

Arquiteturas HVAC, HVDC, MVDC e BESS para Datacenters Hiperescala: Framework Técnico para Planejamento de Suprimento entre Polos Renováveis Remotos e Clusters Digitais

Eduardo M. Fagundes
São Paulo, Brasil
eduardo.mayer@efagundes.com

Abstract— This paper addresses a strategic question at the heart of the digital economy: how to supply large-scale datacenters with reliable, high-quality and cost-competitive power, while the bulk of new generation comes from remote renewable hubs. Hyperscale and multi-tenant datacenters are becoming critical infrastructure, with energy demand comparable to heavy industry but with near-zero tolerance for outages. At the same time, solar and wind projects are often located hundreds of kilometers away from the main digital clusters. Bridging this physical gap, without compromising uptime or business economics, requires a new approach to power architecture.

We compare four key building blocks that structure the power supply to modern datacenters: HVAC (High Voltage Alternating Current) as the incumbent transmission backbone; HVDC (High Voltage Direct Current) for long-distance, high-capacity links; MVDC (Medium Voltage Direct Current) inside the campus as an option to streamline internal distribution; and BESS (Battery Energy Storage System) as a flexible resource that goes beyond traditional backup. In a longer-term view, we also position green hydrogen as a potential replacement for diesel gensets in extended contingencies.

The paper proposes a decision framework that links technology choices to distance, power blocks, grid strength, availability targets and decarbonization goals. Instead of asking which single technology will dominate, the analysis focuses on which combinations are technically and economically rational in each context, and in which sequence they should be deployed. We outline where HVAC remains the preferred business choice, when HVDC becomes compelling, when MVDC adds real value, and under which regulatory and tariff conditions BESS and green hydrogen become strategic assets rather than pure cost.

Keywords—Hyperscale datacenters, HVAC transmission, HVDC links, MVDC architectures, battery energy storage systems (BESS), green hydrogen, renewable energy integration, power system reliability, data center power supply, hybrid HVAC–HVDC grids.

SUMÁRIO EXECUTIVO

Datacenters de grande porte deixaram de ser apenas “salas de servidores”. Hoje são infraestrutura crítica da economia digital: processam transações financeiras, sustentam serviços de nuvem, plataformas de e-commerce, governo digital e aplicações de inteligência artificial em escala massiva. Para isso, exigem energia em grande volume, com alta qualidade e praticamente sem interrupções.

Ao mesmo tempo, a expansão da oferta de energia vem, cada vez mais, de fontes renováveis como solar e eólica, normalmente localizadas em regiões remotas, longe dos grandes polos urbanos e dos clusters de datacenters. Surge o dilema estratégico: como conectar esses polos de geração limpa a grandes datacenters, muitas vezes a centenas de quilômetros de distância, mantendo confiabilidade, previsibilidade de custo e alinhamento com metas de descarbonização?

A solução: um novo portfólio de tecnologias

As soluções tradicionais de transmissão e distribuição em alta tensão ainda são a base do sistema elétrico, mas começam a mostrar limites físicos e econômicos quando precisamos transportar grandes blocos de energia limpa por longas distâncias e atender cargas tão sensíveis quanto os datacenters.

O artigo organiza e compara quatro blocos de solução que, combinados, estão redesenhando a forma de planejar energia para datacenters:

1. HVAC: A transmissão em corrente alternada de alta tensão, que é o padrão atual da maioria das redes. Continua muito competitiva em distâncias curtas e médias, com infraestrutura já estabelecida e grande maturidade regulatória e operacional.
2. HVDC: A transmissão em corrente contínua de alta tensão, que funciona como uma “autoestrada” de energia para longas distâncias e grandes blocos de potência. Permite ligar polos renováveis remotos diretamente a clusters de datacenters, com maior controle de fluxo e menores perdas em certos cenários.

3. MVDC intramuros: Arquiteturas em corrente contínua de média tensão dentro do campus do datacenter. Redesenham a distribuição interna de energia, reduzindo conversões desnecessárias, diminuindo o volume de equipamentos e podendo melhorar eficiência e disponibilidade em ambientes de alta densidade.
4. BESS: Sistemas de baterias que vão além do papel de simples backup. Podem reduzir o uso de geradores a diesel, suavizar picos de demanda, apoiar a estabilidade da rede e, em mercados mais avançados, até gerar receita com serviços ancilares e flexibilidade. Em horizonte mais longo, o artigo também posiciona o hidrogênio verde como alternativa para substituir parte do diesel em contingências prolongadas, em combinação com baterias.

Por que este tema é estratégico para o negócio

Não se trata apenas de escolher uma tecnologia “da moda”. A arquitetura de suprimento de energia passou a ser um driver direto de competitividade para datacenters e para utilities que os atendem. Uma escolha mal calibrada pode significar:

- CAPEX excessivo em linhas, subestações e ativos de backup
- OPEX elevado em perdas, combustível e manutenção
- Risco operacional incompatível com SLAs de missão crítica
- Perda de aderência a metas ESG e exigências de clientes corporativos globais

O artigo entrega três contribuições centrais para tomadores de decisão:

- Um mapa de cenários: Mostra em que condições faz sentido manter a solução tradicional em HVAC, em que faixas de distância e potência HVDC se torna praticamente obrigatório, quando MVDC intramuros agrega valor real e em que contextos BESS é apenas custo ou, ao contrário, vira vantagem competitiva.
- Um framework de decisão: Estrutura critérios claros de comparação entre alternativas: CAPEX, OPEX, perdas, confiabilidade, flexibilidade, qualidade de energia e alinhamento com metas de descarbonização. A ideia é permitir decisões baseadas em trade-offs explícitos, e não em percepções isoladas.
- Um roadmap em fases: Propõe uma trajetória evolutiva: começar com reforços em HVAC onde fizer sentido, incorporar BESS para ganhar flexibilidade e reduzir diesel, avaliar enlacs

HVDC quando a escala e a distância justificarem e, em estágios mais avançados, redesenhar o intramuros com MVDC em campuses de alta densidade.

Próximos passos recomendados

Em síntese, a infraestrutura elétrica associada a datacenters deve ser tratada como ativo estratégico, com decisões de arquitetura pautadas por critérios técnicos e econômico-financeiros consistentes e alinhadas às metas de descarbonização, em vez de ser considerada apenas como custo operacional inevitável. A leitura do artigo é um ponto de partida para:

- Engajar áreas de planejamento, engenharia, regulação e ESG em uma visão comum sobre o tema
- Avaliar, em cada portfólio de sites e regiões, quais cenários de arquitetura são mais aderentes
- Estruturar estudos de caso e projetos-piloto que validem, na prática, combinações HVAC, HVDC, MVDC, BESS e hidrogênio verde

O objetivo é simples e pragmático: ajudar o setor de energia e o setor de datacenters a convergirem para soluções que garantam segurança de suprimento, competitividade de custo e trajetória consistente de descarbonização, preparando o caminho para a próxima década da infraestrutura digital.

I. INTRODUÇÃO

Datacenters de grande porte estão se consolidando como infraestrutura crítica da economia digital, com perfis de carga elevados, sensíveis e contínuos. Em paralelo, a nova capacidade de geração elétrica, especialmente solar e eólica, surge majoritariamente em regiões remotas, muitas vezes a centenas de quilômetros desses polos de demanda. Esse descompasso cria um desafio direto para o setor: como estruturar soluções de suprimento em alta escala que combinem confiabilidade, qualidade de energia e viabilidade econômico-financeira.

Este artigo técnico nasce como contribuição a esse desafio. O objetivo é oferecer uma visão comparativa e aplicada sobre diferentes arquiteturas de fornecimento de energia – HVAC, HVDC, MVDC e BESS – organizadas em cenários onde cada tecnologia tende a ser recomendada e em situações em que não se justifica. A intenção é apoiar decisões de planejamento, projeto e investimento de utilities, operadores de datacenters e investidores institucionais, ajudando a alinhar a expansão da infraestrutura elétrica com a evolução dos polos de processamento de dados.

A. Contexto: crescimento de datacenters hiperescaláveis e demanda por energia confiável

O avanço da economia digital vem deslocando o eixo de criticidade da infraestrutura tradicional para ativos intensivos em dados. Datacenters hiperescaláveis deixaram de ser apenas centros de processamento de TI para se tornarem nós estruturantes de serviços financeiros, comércio eletrônico, streaming, saúde digital, governo eletrônico e aplicações de inteligência artificial em larga escala.

Do ponto de vista elétrico, esse movimento traz três características marcantes:

- Carga elevada e crescente: blocos de algumas dezenas de megawatts evoluindo para centenas de megawatts por campus, com perspectiva de gigawatts em regiões com múltiplos datacenters.
- Perfil de consumo contínuo: fator de carga alto, com pequena variabilidade intra-horária, gerando demanda praticamente “plana” ao longo do dia e do ano.
- Exigência de disponibilidade extrema: requisitos típicos de Tier III/Tier IV implicam tolerância mínima a interrupções, quedas de tensão e desvios de frequência, mesmo de curta duração.

Esses atributos tornam o datacenter uma carga crítica, comparável a instalações industriais sensíveis ou hospitais de grande porte, mas com uma densidade de potência por área muito maior e com maior dependência de sistemas eletrônicos de potência (UPS, conversores, retificadores, inversores). Qualquer perturbação na qualidade de energia pode se propagar para falhas de TI, degradação de serviço, multas contratuais por indisponibilidade e perda de confiança do mercado.

Sob a ótica de planejamento setorial, o crescimento dos datacenters hiperescaláveis funciona como um “novo driver” de expansão de rede, similar ao surgimento de grandes complexos industriais no passado. No entanto, agora esse crescimento ocorre em um contexto de transição energética, com maior participação de renováveis variáveis, metas climáticas e pressões por eficiência energética e redução de emissões.

A combinação de alta demanda estável, requisitos de qualidade de energia muito estritos e agenda de descarbonização cria um espaço claro para reavaliar tecnologias de transmissão, distribuição, armazenamento e arquitetura interna de energia, indo além da solução clássica “alimentação em HVAC + UPS + geradores”.

B. Desafios de longo prazo: distância entre fontes renováveis e polos de carga digital

A expansão da geração renovável, em especial solar e eólica, tende a ocorrer em regiões com alta disponibilidade de recurso energético, terrenos mais baratos e menor adensamento urbano. Em muitos países, isso significa áreas interioranas, semiáridas ou costeiras, frequentemente distantes centenas de quilômetros dos principais polos de consumo, que agora incluem clusters de datacenters

agregados em regiões metropolitanas ou em corredores logísticos de alta conectividade.

Esse descolamento geográfico entre fonte e carga cria um conjunto de desafios estruturais:

- Exigência de novas infraestruturas de transmissão: atendimento a datacenters hiperescaláveis com base em geração renovável remota requer linhas de transmissão dedicadas ou reforços robustos na malha existente, com decisões de longo prazo em CAPEX, prazos de licenciamento e complexidade de implantação.
- Limites físicos e operativos de redes HVAC de longa distância: em trajetos longos, redes em alta tensão em corrente alternada enfrentam perdas crescentes, necessidade de compensação reativa, problemas de estabilidade de tensão e de ângulo, além de limitações de capacidade dinâmica em cenários de alto carregamento.
- Integração de renováveis variáveis com cargas ultrasensíveis: a intermitência da geração fotovoltaica e eólica precisa ser filtrada por camadas de controle, armazenamento e redundância antes de chegar ao “barramento” do datacenter, que não tolera variações bruscas ou interrupções.
- Conflitos de uso de solo e de corredores de transmissão: a criação de longos corredores HVAC ou HVDC envolve questões fundiárias, ambientais e sociais que tendem a se intensificar em países densos ou com áreas ambientalmente sensíveis.

No horizonte de 10 a 20 anos, a tendência é de aumento simultâneo da potência instalada em renováveis remotas e da potência demandada por clusters de datacenters. Isso aponta para uma agenda de planejamento integrada, em que se torna inevitável discutir tecnologias de transmissão de longa distância, arquiteturas híbridas HVAC–HVDC, soluções MVDC intrarregionais e uso estratégico de BESS como elemento de amortecimento entre a variabilidade das fontes e a rigidez de requisitos da carga digital.

C. Objetivo do artigo: comparar arquiteturas HVAC, HVDC, MVDC e BESS para suprimento de datacenters

O objetivo deste artigo é propor um arcabouço técnico para comparar, de forma sistemática, arquiteturas de suprimento de energia para datacenters de alta demanda conectados a polos de geração renovável. A análise combina quatro blocos tecnológicos — HVAC (High Voltage Alternating Current), HVDC (High Voltage Direct Current), MVDC (Medium Voltage Direct Current) intramuros e BESS (Battery Energy Storage System) — e organiza cenários segundo distância, blocos de potência, robustez da rede e requisitos de qualidade de energia. A partir desses cenários, constrói-se um framework de decisão que indica quando manter HVAC como solução dominante, quando HVDC se torna racional, em que casos MVDC agrega valor no campus e como BESS evolui de simples backup para ativo

de flexibilidade e resiliência. A comparação envolve quatro blocos tecnológicos principais:

- HVAC (High Voltage Alternating Current): solução tradicional de transmissão em corrente alternada em alta tensão, amplamente dominada por utilities, com cadeia de suprimentos madura e histórico consolidado de operação.
- HVDC (High Voltage Direct Current): transmissão em corrente contínua em alta tensão, com foco em links de longa distância e altos blocos de potência, incluindo tecnologias VSC, capazes de operar em redes fracas e em integração com renováveis distribuídas.
- MVDC (Medium Voltage Direct Current): aplicação de corrente contínua em níveis de média tensão, principalmente em arquitetura intramuros e redes locais para datacenters, buscando maior eficiência, redução de conversões redundantes e simplificação da topologia interna.
- BESS (Battery Energy Storage System): sistemas de armazenamento em baterias integrados à cadeia de suprimento, seja na interface com HVAC/HVDC, seja no nível do campus ou do próprio datacenter, para suporte de confiabilidade, suavização de carga e prestação de serviços ancilares.

O artigo se propõe a:

- Identificar, para cada tecnologia, os principais benefícios e limitações quando aplicada ao contexto de datacenters hiperescaláveis.
- Construir cenários em que cada arquitetura é tecnicamente recomendável e economicamente racional, assim como cenários em que a adoção seria excessivamente onerosa ou desnecessária.
- Evidenciar sinergias entre tecnologias, por exemplo: HVAC + BESS, HVDC + BESS, MVDC intramuros alimentado por HVAC ou HVDC, e combinações híbridas HVAC–HVDC com camadas de armazenamento.
- Apoiar decisões de stakeholders do setor elétrico e do ecossistema de datacenters no desenho de roadmaps tecnológicos, considerando tanto a realidade atual quanto a evolução esperada da demanda e da matriz de geração.

D. Escopo e limitações: premissas, faixas de potência, distâncias e horizonte de planejamento

Para garantir clareza e aplicabilidade, o artigo adota um conjunto explícito de premissas, que delimitam o escopo da análise e evitam extrapolações indevidas:

- Faixas de potência consideradas:
- Datacenters individuais na faixa de 20 a 100 MW de demanda, com foco em cases de 50 MW como ordem de grandeza de referência.
- Clusters regionais de datacenters com potência agregada entre 200 e 500 MW, admitindo expansão modular até a ordem de gigawatts em horizontes mais longos.

Distâncias típicas entre geração e polos de carga digital:

Categoria	Distância	Características
Curta distância	Até 100–150 km	Infraestrutura existente relevante em HVAC
Distância intermediária	150–400 km	Zona de transição; HVAC ou HVDC podem ser considerados conforme potência, topologia e reforços
Longa distância	Acima de 400–600 km	HVDC tende a ser mais competitivo para grandes blocos de potência e renováveis remotas

Perfil de geração e matriz energética:

- Ênfase em cenários com predominância de geração fotovoltaica e eólica remota, eventualmente complementadas por outras fontes firmes.
- Consideração da variabilidade intradiária e sazonal das renováveis, exigindo mecanismos de controle e armazenamento para garantir a qualidade de energia percebida pelos datacenters.

Horizonte de planejamento:

Prazo	Descrição
Curto e médio prazo	5 a 10 anos — foco em tecnologias maduras ou em fase avançada de implantação, com riscos tecnológicos controlados
Longo prazo	10 a 20 anos — discussão de arquiteturas híbridas, multi-terminais e expansão de MVDC intramuros, tratadas como trajetórias possíveis

Limitações da análise:

- Não é objetivo do artigo tratar em detalhe aspectos regulatórios, tarifários ou de mercado de energia específicos de um país, embora sejam mencionados como condicionantes de viabilidade.
- Questões de licenciamento ambiental, uso do solo e impactos socioambientais são consideradas qualitativamente, sem modelagem detalhada.
- A análise se concentra na arquitetura elétrica de suprimento. Aspectos térmicos e desenho de TI são abordados apenas quando impactam o perfil de carga ou exigência de disponibilidade.

Dentro dessas premissas, o artigo busca construir cenários representativos, que não substituem estudos de engenharia detalhados, mas oferecem um framework robusto para triagem de alternativas, priorização de investimentos e definição de diretrizes de projeto em empreendimentos que combinem alta demanda de energia e missão crítica digital.

2. FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS E ESTADO DA ARTE

Datacenters de alta demanda exigem redes elétricas previsíveis, estáveis e bem compreendidas. Antes de discutir cenários e decisões de investimento, é essencial alinhar conceitos sobre como a energia é transmitida, condicionada, armazenada e disponibilizada em situações normais e de contingência. Aqui organizamos o “kit básico” de tecnologias que compõem o ecossistema elétrico de um datacenter moderno: transmissão em corrente alternada de alta tensão, soluções em corrente contínua, sistemas de armazenamento em baterias e alternativas emergentes de suprimento de longa duração, como o hidrogênio verde.

O ponto de partida é a transmissão em alta tensão em corrente alternada, ainda espinha dorsal da maioria dos sistemas elétricos. Em seguida, discutimos porque, em algumas situações, essa arquitetura começa a mostrar limites físicos e operativos, especialmente em longas distâncias e grandes blocos de potência, e como o conceito de linhas HVAC sintonizadas busca extrair o máximo desempenho possível antes de migrar para alternativas em corrente contínua. Na sequência, entramos em HVDC e MVDC, mostrando como as arquiteturas em corrente contínua abrem novas possibilidades para integração de renováveis, controle de fluxo de potência, redução de perdas e reorganização da distribuição interna dos datacenters.

Complementando esse panorama, posicionamos o BESS (Battery Energy Storage System) como elemento de amortecimento e flexibilidade e introduzimos o hidrogênio verde como candidato a substituir, no médio e longo prazo, parte do papel hoje exercido pelos geradores a diesel em contingências prolongadas. A combinação entre armazenamento em baterias, redes em DC e geração de backup limpa via hidrogênio redesenha o stack energético de missão crítica, aproximando a operação de datacenters de metas de descarbonização sem renunciar a confiabilidade.

A ideia é simples: mostrar, em linguagem clara, até onde HVAC consegue ir com segurança técnica e racionalidade econômica, em que contextos HVDC e MVDC passam a ser candidatos naturais e como BESS e hidrogênio verde se encaixam como tecnologias de suporte, organizando um mapa coerente do estado da arte para quem precisa tomar decisões de arquitetura e investimento.

2.1. Transmissão HVAC em alta tensão

A transmissão em corrente alternada de alta tensão é o padrão de fato dos sistemas de potência. A maior parte das redes de transmissão foi concebida, construída e operada com essa tecnologia. Subestações, linhas aéreas, sistemas de proteção, equipamentos de compensação reativa e normas técnicas foram desenvolvidos para esse paradigma.

Em termos práticos, HVAC oferece algumas vantagens claras. A tecnologia é madura, com uma base instalada enorme, cadeia de suprimentos consolidada e forte padronização. Transformadores, linhas, disjuntores e relés de proteção fazem parte de um ecossistema bem conhecido

por utilities, fabricantes e operadores. Isso se traduz em custos claros, experiência acumulada, disponibilidade de mão de obra qualificada e risco tecnológico baixo.

Por outro lado, o comportamento físico da corrente alternada impõe limitações. Em longas distâncias, a linha passa a demandar compensação reativa significativa, o controle de tensão se torna mais complexo e os fenômenos de estabilidade angular e de tensão ficam mais sensíveis. Em blocos de potência muito elevados, principalmente quando conectados a redes mais fracas, esses efeitos podem se tornar determinantes para o dimensionamento e até inviabilizar soluções puramente em corrente alternada em certos corredores.

