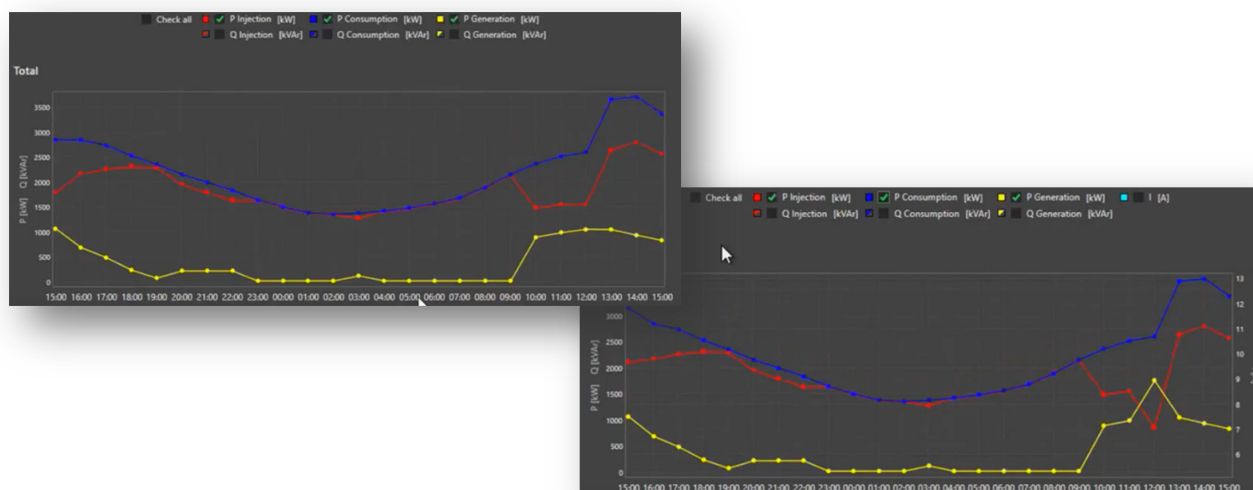


Figura 11 – Previsão de Carga e Geração.

2.2.5 Ilhamento

Uma das mais importantes aplicações do SAEB é sua utilização para manter a continuidade do fornecimento em períodos de contingência devido, por exemplo, à perda de uma linha ou problemas no alimentador. Nesta condição, o SAEB se apresenta como um importante recurso para redução de interrupções do fornecimento e melhoria dos indicadores DEC/FEC.

A Figura 12 apresenta o diagrama elétrico da rede estudada no projeto. As cargas estão agrupadas em 14 grupos – “load groups” - (LG1 a LG14). Estão também representados os alimentadores (principal e adjacentes), chaves, religadores e os sistemas de armazenamento.

