RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar
O Saber. ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

Resiliência energética em instalações críticas: integração de geração solar, armazenamento e grupos geradores

Energy resilience in critical facilities: integration of solar generation, storage and generator sets

Resiliencia energética en instalaciones críticas: integración de generación, almacenamiento y generadores solares

Adriano Cesar Notari

Engenheiro Eletricista, Engenheiro Civil, especialista em Instalações Elétricas e em Engenharia de Segurança do Trabalho

Resumo

Este artigo examina fundamentos de projeto, dimensionamento, proteção e operação de sistemas híbridos destinados à continuidade de instalações críticas. A revisão narrativa integra literatura científica, relatórios de organismos internacionais e guias técnicos pertinentes ao tema. Discute-se a complementaridade entre geração fotovoltaica, armazenamento eletroquímico, grupos geradores e rede pública, com atenção a perfis horários, incerteza, falhas de componentes, qualidade de energia, aterramento, manutenção e governança. A análise sustenta que resiliência não decorre da soma de equipamentos, mas da coordenação verificável entre fontes, controles, proteções e procedimentos. O trabalho não apresenta ensaio experimental nem protocolo universal; oferece uma síntese crítica para apoiar decisões de engenharia e delimita condições necessárias à interpretação responsável de métricas de autonomia e disponibilidade.

Palavras-chave: resiliência energética; microrredes; geração fotovoltaica; armazenamento de energia; grupos geradores; instalações críticas

Abstract

This article examines design, sizing, protection and operational foundations of hybrid systems intended to maintain critical facilities. The narrative review integrates scientific literature, reports from international organizations and technical guides relevant to the subject. It discusses the complementary roles of photovoltaic generation, electrochemical storage, generator sets and the public grid, with attention to hourly profiles, uncertainty, component failures, power quality, grounding, maintenance and governance. The analysis argues that resilience does not result from merely adding equipment, but from verifiable coordination among sources, controls, protections and procedures. The paper does not present an experimental test or a universal protocol; it offers a critical synthesis to support engineering decisions and defines conditions required for responsible interpretation of autonomy and availability metrics.

Keywords: energy resilience; microgrids; photovoltaic generation; energy storage; generator sets; critical facilities

Introdução

A continuidade do fornecimento elétrico tornou-se requisito estrutural para serviços de saúde, telecomunicações, tratamento de água, processamento de dados, segurança e produção. A dependência de controles eletrônicos e redes de comunicação elevou a consequência de interrupções. Ao mesmo tempo, eventos meteorológicos extremos, incêndios, falhas técnicas e ameaças digitais desafiam sistemas concebidos apenas para condições médias. A Agência Internacional de Energia

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

destaca que segurança elétrica exige adequação, flexibilidade, estabilidade e capacidade institucional, especialmente em sistemas com participação crescente de recursos variáveis (IEA, 2021).

Grupos geradores foram historicamente a solução de reserva mais comum, mas sua confiabilidade depende de partida, combustível, manutenção, ventilação e condições transitórias. A difusão de geração fotovoltaica e baterias criou arquiteturas. Esses recursos podem reduzir consumo e emissões e, quando configurados para operação isolada, sustentar cargas durante falhas. Contudo, a integração introduz requisitos de controle, proteção, aterramento e gestão que não aparecem quando equipamentos são avaliados separadamente.

A literatura utiliza diferentes definições de resiliência. Neste artigo, o termo indica a capacidade de antecipar, absorver, adaptar-se e recuperar-se de perturbações, mantendo funções prioritárias. Essa definição evita reduzir resiliência a confiabilidade histórica ou autonomia nominal. O desempenho depende do evento, da carga e do estado do sistema no momento da interrupção. Uma arquitetura adequada a falhas curtas pode ser insuficiente diante de indisponibilidade regional prolongada.

O objetivo é sintetizar critérios para projetar e gerir sistemas híbridos em instalações críticas, distinguindo benefícios potenciais de condições necessárias. A questão orientadora é: quais elementos técnicos e organizacionais permitem que geração solar, armazenamento e grupos geradores contribuam de forma coordenada para a resiliência? O texto aborda métricas, arquitetura, dimensionamento, expansão solar, proteção, manutenção e governança, sem converter a revisão em prescrição universal.