Para datacenters, que exigem estabilidade de tensão e alimentação contínua, essas limitações precisam ser tratadas com atenção. HVAC continua sendo uma tecnologia com excelente relação custo-benefício em muitas situações, mas deixa de ser trivial quando se fala em grandes blocos de potência, distâncias elevadas e alta penetração de geração renovável remota.

2.1.1. Características elétricas básicas e limites práticos de distância e capacidade

Do ponto de vista elétrico, uma linha de transmissão HVAC em alta tensão pode ser vista, de forma simplificada, como um circuito com resistência, indutância e capacitância distribuídas ao longo de todo o seu comprimento. Essa natureza distribuída explica por que, à medida que a distância aumenta, os efeitos de capacitância e reatância se tornam cada vez mais relevantes.

Alguns pontos-chave ajudam a entender os limites práticos:

a) Fluxo de potência e limites térmicos

A capacidade de transporte de uma linha é limitada, primeiro, pelo aquecimento dos condutores. Cada linha tem uma corrente máxima admissível, acima da qual o condutor aquece demais, perde resistência mecânica e pode violar limites de flecha e de segurança. Esse é o limite térmico. Em muitos casos, esse limite é atingido antes de qualquer restrição elétrica mais sofisticada.

b) Reativos, tensão e estabilidade

Em corrente alternada, o fluxo de potência ativa está ligado ao ângulo de tensão entre as extremidades da linha, enquanto a potência reativa está ligada ao módulo da tensão. Em linhas longas, a linha tende a gerar ou consumir potência reativa de forma relevante, dependendo do carregamento. Sem compensação adequada, isso leva a perfis de tensão fora das faixas desejadas, tanto por excesso quanto por falta.

Além disso, a estabilidade do sistema depende da capacidade de manter o sincronismo entre geradores e cargas. Em linhas muito carregadas, a margem de estabilidade angular diminui. Pequenas perturbações podem gerar oscilações mais intensas, exigindo controle mais sofisticado e maior reserva de estabilidade.

c) Comprimento típico e “ponto de inflexão”

Na prática, sistemas HVAC funcionam muito bem em distâncias curtas e médias. À medida que a distância aumenta para algumas centenas de quilômetros, começa a haver necessidade intensiva de dispositivos de compensação reativa, reforços em subestações e equipamentos adicionais. Em distâncias mais longas, a combinação de perdas, limitações de estabilidade e necessidade de compensação começa a encarecer e complicar o projeto.

Esse comportamento é crítico quando se discute suprimento de datacenters. Um cluster de alto consumo ligado a um polo de geração distante, por HVAC, pode exigir:

- linhas duplas ou triplas para garantir capacidade e redundância;
- compensadores síncronos, bancos de capacitores, reatores e STATCOMs para controlar tensão;
- esquemas de proteção e coordenação mais complexos para lidar com condições de falha.

Em outras palavras, HVAC continua funcional, mas o custo incremental para manter qualidade e estabilidade em longas distâncias começa a subir de forma não-linear, especialmente em projetos que combinam grande potência, longos corredores e redes fracas.

2.1.2. *Conceito de HVAC sintonizado (tuned HVAC) e ganhos possíveis em longas distâncias*

O conceito de “tuned HVAC” surge como resposta à necessidade de extrair mais desempenho das linhas em corrente alternada sem abandonar a tecnologia. Em essência, trata-se de otimizar o arranjo da linha e dos equipamentos associados para que a relação entre reatâncias série e shunt seja ajustada de forma a reduzir problemas de estabilidade e perdas em distâncias maiores.

Alguns elementos típicos de um arranjo HVAC sintonizado incluem:

- a) Compensação série e shunt planejadas
 - Compensação série: inserção de capacitores série ao longo da linha para reduzir a reatância efetiva, aumentar a capacidade de transmissão e melhorar a estabilidade angular.
 - Compensação shunt: uso de bancos de capacitores, reatores e equipamentos estáticos de compensação para controlar o perfil de tensão e o fluxo de potência reativa.
 - A sintonia adequada entre essas compensações permite que a linha opere mais próxima da sua capacidade térmica, com maior estabilidade e menor risco de colapso de tensão.

b) Equipamentos FACTS e controle dinâmico

A evolução dos sistemas FACTS (Flexible AC Transmission Systems) possibilita que parte dessa

sintonia seja dinâmica. Dispositivos como STATCOMs, SVCs e controladores de fluxo de potência em corrente alternada permitem ajustar, em tempo quase real, a injeção ou absorção de potência reativa, a impedância aparente da linha e o fluxo de potência entre corredores paralelos.

Isso amplia o envelope de operação de uma linha HVAC em longas distâncias, reduz a necessidade de margens de segurança muito conservadoras e melhora a capacidade de resposta a contingências.

c) Ganhos e limites em contexto de datacenters

Para projetos que envolvem grandes blocos de potência e distâncias significativas, HVAC sintonizado pode ser visto como uma forma de “alongar” a vida útil e a relevância da tecnologia tradicional antes de migrar para HVDC. Em alguns casos, essa abordagem permite:

- adiar investimentos em HVDC, aproveitando infraestrutura existente;
- otimizar corredores já implantados, melhorando capacidade e estabilidade;
- atender clusters de carga importantes com menor interrupção tecnológica.

Por outro lado, há limites claros. Em distâncias muito longas ou em projetos de potência extremamente elevada, mesmo um arranjo HVAC sintonizado exige um nível de compensação tão alto e uma arquitetura tão sofisticada que o custo e a complexidade começam a se aproximar ou até superar alternativas em corrente contínua.

No contexto de datacenters, HVAC sintonizado é especialmente relevante em três tipos de cenário:

- quando a distância entre geração e carga é significativa, mas ainda dentro de uma faixa onde HVAC se mantém competitivo;
- quando já existe um corredor HVAC que pode ser reforçado e otimizado em vez de substituído;
- quando o apetite de risco tecnológico é baixo, mas há pressão por aumento de capacidade e robustez.

A partir de certos patamares de distância e potência, porém, a própria lógica de projeto aponta para soluções HVDC ou híbridas HVAC–HVDC, sobretudo quando se busca integrar geração renovável remota com cargas digitais críticas. Nessas situações, HVAC sintonizado deixa de ser solução final e passa a ser, na prática, uma etapa de transição ou parte de uma arquitetura híbrida mais ampla.

2.2. *Transmissão HVDC*

A transmissão em corrente contínua em alta tensão surge como alternativa quando os limites físicos e operativos da corrente alternada ficam mais evidentes. Em termos simples, HVDC (High Voltage Direct Current) permite transportar grandes blocos de potência por longas distâncias com menores perdas e maior controle de fluxo, à custa de estações conversoras mais complexas e caras.

Nesta subseção, o foco é duplo. Primeiro, explicar as topologias clássicas de HVDC baseadas em conversores LCC (Line Commutated Converter), que foram a base da tecnologia por décadas e ainda são relevantes em projetos de muito alta potência. Depois, mostrar a transição para conversores VSC-HVDC (Voltage Source Converter – High Voltage Direct Current), que ampliaram o campo de aplicação para integração de renováveis, redes fracas e esquemas multi-terminais.

A intenção é oferecer um panorama claro: quando faz sentido pensar em HVDC, qual o papel dos conversores em cada geração tecnológica e porque, no contexto de datacenters e renováveis remotas, VSC-HVDC tende a ganhar protagonismo.

2.2.1. *Topologias clássicas e papel dos conversores LCC (Line Commutated Converter)*

Os sistemas HVDC clássicos foram construídos com conversores LCC, baseados em válvulas tiristorizadas. O princípio é relativamente direto: o conversor depende da rede em corrente alternada para comutar as válvulas, “seguindo” a tensão CA para transformar CA em CC em um terminal, e CC em CA no outro.

Do ponto de vista de arquitetura, as topologias clássicas incluem:

a) Monopolar e bipolar

- Monopolar: um condutor principal em alta tensão contínua, com retorno pela terra ou por um condutor de retorno dedicado. É mais simples e barato, mas tende a ser menos robusto do ponto de vista ambiental e de confiabilidade.
- Bipolar: dois condutores em CC, um positivo e outro negativo, com ponto médio aterrado. Essa configuração é dominante em projetos de grande porte porque oferece redundância intrínseca; em caso de falha em um polo, o sistema pode operar em monopolo com potência reduzida.

b) Back-to-back HVDC

No arranjo back-to-back, os conversores CA/CC e CC/CA ficam na mesma subestação, sem linha de transmissão em CC entre eles. A função não é transportar energia por longas distâncias, mas interligar sistemas em corrente alternada que sejam assíncronos ou tenham características diferentes de estabilidade. É um “acoplador” entre sistemas, permitindo fluxos controlados de potência sem sincronismo elétrico direto.

c) Links ponto a ponto de longa distância

Na aplicação mais típica de HVDC LCC, há uma estação conversora em cada extremidade e uma linha de transmissão em CC entre elas, normalmente aérea e de grande extensão. A motivação é transportar grandes blocos de potência, muitas vezes de usinas

hidrelétricas ou complexos geradores remotos, para centros de carga distantes, com menores perdas totais do que uma solução equivalente em HVAC e com melhor controle de fluxo.

Do ponto de vista funcional, os LCC apresentam características marcantes:

- Dependência de rede forte: como a comutação depende da tensão CA, os conversores precisam estar conectados a sistemas com nível de curto-circuito robusto. Em redes fracas, a operação se torna instável ou exige reforços significativos (por exemplo, compensadores síncronos).
- Consumo de potência reativa: conversores LCC consomem reativos. Em carga plena, a demanda de reativo é elevada o suficiente para exigir compensação dedicada (bancos de capacitores, filtros harmônicos, compensadores).
- Qualidade de energia e harmônicos: a comutação tiristorizada gera harmônicos em ambos os lados CA, o que demanda filtros em projeto e operação.
- Maturidade e escala: a tecnologia LCC está amplamente provada em projetos multi-gigawatt. É particularmente competitiva em interligações de longa distância e muito alta potência, quando há redes CA fortes em ambos os lados.

No contexto de datacenters, os links HVDC LCC podem ser relevantes em duas situações específicas:

- Quando o cluster de datacenters se conecta a um backbone HVDC já existente, dimensionado originalmente para grandes usinas e centros de carga consolidados.
- Quando se avalia uma interligação internacional ou inter-regional muito robusta, em que o datacenter é apenas mais uma carga relevante na periferia de um grande sistema.

Por outro lado, o fato de LCC exigir redes fortes e consumir grande quantidade de reativos torna essa tecnologia menos atraente para topologias que envolvem renováveis remotas em sistemas fracos ou polos de carga “novos” onde o datacenter é a peça central. Nesses contextos, o caminho natural é avaliar VSC-HVDC.

2.2.2. *Evolução para VSC-HVDC (Voltage Source Converter – High Voltage Direct Current) e aplicações com renováveis e múltiplos terminais*

A evolução para VSC-HVDC foi impulsionada por três necessidades claras:

- integrar fontes renováveis variáveis conectadas a redes fracas;
- exercer controle mais fino e independente de potência ativa e reativa;
- viabilizar esquemas multi-terminais e arquiteturas em malha, além de simples links ponto a ponto.

Conversores VSC utilizam dispositivos de eletrônica de potência de comutação controlada, como IGBTs, o que permite controlar a forma de onda de corrente quase de forma independente da tensão da rede. Isso gera uma série de vantagens técnicas:

a) Independência de rede forte e operação em sistemas fracos

Diferentemente dos LCC, os VSC não dependem da força da rede para comutar. Eles podem operar em redes fracas, com baixo nível de curto-circuito, e até formar “ilhas” virtuais de rede, mantendo tensão e frequência de forma controlada. Isso é decisivo quando se deseja conectar:

- parques eólicos offshore ou solares em regiões remotas;
- polos de carga como datacenters em áreas onde a rede ainda é pouco estruturada.

b) Controle independente de potência ativa e reativa

VSC-HVDC permite controlar potência ativa e reativa de forma praticamente independente. Isso significa que o conversor pode:

- transportar potência ativa da forma desejada, respeitando limites térmicos e de tensão;
- prestar serviços de compensação reativa localmente, contribuindo para estabilidade de tensão, sem exigir grandes bancos de capacitores adicionais.

Essa capacidade de controle é muito relevante para datacenters, que exigem tensão bem regulada e observam limites estreitos de variação de qualidade de energia.

c) Capacidade de black start e suporte à estabilidade

Como VSC conseguem controlar tensão e frequência, eles podem, em determinadas condições, ajudar em situações de black start, alimentando partes da rede de forma controlada até que geradores síncronos estejam disponíveis. Em sistemas com grande presença de geradores renováveis e cargas críticas, isso adiciona uma camada de resiliência operacional.

d) Aplicações com renováveis e esquemas multi-terminais

A combinação de VSC-HVDC com geração renovável remota e múltiplos pontos de conexão abre espaço para arquiteturas novas:

- hubs de energia renovável, onde diversos parques eólicos e solares se conectam a uma barra em CC, a partir da qual vários pontos de carga são alimentados;
- redes multi-terminais HVDC, com mais de dois conversores, permitindo transferência de potência entre diferentes regiões com alto grau de flexibilidade;
- integração de diferentes mercados e áreas de controle, com maior capacidade de fluxo

controlado de potência, sem os problemas de laços de potência típicos de grandes redes CA interconectadas.

e) Relevância específica para datacenters

No contexto de datacenters alimentados por renováveis remotas, VSC-HVDC oferece uma combinação que dialoga diretamente com os requisitos da carga:

- desacoplamento dinâmico entre o “mundo” renovável e o “mundo” digital: o conversor filtra variações rápidas de geração, mantendo a barra de suprimento do datacenter estável;
- flexibilidade para operar em redes fracas ou em estágios iniciais de desenvolvimento da infraestrutura;
- possibilidade de combinar o conversor HVDC com BESS em diferentes pontos (lado da geração, lado da carga ou ambos), criando arranjos com alto nível de controle e resiliência.

Ao mesmo tempo, VSC-HVDC ainda carrega desafios: custo de capital relevante das estações conversoras, necessidade de engenharia especializada e, em projetos multi-terminais grandes, complexidade de proteção e coordenação. Esses pontos precisam ser balanceados com os ganhos em flexibilidade, qualidade de energia e integração de renováveis.

Para clusters de datacenters, a mensagem central é que VSC-HVDC deixa de ser uma solução apenas “de nicho” e passa a ser, em determinados patamares de potência e distância, uma opção estratégica. Especialmente quando a geração é predominantemente renovável, a rede local é relativamente fraca e o requisito de qualidade de energia é extremo, a combinação VSC-HVDC + BESS tende a configurar um backbone elétrico alinhado às necessidades de médio e longo prazo do setor digital.

2.3. *Arquiteturas MVDC em ambientes de missão crítica*

Arquiteturas MVDC (Medium Voltage Direct Current) surgem como alternativa intermediária entre a distribuição tradicional em corrente alternada e soluções de alta tensão em corrente contínua. Em vez de tratar o datacenter apenas como “ponta” da rede HVAC, o MVDC propõe uma reorganização da infraestrutura interna de potência: parte relevante da distribuição dentro do campus passa a ser em corrente contínua em níveis de média tensão, com conversores estratégicos próximos às cargas finais.

Para ambientes de missão crítica, como datacenters de alta disponibilidade, isso abre espaço para ganhos de eficiência, redução de etapas de conversão, maior integração com sistemas de armazenamento em baterias e simplificação da topologia de backup. Ao mesmo tempo, introduz desafios novos em proteção, padronização, interoperabilidade e capacitação técnica. Nesta subseção, o foco é entender como o MVDC se encaixa na “camada interna” de energia

do datacenter e em que condições ele agrega valor frente às redes HVAC tradicionais.

2.3.1. *Aplicações em datacenters de alta disponibilidade*

Em datacenters de alta disponibilidade, a arquitetura elétrica típica em HVAC segue, de forma geral, uma lógica em cascata:

- alimentação em alta ou média tensão em corrente alternada;
- transformação e distribuição em níveis de média e baixa tensão em CA;
- múltiplos estágios de conversão CA/CC para atender às cargas de TI, UPS, sistemas auxiliares e infraestrutura predial.

O conceito de MVDC altera essa lógica ao introduzir um “barramento DC” em média tensão na espinha dorsal do datacenter ou do campus. As aplicações típicas incluem:

a) Espinha dorsal em MVDC no interior do campus

Em vez de distribuir energia em 13,8 kV ou 34,5 kV em corrente alternada até várias subestações internas, o projeto passa a considerar um backbone em MVDC, com um ou mais níveis de tensão CC intermediários. A alimentação pode vir de um conversor HVDC–MVDC, de um retificador HVAC–MVDC ou de uma combinação das duas fontes.

Ao longo dessa espinha dorsal em MVDC, são instalados conversores DC/DC ou DC/AC dedicados para alimentar:

- barramentos em baixa tensão CC para TI;
- sistemas de UPS associados diretamente ao barramento DC;
- cargas auxiliares que ainda demandam CA (climatização, motores, iluminação etc.), via inversores dedicados.

b) Integração direta com BESS em nível de média tensão

Em arquiteturas MVDC, o BESS pode ser conectado diretamente no barramento DC de média tensão, reduzindo o número de conversões intermediárias. Isso permite:

- fornecer suporte de energia durante falhas de suprimento com menos estágios de conversão;
- atuar como “buffer” energético entre a rede externa (HVAC ou HVDC) e a demanda interna do datacenter;
- prestar serviços internos de regulação, suavizando transientes e apoiando a estabilidade da tensão DC.

c) Segmentação de zonas críticas em MVDC

Datacenters de grande porte podem ter zonas com requisitos de disponibilidade ainda mais rigorosos (por

exemplo, áreas que hospedam serviços financeiros de missão crítica ou plataformas de IA de alto valor). Nesses casos, a arquitetura MVDC permite criar segmentações: determinados halls ou blocos podem ser atendidos por microrredes em MVDC com BESS e UPS dedicados, oferecendo níveis diferenciados de resiliência dentro do mesmo campus.

d) Integração com suprimento externo HVDC

Quando o datacenter (ou o cluster) é alimentado por um enlace HVDC, faz sentido explorar MVDC como camada intermediária. Em vez de converter diretamente HVDC para HVAC e depois novamente para CC em baixa tensão, a arquitetura pode seguir o fluxo:

- HVDC de longa distância;
- conversão para MVDC em subestação interna;
- distribuição MVDC intramuros;
- conversões DC/DC ou DC/AC apenas onde estritamente necessário.

Essa abordagem reduz a quantidade de interconversões CA/CC, o que pode trazer ganhos de eficiência e simplificar a topologia de proteção e de comutação de fontes em nível de carga.

e) Arquiteturas redundantes e escaláveis

Em ambientes de alta disponibilidade, o MVDC pode ser aplicado com arranjos N+1, 2N ou mesmo 2N+1 em conversores e caminhos de alimentação. Linhas em MVDC, comutadores DC e conversores redundantes podem ser combinados para permitir manutenção programada sem impacto nas cargas críticas e para suportar falhas simples ou múltiplas sem perda de serviço.

Na prática, as aplicações em datacenters de alta disponibilidade giram em torno de quatro objetivos:

- aumentar eficiência energética;
- reduzir a complexidade e o número de estágios de conversão;
- melhorar a integração com BESS e outras fontes DC;
- criar uma infraestrutura interna mais modular, escalável e resiliente.

2.3.2. *Benefícios de MVDC intramuros versus redes HVAC tradicionais*

Comparar MVDC intramuros com redes HVAC tradicionais dentro do datacenter significa avaliar, de forma objetiva, os trade-offs em eficiência, arquitetura, confiabilidade e complexidade. Alguns benefícios típicos do MVDC incluem:

a) Redução de conversões sucessivas CA/CC

Na arquitetura tradicional, o caminho de energia até o servidor costuma seguir uma sequência como:

- HVAC externa → transformação em média tensão CA → distribuição CA → UPS CA/CC/CA → retificação para CC em nível de rack.
- No MVDC, parte dessas etapas pode ser consolidada:
- HVAC ou HVDC externa → conversão para MVDC → distribuição MVDC → conversores DC/DC próximos às cargas.