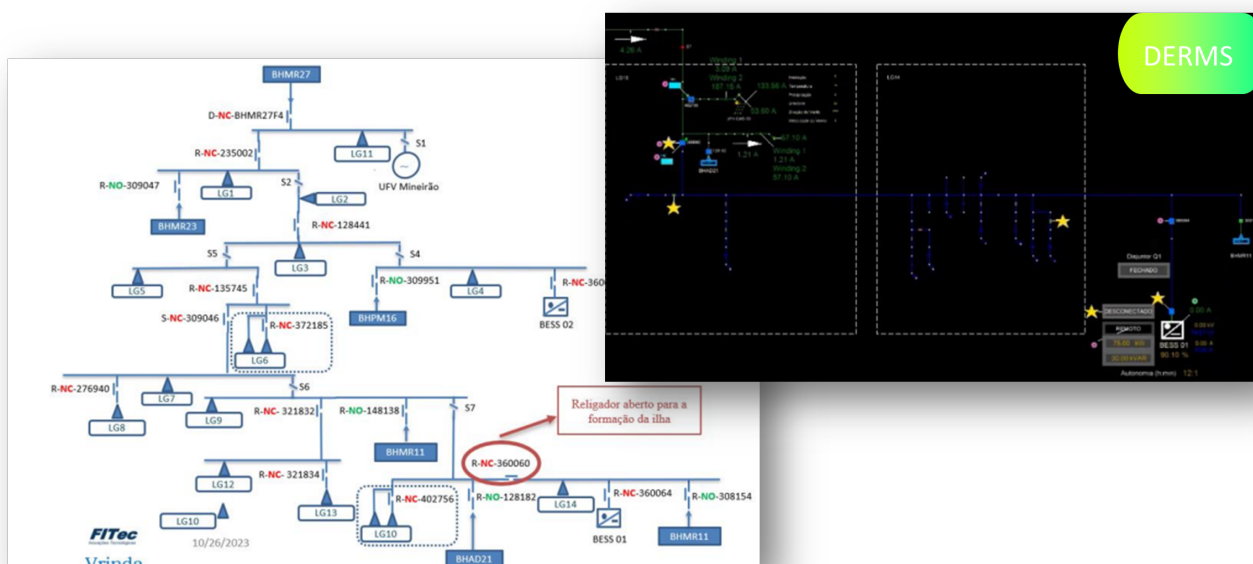


Figura 12 – Cenário 1 de Ilhamento – Diagrama da Rede.

Dois cenários de ilhamento foram avaliados. No primeiro cenário, a ilha é estabelecida através da abertura do religador R-NC-360060, conforme mostrado na Figura 12. O SAEB #1 forma a rede atendendo ao LG14.

A Figura 13 apresenta as curvas de potência fornecida pelo SAEB #1. É possível observar como o sistema acompanha a variação na demanda da carga.

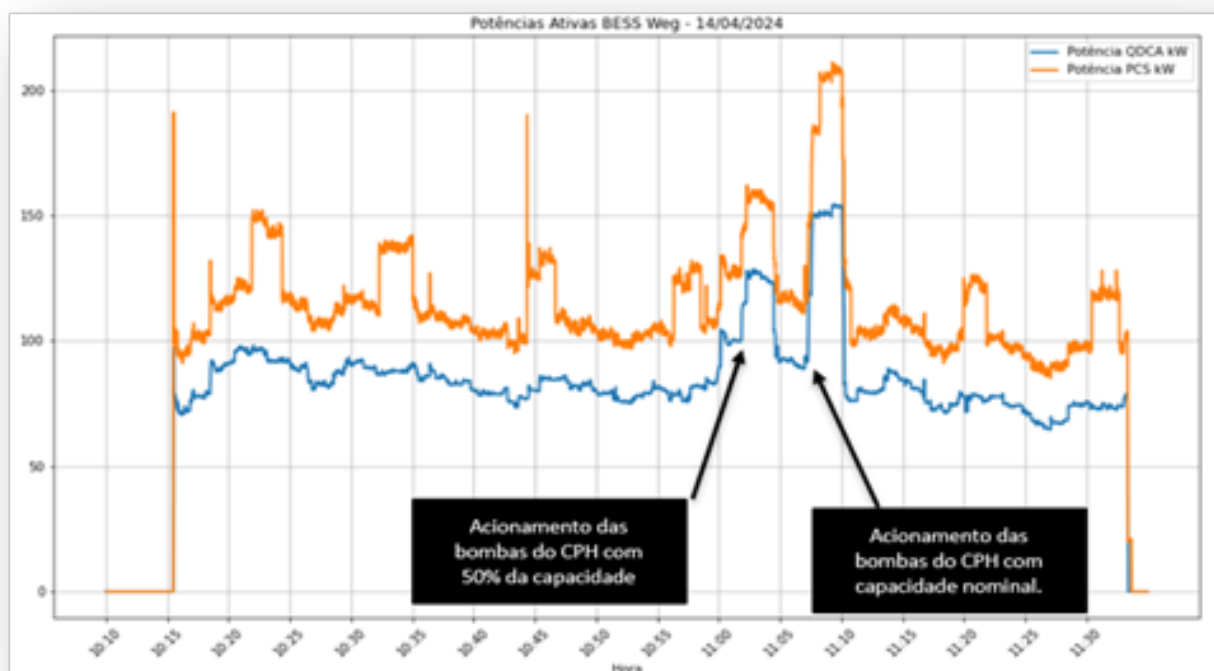


Figura 13 – Cenário 1 de Ilhamento – Potência Fornecida Pelo SAEB para Atendimento à Ilha. Para o segundo cenário, a ilha foi expandida para incluir o LG10, além do LG14, e o estabelecimento da ilha se dá pela abertura da chave S7, conforme mostrado na Figura 14.