Metodologia

Foi realizada revisão narrativa e crítica de literatura, adequada à integração de conceitos provenientes de engenharia de potência, microrredes, armazenamento, confiabilidade e gestão de ativos. Foram priorizados artigos revisados por pares, publicações da Agência Internacional de Energia, da Agência Internacional de Energia Renovável e do National Renewable Energy Laboratory, além de normas reconhecidas.

A busca conceitual considerou combinações de termos relacionados a resiliência elétrica, microrredes híbridas, geração fotovoltaica, baterias, geradores a diesel, instalações críticas, proteção e operação. A seleção privilegiou documentos com método descrito, escopo identificável e relevância para decisões de projeto. Fontes comerciais e textos sem autoria técnica foram excluídos. Dados quantitativos foram utilizados apenas quando acompanhados de unidade, período e instituição responsável.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

A síntese foi organizada por função de engenharia. Cada evidência foi interpretada conforme seu contexto, distinguindo estudos de caso, modelagem, revisão e estatística global. Resultados de uma instalação não foram generalizados como taxas universais. O gráfico utiliza valores publicados pela IRENA para capacidade solar global e tem finalidade descritiva. Ele não demonstra relação causal entre expansão fotovoltaica e resiliência de uma instalação.

Como limitações, a revisão não realizou metanálise, experimento ou validação de um método de dimensionamento. Normas nacionais e requisitos de concessionárias variam por jurisdição e devem ser verificados em cada projeto. As conclusões representam convergências da literatura e critérios analíticos, não substituindo estudos elétricos, avaliação de risco, responsabilidade técnica ou comissionamento específico.

1.Resiliência energética como atributo mensurável de projeto

A resiliência energética não se confunde com a disponibilidade média observada em períodos de operação regular. Ela descreve a capacidade de uma instalação antecipar perturbações, suportar a perda parcial ou total do suprimento externo, manter cargas prioritárias e recuperar funções dentro de limites de tempo definidos. A literatura de microrredes recomenda que o desempenho seja avaliado por cenários de interrupção, duração provável do evento, perfil horário da carga e consequência da indisponibilidade. Essa abordagem desloca o projeto de uma lógica centrada apenas em potência nominal para uma análise orientada à continuidade funcional e ao risco (ANDERSON et al., 2019; NELSON et al., 2020).1

Em instalações críticas, a classificação das cargas constitui a primeira decisão analítica relevante. Sistemas de proteção, comunicação, iluminação de emergência, refrigeração essencial, bombeamento e processamento de dados podem apresentar exigências distintas de qualidade e autonomia. Somar potências instaladas sem considerar simultaneidade, corrente de partida, fator de potência e sequência de restabelecimento tende a produzir soluções superdimensionadas ou incapazes de responder ao evento real. A engenharia de resiliência exige curvas de carga, inventário funcional e critérios explícitos de prioridade, pois a energia disponível durante uma contingência deve ser alocada segundo a criticidade do serviço.

A mensuração pode combinar indicadores como energia não suprida, tempo máximo tolerável de interrupção, autonomia para carga crítica e probabilidade de sobrevivência a uma indisponibilidade com duração determinada. Nenhum indicador isolado substitui a análise sistêmica. Um arranjo pode

1Neste artigo, instalação crítica é aquela cuja perda de energia produz consequência relevante à segurança, à saúde, ao ambiente, à informação ou à continuidade de serviço.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

apresentar elevada autonomia teórica e, ao mesmo tempo, falhar por indisponibilidade do dispositivo de transferência, degradação da bateria, falta de combustível ou erro de coordenação das proteções. Por isso, métricas energéticas precisam ser associadas a modos de falha, ensaios periódicos, condições ambientais e capacidade de manutenção.

A Agência Internacional de Energia observa que a segurança elétrica ganhou importância à medida que economias e serviços se tornam mais dependentes de eletricidade. Digitalização, climatização, mobilidade elétrica e automação ampliam a consequência de interrupções, mesmo quando a frequência de falhas permanece baixa. Essa mudança torna insuficiente tratar o suprimento de emergência como elemento periférico. A arquitetura de alimentação, os meios de transferência, a seletividade e a observabilidade operacional passam a integrar o núcleo do desempenho do ativo (IEA, 2020).