Ao reduzir o número de conversões CA/CC, tende-se a:

- diminuir perdas totais de conversão;
- simplificar o parque de equipamentos eletrônicos;
- reduzir pontos potenciais de falha.

b) Integração mais natural com BESS e outras fontes DC

Sistemas de armazenamento em baterias operam nativamente em corrente contínua. Em uma arquitetura HVAC tradicional, é comum haver conversores adicionais para interface BESS–rede CA. Em MVDC:

- o BESS é conectado diretamente ao barramento DC;
- o controle de fluxo de potência ativa e de suporte durante falhas é mais direto;
- a coordenação entre UPS, BESS e suprimento externo pode ser simplificada em termos de topologia.

Isso favorece esquemas em que o BESS participa tanto da proteção de missão crítica quanto de estratégias de otimização de demanda e participação em serviços ancilares, quando a integração regulatória permite.

c) Eficiência energética em alta densidade de carga

Em datacenters com alta densidade de potência, pequenas melhorias de eficiência ao longo da cadeia de suprimento se traduzem em economia de energia relevante e redução de carga térmica. Ao diminuir conversões desnecessárias e otimizar a distribuição em DC, o MVDC pode contribuir para:

- redução do PUE (Power Usage Effectiveness);
- menor dissipação térmica em equipamentos de conversão;
- dimensionamento mais racional de sistemas de climatização.

d) Flexibilidade arquitetural e modularidade

O barramento MVDC intramuros permite uma estrutura mais modular:

- novos halls ou blocos de datacenter podem ser adicionados com conversores plugáveis no barramento DC;

- é possível segmentar fisicamente e eletricamente áreas com diferentes níveis de criticidade;
- expansões podem ser planejadas em “módulos” de potência, sem reconfigurar toda a arquitetura CA.

Essa modularidade é valiosa em ambientes de crescimento rápido ou em projetos que preveem múltiplas fases de implantação.

e) Desacoplamento parcial de distúrbios em CA

Como o MVDC atua como uma camada intermediária, parte dos distúrbios provenientes da rede HVAC externa (afundamentos de tensão, flicker, variações rápidas) pode ser absorvida e filtrada pelos conversores HVDC/MVDC ou HVAC/MVDC. Isso contribui para:

- estabilidade adicional nos barramentos que alimentam a TI;
- menor sensibilidade a perturbações transitórias na rede em CA.

f) Pontos de atenção e limitações

Apesar dos benefícios, MVDC intramuros não é solução universal. Há desafios importantes:

- maturidade tecnológica e padronização ainda inferiores às arquiteturas HVAC tradicionais;
- complexidade maior em proteção DC, já que as correntes de falha em DC se comportam de forma diferente das falhas em CA, exigindo disjuntores DC e esquemas de proteção especializados;
- necessidade de capacitação de equipes de operação e manutenção para trabalhar com sistemas de média tensão DC, o que envolve novos procedimentos de segurança e diagnóstico;
- custo inicial potencialmente mais elevado, especialmente em mercados onde a oferta de equipamentos MVDC ainda é limitada.

Na comparação direta, MVDC intramuros tende a ser mais interessante quando:

- a potência do datacenter ou do campus é elevada;
- há forte integração com BESS e, eventualmente, com suprimento HVDC;
- a agenda de eficiência energética e redução de perdas é estratégica;
- existe visão de longo prazo de expansão modular e de clusterização de datacenters.

Quando essas condições não estão presentes, uma rede HVAC interna bem projetada, com boas práticas de distribuição, UPS modernos e integração adequada de

BESS pode continuar oferecendo excelente relação custo-benefício, sem a complexidade adicional do MVDC.

2.4. BESS em sistemas elétricos de missão crítica

Em projetos de datacenters, a arquitetura clássica de backup de energia combina UPS (Uninterruptible Power Supply) com grupos geradores a diesel. Normalmente se adota um arranjo com três geradores em paralelo (N+1 ou 2N), capazes de sustentar toda a carga crítica por tempo indefinido, desde que haja combustível disponível. Para cobrir o intervalo entre a perda da rede e a partida dos geradores, usam-se UPS e, em alguns casos, supercapacitores ou volantes de inércia (flywheels).

Esse modelo traz robustez, mas também uma série de desafios: gestão de combustível (qualidade do diesel, volume em reservatório, renovação periódica para evitar decantação e contaminação), logística de abastecimento em situações de crise, necessidade de testes regulares com carga, ruído, emissões locais (NOx, material particulado) e emissões globais de gases de efeito estufa. Em um contexto de datacenter “verde”, as horas de operação a diesel se tornam um passivo ambiental e reputacional.

Sistemas de armazenamento em baterias, ou BESS (Battery Energy Storage System), não eliminam automaticamente os geradores, mas mudam o papel de cada componente. Em vez de depender do diesel para qualquer evento acima de poucos minutos, o datacenter passa a contar com um “pulmão” elétrico que pode sustentar a carga por dezenas de minutos ou algumas horas, reduzir a necessidade de acionamento de geradores e servir como camada de flexibilidade entre a rede, as fontes locais e a carga digital.

Vamos tratar o BESS como elemento que reorganiza a arquitetura de backup e de operação. Primeiro, analisamos seu papel na interface com HVAC (High Voltage Alternating Current) e HVDC (High Voltage Direct Current), incluindo a convivência com geradores a diesel, supercapacitores e volantes de inércia. Em seguida, comparamos conceitualmente o modelo tradicional baseado em UPS e geradores com soluções em que o BESS assume parte das funções de backup e estabilidade.

2.4.1. Papel do BESS na interface com HVDC, HVAC e backup baseado em diesel

Na prática, um datacenter de grande porte combina várias camadas de continuidade:

- milissegundos a segundos: UPS, supercapacitores e/ou volantes de inércia;
- segundos a dezenas de minutos: autonomia de UPS e, em arquiteturas modernas, de BESS;
- dezenas de minutos a horas: grupos geradores a diesel ou outra fonte de geração local;
- longo prazo: restabelecimento da rede ou logística de combustível.

O BESS se insere precisamente na faixa intermediária, conectando o mundo da eletrônica de potência ao mundo da geração térmica e da rede externa.

a) Convivência com grupos geradores a diesel

O arranjo mais realista não é “BESS em vez de gerador”, e sim “BESS reduzindo a dependência do gerador”. Isso se traduz em vários papéis práticos:

- Redução da frequência de partida dos geradores: Eventos de curta ou média duração (por exemplo, interrupções de alguns minutos na rede) podem ser atendidos exclusivamente pelo BESS, evitando partidas desnecessárias dos grupos geradores.
- Redução do tempo de operação em diesel: Mesmo em falhas mais longas, o BESS pode assumir parte da carga ou atuar no “peak shaving” interno, reduzindo o carregamento médio dos geradores, o consumo de combustível e as emissões por hora de contingência.
- Apoio à logística de abastecimento: Em situações excepcionais (bloqueios logísticos, eventos climáticos, restrições de abastecimento), a autonomia adicional fornecida pelo BESS estende o tempo disponível para reabastecer os tanques, reduzindo o risco de parada por falta de diesel.
- Otimização de testes e manutenção: A existência de BESS permite, em alguns casos, testar geradores sob carga controlada, usando o BESS como elemento de apoio na transição de fontes, e reduzir o tempo em funcionamento apenas para testes.

Nesse contexto, o BESS funciona como amortecedor entre rede e geração local, permitindo que o diesel deixe de ser a primeira resposta a qualquer distúrbio e passe a ser a “última linha de defesa” para eventos realmente longos.

b) Integração com supercapacitores e volantes de inércia

Soluções como supercapacitores e volantes de inércia (flywheels) são usadas para cobrir transientes muito curtos e o tempo de partida de geradores. O volante é um cilindro pesado, girando a alta velocidade; quando a rede falha, a energia cinética armazenada é convertida em energia elétrica por alguns segundos ou dezenas de segundos, até que a nova fonte (gerador ou outra) assuma.

Quando introduzimos o BESS, a arquitetura pode ser organizada em camadas:

- Camada ultrarrápida: supercapacitores ou flywheels, cobrindo milissegundos a poucos segundos, garantindo que nenhuma microinterrupção seja percebida pela TI.
- Camada de curto e médio prazo: BESS, oferecendo minutos ou horas de autonomia, mantendo a carga com perfil estável, sem necessidade imediata de partida de geradores.
- Camada de longa duração: geradores a diesel ou outras fontes locais (microturbinas, células a combustível etc.), acionados apenas quando

o evento ultrapassa a capacidade planejada do BESS.

Essa combinação permite dimensionar supercapacitores ou volantes de forma mais racional, já que não precisam sustentar a carga até o fim de uma contingência longa, e dimensionar o BESS para o perfil de risco de cada instalação, em vez de tentar substituições completas impraticáveis.

c) BESS na interface com HVAC e HVDC

Na interface com HVAC, o BESS pode ser conectado tanto no nível de média tensão quanto de baixa tensão, operando via conversores CA/CC dedicados. Isso permite:

- manter a alimentação estável durante afundamentos e interrupções parciais da rede;
- fornecer serviços de regulação de frequência e controle de tensão em coordenação com a subestação local;
- reduzir a demanda de pico do datacenter na ponta do dia, aliviando transformadores e linhas e diminuindo custos tarifários.

Na interface com HVDC, especialmente em soluções VSC-HVDC, o BESS pode:

- ser conectado ao barramento CC do conversor, com controle direto da potência ativa e, em certos esquemas, suporte indireto à estabilidade de tensão;
- atuar como buffer entre a variabilidade da geração renovável no lado remoto e a rigidez da carga no lado do datacenter, suavizando flutuações antes que cheguem ao barramento CA interno;
- apoiar estratégias de black start em conjunto com o conversor, energizando gradativamente partes da rede interna do datacenter ou de um cluster de datacenters.

d) Limitações práticas do BESS como fonte de backup

Apesar dos benefícios, há limites claros:

- Autonomia finita: Em geral, BESS é dimensionado para dezenas de minutos ou poucas horas para cargas críticas. Substituir completamente geradores em um datacenter hiperescalável exigiria capacidades de armazenamento muito grandes, com CAPEX elevado e footprint físico relevante.
- Envelhecimento e gestão de ciclo de vida: Baterias sofrem degradação com ciclos de carga/descarga, temperatura e perfil de operação. O uso intensivo do BESS para múltiplas funções (backup, ancilares, arbitragem) exige uma estratégia clara de gestão de vida útil.
- Segurança e requisitos de instalação: Sistemas BESS em grande escala demandam cuidados com ventilação, proteção contra

incêndio, segregação física e monitoramento térmico e elétrico, especialmente em tecnologias de lítio.

Na prática, o uso de BESS como substituto completo de geradores é exceção. O cenário mais racional é BESS reduzindo o tempo e a intensidade de uso dos geradores, melhorando o perfil ambiental e operacional do datacenter.

2.4.2. Comparação conceitual entre UPS tradicionais e soluções baseadas em BESS

Com a presença de geradores, supercapacitores, volantes de inércia e BESS, a comparação entre UPS e BESS precisa ser colocada em um quadro mais amplo.

a) UPS tradicionais: proteção de milissegundos e minutos

O UPS permanece com funções bem definidas:

- garantir continuidade imediata, sem qualquer interrupção, no momento da falha da rede;
- filtrar distúrbios rápidos (surtos, afundamentos, harmônicos) e entregar energia de alta qualidade à carga de TI;
- oferecer autonomia curta, suficiente para permitir partidas, transferências e comutações sem impacto na TI.

Essa função é irreduzível. Mesmo com BESS, um datacenter de alta criticidade continua exigindo UPS junto às cargas, operando em dupla conversão ou arquitetura equivalente.

b) BESS: camada intermediária de energia e flexibilidade

O BESS é, conceitualmente, uma camada de energia acima do UPS e abaixo dos geradores:

- estende a autonomia do sistema além dos minutos típicos de UPS;
- permite adiar ou reduzir partidas de geradores, transformando eventos que antes acionariam diesel em eventos atendidos com energia armazenada;
- serve como elemento ativo de gestão de demanda, apoio à rede e integração com geração renovável.

Enquanto o UPS é dimensionado em função direta da carga de TI, o BESS é dimensionado em função de cenários de risco, estratégias operacionais e objetivos ambientais e econômicos.

c) Supercapacitores, volantes de inércia e BESS no “pipeline” de continuidade

Em projetos recentes, a “linha do tempo” de continuidade se organiza assim:

- 0 a alguns segundos: supercapacitores e/ou volantes de inércia garantem transição perfeita entre rede, UPS e novas fontes;

- segundos a dezenas de minutos ou horas: BESS assume como fonte principal ou complementar, mantendo a carga sem acionamento imediato de geradores;
- acima da autonomia do BESS: geradores a diesel (ou outra geração local) entram como sustentação de longo prazo.

UPS continua associado à camada ultrarrápida, mas passa a interagir com um portfólio maior de fontes do que apenas rede e gerador. O BESS cria um “meio de campo” em que o operador tem margem para decidir se vale a pena acionar diesel, reduzir carga, migrar workloads para outro site ou aguardar o restabelecimento da rede.

d) Datacenter verde e reposicionamento do diesel

Sob a ótica de sustentabilidade, o BESS é peça central para reposicionar o papel do diesel:

- reduz o número de horas efetivas de operação dos geradores;
- permite dimensionar menor consumo médio em contingências;
- facilita combinar energia renovável local (solar de cobertura, por exemplo) com backup, evitando o acionamento do diesel em pequenas oscilações de rede;
- contribui para reduzir a intensidade de carbono por kWh efetivamente consumido em operação, especialmente quando parte da recarga do BESS vem de fontes renováveis.

Na síntese conceitual, UPS, BESS, supercapacitores, volantes de inércia e geradores não competem entre si; eles ocupam faixas diferentes de tempo e função. A inovação está em como redistribuir responsabilidades:

- o UPS concentra proteção imediata e qualidade de energia para a TI;
- o BESS se torna o “buffer” central de energia do datacenter, conectando rede, renováveis, geradores e carga;
- o diesel é deslocado para a função de seguro residual para eventos prolongados, em vez de ser o protagonista em qualquer falha de rede.

Esse redesenho é o que permite que um datacenter se aproxime, de forma concreta, de uma operação de baixo carbono, sem renunciar aos requisitos extremos de disponibilidade que caracterizam a infraestrutura digital de missão crítica.

2.5. Hidrogênio verde como alternativa aos geradores a diesel em datacenters

O hidrogênio verde começa a despontar como alternativa de médio e longo prazo para substituir, parcial ou totalmente, o uso de geradores a diesel em datacenters de missão crítica. A lógica é relativamente simples: em vez de manter grandes volumes de combustível fóssil em tanques e depender de logística rodoviária em cenários de crise, a infraestrutura passa a contar com hidrogênio produzido a

partir de eletricidade renovável, armazenado localmente e convertido em energia elétrica por células a combustível ou motores dedicados.

Na prática, o hidrogênio tende a ocupar o papel de “fonte de energia de longa duração” para contingências prolongadas, enquanto BESS (Battery Energy Storage System) e UPS (Uninterruptible Power Supply) permanecem como camadas de resposta rápida para eventos de curta duração. A combinação hidrogênio verde + BESS forma um stack tecnológico potencialmente alinhado a metas de descarbonização, redução de ruído e mitigação de riscos associados ao diesel, mas com desafios importantes de custo, infraestrutura e maturidade regulatória.

2.5.1. Configurações típicas: células a combustível e motores a hidrogênio

As arquiteturas mais comuns em discussão para uso de hidrogênio em datacenters incluem:

- Células a combustível alimentadas por hidrogênio: Hidrogênio armazenado em tanques pressurizados ou liquefeito é convertido em energia elétrica por meio de células a combustível (por exemplo, PEMFC). A saída em corrente contínua pode ser integrada diretamente a barramentos DC (MVDC ou LVDC) ou convertida para CA para conexão a quadros convencionais.
- Motores de combustão interna adaptados a hidrogênio: Em alguns casos, motores semelhantes aos grupos geradores atuais são adaptados para queimar hidrogênio ou misturas com gás natural. Essa abordagem conserva, em parte, a cadeia de conhecimento de grupos geradores convencionais, mas mantém características de máquina térmica e emissões de NOx que exigem tratamento.
- Produção on-site por eletrólise: Em vez de depender exclusivamente de fornecimento externo de hidrogênio, alguns conceitos preveem eletrólise local usando energia da rede ou de renováveis dedicadas. A produção on-site reduz dependência logística, mas exige água de alta qualidade, sistemas de compressão/armazenamento e controle rigoroso da operação.
- Integração com BESS e UPS: Em todas as variantes, o hidrogênio não substitui o papel do BESS/UPS na resposta instantânea. O desenho típico mantém:
 - UPS e BESS para milissegundos até dezenas de minutos
 - hidrogênio verde para horas ou dezenas de horas de operação em contingência prolongada

2.5.2. *Vantagens técnicas, ambientais e operacionais em relação ao diesel*

Quando bem projetado, o uso de hidrogênio verde oferece um conjunto de vantagens relevantes para datacenters com alta criticidade e compromissos ESG:

- Redução drástica de emissões diretas: Hidrogênio verde, produzido a partir de eletricidade renovável, elimina as emissões diretas de CO₂ associadas à queima de diesel. Em células a combustível, o principal subproduto é água; em motores de combustão, permanecem NO_x, mas com perfil de emissões muito distinto de grupos a diesel.
- Coerência com metas de descarbonização e “datacenter verde”: A substituição de geradores a diesel por hidrogênio verde aumenta a credibilidade de compromissos ambientais e pode ser decisiva em mercados onde clientes finais exigem evidências robustas de neutralidade de carbono ou redução de Scope 1 e Scope 2.
- Redução de ruído e vibração (em especial com células a combustível): Sistemas baseados em células a combustível operam com níveis de ruído e vibração significativamente menores do que grupos geradores tradicionais. Isso é particularmente importante em datacenters próximos a áreas urbanas ou em empreendimentos com restrições acústicas.
- Menor dependência de logística rodoviária em cenários críticos: Modelos com produção on-site por eletrólise reduzem a dependência de caminhões tanque de diesel, que podem enfrentar restrições de acesso em desastres naturais, crises de segurança ou interrupções de infraestrutura viária. Mesmo em cenários com fornecimento externo de hidrogênio, a logística tende a ser pensada de forma mais estruturada e menos sujeita à degradação do combustível no tanque.
- Compatibilidade com arquitetura elétrica em DC: A saída em corrente contínua das células a combustível dialoga bem com barramentos MVDC ou LVDC internos, reduzindo o número de estágios de conversão quando comparada a um arranjo diesel + alternador + retificação.

2.5.3. *Desafios, riscos e limitações na substituição do diesel*

Apesar dos benefícios, a adoção de hidrogênio verde como substituto do diesel enfrenta desafios importantes, que precisam ser considerados de forma realista:

- Custo do hidrogênio verde e CAPEX da infraestrutura: O custo nivelado do hidrogênio verde ainda é significativamente superior ao do diesel em muitos mercados. Além do combustível, a infraestrutura de produção on-site (eletrólise), compressão, armazenamento, células a combustível ou motores dedicados representa

CAPEX elevado, especialmente em projetos pioneiros.

- Eficiência global do ciclo energia-hidrogênio-energia: A cadeia completa – eletrólise, compressão/armazenamento, conversão em eletricidade – apresenta perdas em cada etapa. Em muitos casos, o custo energético total por kWh útil em contingência é maior do que em um arranjo convencional com diesel, o que precisa ser ponderado frente aos benefícios ambientais e regulatórios.
- Complexidade de segurança e normas específicas: Hidrogênio é inflamável, difunde-se com facilidade e possui faixa de inflamabilidade ampla. A gestão segura exige:
 - projeto cuidadoso de ventilação, detecção de vazamento e supressão
 - materiais e componentes compatíveis com H₂
 - normas e certificações específicas, que ainda estão em consolidação em muitos mercados

Isso implica treinamento especializado, revisão de rotinas de manutenção e integração cuidadosa com sistemas de proteção e detecção de incêndio existentes.