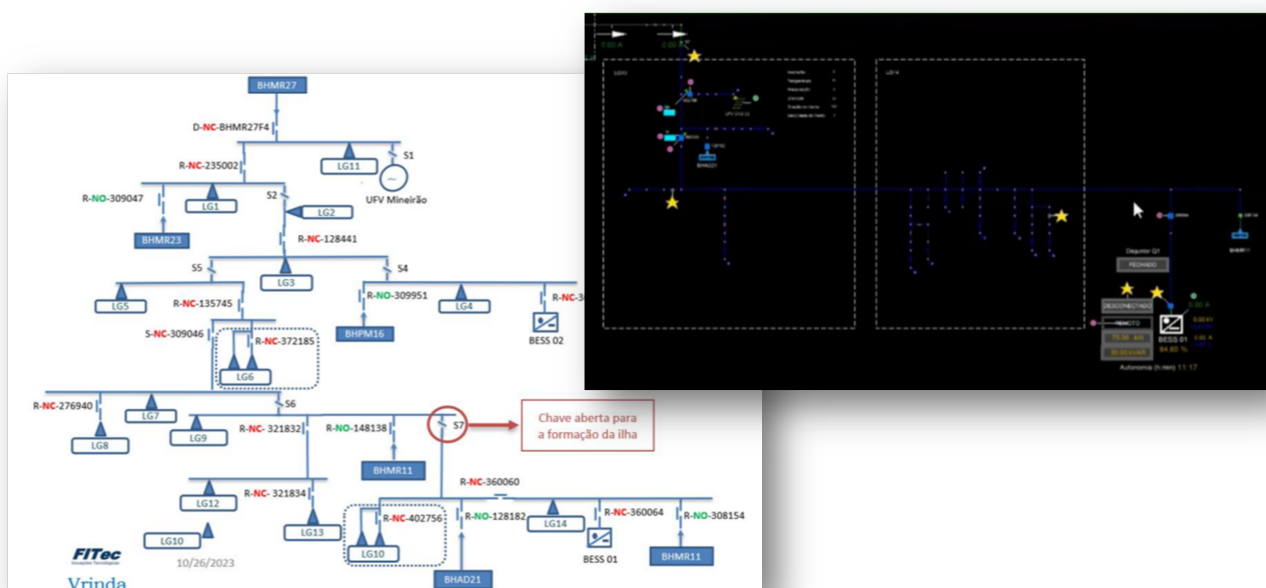


Figura 14 – Cenário 2 de Ilhamento – Diagrama da Rede.

O principal aspecto deste novo cenário é a existência de uma usina solar (minigeração distribuída) entre as unidades pertencentes ao LG10. Com isso, é possível observar o comportamento do SAEB #1 diante da entrada e saída da usina solar, bem como as variações de geração solar e até mesmo a inversão do fluxo de potência, ocasionando o carregamento das baterias do SAEB #1. A Figura 14 apresenta as curvas de potência para este cenário, destacando os instantes da entrada da usina e a reversão do fluxo de potência no circuito, com o SAEB #1 sendo carregado pela GD.