A decisão técnica deve ainda reconhecer que resiliência possui custo e valor dependentes do contexto. A interrupção de uma carga administrativa pode ser adiada, enquanto a perda de ventilação, telecomunicação ou controle de processo pode produzir efeitos imediatos. A comparação entre alternativas deve considerar investimento, operação, combustível, substituição de componentes, emissões, manutenção e custo evitado da indisponibilidade. Assim, a solução mais resiliente não é necessariamente a de maior capacidade instalada, mas a que sustenta funções prioritárias com confiabilidade demonstrável e custo de ciclo de vida coerente.

2. Arquitetura híbrida e coordenação entre fontes

Uma arquitetura híbrida reúne recursos com respostas temporais e características complementares. A geração fotovoltaica reduz consumo da rede e pode contribuir durante eventos diurnos, mas depende da irradiância e da capacidade de operar em modo ilhado. Baterias respondem rapidamente, estabilizam transições e atendem variações de curta duração. Grupos geradores oferecem energia despachável enquanto houver combustível e condições mecânicas adequadas. A rede pública, quando disponível, permanece como fonte principal ou complementar. O valor do conjunto decorre da coordenação entre esses elementos, e não da simples presença física de cada tecnologia.2

O ponto central da coordenação é o balanço instantâneo entre geração e carga. Em modo conectado, inversores podem operar seguindo frequência e tensão da rede. Em modo ilhado, algum recurso precisa estabelecer referências elétricas e sustentar a estabilidade diante de degraus de carga. Inversores formadores de rede, baterias e máquinas síncronas possuem respostas distintas. A transição

2Capacidade nominal de bateria não corresponde integralmente à energia utilizável, devido a limites de descarga, eficiência, temperatura, envelhecimento e reserva operacional.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

deve ser estudada quanto a tempo de transferência, afundamentos de tensão, frequência, corrente de curto-circuito e capacidade de partida de motores. A arquitetura de controle precisa ser compatível com as proteções e com as limitações de cada equipamento.

A inserção de armazenamento altera a lógica de despacho. A bateria pode permanecer reservada para contingências, realizar redução de ponta, absorver excedentes solares ou prestar mais de um serviço segundo uma hierarquia. Estratégias agressivas de arbitragem econômica podem diminuir o estado de carga disponível quando ocorre uma interrupção. Por outro lado, manter reserva integral reduz o aproveitamento econômico do ativo. A literatura recomenda otimização que incorpore incerteza de falhas e preserve uma margem de energia associada à criticidade, à previsão meteorológica e ao tempo esperado de mobilização do gerador (IEA, 2024).

O grupo gerador continua relevante em eventos prolongados, mas sua confiabilidade depende de fatores que o cálculo de potência não revela. Partidas malsucedidas, combustível degradado, falhas de bateria de partida, manutenção atrasada e operação prolongada em baixa carga podem reduzir o desempenho. Estudos comparativos mostram que microrredes com geração fotovoltaica, armazenamento e geradores em rede podem superar arranjos exclusivamente a diesel em resiliência e custo de ciclo de vida, desde que o projeto represente falhas dos componentes e logística de combustível (MARQUSEE; BECKER; ERICSON, 2021).

A coordenação deve prever estados operacionais claros, condições de entrada e saída, prioridades e resposta a falhas internas. Modos como operação normal, carregamento preventivo, contingência, ilhamento, recomposição e retorno à rede precisam ser documentados. Intertravamentos elétricos e lógicos devem impedir paralelismo indevido e energização insegura. A supervisão deve registrar grandezas, alarmes e comandos suficientes para análise posterior. Essa disciplina reduz ambiguidades e transforma um conjunto de equipamentos em um sistema energético efetivamente gerenciável.

3. Dimensionamento técnico sob incerteza

O dimensionamento convencional baseado em um único dia típico não representa adequadamente a resiliência. Irradiância, temperatura, carga e duração da interrupção variam, enquanto a degradação modifica a energia utilizável da bateria ao longo dos anos. Uma análise robusta utiliza séries temporais, cenários sazonais e eventos extremos plausíveis. O objetivo é verificar quantas horas ou dias as cargas críticas podem ser atendidas e quais combinações de falhas levam à perda do serviço. Modelos determinísticos são úteis para triagem, mas a incerteza deve ser explicitada quando a consequência da falha é elevada.