- Maturidade tecnológica em escala de datacenter: Embora células a combustível e soluções a hidrogênio já sejam conhecidas, o uso em larga escala como backbone de backup em datacenters hiperescaláveis ainda está em fase de adoção inicial. A curva de aprendizado envolve riscos de disponibilidade de peças, suporte técnico, curva de confiabilidade em campo e integração com sistemas de automação e monitoramento existentes.
- Disponibilidade e logística de suprimento em diferentes regiões: Em áreas sem infraestrutura consolidada de produção e distribuição de hidrogênio, a dependência de soluções on-site ou de cadeias logísticas emergentes adiciona risco ao modelo operacional. Em muitos contextos, o diesel ainda é o combustível com maior capilaridade e previsibilidade de fornecimento.
- Integração com o stack de energia existente: A transição do diesel para hidrogênio verde não é trivial em ambientes que já possuem investimentos significativos em grupos geradores, tanques, sistemas de exaustão e controles associados. Estratégias de migração gradual precisam ser avaliadas, incluindo períodos de operação híbrida (parte do parque em diesel, parte em hidrogênio) e reaproveitamento de ativos existentes.

Em síntese, o hidrogênio verde surge como candidato consistente para substituir, no médio e longo prazo, parte relevante do papel hoje exercido pelos geradores a diesel em datacenters – especialmente em projetos com metas agressivas de descarbonização e com acesso competitivo a

energia renovável. A decisão, porém, deve ser balizada por análise clara de custos, riscos, maturidade tecnológica e contexto regulatório, e quase sempre será mais racional quando combinada a BESS e arquiteturas elétricas otimizadas em DC, em vez de tentar replicar de forma direta o modelo mental de “trocar diesel por hidrogênio” sem redesenhar a solução como um todo.

3. DATACENTERS COMO CARGAS CRÍTICAS NO SISTEMA ELÉTRICO

Datacenters de grande porte consolidaram-se como elementos estruturantes da infraestrutura digital e, ao mesmo tempo, como cargas de alta relevância para o sistema elétrico. A combinação de potência instalada elevada, operação contínua e sensibilidade extrema a perturbações torna esses empreendimentos diferentes de consumidores industriais convencionais. Do ponto de vista de planejamento e operação, a presença de um ou vários datacenters em determinada região altera fluxos de potência, requisitos de qualidade de energia e critérios de estabilidade.

Esta seção analisa o datacenter sob a ótica do sistema de potência. Primeiro, caracteriza-se seu comportamento como carga dinâmica, incluindo perfil de demanda, rampas e resposta a afundamentos de tensão e desvios de frequência. Em seguida, são descritos os requisitos específicos de qualidade de energia associados à TI de missão crítica e às classes de confiabilidade usuais (Tier III, Tier IV). Por fim, discute-se a interação entre datacenters e a rede, tanto como fonte de risco quanto como potencial ativo sistêmico, especialmente quando integrados a BESS (Battery Energy Storage System) e arquiteturas de suprimento mais avançadas.

3.1. Caracterização de datacenters como cargas dinâmicas

Do ponto de vista elétrico, um datacenter moderno se comporta como uma carga eletrônica de grande porte. A maior parte da potência é consumida por servidores, sistemas de armazenamento, elementos de rede, infraestrutura de climatização e sistemas auxiliares, todos alimentados por cadeias de conversão eletrônica (UPS, retificadores, inversores, fontes chaveadas, acionamentos de velocidade variável). Esse arranjo modifica a forma tradicional de modelar cargas, que antes se apoiava fortemente em representações agregadas de motores e cargas passivas.

Algumas características gerais se destacam:

- fator de potência tipicamente elevado, porém, com conteúdo harmônico significativo
- baixa tolerância a variações de tensão e frequência, mesmo de curta duração
- predominância de resposta controlada por eletrônica de potência, com pouca inércia eletromecânica associada

Além disso, o perfil de demanda é resultado da combinação entre workloads de TI, atuação dos sistemas térmicos e

políticas de eficiência energética, produzindo rampas de carga e degraus que o sistema elétrico precisa acomodar com segurança.

3.1.1. Perfil de demanda, rampas de carga e sensibilidade a afundamentos de tensão

A demanda elétrica de um datacenter hiperescalável apresenta um conjunto de propriedades que o torna um consumidor singular para a rede:

- Alta potência instalada: Unidades individuais encontram-se, em muitos casos, na faixa de dezenas de megawatts, e clusters regionais podem atingir algumas centenas de megawatts. Em termos de impacto na rede, um único campus pode ser comparável a uma planta industrial pesada.
- Fator de carga elevado: O consumo tende a ser pouco sazonal e relativamente estável ao longo do dia. Há variações associadas a picos de uso de aplicações, janelas de processamento e ciclos térmicos, mas, em média, o perfil se aproxima de uma carga quase “baseload”, com demanda próxima da potência contratada durante grande parte do tempo.
- Ramps e degraus de carga: A ativação de novos halls, a entrada em operação de módulos de TI, a variação do número de servidores em uso, bem como as dinâmicas de chillers, bombas e ventiladores, geram rampas de megawatts por minuto e degraus de carga praticamente instantâneos quando grandes blocos são conectados ou desconectados.

Em paralelo, a sensibilidade a afundamentos de tensão é elevada. Mesmo eventos relativamente modestos do ponto de vista da engenharia de sistemas podem ter consequências relevantes para a operação de TI:

- proteções em UPS e conversores podem atuar, desconectando cargas ou mudando modos de operação
- servidores e equipamentos de rede podem reinicializar ou apresentar falhas intermitentes
- sistemas de armazenamento podem sofrer interrupções abruptas, com risco de perda ou corrupção de dados
- a indisponibilidade de serviços pode gerar penalidades contratuais e danos reputacionais significativos

Como consequência, o envelope de afundamentos de tensão admissíveis em pontos de suprimento a datacenters tende a ser mais restritivo do que em cargas industriais convencionais. Esse fato se traduz em exigências mais rígidas de performance da rede local, coordenação fina de proteções e múltiplas camadas de mitigação internas (UPS, BESS, arquiteturas MVDC, controles de tensão).

3.1.2. *Impactos em estabilidade de tensão e frequência*

A inserção de datacenters de grande porte em redes de distribuição ou subtransmissão altera a dinâmica de estabilidade de tensão e, em alguns contextos, contribui para desafios de frequência, sobretudo em sistemas com menor inércia.

Sob a ótica da estabilidade de tensão, observam-se efeitos como:

- aumento do carregamento de linhas e transformadores que alimentam a área, reduzindo margens de tensão em condições de ponta ou contingência
- maior sensibilidade de barras próximas a afundamentos de tensão decorrentes de faltas, manobras ou perda de elementos da rede
- redução da contribuição natural de amortecimento fornecida por cargas convencionais, uma vez que o comportamento da carga de datacenter é mediado por eletrônica de potência, com controles que podem não reproduzir os mecanismos clássicos de resposta de cargas passivas ou motorizadas

No domínio da frequência, dois fenômenos merecem atenção:

- variações bruscas de carga associadas a degraus ou desconexões de blocos relevantes podem contribuir para desvios rápidos de frequência em sistemas com baixa inércia síncrona
- a perda súbita de um datacenter, por atuação de proteção interna ou externa, funciona como uma redução abrupta de carga, também produzindo transientes de frequência e redistribuição de fluxos em nível de transmissão e subtransmissão

Como a maior parte da carga do datacenter é eletronicamente condicionada, o seu comportamento em eventos de frequência não é trivial. Dependendo da parametrização de UPS, BESS e conversores, o conjunto pode:

- colaborar com o amortecimento de oscilações, por meio de controles bem projetados
- ou exacerbar instabilidades, caso proteções e controles sejam excessivamente sensíveis ou descoordenados

Por esses motivos, a conexão de datacenters relevantes exige estudos específicos de estabilidade de tensão, resposta dinâmica em eventos de frequência e coordenação entre a filosofia de controle interna do cliente e a estratégia de operação do operador do sistema.

3.2. *Requisitos de qualidade de energia*

A qualidade de energia em datacenters está diretamente vinculada à continuidade de serviços digitais e ao cumprimento de acordos de nível de serviço. Pequenas falhas elétricas podem se traduzir em interrupções de alto

impacto econômico. Por isso, parâmetros como tensão, frequência, distorção harmônica e ocorrência de eventos de curta duração precisam ser tratados em patamares mais restritivos do que aqueles usualmente aplicados a consumidores industriais de grande porte.

Essa realidade se reflete em especificações contratuais e técnicas que incluem:

- envelopes estreitos de variação de tensão em regime permanente
- critérios rigorosos para afundamentos e elevações de tensão de curta duração
- limites conservadores para distorção harmônica total e harmônicos individuais
- expectativa de estabilidade de frequência muito próxima ao valor nominal, com tolerância limitada a desvios transitórios

Além disso, os próprios sistemas internos (UPS, BESS, conversores, proteções) são projetados para atender critérios de ride-through diferenciados, frequentemente mais exigentes que as normas genéricas de compatibilidade eletromagnética e qualidade de energia em redes públicas.

3.2.1. *Tensão, frequência, distorção harmônica e eventos de curta duração*

Parâmetros de qualidade de energia nos barramentos que alimentam TI e sistemas críticos são definidos de forma a traduzir requisitos de disponibilidade em grandezas mensuráveis. Em linhas gerais, os principais critérios incluem:

- Variação de tensão em regime permanente dentro de faixas estreitas em torno do valor nominal, de modo a não provocar estresse excessivo em fontes chaveadas e equipamentos sensíveis.
- Afundamentos e elevações de tensão limitados em profundidade e duração, de forma a evitar disparo de proteções em cascata, desligamentos de UPS ou perda de sincronismo em conversores internos.
- Distorção harmônica global e por ordem mantida dentro de níveis compatíveis com as recomendações para equipamentos de TI, preservando desempenho, eficiência e vida útil dos equipamentos.
- Controle de transientes rápidos (impulsos, surtos, comutações), com uso de proteções adequadas e coordenação de dispositivos de supressão.

A frequência, em sistemas interligados, é usualmente bem controlada pelo operador, mas eventos como perda de geração ou desconexão de grandes blocos de carga ainda podem provocar desvios momentâneos. A eletrônica associada a UPS e BESS precisa:

- suportar esses desvios dentro de uma banda de tolerância definida
- não amplificar instabilidades por meio de comportamentos não lineares ou modos de controle mal ajustados

Eventos de curta duração, como faltas monofásicas, religamentos automáticos e manobras de equipamentos de grande porte, são particularmente críticos em barras que alimentam datacenters. A estratégia de projeto costuma incluir:

- definição de curvas de ride-through para UPS, BESS e demais conversores, permitindo a continuidade de operação em uma faixa controlada de distúrbios
- estabelecimento de critérios internos de compatibilidade com a rede mais rígidos do que os padrões genéricos, de modo a reduzir a probabilidade de desligamentos desnecessários

3.2.2. *Níveis de disponibilidade e classes de confiabilidade típicas (Tier III, Tier IV)*

Classificações como Tier III e Tier IV traduzem, em linguagem de mercado, requisitos de disponibilidade, redundância e manutenção sem interrupção. Do ponto de vista elétrico, esses níveis de serviço se desdobram em decisões de arquitetura e critérios de qualidade de energia.

Entre os desdobramentos mais relevantes estão:

- escolha de arranjos de redundância (N, N+1, 2N) em alimentação, UPS, BESS e grupos geradores
- necessidade de múltiplos caminhos independentes de suprimento, muitas vezes com dupla alimentação de subestação, circuitos redundantes e enlaces com topologias em anel ou malha
- exigência de esquemas de transferência automática e manual que permitam manutenção em carga, sem interrupção dos serviços de TI

A qualidade de energia, nesse contexto, deixa de ser mera conformidade com normas mínimas e passa a ser componente de um compromisso de disponibilidade. Na prática, as especificações de tensão, frequência, harmônicos e eventos de curta duração convergem com os requisitos de arquitetura, definindo:

- quanta redundância elétrica é necessária
- quantas fontes físicas independentes devem existir
- qual combinação de HVAC, HVDC, MVDC, UPS e BESS é mais adequada para sustentar o nível de Tier desejado com relação custo-benefício aceitável

3.3. *Interação entre datacenters e o sistema de potência*

A presença de datacenters no sistema de potência introduz uma relação bidirecional complexa. De um lado, a rede precisa garantir desempenho adequado para uma carga extremamente sensível. De outro, a conexão de grandes blocos de carga em pontos específicos altera fluxos de potência, carregamentos e margens de estabilidade, exigindo ajustes na operação e no planejamento.

À medida que a densidade de datacenters aumenta em determinada região, decisões de expansão de redes de transmissão e distribuição, localização de novas

subestações, adoção de tecnologias avançadas de controle e desenho de programas de serviços ancilares passam a considerar explicitamente esse tipo de carga. Ao mesmo tempo, datacenters equipados com BESS e sistemas de controle sofisticados podem ser integrados a soluções de flexibilidade, assumindo papel ativo na operação do sistema.

3.3.1. *Resposta do sistema a grandes blocos de carga concentrada*

A conexão de um datacenter de grande porte em uma barra de distribuição ou subtransmissão cria um ponto de carga altamente concentrada. Em estudos de fluxo de carga e estabilidade, essa conexão:

- altera o perfil de fluxos nas linhas que alimentam a região, podendo aproximar alguns elementos de seus limites térmicos ou de estabilidade
- aumenta o carregamento de transformadores e equipamentos de manobra, requerendo, em muitos casos, reforços ou reconfiguração de topologias
- reduz margens de estabilidade de tensão em situações de contingência, principalmente quando combinada com outros grandes consumidores ou alta penetração de geração distribuída na área

A eventual perda súbita de um datacenter, por atuação de proteção interna ou externa, também configura um evento relevante para o sistema:

- a saída abrupta de um grande bloco de carga pode provocar elevação momentânea de frequência, dependendo do porte relativo ao sistema interligado
- a redistribuição de fluxos após a perda da carga pode sobrecarregar linhas e transformadores em outras rotas, exigindo que esquemas de proteção e automatismos sejam cuidadosamente ajustados

Por esses motivos, processos de conexão de datacenters de grande porte geralmente incluem:

- estudos detalhados de fluxo de carga, curto-circuito e estabilidade para diferentes cenários de operação
- definição de critérios de corte seletivo de carga, coordenação entre proteções de cliente e de concessionária e eventual implementação de esquemas especiais de proteção de sistema
- planejamento de reforços em transmissão, subtransmissão, distribuição e compensação reativa para manter margens adequadas de operação

3.3.2. *Datacenters como ativos de rede: potencial para serviços ancilares*

Datacenters equipados com BESS, sistemas de controle avançados e capacidade de gestão de carga podem deixar de ser apenas cargas inflexíveis e passar a atuar como recursos energéticos distribuídos. Em contextos regulatórios e de mercado favoráveis, essa transformação

abre espaço para a prestação de serviços ancilares e suporte à operação.

Entre os serviços possíveis, destacam-se:

- Regulação de frequência: variação controlada do consumo, ou uso de BESS para injeção e absorção rápida de potência ativa, apoiando o controle de frequência em eventos de desvio.
- Suporte de tensão: controle coordenado de potência reativa em UPS, compensadores estáticos, inversores de BESS e demais conversores, contribuindo para a manutenção de perfis de tensão em barras críticas.
- Resposta rápida a emergências: redução temporária da demanda em condições de escassez, conforme contratos específicos, ou alteração de perfis de carga para aliviar elementos sobrecarregados.

A efetivação desse potencial depende de três condições estruturais:

- Arquitetura interna projetada para operar com flexibilidade, sem comprometer os requisitos de disponibilidade da TI.
- Mecanismos regulatórios, tarifários e de mercado que reconheçam e remunerem adequadamente a prestação de serviços ancilares por grandes consumidores.
- Coordenação operacional entre o centro de controle do datacenter e o operador do sistema, com canais claros de comunicação, sinalização e supervisão.

Mesmo na ausência de mercados ancilares formados, datacenters podem contribuir para a estabilidade local por meio de:

- perfis de carga previsíveis e comunicação antecipada de grandes mudanças operacionais
- uso de BESS para amortecer transientes da rede, reduzindo a propagação de distúrbios
- coordenação de janelas de manutenção com condições sistêmicas mais favoráveis

Em síntese, a relação entre datacenters e o sistema elétrico combina riscos e oportunidades. Quando integrados em uma arquitetura bem planejada de HVAC, HVDC, MVDC e BESS, datacenters podem ser tratados não apenas como cargas críticas a serem protegidas, mas como peças estratégicas na modernização e na flexibilização da rede elétrica em um contexto de transição energética e digital.

4. ARQUITETURAS DE SUPRIMENTO DE ENERGIA: OPÇÕES TECNOLÓGICAS

Decisões sobre suprimento de energia para datacenters de grande porte deixaram de ser uma mera escolha entre “qual tensão” e “quantos alimentadores”. Hoje, trata-se de definir uma arquitetura sistêmica que conecta polos de geração (muitas vezes renováveis e remotos), corredores de transmissão, subestações, redes regionais, campus de

datacenters e camadas internas de backup e armazenamento. Cada decisão nessa cadeia impacta CAPEX, OPEX, risco operacional, pegada de carbono e capacidade de expansão futura.

O portfólio tecnológico disponível pode ser organizado em quatro blocos principais. A alimentação em HVAC (High Voltage Alternating Current) convencional continua sendo a solução dominante, alavancando a infraestrutura existente e a maturidade regulatória, especialmente em distâncias curtas e médias e em redes robustas. Em seguida, enlaces HVDC (High Voltage Direct Current) ponto a ponto passam a ser candidatos naturais quando há polos renováveis distantes, grandes blocos de potência e necessidade de controle fino de fluxo e desacoplamento dinâmico entre geração e carga.

À medida que os sistemas evoluem, surgem configurações híbridas HVAC–HVDC, nas quais o HVDC atua como backbone de longa distância e o HVAC permanece como malha regional de distribuição. Essa combinação permite integrar múltiplos polos de geração renovável a múltiplos clusters de carga digital, preservando a compatibilidade com redes existentes e abrindo caminho para uma transição gradual de arquiteturas puramente em CA para topologias com maior presença de CC em alta tensão.

No nível intramuros, arquiteturas MVDC (Medium Voltage Direct Current) redesenham a infraestrutura interna do campus. A espinha dorsal em corrente contínua em média tensão possibilita reduzir o número de conversões, integrar de forma mais direta UPS (Uninterruptible Power Supply), BESS (Battery Energy Storage System) e grupos geradores, e melhorar eficiência energética e modularidade. Essa camada interna em CC é particularmente estratégica quando o datacenter é alimentado por HVDC ou quando há metas agressivas de eficiência e descarbonização.

O objetivo da seção é organizar essas quatro arquiteturas de forma comparável, deixando claro para o leitor que não existe uma solução única “correta”, mas um conjunto de arranjos possíveis. A escolha ótima depende de distância entre geração e carga, escala do cluster de datacenters, robustez da rede existente, perfil de renováveis, metas de sustentabilidade e apetite ao risco tecnológico. A partir daí, torna-se possível discutir cenários em que cada arquitetura é tecnicamente e economicamente recomendável, e cenários em que se torna excessiva, arriscada ou desnecessária.

4.1. *Arquitetura 1: Alimentação em HVAC convencional*

A alimentação em HVAC convencional representa a solução mais difundida na indústria: a mesma lógica de transmissão e distribuição que atende cargas industriais e urbanas é aplicada aos datacenters, com eventuais reforços locais. Em muitos casos, é a primeira opção a ser considerada, especialmente quando a distância entre geração e carga é moderada e a rede existente tem capacidade de absorver a nova demanda.

4.1.1. *Descrição do arranjo típico (usinas, linhas HVAC, subestações, distribuição local)*

O arranjo típico em HVAC convencional pode ser descrito, de forma simplificada, em camadas:

- Polo de geração: Conjunto de usinas conectadas à malha de transmissão em corrente alternada (hidrelétricas, térmicas, eólicas, solares centralizadas). Na visão do datacenter, esse polo é a “origem” da energia, ainda que, em sistemas interligados, a origem física seja difusa.
- Malha de transmissão em alta tensão: Linhas aéreas em tensões típicas de 230 kV, 345 kV, 500 kV ou equivalentes, com arranjos simples, duplos ou em anel, dependendo do sistema. Essas linhas conectam o polo de geração às regiões de carga e às subestações principais.
- Subestações de seccionamento e transformação: Subestações elevatórias e rebaixadoras, com transformadores e equipamentos de manobra, convertem a tensão de transmissão para níveis de subtransmissão (por exemplo, 138 kV, 69 kV) e distribuição de média tensão (13,8 kV, 34,5 kV). Nessa etapa, são incorporados dispositivos de compensação reativa e controle de tensão.
- Rede de subtransmissão e distribuição: A partir das subestações, ramais em média tensão atendem diretamente consumidores industriais ou alimentam subestações dedicadas ao datacenter. Em projetos de maior porte, é comum a construção de uma subestação específica, conectada em nível de subtransmissão, para alimentar exclusivamente o campus de datacenters.
- Infraestrutura interna do datacenter: Dentro do campus, transformadores, painéis de média e baixa tensão, UPS, BESS, grupos geradores, sistemas de distribuição em baixa tensão e, eventualmente, MVDC interno compõem a camada final de suprimento, mas a “chegada” principal é em HVAC.