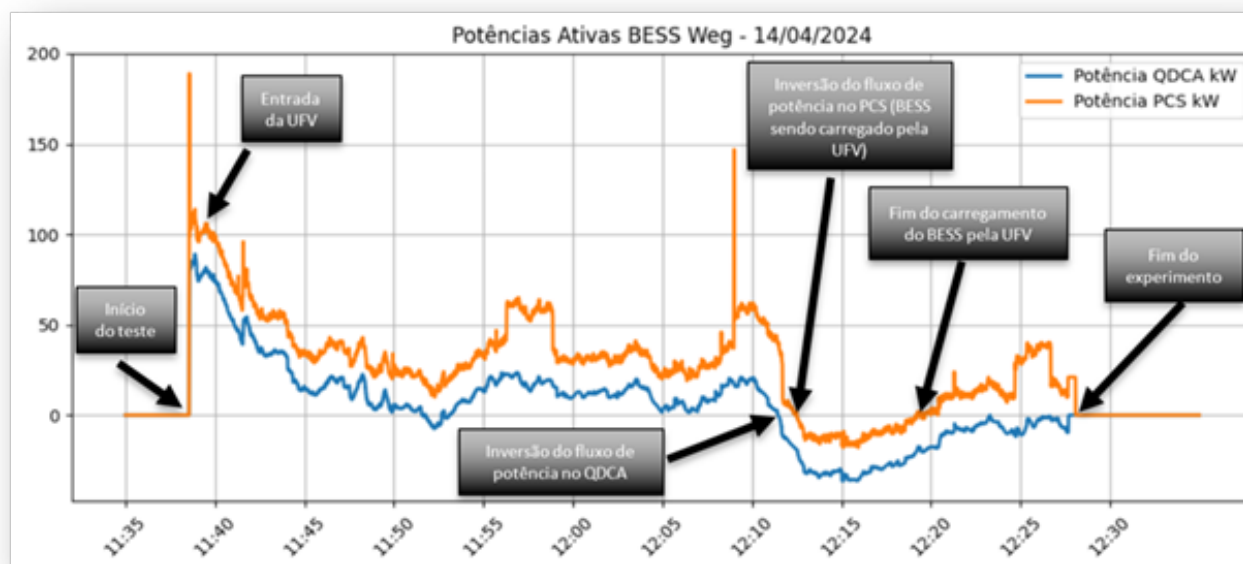


Figura 15 – Cenário 2 de Ilhamento – Potência Fornecida Pelo SAEB para Atendimento à Ilha.

Os resultados das avaliações experimentais apresentados acima demonstram a capacidade dos SAEB de prover serviços para a rede de distribuição. O conceito da planta integrada e operada remotamente pelo Centro de Operações da Distribuição - COD, por meio de uma ferramenta DERMS, possui um elevado potencial de aplicação no sistema de distribuição. Os testes experimentais realizados no projeto foram bastante satisfatórios, servindo de base para novos desenvolvimentos da Cemig D no campo de sistemas de armazenamento de energia e microrredes.

Nesta perspectiva, a Cemig D está desenvolvendo novas iniciativas correlatas. Uma delas é a implantação de uma microrrede no município de Serra da Saudade. Trata-se da replicação do conceito, onde o SAEB será associado a uma UFV provendo redução de interrupções do fornecimento e melhorias na qualidade de energia. Outra iniciativa é o desenvolvimento de sistemas móveis de armazenamento para aplicações nas redes de média e baixa tensão. A associação da mobilidade com os SAEB potencializa sua utilização reduzindo o payback time do investimento. Além dessas iniciativas, estão em andamento estudos para aplicação de SAEB em subestações de distribuição, bem como a concepção de microrredes em redes de distribuição, melhorando a capacidade do sistema para lidar com a conexão massiva de geração distribuída.

3. Conclusão

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de uma Planta Piloto de Armazenamento de Energia por Baterias – SAEB, integrada ao COD – Centro de Operações da Distribuição e operada remotamente através de um sistema DERMS – Distributed Energy Resource Management System. Foram apresentadas as características e aplicações da Planta Piloto, bem como os resultados dos testes experimentais realizados no projeto. Os casos de uso avaliados foram o *Alívio de Carga – Despacho Instantâneo de Potência, Regulação de Tensão ao Longo do Alimentador, Peak Shaving, Previsão de Carga e Geração e Ilhamento*. Os resultados mostraram a capacidade dos sistemas de armazenamento de proverem serviços para a rede, evidenciando o SAEB como um componente chave para o novo e complexo sistema de distribuição, caracterizado pela alta disseminação de *Recursos Energéticos Distribuídos*. O trabalho foi realizado dentro do Projeto de PDI Cemig/Aneel PD – D0722/727 – Análise de Arranjo Técnico e Comercial Baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV.

4. Referências bibliográficas

- [1] Projeto de P&D Cemig/Aneel PD – D0722 – Análise de Arranjo Técnico e Comercial Baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV. Relatórios de projeto (Cemig D, UFMG, Fltec, Concert, ITEM).
- [2] Projeto de P&D Cemig/Aneel PD – D0727 – Análise de Arranjo Técnico e Comercial Baseado em uma Planta Piloto de Sistema Distribuído de Armazenamento de Energia em Alimentador Crítico da Rede de Distribuição de 13,8 kV – Fase II. Relatórios de projeto (Cemig D, UFMG, Fltec, Concert, ITEM).
- [3] ANEEL. (2016). Chamada nº 021/2016 - Projeto Estratégico: “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro”. Brasília.
- [4] ANEEL. (2024). Banco de dados da Geração Distribuída. Disponível em:
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoieY2VmMmUwN2QtYXN0ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiJR9>. Acesso em novembro de 2024.
- [5] CEMIG, UFMG, FITEC, ITEM, CONCERT, FCO. (2024). Workshop de Encerramento PDI D0722/727. Disponível no perfil da Fundação Christiano Ottoni no Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=Cee1zqpu0gw>