A potência fotovoltaica deve ser estimada com perdas por temperatura, sujeira, sombreamento, conversão, indisponibilidade e orientação. A energia anual prevista não garante contribuição durante

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

uma contingência específica. Em um evento noturno, a fonte solar não fornece potência imediata; em dias nublados, a produção pode permanecer abaixo da média. Por isso, a participação fotovoltaica na resiliência deve ser calculada por perfis horários e não por médias mensais. O uso de dados meteorológicos representativos permite quantificar faixas de desempenho e evitar promessas de autonomia sem fundamento.

No armazenamento, potência e energia são variáveis diferentes. A potência determina a capacidade de atender picos e formar a rede, enquanto a energia define a duração do atendimento. Profundidade de descarga, eficiência, temperatura, taxa de descarga e envelhecimento reduzem a capacidade disponível. A reserva operacional também limita o uso. A especificação deve incluir critérios de fim de vida, expansão, segurança térmica, proteção, ventilação e estratégia de substituição. Dimensionar apenas pela capacidade nominal inicial transfere para a operação um risco que deveria ter sido tratado no projeto.

O grupo gerador é selecionado considerando regime de serviço, características transitórias, altitude, temperatura, combustível, ruído, emissões e manutenção. Cargas com motores, elevadores, transformadores ou eletrônica de potência podem impor condições distintas das indicadas pela potência ativa total. A sequência de entrada de cargas reduz degraus e pode permitir equipamento menor, mas exige automação confiável. A operação em paralelo com outros recursos demanda estudo de sincronismo, compartilhamento de carga, proteção e aterramento. Esses requisitos demonstram porque catálogos não substituem engenharia de aplicação.

Ferramentas de otimização podem comparar milhares de combinações, porém o resultado depende das premissas. Custos de combustível, taxa de desconto, valor da energia não suprida, vida útil e restrições operacionais devem ser transparentes. Um valor ótimo matemático pode ser tecnicamente frágil se ignorar manutenção, disponibilidade de peças ou competência da equipe. A decisão deve passar por análise de sensibilidade e revisão de engenharia. A modelagem serve para tornar escolhas auditáveis, não para eliminar julgamento profissional.

4. Expansão solar e o papel do armazenamento

A expansão fotovoltaica alterou a escala do problema de integração. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável, a capacidade solar fotovoltaica global passou de aproximadamente 710 GW ao final de 2020 para 1 865 GW ao final de 2024. O crescimento amplia a disponibilidade de geração de baixo custo, mas também aumenta a necessidade de flexibilidade, redes adequadas, controle e armazenamento. O dado global não determina a solução de uma instalação específica, porém

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

demonstra que tecnologias antes periféricas passaram a compor decisões centrais de infraestrutura energética (IRENA, 2025).3

Baterias podem reduzir perdas e congestionamentos, deslocar energia no tempo e apoiar a integração de fontes variáveis. A Agência Internacional de Energia estima que a capacidade global de armazenamento deverá crescer fortemente para sustentar a expansão renovável com segurança. Em instalações críticas, a mesma tecnologia pode acrescentar continuidade e qualidade, desde que a estratégia reserve energia para contingências. O benefício energético não elimina riscos de segurança, degradação ou cadeia de suprimento, que precisam ser incorporados à especificação e à operação (IEA, 2024).

O gráfico apresentado sintetiza apenas dois pontos observados da série internacional e não constitui projeção. Sua função é evidenciar a mudança de escala da geração solar em quatro anos. Comparações temporais exigem unidade e escopo consistentes, razão pela qual se utiliza capacidade instalada global expressa em gigawatts. A interpretação adequada não é que toda capacidade possa operar de forma isolada, mas que o planejamento de redes e ativos deve acomodar uma participação crescente de recursos baseados em inversores.

O uso local de geração solar para resiliência depende de requisitos de ilhamento. Muitos sistemas conectados desligam durante a perda da rede para proteger trabalhadores e equipamentos. A continuidade exige arquitetura capaz de separar eletricamente a instalação, estabelecer tensão e frequência, coordenar proteções e administrar o balanço de potência. Sem essas funções, painéis instalados podem permanecer indisponíveis justamente durante a interrupção. Essa distinção entre geração distribuída e microrrede é essencial para evitar interpretações simplificadas.