Essa arquitetura se apoia fortemente na infraestrutura existente do sistema elétrico, adicionando reforços onde necessário.

4.1.2. *Pontos fortes: maturidade, custo de capital, facilidade de integração*

A alimentação em HVAC convencional apresenta um conjunto de vantagens que explicam sua predominância:

- Maturidade tecnológica e experiência operacional: A tecnologia de transmissão e distribuição em CA é amplamente dominada por utilities, fabricantes e integradores. Há décadas de experiência acumulada em projeto, construção, operação e manutenção, com normas consolidadas e boas práticas estabelecidas.
- Cadeia de suprimentos ampla: Transformadores, disjuntores, seccionadoras, linhas, isoladores, bancos de capacitores, reatores e sistemas de

proteção HVAC estão amplamente disponíveis, com múltiplos fornecedores, o que reduz risco de obsolescência e facilita reposição de componentes.

- Custo de capital competitivo em distâncias curtas e médias: Em distâncias moderadas e blocos de potência até certos patamares, a combinação de CAPEX de linhas e subestações HVAC costuma ser mais competitiva que alternativas em HVDC, sobretudo quando não há necessidade de construir estações conversoras.
- Facilidade de integração com a rede existente: Conectar um datacenter em HVAC a uma rede em CA já consolidada é, em termos conceituais, uma extensão das práticas usuais de conexão de grandes consumidores. Do ponto de vista regulatório e comercial, modelos de acesso, tarifas e contratos estão mais maduros para essa arquitetura.
- Flexibilidade para expansão incremental: Reforços em linhas, instalação adicional de bancos de capacitores, upgrades de transformadores e construção de novas subestações locais podem ser feitos em fases, acompanhando o crescimento do datacenter.

4.1.3. *Pontos fracos: limitações de distância, perdas e estabilidade em blocos de alta potência*

Apesar das vantagens, a arquitetura HVAC convencional apresenta limitações quando se combinam longas distâncias, grandes blocos de potência e participação significativa de renováveis remotas:

- Limites de distância e necessidade de compensação: Em longos corredores, a linha HVAC passa a exigir compensação reativa intensa, dispositivos FACTS e esquemas de controle sofisticados para manter perfis de tensão e margens de estabilidade. O custo incremental desses recursos pode reduzir a vantagem de CAPEX inicial.
- Perdas em transmissão mais elevadas em longas distâncias: A natureza da CA, com reatâncias distribuídas, tende a aumentar perdas em trajetos muito longos, principalmente em linhas altamente carregadas. Em cenários de centenas de quilômetros, alternativas em HVDC frequentemente apresentam melhor desempenho em perdas.
- Sensibilidade da estabilidade de tensão e ângulo: Grandes blocos de potência transmitidos em HVAC sobre redes já carregadas podem reduzir significativamente margens de estabilidade de tensão e de ângulo. Em contingências, a probabilidade de colapso de tensão ou desligamentos em cascata aumenta.
- Limitações em redes fracas ou em desenvolvimento: Em áreas com redes relativamente frágeis, o acréscimo de um datacenter de grande porte pode exigir reforços

substanciais em HVAC (novas linhas, subestações, compensadores síncronos) para atingir níveis aceitáveis de desempenho.

- Integração menos direta com renováveis remotas: Quando a geração é predominantemente eólica ou solar em regiões remotas, o uso exclusivo de HVAC pode exigir caminhos longos em CA, com complexidade adicional de controle e estabilidade, comparativamente a soluções em HVDC.

Em síntese, a alimentação HVAC convencional tende a ser a opção de referência em distâncias curtas e médias, em redes robustas e com blocos de potência moderados a altos. A partir de determinadas distâncias e escalas de projeto, torna-se necessário avaliar alternativas.

4.2. *Arquitetura 2: Enlace HVDC ponto a ponto para cluster de datacenters*

O enlace HVDC ponto a ponto introduz uma ruptura em relação à arquitetura puramente HVAC. Em vez de estender a rede em CA até próximo ao datacenter, cria-se um “corredor dedicado” em corrente contínua em alta tensão, ligando um polo de geração (geralmente renovável remoto) a um polo de carga digital. Em cada extremidade há uma estação conversora HVDC/CA, que faz a interface com a rede local.

4.2.1. *HVDC conectando polo renovável remoto ao polo de datacenters*

O arranjo típico de HVDC ponto a ponto para datacenters envolve:

- Polo renovável remoto: Conjunto de usinas solares e eólicas, muitas vezes em regiões com excelente recurso energético e baixa densidade de carga. Nessa região, a geração é conectada inicialmente em HVAC às barras locais.
- Estação conversora HVDC no polo de geração: Conversor CA/CC (LCC ou, cada vez mais, VSC) que recebe a energia das barras em CA, converte para CC em alta tensão e injeta na linha HVDC. Em projetos com forte presença de renováveis, conversores VSC são preferidos pela capacidade de operar em redes fracas e controlar ativamente potência ativa e reativa.
- Linha HVDC de longa distância: Enlace em corrente contínua, normalmente aéreo, que transporta grandes blocos de potência com menores perdas e maior controle de fluxo do que uma solução equivalente em HVAC em longas distâncias.
- Estação conversora HVDC no polo de datacenters: Conversor CC/CA que recebe a energia em CC, converte para CA em níveis de transmissão ou subtransmissão e alimenta subestações dedicadas ao cluster de datacenters. A partir daí, a distribuição pode ser em HVAC ou combinada com MVDC intramuros.

Essa arquitetura cria um “tubo energético” dedicando parte da infraestrutura de transmissão para o suprimento de datacenters, com forte desacoplamento elétrico entre polo renovável e polo de carga.

4.2.2. *Benefícios em longas distâncias, controle de fluxo de potência e desacoplamento dinâmico*

Os principais benefícios do enlace HVDC ponto a ponto para datacenters incluem:

- Melhor desempenho em longas distâncias: Em trajetos de centenas de quilômetros, o HVDC tende a apresentar menores perdas totais e maior capacidade de transmissão para um mesmo corredor físico do que HVAC, especialmente em altos níveis de potência.
- Controle de fluxo de potência: O fluxo de potência em um enlace HVDC é determinado pelos controles dos conversores, e não por diferenças de ângulo de tensão ao longo da rede. Isso permite:
 - transferências controladas e estáveis entre polos de geração e carga
 - menor risco de laços indesejados de potência
 - gestão mais previsível de carregamento do corredor
- Desacoplamento dinâmico entre polos: Em HVDC, perturbações no polo de geração têm impacto filtrado no polo de carga, e vice-versa. Falhas e oscilações em uma extremidade não se propagam de forma tão direta quanto em um sistema puramente HVAC, contribuindo para:
 - maior estabilidade de tensão no polo de datacenters
 - menor exposição do datacenter a eventos transitórios distantes
 - capacidade de operar polos com características de estabilidade muito distintas
- Integração mais eficiente com renováveis remotas: Em regiões com redes fracas e alta penetração de renováveis, conversores VSC–HVDC podem:
 - fornecer suporte de tensão local
 - conectar geração renovável a clusters de datacenters com elevado grau de controle
 - facilitar esquemas de operação com múltiplas usinas e um grande polo de carga digital

4.2.3. *Penalidades de CAPEX e desafios de redundância*

Os ganhos técnicos do HVDC vêm acompanhados de custos e desafios:

- CAPEX elevado das estações conversoras: As estações HVDC representam investimentos significativos, com equipamentos de alta complexidade (válvulas, transformadores especiais, filtros, sistemas de controle). Em

projetos de menor escala ou distâncias curtas, esse CAPEX pode tornar a solução menos competitiva frente a HVAC.

- Desafios de redundância e disponibilidade: Em um enlace ponto a ponto, a falha de uma estação conversora pode resultar na perda de toda a capacidade do corredor, a menos que existam redundâncias internas robustas (módulos redundantes, polos paralelos, caminhos alternativos). Em datacenters de missão crítica, isso exige:
 - projeto cuidadoso dos níveis de redundância dentro das estações
 - integração com outras fontes de suprimento (HVAC local, geração distribuída, BESS)
 - estratégias de operação que evitem pontos únicos de falha sistêmica
- Complexidade de proteção e coordenação: A proteção de enlaces HVDC, especialmente em VSC multi-módulo, requer técnicas de detecção e isolamento rápidas, além de coordenação fina com proteções da rede CA em ambos os lados.
- Barreiras regulatórias e institucionais: Em muitos ambientes regulatórios, a inserção de enlaces HVDC dedicados a grandes consumidores ainda é tema novo, com implicações em acesso à rede, tarifas e alocação de custos.

Para clusters de datacenters em longas distâncias de polos renováveis, o HVDC ponto a ponto pode ser uma solução tecnicamente superior. A decisão passa por comparar o CAPEX adicional dos conversores e os desafios de redundância com ganhos em perdas, estabilidade e qualidade de suprimento.

4.3. Arquitetura 3: Grade híbrida HVAC–HVDC

A grade híbrida HVAC–HVDC combina o melhor de dois mundos: usa HVDC como backbone de longa distância e HVAC para distribuição regional e integração com a rede existente. Em vez de pensar em HVDC apenas como um “duto dedicado”, essa arquitetura enxerga o HVDC como parte de uma malha de transmissão que atende múltiplos polos de geração e múltiplos nós de carga, incluindo datacenters.

4.3.1. HVDC para backbone de longa distância e HVAC para distribuição regional

A lógica da grade híbrida pode ser sintetizada da seguinte forma:

- Backbone HVDC: Grandes enlaces HVDC conectam regiões com excesso de geração renovável a regiões com alta demanda, funcionando como “eixos estruturantes” de transferência de energia em longa distância. Esses enlaces podem ser ponto a ponto ou multi-terminais.
- Rede HVAC regional: Em cada região, a energia é entregue em barras HVAC (por conversores HVDC/CA) e distribuída pelas redes de

transmissão e subtransmissão existentes, alimentando tanto datacenters quanto outras cargas urbanas e industriais.

- Subestações e conexões mistas: Alguns nós podem ter tanto conexões HVAC tradicionais quanto terminais HVDC, permitindo intercâmbios flexíveis de potência e maior resiliência em contingências.

Para datacenters, essa arquitetura significa, em geral:

- conexão em HVAC a uma rede regional reforçada por HVDC
- possibilidade de acesso a múltiplas fontes de geração remotas, via backbone HVDC
- maior diversidade de rotas de suprimento, combinando benefícios de malha CA e enlaces CC

4.3.2. Integração de múltiplos polos de geração e múltiplos nós de carga

A grade híbrida HVAC–HVDC é particularmente interessante quando:

- há múltiplos polos de geração renovável remota (eólica onshore/offshore, solar de grande porte) espalhados por diferentes regiões
- existem vários clusters de carga digital e industrial em diferentes áreas do sistema
- o objetivo é otimizar fluxos em escala regional ou nacional, não apenas entre dois pontos

As principais vantagens dessa integração incluem:

- maior flexibilidade na alocação de geração para diferentes centros de carga
- possibilidade de elevar a utilização de renováveis, redistribuindo excedentes entre regiões
- redução da dependência de um único corredor ou de uma única tecnologia, com caminhos alternativos em CA e CC

Na prática, datacenters conectados a uma grade híbrida se beneficiam de um “portfólio” mais amplo de fontes e rotas de energia, com potencial de maior confiabilidade e competitividade de custos, desde que a coordenação entre HVDC e HVAC seja bem projetada.

4.3.3. Compatibilização com redes existentes e plano de transição de HVAC para HVDC

A transição de uma malha puramente HVAC para uma grade híbrida não é instantânea. Requer planejamento em fases:

- Identificação de corredores e eixos prioritários: Trechos com altos fluxos de longa distância, limitações de estabilidade ou forte vocação renovável são candidatos naturais à introdução de HVDC.
- Implantação progressiva de enlaces HVDC: Inicialmente, podem ser criados enlaces ponto a ponto entre regiões estratégicas. Ao longo do

tempo, novos terminais podem ser adicionados, evoluindo para estruturas multi-terminais.

- Adequação de subestações e proteção: Subestações HVAC precisam ser adaptadas para receber terminais HVDC, e esquemas de proteção precisam ser revisados para refletir a nova topologia híbrida.
- Integração com planejamento de datacenters: A localização de novos datacenters e clusters pode ser planejada em sinergia com o desenvolvimento da grade híbrida, posicionando grandes cargas próximas a nós estratégicos da combinação HVAC–HVDC.

Essa abordagem permite capturar gradualmente os benefícios do HVDC sem abandonar a infraestrutura HVAC existente, usando o backbone em CC como elemento de reforço estrutural do sistema.

4.4. *Arquitetura 4: MVDC intramuros com suprimento HVAC ou HVDC*

A última arquitetura desloca o foco para dentro do campus de datacenters. A ideia é usar MVDC como “espinha dorsal” interna, independentemente de a energia chegar ao site via HVAC tradicional ou via enlace HVDC. Essa abordagem redesigna a distribuição interna, buscando ganhos de eficiência, modularidade e integração com BESS e UPS.

4.4.1. *MVDC dentro do campus de datacenters (média tensão em corrente contínua)*

O arranjo MVDC intramuros segue, em linhas gerais, o seguinte fluxo:

- Suprimento externo: A energia chega ao campus em HVAC (média ou alta tensão) ou HVDC. Se for HVAC, é convertida para MVDC por uma estação retificadora. Se for HVDC, pode ser convertida diretamente para um nível de MVDC interno, dependendo da topologia adotada.
- Barramento MVDC de distribuição: Um ou mais barramentos de média tensão em corrente contínua percorrem o campus, alimentando diferentes módulos de datacenter, subestações internas e sistemas auxiliares.
- Conversores DC/DC e DC/AC locais: Próximo às cargas, conversores DC/DC rebaixam a tensão para níveis de baixa tensão CC, alimentando diretamente a TI ou UPS em CC. Conversores DC/AC são usados para cargas que ainda exigem CA (climatização, motores, iluminação).
- Integração direta com BESS: Sistemas BESS são conectados ao barramento MVDC, reduzindo o número de conversões intermediárias e permitindo controle rápido de potência.

Essa arquitetura cria uma camada interna em CC, na qual diversas funções (distribuição, backup, armazenamento) podem ser integradas de forma mais direta.

4.4.2. *Impactos em eficiência, disponibilidade e footprint de equipamentos*

A adoção de MVDC intramuros gera impactos relevantes:

- Eficiência energética: Redução do número de conversões CA/CC e CC/CA ao longo da cadeia de suprimento interno tende a diminuir perdas. Em datacenters de alta densidade, pequenas melhorias de eficiência se traduzem em economias energéticas e redução de carga térmica.
- Disponibilidade e modularidade: A distribuição em MVDC pode favorecer arranjos modulares, com segmentos independentes e redundantes. Conversores e ramais MVDC podem ser configurados em arranjos N+1, 2N e similares, com comutação entre caminhos de forma relativamente simples.
- Footprint de equipamentos: A possibilidade de concentrar conversores e reduzir a quantidade de transformadores e painéis em baixa tensão pode diminuir a área ocupada por salas elétricas e simplificar a infraestrutura física, liberando espaço para TI ou outros usos estratégicos.
- Complexidade de proteção e segurança: Em contrapartida, a proteção em MVDC é mais complexa do que em HVAC. Correntes de falha em DC não passam por zero, exigindo disjuntores e esquemas específicos. A segurança operacional em média tensão DC demanda normas e práticas ainda em consolidação, com impacto em custos e capacitação de equipes.

4.4.3. *Integração com UPS, BESS e grupos geradores*

A arquitetura MVDC intramuros é particularmente interessante quando integrada de forma inteligente com UPS, BESS e geração local:

- UPS em topologia DC: UPS podem ser projetados para operar diretamente em barramentos DC, reduzindo conversões e aumentando a eficiência. A TI pode ser alimentada em baixa tensão CC, com UPS fazendo apenas o condicionamento fino e ride-through de curtíssimo prazo.
- BESS como “pulmão” do barramento MVDC: BESS conectados ao barramento MVDC podem:
 - sustentar a carga por períodos mais longos sem necessidade imediata de partida de geradores
 - participar de esquemas de controle de tensão e de redistribuição de carga entre módulos de datacenter
 - apoiar estratégias de resposta a contingências e de participação em serviços ancilares
- Grupos geradores integrados à camada MVDC: Grupos geradores podem ser conectados em CA convencional, com retificação para MVDC, ou, em arquiteturas mais avançadas, ter geradores e conversores dimensionados para injeção direta em

DC. Em ambos os casos, a camada MVDC funciona como zona de acoplamento entre diferentes fontes (rede, geradores, renováveis locais, BESS).

Quando bem projetada, a combinação MVDC + UPS + BESS + geradores permite redistribuir funções: UPS cuidam da continuidade imediata, BESS fornecem autonomia e flexibilidade, geradores passam a ser a última linha de sustentação em eventos prolongados, e o MVDC oferece a infraestrutura de interconexão entre esses elementos e a TI.

No conjunto, as quatro arquiteturas de suprimento descritas nesta seção formam um “cardápio” tecnológico que será explorado, na sequência do artigo, em cenários específicos de distância, potência, perfil de rede e estratégia de descarbonização, identificando quando cada arranjo é tecnicamente recomendável e quando se torna excessivo ou economicamente injustificável.

5. PAPEL DO BESS NO ECOSISTEMA DE SUPRIMENTO A DATACENTERS

Sistemas de armazenamento em baterias, ou BESS (Battery Energy Storage System), deixaram de ser um acessório de backup para se tornarem um componente estruturante da arquitetura de suprimento a datacenters. Em vez de atuar apenas como “bateria grande”, o BESS passa a operar em múltiplas camadas: acoplado à rede HVAC (High Voltage Alternating Current), integrado a enlaces HVDC (High Voltage Direct Current) e posicionado no nível do próprio datacenter, interagindo com UPS (Uninterruptible Power Supply), grupos geradores e mercados de serviços ancilares.

O valor do BESS não está só na autonomia em minutos ou horas, mas na capacidade de remodelar o perfil de carga, amortecer distúrbios, aliviar a rede em momentos críticos, integrar de forma mais eficiente fontes renováveis e monetizar flexibilidade. Em arquiteturas modernas, o BESS funciona como “orquestrador energético”: suaviza as interfaces entre rede e carga, cria margem de manobra operacional para o operador do datacenter e, quando há ambiente regulatório, dialoga com o operador do sistema de potência.

Esta seção organiza o papel do BESS em três níveis complementares. No nível de rede HVAC, o foco está em deslocamento de carga e alívio de infraestrutura. Na camada HVDC, o BESS é analisado como parte do controle coordenado com conversores VSC (Voltage Source Converter). No nível do datacenter, o BESS é tratado como elemento que reconfigura a relação com UPS tradicionais, grupos geradores e mercados de flexibilidade.

5.1. BESS acoplado a enlaces HVAC

Quando integrado a redes HVAC, o BESS funciona como um amortecedor entre o perfil rígido do datacenter e as limitações físicas da rede. O acoplamento pode ser feito em níveis de transmissão, subtransmissão ou distribuição, dependendo da topologia. Em todos os casos, a lógica é a

mesma: usar o armazenamento para reduzir picos, suavizar rampas, suportar afundamentos de tensão e melhorar a confiabilidade local, sem alterar a topologia principal da rede.

5.1.1. Deslocamento de carga, redução de picos e alívio de rede

No contexto de HVAC, o BESS permite reposicionar a demanda do datacenter no tempo:

- Deslocamento de carga (load shifting): O BESS é carregado em períodos de menor carregamento da rede ou preços mais baixos de energia, e descarregado em períodos de maior demanda ou preços mais altos. Para o datacenter, isso significa:
 - redução do custo marginal de energia em horários de ponta
 - menor exposição a tarifas horossazonais mais elevadas
 - alívio de transformadores e linhas em condições de maior estresse
- Redução de picos (peak shaving): Picos de demanda do datacenter podem ser “cortados” pela injeção de potência do BESS em momentos de maior consumo. Do ponto de vista da rede:
 - reduz-se a demanda máxima registrada, com impacto direto sobre componentes tarifários baseados em demanda
 - diminuem-se os níveis de carregamento em equipamentos críticos
 - aumenta-se a margem operacional em contingências
- Suavização de rampas de carga: Em expansões de datacenter ou em janelas de maior workload, rampas de alguns megawatts em poucos minutos podem ser amortecidas pelo BESS, que absorve parte da variação instantânea, entregando à rede uma curva de carga mais suave e previsível.

Esse conjunto de funções transforma o BESS em uma ferramenta de “engenharia econômica”: abre espaço para negociar melhor conexão, modular investimentos em reforços de rede e reduzir a necessidade de sobredimensionamento de infraestrutura de transmissão e distribuição.

5.1.2. Ganhos de confiabilidade local e mitigação de distúrbios

Além da função econômico-operacional, o BESS contribui diretamente para a confiabilidade local:

- Suporte a afundamentos de tensão e distúrbios de curta duração: Em eventos de falha na rede HVAC (curtos, chaveamentos, religamentos automáticos), o BESS pode injetar potência ativa no ponto de conexão, ajudando a manter a tensão em patamares mais estáveis, em coordenação com UPS e demais elementos internos. Isso reduz o risco de atuação desnecessária de proteções no datacenter.

- Autonomia em interrupções de curta e média duração: Quando a rede sofre interrupções de alguns minutos, o BESS pode assumir a alimentação de parte ou da totalidade da carga crítica, evitando o acionamento imediato de grupos geradores a diesel. Esse comportamento:
 - reduz emissões de gases de efeito estufa associadas a testes e acionamentos frequentes de geradores
 - diminui desgaste mecânico e custos de manutenção dos grupos geradores
 - oferece margem de tempo adicional para decisões operacionais em incidentes mais complexos
- Buffer para eventos em cascata: Em contingências mais severas (perda de linhas, subestações ou trechos de rede), o BESS funciona como almofada de tempo, permitindo:
 - executar planos de resposta, como shed de carga seletivo ou migração de workloads para outros sites
 - acionar geradores de forma coordenada, evitando partidas simultâneas desnecessárias
 - organizar o sequenciamento de restabelecimento do datacenter e da própria rede

Quando bem parametrizado e coordenado com proteções e sistemas internos, o BESS acoplado à HVAC eleva a confiabilidade percebida pelo datacenter sem exigir que toda a rede ao redor seja superdimensionada para suportar todos os cenários de pior caso.

5.2. BESS integrado a sistemas HVDC

Em arquiteturas com HVDC, o BESS encontra um ambiente ainda mais favorável. A presença de conversores VSC-HVDC, com controle digital avançado de potência ativa e reativa, cria uma plataforma natural para integrar armazenamento como parte do controle primário e secundário de tensão e frequência em polos de geração e carga.

5.2.1. Modelos de controle coordenado BESS–VSC para estabilização de tensão e frequência

A integração BESS–VSC pode seguir diferentes modelos:

- BESS conectado ao barramento CC do enlace HVDC: O BESS compartilha o barramento DC com o conversor. Nessa configuração:
 - o controle de potência ativa do BESS atua diretamente na estabilização da tensão DC
 - variações rápidas de geração renovável ou carga podem ser amortecidas sem sobrecarregar imediatamente o conversor
 - estratégias de controle coordenadas entre VSC e BESS mantêm a estabilidade do enlace mesmo em redes CA fracas em ambos os lados

- BESS conectado ao lado CA do conversor: O BESS opera em CA na barra onde o conversor VSC faz a interface com a rede ou com o datacenter. A coordenação de controles permite:
 - suporte de frequência e tensão na barra CA
 - resposta rápida a eventos de perda de geração ou carga
 - uso do BESS como reserva de controle rápido, enquanto o VSC gerencia o fluxo médio de potência ao longo do enlace

Em ambos os casos, o controle coordenado BESS–VSC pode ser configurado para:

- atuar como fonte de inércia sintética, respondendo rapidamente a desvios de frequência
- fornecer suporte dinâmico de tensão, modulando potência reativa (quando a interface do BESS permite)
- desacoplar ainda mais as dinâmicas entre o polo renovável e o polo de datacenters, filtrando oscilações de um lado antes que se propaguem para o outro

Essa abordagem é especialmente relevante em cenários com alta penetração de renováveis variáveis e presença de datacenters como grandes polos de carga estável e sensível.

5.2.2. Dimensionamento ótimo de BESS em links HVDC dedicados a datacenters

Em enlaces HVDC dedicados ou fortemente associados a clusters de datacenters, o dimensionamento do BESS precisa equilibrar:

- requisitos de estabilidade e qualidade de energia
- metas de autonomia mínima em contingências
- oportunidade de uso econômico (arbitragem, serviços ancilares, redução de picos)
- CAPEX, OPEX e impacto em ciclo de vida das baterias

Alguns critérios práticos de dimensionamento incluem:

- Escala relativa ao enlace e ao datacenter: Potências típicas de BESS na faixa de alguns por cento até dezenas de por cento da potência nominal do enlace podem ser suficientes para:
 - amortecer transientes
 - realizar deslocamento de carga em horizontes de horas
 - garantir autonomia parcial em eventos relevantes
- Horizonte temporal de atuação: Definição clara de qual problema o BESS precisa resolver:
 - segundos a minutos: suporte dinâmico a HVDC e à estabilidade da rede
 - dezenas de minutos a poucas horas: cobertura de contingências intermediárias, redução de acionamento de geradores

- horas: participação ativa em estratégias de mercado e de operação otimizada do enlace
- Integração com estratégias de controle do datacenter: O dimensionamento ótimo considera também:
 - a possibilidade de o datacenter ajustar carga (demand response limitado)
 - o trade-off entre mais capacidade de BESS em nível de enlace e mais BESS em nível de datacenter
 - a coexistência com UPS e geradores locais

O resultado não é um “tamanho único”, mas uma curva de compromisso: mais BESS em nível de HVDC tende a melhorar a estabilidade global e a integração de renováveis, enquanto mais BESS em nível do datacenter aumenta flexibilidade local e capacidade de monetizar serviços ancilares diretamente na barra de carga.

5.3. BESS no nível do datacenter

No nível do datacenter, o BESS atua mais próximo da realidade operacional do cliente: dialoga com UPS, grupos geradores, contratos de energia e SLAs (Service Level Agreements) com usuários finais. É nessa camada que a discussão sobre substituição parcial de UPS tradicionais, monetização de flexibilidade e trade-offs econômico-operacionais se torna mais tangível.

5.3.1. Substituição parcial ou complementar a UPS tradicionais

O papel clássico do UPS é garantir continuidade instantânea e filtrar distúrbios de curtíssimo prazo, com autonomias típicas de alguns minutos. O BESS, por sua vez, é projetado para horizontes de tempo maiores e cobertura mais ampla de carga. A arquitetura ótima tende a combinar os dois:

- UPS próximos à carga de TI: Mantêm a função crítica de proteção por milissegundos, dupla conversão e ride-through muito curto. Continuam dimensionados para a TI e alguns sistemas auxiliares imediatos.
- BESS em nível de barramento: Opera em média ou baixa tensão, com capacidade de sustentar o datacenter (integral ou parcialmente) por dezenas de minutos ou horas. Interage com o UPS como fonte “a montante”, reduzindo a necessidade de partida de geradores e absorvendo eventos de rede.

Em alguns casos, parte da função de UPS pode ser absorvida por sistemas baseados em baterias de maior porte com topologia DC mais integrada. Mesmo assim, a camada de proteção ultrarrápida junto à TI tende a permanecer, seja como UPS tradicional, seja como solução integrada com eletrônica de potência dedicada.

5.3.2. Participação em mercados de serviços ancilares e monetização de flexibilidade

Quando a regulação permite, o BESS no nível do datacenter cria um vetor de receita ou redução de custos, além da função de backup:

- Serviços ancilares de frequência e tensão: O BESS pode prestar regulação de frequência e suporte de tensão, mediante contratos com o operador do sistema, desde que:
 - reserve uma parte da capacidade para funções de sistema
 - mantenha margens adequadas para atendimento às contingências internas do datacenter
- Produtos de capacidade e resposta da demanda: A flexibilidade do BESS, combinada com eventual ajuste de carga do datacenter (por exemplo, migração temporária de workloads entre sites), pode ser estruturada como produto de capacidade ou resposta da demanda, permitindo:
 - adiar investimentos em geração e rede em nível sistêmico
 - capturar receita adicional ou descontos tarifários
- Arbitragem temporal de energia: Em mercados com forte variação intradiária de preços, o BESS pode carregar em horários de baixa tarifa e descarregar em horários de alta tarifa, reduzindo o custo médio de energia consumida, desde que essa estratégia não comprometa a função de backup.

A monetização de flexibilidade exige governança clara: definição de prioridades entre segurança do datacenter e serviços ao sistema, critérios de reserva de capacidade, limites de profundidade de descarga e regras de operação em eventos simultâneos (contingência interna e chamada de serviço ancilar, por exemplo).

5.3.3. Trade-offs econômico-operacionais entre UPS baseados em baterias convencionais e BESS de maior porte

A decisão de investir em BESS de maior porte versus ampliar apenas UPS tradicionais envolve um conjunto de trade-offs:

- CAPEX e complexidade: UPS tradicionais são soluções consagradas, modulares e diretamente ligadas à TI. BESS de maior porte adicionam:
 - maior CAPEX unitário
 - necessidade de áreas dedicadas, sistemas de segurança, supervisão e integração com SCADA e EMS
 - maior complexidade de engenharia de conexão com rede e sistemas internos
- OPEX, ciclo de vida e valor agregado:

BESS permite:

- reduzir horas de operação de geradores, diminuindo custos de combustível e manutenção
- capturar valor via arbitragem e serviços ancilares (quando disponíveis)
- modularizar melhor a resposta a eventos, evitando “ligar tudo” sempre que a rede oscila

Porém, exige:

- gestão cuidadosa de ciclos de carga e descarga para preservar vida útil
- planejamento de substituição de módulos ao longo da vida do projeto
- Robustez operacional: UPS tradicionais são extremamente maduros e previsíveis; BESS, especialmente em grandes escalas, ainda representa uma camada adicional de complexidade. A decisão ótima tende a não substituir UPS, mas redistribuir funções:
 - UPS focados em proteção instantânea e qualidade de energia para TI
 - BESS focado em autonomia, flexibilidade e interface com rede e mercados
 - geradores reposicionados como última barreira para eventos de longa duração

No conjunto, o BESS no nível do datacenter consolida a transição de um modelo puramente “defensivo” (UPS + diesel) para um modelo “estratégico”, em que o datacenter passa a ser ao mesmo tempo consumidor crítico e ativo sistêmico. A arquitetura de suprimento deixa de ser apenas um custo necessário e passa a ser, também, uma plataforma de flexibilidade e vantagem competitiva.

6. CENÁRIOS DE APLICAÇÃO: ONDE CADA TECNOLOGIA É OU NÃO VIÁVEL

Decidir entre HVAC (High Voltage Alternating Current), HVDC (High Voltage Direct Current), redes híbridas, MVDC (Medium Voltage Direct Current) intramuros e BESS (Battery Energy Storage System) não é uma escolha binária, mas um exercício de enquadramento de cenário. A combinação entre distância, blocos de potência, robustez da rede existente, metas de disponibilidade e restrições econômico-regulatórias define uma “zona de viabilidade” para cada tecnologia. Em alguns contextos HVAC convencional é claramente dominante; em outros, HVDC passa a ser praticamente obrigatório; em certos casos, MVDC e BESS agregam valor marginal; em outros, são overdesign sem retorno proporcional.

Esta seção organiza o raciocínio por eixos de análise e, em seguida, apresenta cenários-tipo. A ideia é oferecer uma matriz conceitual: para determinadas faixas de distância, potência e qualidade de rede, quais arquiteturas tendem a ser tecnicamente recomendáveis, quais são fronteiras aproximadas de competitividade e em que situações a adoção de soluções mais sofisticadas se torna um luxo pouco justificável.

6.1. Eixos de análise e premissas

A comparação entre arquiteturas de suprimento e soluções de armazenamento pode ser feita a partir de alguns eixos principais, que funcionam como parâmetros de enquadramento:

- distância entre polos de geração e clusters de datacenters
- potência instalada no polo de geração e demanda agregada do cluster
- força (robustez) da rede local e necessidade de reforços estruturais
- requisitos de disponibilidade, redundância e continuidade de serviço (N, N+1, 2N)

6.1.1. Distância entre geração e datacenters

A distância física entre o polo de geração (especialmente quando renovável e remoto) e os datacenters é um dos discriminadores mais fortes entre HVAC e HVDC:

- distâncias curtas: Em trajetos da ordem de dezenas a poucas centenas de quilômetros, HVAC tende a ser mais competitivo em CAPEX, pois evita estações conversoras. A necessidade de compensação reativa e dispositivos FACTS é manejável, desde que a rede não esteja próxima de saturação.
- distâncias intermediárias: Em faixas de algumas centenas de quilômetros, surge uma zona de transição. HVAC continua viável, mas começa a exigir mais compensação e reforços; HVDC passa a ganhar relevância técnica, sobretudo em blocos de potência elevados.
- longas distâncias: Em distâncias na casa das várias centenas de quilômetros ou mais, o HVDC geralmente passa a oferecer menores perdas, maior capacidade por corredor e melhor controle de fluxo. O custo das estações conversoras começa a ser compensado pelo ganho sistêmico.

Para cenários com geração e datacenters relativamente próximos, HVAC tende a ser a referência. À medida que o polo de geração se afasta e os blocos de potência crescem, HVDC passa de opção a candidato natural.

6.1.2. Potência instalada (geração) e demanda do cluster de datacenters

A escala do projeto é determinante:

- blocos de potência modestos e datacenters de médio porte: Em faixas de poucos megawatts a baixa dezena de megawatts, a infraestrutura de transmissão e subtransmissão existente costuma ser suficiente com reforços marginais, e HVAC permanece dominante. HVDC raramente se paga em escalas reduzidas.
- blocos de potência elevados e clusters hiperescaláveis: Quando o objetivo é conectar grandes polos renováveis (centenas de megawatts ou gigawatts) a clusters de datacenters de dezenas ou centenas de megawatts, HVDC passa a fazer

mais sentido como backbone. A concentração de carga em um ou mais nos fortalece o argumento por enlaces dedicados ou semidedicados.

- relação geração/carga: Quando a potência de geração dedicada ao cluster é muito superior à demanda dos datacenters, a infraestrutura precisa acomodar fluxos para o restante do sistema. Em arquiteturas híbridas HVAC–HVDC, essa relação influencia a topologia: uma parte da energia é “ancorada” no cluster, o restante escoar para outras regiões.

6.1.3. *Força da rede local e necessidade de reforços*

A robustez da rede na região do datacenter, medida em termos de capacidade de curto-circuito, margens de carregamento e presença de recursos de compensação, também direciona o desenho:

- rede forte e malha bem estruturada: Em sistemas com múltiplas alimentações, alta capacidade de curto-circuito e bons níveis de redundância, a conexão de datacenters via HVAC tende a ser relativamente direta. O problema principal é o reforço local de transformadores e alimentadores.
- rede fraca e infraestrutura limitada: Em áreas com redes radiais, baixa capacidade de curto-circuito e poucos caminhos alternativos, o acréscimo de grandes datacenters pode exigir investimentos substanciais em HVAC. Nesses contextos, enlaces HVDC ou soluções com BESS passam a ser avaliados como forma de “artificialmente” reforçar a região ou desacoplar dinâmicas.
- coexistência com geração distribuída e renováveis locais: Em regiões com muita geração distribuída (GD) e intermitência, a interação entre GD, datacenters e rede pode exigir recursos adicionais de controle. BESS e HVDC (quando presentes) podem funcionar como elementos de estabilização; em HVAC puro, a necessidade de compensação e automação aumenta.

6.1.4. *Requisitos de disponibilidade e redundância (N, N+1, 2N)*

As metas de disponibilidade da infraestrutura de TI se traduzem em exigências sobre o sistema elétrico:

- projetos com arquitetura N ou N+1: Em contextos menos extremos de redundância, soluções HVAC bem dimensionadas, com bons esquemas de backup interno, costumam ser suficientes. O foco é garantir alimentação dupla em HVAC, UPS robustos e grupos geradores adequados.
- projetos 2N ou superiores: Em datacenters Tier IV e configurações com dupla rota física de suprimento, a arquitetura de rede externa precisa ser compatível: múltiplos alimentadores independentes, duas subestações distintas, e, em alguns casos, rotas elétricas e físicas separadas. Em sistemas com HVDC, isso pode significar enlaces redundantes, conversores em paralelo ou

combinação de um caminho HVAC e outro HVDC.

- integrações com BESS e MVDC: Quanto maior o nível de redundância, mais atraente se torna a integração de BESS e MVDC para reduzir a dependência de acionamento de geradores e aumentar a flexibilidade interna. O custo incremental precisa ser comparado com o valor econômico da disponibilidade exigida.

6.2. *Cenários-tipo para HVAC*

HVAC permanece como solução dominante em uma ampla gama de cenários. A chave é identificar quando essa dominância é clara e quando começam a aparecer sinais de perda de competitividade, seja por limitações técnicas, seja por custos crescentes de reforços.

6.2.1. *Cenário A1: distâncias curtas, potência moderada, rede forte*

Cenário típico:

- geração conectada à mesma região elétrica dos datacenters ou em região adjacente
- distâncias na faixa de dezenas a poucas centenas de quilômetros
- demanda de datacenter (ou cluster) em dezenas de megawatts, com possibilidade de expansão modular
- rede de transmissão e subtransmissão robusta, com malhas em anel, boa capacidade de curto-circuito e múltiplas fontes

Neste cenário:

- alimentação em HVAC, com construção ou reforço de subestações dedicadas, tende a ser a solução de melhor relação custo–benefício
- BESS pode ser adicionado para peak shaving e aumento de resiliência, mas não altera a escolha estrutural por HVAC
- HVDC aparece, no máximo, como opção estratégica para projetos muito específicos, raramente justificável em CAPEX

6.2.2. *Quando HVAC é dominante em custo e simplicidade*

HVAC tende a permanecer dominante quando:

- as distâncias entre polos de geração e datacenters são relativamente curtas
- a rede existente consegue ser reforçada incrementalmente, sem necessidade de grandes redesenhos
- a regulação, os modelos de conexão e os contratos de acesso à rede são estruturados para CA
- os requisitos de descarbonização podem ser atendidos com renováveis integradas à própria rede HVAC ou próxima ao cluster, sem a necessidade de grandes corredores dedicados

Nesses casos, HVDC, MVDC e soluções mais sofisticadas entram mais como exceções do que como regra.

6.2.3. *Limites a partir dos quais HVAC começa a perder competitividade*

HVAC começa a perder competitividade quando:

- a distância entre geração renovável remota e datacenters cresce a ponto de exigir linhas longas com compensação intensiva
- os blocos de potência se aproximam de limites em que a estabilidade de tensão e de ângulo se torna crítica, obrigando a instalação de equipamentos de controle caros
- a rede local é fraca, e os reforços necessários em linhas, subestações e compensadores se aproximam, em custo, do CAPEX das estações conversoras HVDC

Nessa zona de transição, uma análise comparativa detalhada HVAC versus HVDC passa a ser mandatória, especialmente em horizontes de longo prazo com múltiplas fases de expansão.

6.3. *Cenários-tipo para HVDC ponto a ponto*

HVDC ponto a ponto torna-se protagonista em cenários em que a combinação distância + potência + fraqueza de rede torna a solução exclusivamente em HVAC tecnicamente difícil ou economicamente pouco eficiente.