A combinação entre crescimento solar e armazenamento cria oportunidades, mas não elimina o papel de fontes despacháveis em eventos longos ou em locais com baixa disponibilidade renovável. A solução híbrida permite distribuir funções entre recursos e reduzir dependência de um único modo de falha. Seu desempenho deve ser demonstrado por simulação, ensaio e monitoramento. A transição energética, sob essa perspectiva, não significa apenas substituir equipamentos, mas reorganizar a arquitetura de confiabilidade e a gestão do ativo.

3O termo microrrede pressupõe capacidade de controlar recursos e cargas dentro de limites elétricos definidos, com possibilidade de operação conectada ou isolada quando prevista.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

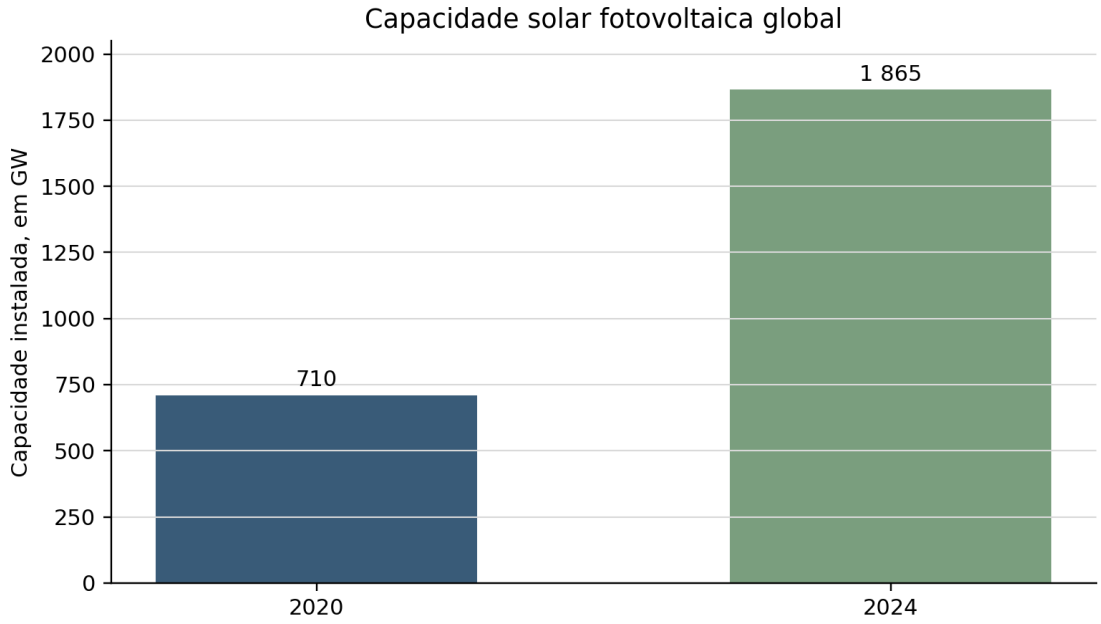


Figura 1. Capacidade solar fotovoltaica global em 2020 e 2024. Fonte: elaboração do autor com dados da IRENA (2025).

5. Proteção, segurança e qualidade da energia

Microrredes e sistemas híbridos modificam níveis e direções de corrente. Proteções projetadas para fluxo unidirecional podem perder sensibilidade ou seletividade durante o ilhamento. Inversores normalmente limitam corrente de falta, enquanto geradores síncronos contribuem de forma diferente. Estudos de curto-circuito devem considerar estados operacionais possíveis e ajustar dispositivos sem comprometer proteção de pessoas ou equipamentos. A coordenação precisa abranger sobrecorrente, falta à terra, tensão, frequência, potência reversa e condições de sincronismo.4

O esquema de aterramento pode mudar entre operação conectada e isolada. A posição do condutor neutro, a existência de fonte separadamente derivada e a comutação de polos influenciam a detecção de faltas e as tensões de toque. Uma transferência tecnicamente funcional pode permanecer insegura se a referência à terra não tiver sido analisada. O projeto deve representar cada modo, documentar caminhos de corrente e verificar compatibilidade com normas aplicáveis. Segurança elétrica é atributo de arquitetura, não um complemento documental.