6.3.1. *Cenário B1: longas distâncias, blocos de potência elevados, rede remota fraca*

Cenário típico:

- polo de geração renovável em região remota, com excelente recurso solar ou eólico, mas redes HVAC locais frágeis
- cluster de datacenters situado em região distante, com bons acessos de telecom e proximidade a mercados consumidores
- necessidade de transmitir blocos de potência elevados de forma estável e previsível ao longo de grandes distâncias
- pouca atratividade em reforçar toda a malha HVAC intermediária apenas para esse fluxo

Neste cenário:

- HVDC ponto a ponto, com conversores VSC e linha dedicadas, tende a ser a solução tecnicamente mais robusta
- o enlace desacopla as dinâmicas dos dois polos, protegendo o datacenter de perturbações na rede remota e vice-versa
- HVAC local continua sendo usado para distribuição regional, enquanto o HVDC cumpre o papel de “corredor principal”

6.3.2. *Condições em que HVDC agrega valor técnico (controle, perdas, estabilidade)*

HVDC agrega valor técnico claro quando:

- a distância impõe perdas elevadas e complexidade de compensação em HVAC
- há necessidade de controle firme de fluxo de potência, evitando laços em CA e sobrecarga de determinados corredores
- a rede em pelo menos um dos polos é fraca, e a capacidade de conversores VSC de operar em redes fracas e fornecer suporte de tensão torna-se crítica
- há interesse em desacoplar áreas de controle distintas ou integrar sistemas parcialmente assíncronos

Em clusters de datacenters alimentados por renováveis remotas, esses fatores tendem a se somar, reforçando a tese de HVDC.

6.3.3. *Situações em que HVDC não se paga: distâncias curtas, potência limitada, infraestrutura existente robusta*

HVDC tende a ser economicamente difícil de justificar quando:

- as distâncias são curtas ou moderadas, e HVAC consegue atender com reforços razoáveis
- os blocos de potência são modestos, reduzindo a diluição do CAPEX das estações conversoras
- a rede existente já é robusta e possui capacidade de acomodar a carga adicional sem mudanças estruturais profundas
- a regulação e a governança setorial não favorecem investimentos em infraestrutura dedicada ou semidedicada

Nesses contextos, HVDC vira uma solução tecnicamente elegante, porém com baixa relação custo-benefício frente a HVAC bem dimensionado.

6.4. *Cenários-tipo para redes híbridas HVAC–HVDC*

Redes híbridas HVAC–HVDC emergem quando há múltiplos polos de renováveis e múltiplos clusters de carga, e o sistema como um todo passa a se organizar com backbone HVDC e malha regional em HVAC.

6.4.1. *Cenário C1: múltiplas fontes renováveis remotas e múltiplos polos de datacenters*

Cenário típico:

- vários hubs de geração renovável (eólica onshore, offshore, solar de grande porte) distribuídos em diferentes regiões
- múltiplos clusters de datacenters em áreas também distintas, cada um com dezenas ou centenas de megawatts de demanda
- necessidade de otimizar fluxos entre regiões, redistribuindo excedentes de renováveis e equilibrando cargas

A grade híbrida permite:

- usar HVDC como “eixos estruturantes” de transferência de energia entre regiões
- manter redes HVAC regionais como malha de distribuição fina para datacenters e demais cargas
- oferecer, a cada cluster de datacenters, acesso a uma carteira mais diversificada de fontes

6.4.2. *Benefícios de flexibilidade versus complexidade de operação e proteção*

A combinação HVAC–HVDC traz benefícios e desafios:

- benefícios
 - flexibilidade para redirecionar fluxos em resposta a variações de geração e carga
 - maior utilização de renováveis, reduzindo vertimentos e ampliando o consumo em datacenters
 - aumento da resiliência sistêmica, com rotas alternativas em CA e CC
- complexidade
 - operação mais sofisticada, com necessidade de coordenação entre controles de VSC e despacho HVAC
 - proteção mais complexa, principalmente em esquemas multi-terminais HVDC
 - maior demanda por ferramentas avançadas de análise em tempo real e operadores com formação específica

Em ambientes com governança e infraestrutura de operação maduras, os ganhos de flexibilidade tendem a compensar a complexidade. Em sistemas menos preparados, a adoção deve ser gradual.

6.4.3. *Estágios de migração de HVAC puro para topologias híbridas*

Uma trajetória típica de migração inclui:

- reforço de corredores HVAC existentes até limites práticos
- implantação de enlaces HVDC ponto a ponto entre regiões críticas
- adição progressiva de novos terminais HVDC, evoluindo para estruturas multi-terminais
- adaptação de subestações, proteção e sistemas de operação para lidar com a topologia híbrida

A localização de novos datacenters pode ser planejada em sinergia com essa migração, posicionando clusters próximos a nós estratégicos da grade híbrida.

6.5. *Cenários-tipo para MVDC intramuros*

MVDC intramuros não altera a macroarquitetura do sistema elétrico, mas redesenha a infraestrutura dentro do campus de datacenters. Sua adoção depende de densidade de potência, extensão interna e metas de eficiência e modularidade.

6.5.1. *Cenário D1: campus de alta densidade energética com grandes distâncias internas*

Cenário típico:

- campus com múltiplos módulos de datacenter, distribuídos em área extensa
- densidade de potência elevada por módulo, com crescimento planejado em fases
- necessidade de distribuir energia em distâncias internas significativas, com múltiplos caminhos redundantes

Nesse contexto:

- o backbone em MVDC pode reduzir o número de transformadores e painéis em baixa tensão
- conversores DC/DC próximos às cargas permitem modularidade e flexibilidade de expansão
- BESS pode ser conectado diretamente ao barramento MVDC, otimizando backup e serviços internos

6.5.2. *Onde MVDC melhora a disponibilidade e eficiência*

MVDC intramuros tende a agregar valor quando:

- a redução de conversões CA/CC e CC/CA leva a ganhos de eficiência significativos, impactando PUE
- a arquitetura DC facilita arranjos de redundância, com menor complexidade de cabos e equipamentos em baixa tensão
- há interesse em integrar de forma mais direta BESS, UPS em DC e, eventualmente, geração local em corrente contínua

Em ambientes de altíssima densidade, os ganhos em footprint, eficiência e simplicidade de caminhos de redundância podem ser relevantes.

6.5.3. *Cenários em que MVDC é overdesign frente a uma solução HVAC interna bem projetada*

MVDC intramuros pode se configurar como overdesign quando:

- o campus é compacto, com distâncias internas pequenas
- a densidade de potência não é extrema, permitindo soluções HVAC internas com boa eficiência e custo menor
- a equipe de operação não tem maturidade ou escala suficientes para justificar a complexidade adicional de proteção e manutenção em média tensão DC
- o CAPEX incremental de conversores, disjuntores DC e sistemas de supervisão não se paga frente aos ganhos marginais de eficiência e disponibilidade

Nesses casos, uma arquitetura HVAC interna bem projetada, com UPS modernos e BESS adequadamente integrados, costuma atender plenamente às necessidades.

6.6. Cenários-tipo para BESS em datacenters

BESS pode ir de “nice to have” a elemento central da arquitetura, dependendo de tarifas, criticidade, metas ambientais e possibilidade de participação em mercados de flexibilidade.

6.6.1. Casos em que BESS gera ROI relevante (peak shaving, redução de geradores, ancilares)

BESS tende a gerar retorno atrativo quando:

- o regime tarifário apresenta forte penalização por demanda de ponta ou tarifas horárias diferenciadas
- a presença de geradores a diesel é robusta, e há espaço para reduzir horas de operação, consumo de combustível e custos de manutenção
- existem mercados ou mecanismos remunerados de serviços ancilares, permitindo monetizar regulação de frequência, suporte de tensão ou capacidade de reserva
- o datacenter tem estratégia clara de descarbonização, e a redução de operação de diesel tem valor econômico e reputacional

Nesses cenários, o BESS deixa de ser apenas custo de segurança e passa a compor a estratégia econômico-operacional do site.

6.6.2. Casos em que BESS não é competitivo (custos elevados versus criticidade e regime tarifário)

BESS pode não ser competitivo quando:

- o regime tarifário é pouco sensível à demanda de ponta e à variação horária, limitando ganhos de arbitragem
- o custo de capital e o custo de oportunidade de investir em baterias são elevados, em contexto de baixa remuneração de flexibilidade
- a infraestrutura de geradores já existe, com custo marginal relativamente baixo, e não há meta forte de redução de emissões
- a criticidade do datacenter exige manter, de qualquer forma, uma frota de geradores dimensionada para cenários severos, reduzindo o espaço para substituição efetiva por BESS

Nesses casos, BESS pode continuar útil como ferramenta técnica, mas com dificuldade para atingir ROI estritamente financeiro.

6.6.3. Combinações HVAC/HVDC + BESS com melhor relação custo-benefício

As combinações mais promissoras tendem a aparecer quando:

- HVAC é utilizado em distâncias curtas/médias, com BESS no nível do datacenter para peak shaving, redução de uso de diesel e mitigação de distúrbios
- HVDC conecta polos remotos de renováveis, com BESS tanto em nível de enlace (estabilização, integração de renováveis) quanto em nível do datacenter (autonomia e flexibilidade local)
- redes híbridas HVAC–HVDC utilizam BESS para amortecer transientes sistêmicos e oferecer serviços ancilares em nós estratégicos

Em síntese, BESS é o elemento que permite transformar arquiteturas de suprimento de energia em plataformas de flexibilidade. Combinado de forma inteligente com HVAC, HVDC e MVDC, desloca o datacenter do papel de carga rígida para o de ativo dinâmico, capaz de alinhar disponibilidade extrema, eficiência econômica e trajetória de descarbonização.

7. FRAMEWORK DECISÓRIO PARA SELEÇÃO DA ARQUITETURA DE SUPRIMENTO

A escolha da arquitetura de suprimento de energia para datacenters hiperescaláveis é, na prática, uma decisão de portfólio de ativos: define em quais situações HVAC (High Voltage Alternating Current) continua suficiente, quando HVDC (High Voltage Direct Current) passa a ser racional, em que contextos redes híbridas HVAC–HVDC criam valor sistêmico e quando vale a pena sofisticar os intramuros com MVDC (Medium Voltage Direct Current) e BESS (Battery Energy Storage System).

O framework decisório proposto combina duas camadas:

- i. uma matriz de enquadramento por distância, potência e perfil de rede, que reduz o espaço de alternativas;
- ii. critérios técnico-econômicos e de qualidade de energia, usados para comparar as arquiteturas candidatas e organizar um roadmap em fases com mitigação explícita de riscos.

7.1. Matriz de decisão por distância, potência e perfil de rede

O primeiro passo é posicionar o projeto em uma matriz simples de cenários, usando três eixos básicos:

- distância entre polo de geração e cluster de datacenters
- potência a transmitir e demanda agregada do cluster
- robustez da rede local (forte, intermediária, fraca) e necessidade de reforços

A tabela a seguir sintetiza cenários-tipo e as arquiteturas que tendem a ser mais racionais em cada quadrante.

Tabela – Matriz de decisão por cenário

Cenário	Caracterização elétrica (distância, potência, perfil de rede)	Arquitetura de suprimento mais indicada	Papel do BESS e observações
A1	Curta distância (dezenas de km); potência moderada (até algumas dezenas de MW); rede forte, malha robusta	HVAC convencional com subestação dedicada	BESS opcional, focado em peak shaving e mitigação de distúrbios locais. Cenário clássico em que HVAC é dominante em custo e simplicidade.
A2	Curta a intermediária; alta potência (dezenas a >100 MW); rede fraca ou radial	HVAC reforçado (novas linhas, compensação reativa, reforços locais)	BESS relevante para aliviar a rede, reduzir picos e melhorar ride-through, postergando reforços estruturais.
B1	Longa distância (centenas de km); alta potência (centenas de MW agregados); rede remota fraca no polo de geração	Enlace HVDC ponto a ponto, preferencialmente VSC	BESS no enlace e no datacenter para estabilidade, amortecimento de variações de renováveis e aumento de autonomia. HVDC passa a ser backbone natural entre polo renovável remoto e polo digital.
C1	Longas distâncias com múltiplos corredores; alta potência com múltiplos hubs de geração e carga; rede interligada complexa	Grade híbrida HVAC–HVDC (HVDC como backbone, HVAC regional)	BESS em nós estratégicos e barras de datacenters, apoiando flexibilidade sistêmica e uso máximo de renováveis. Adequado para sistemas com múltiplos polos renováveis e múltiplos clusters de datacenters.
D1	Distâncias internas relevantes no campus; alta densidade por módulo; rede externa já definida (HVAC ou HVDC)	MVDC intramuros alimentado por HVAC ou HVDC	BESS conectado diretamente ao barramento MVDC, com foco em eficiência interna, modularidade e integração direta com UPS e cargas DC.
E1	Distâncias variadas; foco em otimização local e tarifária; qualquer porte; rede com	HVAC ou HVDC conforme o caso; BESS tratado como ativo central de flexibilidade	BESS como elemento estrutural (peak shaving, load shifting, serviços ancilares, redução de uso de diesel).

Cenário	Caracterização elétrica (distância, potência, perfil de rede)	Arquitetura de suprimento mais indicada	Papel do BESS e observações
	restrições ou alto custo de demanda		Aqui o valor econômico-operacional do BESS é tão relevante quanto a escolha da arquitetura de rede.

7.2. Critérios de avaliação técnico-econômica (CAPEX, OPEX, perdas, confiabilidade, flexibilidade)

Depois de enquadrar o projeto em um cenário-tipo, a comparação entre arquiteturas deve ser feita com base em um conjunto estável de critérios:

- **CAPEX:** Linhas, subestações, estações conversoras HVDC, barramentos MVDC, BESS, UPS, geradores.
- **OPEX e perdas técnicas:** Perdas em HVAC versus HVDC em diferentes distâncias; uso de diesel; custos de manutenção.
- **confiabilidade e resiliência:** Pontos únicos de falha; possibilidades de N, N+1, 2N; comportamento em contingências.
- **flexibilidade e escalabilidade:** Facilidade de expansão modular do datacenter; conexão de novos polos renováveis; ajuste de papel do BESS ao longo do tempo.
- **complexidade de operação e proteção:** Requisitos de centro de operação, automação, proteção em DC, coordenação HVAC–HVDC.

Uma síntese qualitativa útil pode ser apresentada em uma tabela comparativa de arquiteturas.

Tabela – Comparação qualitativa de arquiteturas

Arquitetura	CAPEX / OPEX e perdas	Confiabilidade e flexibilidade	Observações principais
HVAC convencional	CAPEX baixo-médio; OPEX e perdas crescentes em longas distâncias	Boa confiabilidade se a rede for robusta; flexibilidade média, baseada em expansão incremental de linhas e subestações	Arquitetura dominante e madura; simples de operar e proteger. Começa a perder competitividade em longas distâncias e blocos de potência muito elevados.
HVDC ponto a ponto	CAPEX alto, concentrado em conversores; OPEX e perdas baixas em longas distâncias	Alta confiabilidade se houver redundâncias adequadas; boa flexibilidade para grandes blocos de potência	Ideal para conectar polos renováveis remotos a clusters de datacenters; exige planejamento cuidadoso de redundância e aumenta moderadamente a complexidade de operação e proteção.
Grade híbrida HVAC–HVDC	CAPEX elevado; OPEX otimizado em nível sistêmico, com melhor uso de ativos	Confiabilidade muito alta se bem projetada; elevada flexibilidade e escalabilidade em topologias multi-polo e multi-região	Adequada para sistemas com múltiplos hubs de geração e carga; traz complexidade significativa de coordenação, proteção e despacho entre CA e CC.
MVDC intramuros	CAPEX médio-alto; OPEX reduzido intramuros por menos conversões e menores perdas internas	Alta confiabilidade no campus se a proteção em DC for madura; flexibilidade elevada pela modularidade interna	Favorece eficiência e modularidade em campi de alta densidade; exige tecnologias de proteção em DC e capacitação específica de operação e manutenção.
BESS em datacenter / rede	CAPEX médio-alto; reduz OPEX associado a diesel, picos de demanda e algumas perdas sistêmicas	Aumenta significativamente a resiliência, o ride-through e a capacidade de prestar serviços ancilares; flexibilidade muito alta	Atua como ativo transversal às arquiteturas (HVAC/HVDC/MVDC); adiciona complexidade de controle e despacho, mas pode transformar a flexibilidade elétrica em valor econômico direto.

A leitura dessa tabela é direta:

- HVAC tem melhor CAPEX em contextos simples, mas piora em longas distâncias e redes fracas.

- HVDC e híbridas sobem CAPEX, mas ganham em perdas, controle de fluxo e estabilidade em grandes blocos.
- MVDC intramuros e BESS são “camadas de sofisticação” que passam a fazer sentido quando a escala, os requisitos de disponibilidade e o contexto tarifário justificam o esforço adicional.

7.3. Critérios de qualidade de energia e requisitos de datacenter

Arquiteturas que performam bem em CAPEX/OPEX podem ser descartadas se não cumprirem os envelopes de qualidade de energia exigidos pela infraestrutura de TI. Os principais critérios a integrar ao processo decisório são:

- parâmetros elétricos no ponto de acoplamento comum: Faixas de tensão em regime permanente, tolerância a afundamentos e elevações, distorção harmônica total e por ordem, controle de transientes de curta duração.
- compatibilidade com a arquitetura interna do datacenter: Capacidade de a arquitetura externa se integrar a UPS, BESS, MVDC e grupos geradores, sem criar modos de falha complexos ou exigir compensações internas desproporcionais.
- redundância e rotas físicas de alimentação: Viabilidade prática de implantar caminhos duplos e independentes (N, N+1, 2N), incluindo rotas elétricas e físicas separadas quando requerido por projetos Tier III/Tier IV.
- aderência a requisitos regulatórios e de grid code: Cumprimento de exigências de suporte de tensão, resposta em frequência, ride-through de faltas, limites de injeção de harmônicos e comportamento em eventos sistêmicos.

Na prática, a melhor arquitetura é aquela que minimiza a “tensão residual” entre o que a rede entrega e o que o datacenter exige. Quanto mais limpa, estável e previsível for a energia na fronteira, mais racional é o dimensionamento da camada interna de proteção e backup.

7.4. Roadmap de implantação: abordagem em fases e mitigação de riscos

A decisão sobre a arquitetura alvo precisa ser traduzida em um roadmap de implantação por fases, permitindo que a infraestrutura evolua com a demanda, com a maturidade tecnológica e com o contexto regulatório.

Uma estrutura típica de roadmap pode seguir quatro estágios:

- Fase 1 – Arquitetura base em HVAC com visão de futuro: Implantação de alimentação HVAC reforçada, subestações dedicadas e camadas internas convencionais (UPS, geradores), já reservando espaço físico, interfaces elétricas e lógicas para futura inserção de BESS, MVDC ou HVDC.
- Fase 2 – Inserção seletiva de BESS e otimização operacional: Instalação de BESS em pontos de

alto impacto (barras do datacenter, eventualmente barras de rede) para reduzir picos, diminuir uso de diesel, amortecer distúrbios e testar uso de flexibilidade, sem alteração radical da topologia externa.

- Fase 3 – Introdução de HVDC ou evolução para redes híbridas: À medida que a demanda cresce e novos polos renováveis remotos entram na equação, implantação de enlaces HVDC ponto a ponto ou multi-terminais, convivendo com a malha HVAC. Essa fase consolida o backbone em CC sem desligar a infraestrutura existente.
- Fase 4 – Redesenho intramuros com MVDC e consolidação da flexibilidade: Em estágios avançados, redesenho da distribuição interna para MVDC, integração mais profunda de BESS e UPS em DC, e eventual geração local. O datacenter passa a operar como nó ativo da infraestrutura elétrica, com capacidade de prestar serviços ancilares e gerenciar sua própria flexibilidade em tempo quase real.

A mitigação de riscos ao longo desse roadmap inclui:

- uso de pilotos e protótipos para HVDC, MVDC e BESS antes de roll-out em grande escala
- contratos de desempenho e manutenção claros com fornecedores críticos
- alinhamento prévio com reguladores e operadores de sistema quanto a enlaces dedicados, uso de BESS e participação em serviços ancilares
- planos de contingência que mantenham o datacenter operando em configurações mais conservadoras caso alguma tecnologia avançada atrase, falhe ou não entregue o desempenho esperado

O framework decisório, combinado às tabelas de enquadramento e comparação, transforma a escolha de arquitetura de suprimento de energia em um processo estruturado e auditável. Em vez de uma decisão pontual e pouco transparente, passa a ser uma trajetória de longo prazo, alinhando engenharia, finanças, regulação e estratégia digital do operador de datacenters.

8. DESAFIOS DE IMPLEMENTAÇÃO E AGENDA FUTURA

A convergência entre datacenters hiperescaláveis, redes HVAC (High Voltage Alternating Current), enlaces HVDC (High Voltage Direct Current), arquiteturas MVDC (Medium Voltage Direct Current) e BESS (Battery Energy Storage System) redefine o papel da infraestrutura elétrica. Tecnicamente, as soluções já existem ou estão em rápida maturação. O grande desafio passa a ser viabilizar projetos em escala, com modelos regulatórios adequados, padrões técnicos interoperáveis, instrumentos de mercado coerentes e capacidade institucional para operar redes híbridas complexas.