Qualidade de energia inclui variações de tensão, frequência, harmônicas, desequilíbrio, cintilação e transitórios. Cargas eletrônicas sensíveis e conversores podem interagir, especialmente em redes de baixa potência de curto-circuito. A modelagem deve avaliar estabilidade e distorção, enquanto o

4Normas e requisitos de interconexão devem ser verificados na edição vigente e na jurisdição do empreendimento.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

comissionamento confirma parâmetros reais. A presença de baterias não garante qualidade automaticamente. Controle inadequado, filtros mal dimensionados ou ressonâncias podem introduzir novos problemas. Medição contínua permite identificar tendências antes que se convertam em indisponibilidade.

A segurança do armazenamento requer avaliação de química, propagação térmica, detecção, ventilação, supressão, afastamentos, acesso e resposta de emergência. A probabilidade de incidente pode ser baixa, mas as consequências justificam barreiras independentes. O projeto deve considerar informações do fabricante, normas técnicas e condições ambientais. Planos de inspeção e treinamento precisam acompanhar o ativo durante sua vida útil. A engenharia não deve transferir integralmente a gestão do risco ao sistema eletrônico de bateria.

O comissionamento integrado testa funções que a verificação individual não alcança. Devem ser simuladas perda de rede, falha de partida, indisponibilidade de bateria, retorno de fonte, rejeição de carga e comunicação interrompida. Ensaios precisam ser planejados para não expor pessoas ou processos a risco indevido. Resultados, ajustes e limitações devem ser registrados. A repetição periódica de testes críticos é necessária porque software, carga, combustível e condição dos componentes mudam com o tempo.

6. Operação, manutenção e governança do desempenho

A resiliência projetada só permanece válida quando a operação conserva premissas essenciais. Alterações de carga, expansões, novos equipamentos e mudanças de uso podem consumir margens sem revisão formal. Um processo de gestão de mudanças deve avaliar impacto sobre potência, autonomia, proteção e sequência de recomposição. Diagramas, listas de carga e lógicas precisam refletir a configuração real. A divergência entre documentação e campo reduz a confiabilidade de manobras e dificulta a resposta a incidentes.

A manutenção baseada apenas em calendário pode ser complementada por condição e criticidade. Temperatura de módulos, resistência interna, número de ciclos, qualidade do combustível, vibração, pressão, alarmes e histórico de partidas ajudam a antecipar falhas. Indicadores devem ser poucos, confiáveis e ligados a decisões. Coletar dados sem critérios de interpretação aumenta complexidade sem melhorar desempenho. A governança define responsáveis, limites de alarme, prazos de intervenção e evidências de fechamento.

Testes de autonomia precisam considerar que descarregar completamente uma bateria ou operar um gerador por longo período pode impor custo e risco. Métodos de ensaio parcial, análise de tendência e simulação podem reduzir exposição, mas não substituem toda verificação física. A frequência deve

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

refletir criticidade e histórico. Quando um teste encontra falha, a correção deve incluir causa, efeito sobre outras funções e necessidade de revisar premissas de projeto. O aprendizado operacional fecha o ciclo de engenharia.

A logística de combustível continua determinante em eventos regionais. Estradas bloqueadas, alta demanda e restrições de armazenamento podem limitar reposição. A autonomia nominal deve ser interpretada à luz da quantidade utilizável, consumo em carga variável e qualidade do produto. Estratégias híbridas podem reduzir consumo e prolongar o estoque, enquanto contratos e planos de emergência melhoram a reposição. Nenhuma medida isolada garante continuidade; a robustez resulta de diversidade técnica e preparação organizacional.

A governança também deve incluir cibersegurança, pois controladores, inversores, sistemas supervisórios e plataformas remotas ampliam a superfície digital. Privilégios de acesso, atualização, registro de eventos, segmentação e recuperação de configurações são necessários. Um incidente cibernético pode impedir comandos ou alterar parâmetros sem dano físico inicial. Integrar segurança digital à manutenção elétrica evita que a automação, criada para elevar a resiliência, se transforme em novo ponto único de falha.

7. Avaliação econômica e decisão por ciclo de vida

A avaliação econômica de sistemas resilientes precisa combinar fluxos monetários e consequências operacionais. Investimento inicial, substituição de baterias, consumo de combustível, manutenção, tarifas, perdas e valor residual compõem o custo de ciclo de vida. A economia na conta de energia não representa, sozinha, o valor da continuidade. Para cargas críticas, devem ser examinados custos evitados de interrupção, perda de produção, recuperação de dados, deterioração de produtos e mobilização emergencial. Como esses valores possuem incerteza, convém trabalhar com intervalos e cenários, evitando transformar uma estimativa em precisão aparente.

O horizonte de análise deve refletir vidas úteis diferentes. Módulos fotovoltaicos, inversores, baterias, geradores e sistemas de controle não envelhecem no mesmo ritmo. Substituições precisam ser posicionadas no fluxo de caixa, com premissas de degradação e inflação coerentes. A taxa de desconto influencia a comparação entre investimento inicial elevado e despesas futuras. Uma decisão transparente apresenta os valores utilizados e mostra como o resultado muda diante de variações. A análise de sensibilidade é especialmente importante em tecnologias cujo preço e desempenho evoluem rapidamente.

Tarifas com demanda, horários e penalidades podem tornar o armazenamento economicamente atrativo mesmo sem interrupção. Entretanto, o despacho para redução de custos pode competir com

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

a reserva de resiliência. A otimização deve atribuir prioridade explícita à continuidade ou calcular o valor de manter determinado estado de carga. Regras adaptativas podem considerar previsão de tempestade ou risco de falha da rede, mas exigem dados e supervisão. A economia operacional não deve consumir silenciosamente a margem destinada a eventos críticos.

Externalidades ambientais também integram a decisão. Reduzir horas de operação do gerador diminui consumo local, ruído e emissões, enquanto baterias e painéis possuem impactos de fabricação, transporte e fim de vida. Uma comparação responsável utiliza fronteiras consistentes e reconhece que emissões variam conforme combustível, eficiência, matriz elétrica e reciclagem. O objetivo não é declarar uma tecnologia universalmente limpa, mas escolher uma combinação que reduza impactos mantendo função e segurança.

Critérios multicritério podem organizar confiabilidade, custo, emissões, espaço, ruído, manutenção e disponibilidade de fornecedores. Pesos devem ser definidos por responsáveis e partes afetadas, pois não são propriedades naturais do equipamento. O resultado serve para documentar preferências e conflitos, não para produzir uma verdade automática. Decisões robustas costumam permanecer aceitáveis em diferentes cenários, mesmo quando não são ótimas em uma única previsão.

8. Discussão crítica e agenda de desenvolvimento

A literatura converge ao reconhecer que diversidade de recursos pode elevar resiliência, mas diverge quanto à forma de medir benefício. Estudos utilizam durações de falha, perfis de carga, clima e custos distintos. Comparar resultados sem essas condições pode produzir conclusões enganosas. Uma agenda de pesquisa útil deve publicar conjuntos de premissas, modelos e dados suficientes para reprodução, além de incluir falhas de componentes e comportamento operacional.

Outra lacuna está na validação de longo prazo. Muitos estudos simulam desempenho, enquanto poucos acompanham sistemas por anos para relacionar degradação, manutenção e eventos reais. Dados operacionais anonimizados poderiam melhorar parâmetros de confiabilidade. Contudo, instalações críticas possuem restrições de segurança e confidencialidade. Protocolos de compartilhamento devem equilibrar conhecimento e proteção.

A crescente participação de inversores exige métodos aprimorados para estabilidade e proteção. Modelos agregados podem não representar controles proprietários, e atualizações de firmware alteram comportamento. Testes de conformidade, modelos validados e documentação de parâmetros tornam-se importantes. A cooperação entre fabricantes, projetistas, operadores e pesquisadores pode reduzir incerteza sem expor informações sensíveis.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

Em países e regiões com infraestrutura desigual, soluções precisam considerar capacidade local de manutenção. Um sistema sofisticado pode apresentar menor resiliência prática se peças, suporte e treinamento não estiverem disponíveis. Projetos modulares, documentação clara e estratégias de operação degradada podem aumentar robustez. A engenharia deve adaptar tecnologia ao contexto em vez de presumir condições institucionais uniformes.

A principal implicação é que resiliência deve ser tratada como desempenho verificável. Requisitos precisam ser definidos antes da seleção, demonstrados no comissionamento e acompanhados durante a vida útil. Pesquisas futuras devem aproximar modelagem, dados de campo, fatores humanos e economia. Essa integração permitirá comparar soluções com maior rigor e evitar que resiliência seja utilizada apenas como expressão genérica de valor.

Conclusão

A resiliência energética de instalações críticas é uma propriedade do sistema completo. Potência instalada, capacidade de bateria e volume de combustível são insuficientes quando controles, proteções, transferência e operação não foram coordenados. O projeto deve começar por funções prioritárias, tempos toleráveis e consequências da falha.

A complementaridade entre geração fotovoltaica, armazenamento e grupos geradores amplia alternativas. A bateria oferece resposta rápida e flexibilidade, a fonte solar contribui com energia renovável e o gerador sustenta eventos prolongados. A combinação reduz dependência de um único recurso, mas cria interfaces que precisam de engenharia detalhada.

O dimensionamento deve representar séries temporais, sazonalidade, degradação e falhas. Médias anuais não determinam autonomia durante contingências. A análise de sensibilidade e os cenários permitem compreender quais premissas dominam o resultado e onde reservas são necessárias.

A expansão solar global confirma a relevância da integração de recursos baseados em inversores. Entretanto, geração conectada não equivale a capacidade de ilhamento. Continuidade requer separação, referência elétrica, controle e proteção compatíveis.

Segurança e qualidade de energia não podem ser tratadas depois da seleção de equipamentos. Aterramento, correntes de falta, harmônicas, riscos do armazenamento e transições operacionais determinam se o sistema pode funcionar sem criar novas exposições.

Comissionamento integrado constitui evidência essencial. Testar perda e retorno da rede, falha de recursos e rejeição de carga revela interações que ensaios isolados não mostram. A documentação dos resultados preserva conhecimento para manutenção.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VI, v.2 2025 | submissão: 22/12/2025 | aceito: 25/12/2025 | publicação: 28/12/2025

Ao longo da vida útil, gestão de mudanças, dados de condição, logística de combustível e cibersegurança sustentam o desempenho. A instalação evolui, e suas premissas devem ser revisadas. Resiliência é prática contínua, não característica permanente obtida na entrega.

Conclui-se que sistemas híbridos podem elevar continuidade e eficiência quando submetidos a critérios mensuráveis, arquitetura coerente e governança. A decisão responsável combina modelagem, normas, ensaios e julgamento profissional, mantendo explícitas as limitações de cada fonte e de cada evidência.

Referências

ANDERSON, K. et al. Microgrids for energy resilience: a guide to conceptual design and lessons from defense projects. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2019.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: a review of technologies, key drivers, and outstanding issues. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 402 a 411, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.040.

HERVÁS ZARAGOZA, J. et al. Microgrids as a mechanism for improving energy resilience during grid outages: a post COVID 19 case study for hospitals. Renewable Energy, v. 199, p. 308 a 319, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2022.08.132.

HWANG, S.; TONGSOPIT, S.; KITTNER, N. Transitioning from diesel backup generators to photovoltaic plus storage microgrids in California public buildings. Sustainable Production and Consumption, v. 38, p. 252 a 265, 2023. DOI: 10.1016/j.spc.2023.04.001.

IEA. Power systems in transition: challenges and opportunities ahead for electricity security. Paris: International Energy Agency, 2020.

IEA. Secure energy transitions in the power sector. Paris: International Energy Agency, 2021.

IEA. Batteries and secure energy transitions. Paris: International Energy Agency, 2024.

IEA. World energy investment 2025. Paris: International Energy Agency, 2025.

IRENA. Renewable capacity statistics 2025. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2025.

MARQUSEE, J.; BECKER, W.; ERICSON, S. Resilience and economics of microgrids with photovoltaic generation, battery storage, and networked diesel generators. Advances in Applied Energy, v. 3, 100049, 2021. DOI: 10.1016/j.adapen.2021.100049.

NELSON, J. R.; JOHNSON, N. G. Statistical development of microgrid resilience during islanding operations. Applied Energy, v. 279, 2020. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115724.

SEPÚLVEDA MORA, S. B.; Hegedus, S. Resilience analysis of renewable microgrids for commercial buildings with different usage patterns and weather conditions. Renewable Energy, v. 192, p. 731 a 744, 2022. DOI: 10.1016/j.renene.2022.04.090.

TON, D. T.; SMITH, M. A. The United States experience with the development and deployment of microgrids. The Electricity Journal, v. 25, n. 8, p. 84 a 94, 2012. DOI: 10.1016/j.tej.2012.09.013.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.