Esta seção discute quatro camadas de desafio: barreiras regulatórias e de mercado, padronização técnica, lacunas de pesquisa em modelagem integrada e perspectivas de longo

prazo para clusters energéticos digitais ancorados em datacenters.

8.1. Barreiras regulatórias e de mercado para enlaces HVDC dedicados a datacenters

A ideia de utilizar enlaces HVDC dedicados ou semidedicados a clusters de datacenters tensiona estruturas regulatórias desenhadas, historicamente, para redes HVAC com acesso compartilhado. Alguns pontos críticos aparecem com recorrência:

- Alocação de custos e acesso à rede: Definir quem paga o quê em um enlace HVDC que beneficia, ao mesmo tempo, um grande consumidor e o sistema como um todo não é trivial. Modelos tradicionais de tarifa de uso do sistema nem sempre contemplam corredores dedicados de longa distância com grandes blocos de potência e forte componente de interesse privado.
- Natureza do ativo: transmissão pública, linha dedicada ou ativo do consumidor: Enlaces HVDC podem ser vistos como parte da rede básica, como infraestrutura dedicada de uso restrito ou como ativo do próprio operador de datacenter. Cada enquadramento implica regras distintas de remuneração, acesso de terceiros, regulação de retorno sobre investimento e responsabilidade operacional.
- Compatibilidade com princípios de acesso aberto e não discriminação: A existência de um corredor HVDC dimensionado para um cluster de datacenters levanta questões sobre acesso por outros agentes de geração e carga. A regulação precisa conciliar o interesse em investimentos direcionados com os princípios de competição e acesso aberto que estruturam muitos mercados.
- Sinalização econômica para BESS e serviços ancilares: BESS associado a datacenters ou a enlaces HVDC só se viabiliza plenamente quando existem sinais de preço claros para flexibilidade, capacidade, regulação de frequência e suporte de tensão. Em mercados onde esses produtos ainda são incipientes ou mal remunerados, a decisão de investimento exige visão de longo prazo e apetite a risco regulatório.

Sem ajustes regulatórios e de desenho de mercado, o risco é ficar preso a soluções HVAC convencionais, mesmo quando o racional técnico e sistêmico aponta para HVDC e BESS como alternativas mais eficientes.

8.2. Padrões técnicos e interoperabilidade entre HVAC, HVDC, MVDC e BESS

A construção de arquiteturas híbridas e intramuros avançadas esbarra diretamente em questões de padronização e interoperabilidade. A convergência entre múltiplas tecnologias de tensão e corrente cria desafios como:

- Ausência de padrões consolidados para MVDC e proteção em DC: Enquanto HVAC dispõe de

décadas de normas consolidadas, o universo de média tensão DC ainda está em estágio de consolidação. Métodos de detecção e interrupção de faltas, coordenação de proteções, dispositivos de manobra e requisitos de ensaios em DC exigem harmonização para reduzir riscos técnicos e de fornecimento.

- Interoperabilidade entre equipamentos de múltiplos fabricantes: Conversores HVDC, retificadores MVDC, UPS, BESS e sistemas de supervisão tendem a ser fornecidos por vendedores distintos, com protocolos e filosofias de controle próprios. Sem padrões robustos de comunicação, modelos de dados e interfaces, o risco de dependência de fornecedor (lock-in) e de comportamentos inesperados em regime dinâmico aumenta.
- Integração entre camadas de controle: A coordenação entre controles de VSC-HVDC, BESS, reguladores de tensão HVAC, sistemas de automação de subestações e sistemas internos do datacenter exige arquitetura clara de hierarquia de controle, tempos de resposta e limites de atuação. Falhas de coordenação podem anular os benefícios da arquitetura avançada e, em cenários extremos, comprometer a estabilidade.
- Cibersegurança e convergência OT-IT: A interligação de redes de automação de potência, sistemas de gestão de datacenter e plataformas de orquestração de BESS amplia a superfície de ataque cibernético. A ausência de padrões de cibersegurança desenhados especificamente para redes híbridas HVAC-HVDC-MVDC com BESS aumenta a exposição a riscos operacionais.

O avanço em padrões técnicos, ensaios de tipo, guias de interoperabilidade e requisitos mínimos de cibersegurança é condição necessária para que arquiteturas híbridas e intramuros avancem de projetos pontuais para escala industrial.

8.3. *Lacunas de pesquisa: modelagem integrada datacenter-rede-armazenamento*

A literatura técnica sobre sistemas de potência evoluiu rapidamente em temas como HVDC, BESS e impacto de grandes cargas eletrônicas. Ainda assim, permanecem lacunas importantes quando se trata de modelar, de forma integrada, datacenters, rede elétrica e armazenamento em cenários realistas de operação:

- Modelos dinâmicos acoplados de datacenters: A maior parte dos estudos ainda representa datacenters como cargas agregadas com perfis simplificados de demanda. Falta, em muitos casos, modelagem detalhada do comportamento dinâmico de UPS, MVDC intramuros, BESS, grupos geradores e sistemas de climatização em eventos de tensão, frequência e ilhamento.
- Co-simulação de infraestrutura elétrica e workloads de TI: A forma como workloads de TI são escalonados, migrados entre sites e modulados

em tempo real afeta diretamente perfis de carga, rampas e oportunidades de resposta da demanda. Há espaço relevante para modelos que acoplem simuladores de sistema elétrico a modelos de orquestração de workloads e gestão térmica de datacenters.

- Otimização conjunta de HVAC, HVDC, MVDC e BESS: Estudos techno-econômicos tendem a comparar alternativas isoladas (por exemplo, HVAC versus HVDC) ou a avaliar BESS de forma localizada. Falta aprofundar abordagens de otimização multiobjetivo que considerem simultaneamente: topologia de rede, arquitetura intramuros, dimensionamento de BESS, regime tarifário, metas de descarbonização e requisitos de disponibilidade.
- Metodologias de avaliação de risco e resiliência específicas para clusters digitais: Clusters de datacenters integrados a HVDC, MVDC e BESS demandam métricas de risco que considerem não apenas falhas elétricas, mas também falhas de coordenação de controle, incidentes cibernéticos e falhas de software de orquestração. Há espaço para modelos que combinem análise de confiabilidade de ativos com análise de risco operacional em ambientes de missão crítica.

Endereçar essas lacunas é chave para sair de decisões de engenharia baseadas apenas em heurísticas e avançar para frameworks de planejamento realmente integrados datacenter-rede-armazenamento.

8.4. *Perspectivas futuras: clusters energéticos digitais e redes híbridas em larga escala*

A trajetória de médio e longo prazo aponta para a consolidação de clusters energéticos digitais, em que datacenters deixam de ser apenas cargas críticas isoladas e passam a ancorar ecossistemas completos de geração, transmissão, armazenamento e aplicações avançadas. Alguns vetores de evolução se destacam:

- Consolidação de backbones HVDC e grades híbridas em escala regional: À medida que a penetração de renováveis remotas aumenta e a densidade de datacenters cresce, backbones HVDC integrados a redes HVAC regionais tendem a se tornar infraestrutura básica. Datacenters passam a ser nós preferenciais desses eixos, combinando acesso a energia competitiva e capacidade de oferecer flexibilidade ao sistema.
- Generalização de MVDC intramuros em grandes campuses: Em clusters de muito alta densidade, MVDC intramuros tende a se consolidar como padrão, reduzindo conversões, melhorando eficiência e facilitando a integração de BESS, UPS em DC e, futuramente, novas tecnologias de armazenamento. Campus de datacenters começam a se parecer, do ponto de vista elétrico, com microgrids DC altamente integradas.
- BESS como infraestrutura essencial, e não apenas opcional: À medida que regimes tarifários,

mercados de serviços ancilares e metas de descarbonização evoluem, BESS tende a migrar do status de “complemento de segurança” para “ativo estrutural” do ecossistema. Em muitos casos, será tão natural prever BESS associado a datacenters quanto hoje é natural prever subestações dedicadas.

- Clusters energéticos digitais em sinergia com outros setores críticos: Em horizontes mais longos, é provável que clusters de datacenters se integrem a outros consumidores e produtores críticos, como plantas industriais avançadas, hubs logísticos e infraestruturas de transporte eletrificado. O resultado são “distritos energéticos digitais”, com redes híbridas HVAC–HVDC, MVDC intramuros, BESS e, potencialmente, outras formas de armazenamento, operando sob lógica integrada de otimização.

O desenho regulatório, os padrões técnicos e as soluções de mercado que forem escolhidos hoje para primeiros projetos piloto vão moldar essa trajetória por décadas. A agenda futura passa, portanto, por dois movimentos em paralelo: acelerar projetos de referência que validem arquiteturas híbridas e intramuros mais avançadas e, ao mesmo tempo, construir o arcabouço institucional que permita que esses projetos saiam da condição de exceção para se tornarem parte da nova normalidade da infraestrutura elétrica que suporta a economia digital.

9. CONCLUSÕES

A análise das arquiteturas HVAC (High Voltage Alternating Current), HVDC (High Voltage Direct Current), redes híbridas, MVDC (Medium Voltage Direct Current) intramuros e BESS (Battery Energy Storage System) evidencia que não existe uma solução única e definitiva para o suprimento de energia a datacenters hiperescaláveis. Cada tecnologia responde a um recorte específico de racionalidade técnica e econômico-financeira, condicionado por variáveis como distância entre geração e carga, blocos de potência a transmitir, robustez e topologia da rede existente, requisitos de qualidade de energia e metas de disponibilidade, resiliência e descarbonização.

A decisão mais eficiente não nasce da defesa isolada de uma tecnologia, mas do enquadramento correto do cenário e da construção de combinações inteligentes entre essas camadas – HVAC, HVDC, MVDC, BESS e, em horizontes mais longos, até mesmo hidrogênio verde – em arquiteturas coerentes com o plano de negócios do datacenter, o planejamento da rede e a estratégia ESG corporativa. Em outras palavras, o problema relevante deixa de ser “qual tecnologia vencerá” e passa a ser “como orquestrar o portfólio tecnológico adequado para cada contexto”, com uma visão de ciclo de vida, escalabilidade e alinhamento regulatório.

9.1. Síntese dos cenários onde cada tecnologia é recomendada

Em linhas gerais, as conclusões por cenário podem ser organizadas da seguinte forma:

- HVAC convencional mantém protagonismo em distâncias curtas e médias, com blocos de potência moderados a elevados e redes robustas, especialmente quando é possível reforçar a infraestrutura com novas subestações, circuitos adicionais e compensação reativa incremental. Nesses casos, HVAC oferece a melhor combinação entre CAPEX, simplicidade operacional e integração com o sistema existente.
- HVDC ponto a ponto passa a ser tecnicamente recomendado quando se combinam longas distâncias, blocos de potência elevados e redes remotas frágeis no polo de geração ou no polo de carga. Nessa faixa de aplicação, HVDC oferece menores perdas, controle firme de fluxo de potência e desacoplamento dinâmico entre regiões, o que é particularmente vantajoso em projetos que conectam polos renováveis remotos a clusters de datacenters.
- Redes híbridas HVAC–HVDC tornam-se recomendáveis em sistemas com múltiplos polos de geração renovável e múltiplos clusters de datacenters, quando a prioridade é otimizar fluxos em escala regional ou nacional. Nesses contextos, HVDC assume o papel de backbone estrutural, enquanto HVAC permanece como malha de distribuição regional.
- MVDC intramuros é mais indicado em campuses de alta densidade energética, com grandes distâncias internas e crescimento modular planejado. Nessas condições, a distribuição em média tensão DC melhora eficiência, reduz o número de conversões, simplifica arranjos de redundância e integra de forma mais direta BESS e UPS em DC.
- BESS, tanto em nível de rede quanto no nível do datacenter, é recomendado quando há necessidade simultânea de elevar resiliência, reduzir dependência de geradores a diesel, suavizar perfis de carga e capturar valor em tarifas, serviços ancilares ou metas de descarbonização. Em muitos cenários, BESS deixa de ser apenas um “acessório de backup” e passa a ser ativo estrutural da arquitetura de suprimento.

9.2. Condições em que soluções avançadas não são justificáveis

Soluções avançadas deixam de ser justificáveis quando a complexidade e o CAPEX incremental não se traduzem em ganhos proporcionais de confiabilidade, eficiência ou valor econômico. De forma sintética:

- HVDC tende a ser excessivo em distâncias curtas, blocos de potência limitados e redes HVAC robustas, nas quais reforços convencionais

atendem à demanda com custo menor e menor complexidade regulatória e operacional.

- Redes híbridas HVAC–HVDC com múltiplos terminais são difíceis de justificar em sistemas de pequeno porte, com poucos polos de geração e datacenters isolados. Nesses casos, a complexidade de operação e proteção supera os benefícios de flexibilidade.
- MVDC intramuros tende a ser overdesign em campus compactos, com distâncias internas reduzidas, densidade de potência moderada e equipes de operação ainda não preparadas para as especificidades de proteção e manutenção em média tensão DC. Uma arquitetura HVAC interna bem projetada, com UPS modernos e BESS dimensionado, costuma ser suficiente.
- BESS de grande porte pode não se pagar em contextos com baixa volatilidade tarifária, ausência de mercados estruturados de serviços ancilares, custos elevados de capital e exigência regulatória fraca quanto à redução de emissões. Nesses cenários, a estratégia mais racional pode ser manter UPS e geradores em arquiteturas tradicionais, com inserção seletiva de armazenamento apenas em pontos críticos.

9.3. *Recomendações estratégicas para investidores, utilities e operadores de datacenters*

Do ponto de vista estratégico, três recomendações se destacam:

- Para investidores em datacenters, a arquitetura de suprimento deve ser tratada como ativo core, e não como utilidade acessória. Projetos de grande porte devem incorporar, desde o início, a possibilidade de evoluir de HVAC puro para combinações com BESS, MVDC intramuros e, em determinados casos, enlaces HVDC ou participação em redes híbridas. Isso reduz o risco de obsolescência e aumenta o valor estratégico do ativo ao longo do ciclo de vida.
- Para utilities, datacenters hiperescaláveis devem ser tratados como elementos estruturantes do planejamento de rede. Em regiões com forte vocação renovável e potencial para clusters digitais, faz sentido considerar, já no planejamento decenal, a viabilidade de corredores HVDC, subestações dedicadas, nós de BESS e topologias híbridas, em vez de reagir caso a caso com reforços HVAC pontuais.
- Para operadores de datacenters, a prioridade é construir arquiteturas internas flexíveis, capazes de dialogar com diferentes perfis de suprimento externo. MVDC intramuros, BESS dimensionado com critérios claros e UPS integrados a estratégias de controle permitem que o datacenter participe de forma ativa da gestão de energia, em vez de se posicionar apenas como carga inflexível.

De forma transversal, é recomendável que todos os agentes acompanhem de perto a evolução regulatória e de mercado

em torno de HVDC, BESS e serviços ancilares, pois essas definições afetarão diretamente a atratividade de diferentes arquiteturas.

9.4. *Próximos passos para aprofundar estudos de caso e validação em projetos-piloto*

A consolidação das conclusões deste artigo em diretrizes práticas depende de um ciclo estruturado de estudos de caso e projetos-piloto. Alguns passos se destacam como agenda imediata:

- Desenvolvimento de estudos de caso aplicados a regiões e sistemas específicos, com modelagem detalhada de datacenters, redes HVAC/HVDC, MVDC intramuros e BESS, incluindo perfis reais de carga, tarifas e planos de expansão de geração renovável.
- Implantação de projetos-piloto que combinem, em escala controlada, elementos como HVDC dedicado ou semidedicado a datacenters, MVDC intramuros e BESS com múltiplos modos de operação (backup, peak shaving, serviços ancilares). Esses pilotos devem ser concebidos com forte componente de monitoramento, métricas de desempenho e transparência de resultados.
- Construção conjunta, por investidores, utilities, reguladores e operadores de datacenters, de frameworks regulatórios e contratuais que viabilizem enlaces dedicados, remunerem flexibilidade e definam papéis claros para BESS no contexto de serviços de sistema.
- Aproximação entre comunidade acadêmica, centros de pesquisa e indústria para tratar das lacunas de modelagem integrada datacenter–rede–armazenamento, da padronização técnica em MVDC e da interoperabilidade entre fabricantes de conversores, UPS, BESS e sistemas de automação.

A convergência entre infraestrutura digital e infraestrutura elétrica tende a se tornar um eixo central da competitividade econômica e da segurança sistêmica. Navegar essa convergência com racionalidade técnica, visão de longo prazo e disposição para experimentar arquiteturas avançadas, em ambiente controlado, é o passo essencial para transformar datacenters de grandes consumidores de energia em catalisadores de modernização das redes elétricas e da transição energética.

10. APLICAÇÃO PRÁTICA DO FRAMEWORK EM PROJETOS REAIS

O framework analítico apresentado neste artigo pode ser aplicado em diferentes estágios de maturidade de projetos envolvendo datacenters e infraestrutura de suprimento de energia.

Em projetos em fase inicial (greenfield), a abordagem apoia estudos de seleção de sítio e enquadramento de cenário, combinando análise de diferentes polos de geração

renovável, rotas de transmissão e requisitos de carga dos futuros datacenters. Em datacenters em operação ou em expansão, o framework pode ser utilizado para diagnosticar a arquitetura elétrica existente (interna e de conexão), identificar oportunidades de retrofit com BESS, reforços seletivos em HVAC e eventual adoção de MVDC intramuros em novos módulos, além de avaliar a participação em serviços ancilares quando o ambiente de mercado permitir.

Do ponto de vista de utilities e operadores de sistema, a mesma lógica pode ser aplicada a estudos de impacto de clusters de datacenters em redes existentes, à avaliação de corredores HVAC/HVDC e à escolha de nós estratégicos para instalação de BESS e desenvolvimento de topologias híbridas HVAC–HVDC.

Empresas de engenharia e consultoria especializadas em energia e datacenters, como a nMentors Engenharia, podem utilizar esse framework como base estruturada para estudos de viabilidade, planejamento de arquitetura elétrica e suporte à implantação, conectando decisões tecnológicas (HVAC, HVDC, MVDC, BESS, hidrogênio verde) a requisitos de confiabilidade, competitividade e metas de descarbonização dos projetos.

10.1. Atuação ponta a ponta: do estudo à arquitetura de referência

Uma linha de atuação típica abrange todo o ciclo de decisão:

- Diagnóstico e enquadramento de cenário
 - Mapeamento de distâncias, blocos de potência, perfil de rede, disponibilidade de polos renováveis e requisitos de disponibilidade do datacenter
 - Enquadramento do projeto na matriz de cenários (HVAC, HVDC, híbrido, MVDC intramuros, BESS) e identificação de 2–3 arquiteturas candidatas com melhor aderência
- Estudos de viabilidade técnico-econômica comparativa
 - Modelagem de cenários HVAC, HVDC ponto a ponto, grade híbrida, MVDC intramuros e diferentes configurações de BESS
 - Análise integrada de CAPEX, OPEX, perdas, confiabilidade, flexibilidade e trajetória de descarbonização
 - Elaboração de recomendações executivas de “go / no go” para cada alternativa, com sensibilidade a expansão futura do cluster de datacenters
- Definição da arquitetura de referência

- Seleção da topologia alvo (ou topologia em fases): níveis de tensão, pontos de conexão, filosofia de redundância (N, N+1, 2N), posicionamento do BESS e eventual uso de MVDC intramuros
- Tradução da arquitetura de referência em requisitos de desempenho: envelopes de tensão, limites de distúrbios, metas de disponibilidade, critérios de integração com UPS, grupos geradores e camadas de automação

10.2. Engenharia aplicada, especificações e suporte a implantação

Uma vez definida a arquitetura de referência, a nMentors Engenharia (como exemplo de empresa integradora) pode apoiar a passagem da decisão conceitual para o plano de obra:

- Projeto conceitual e diretrizes de engenharia
 - Elaboração de arranjos unifilares conceituais, critérios de proteção, estratégias de coordenação HVAC–HVDC–MVDC e integração com BESS
 - Definição de requisitos mínimos para subestações, conversores, painéis, sistemas de supervisão e teleproteção
 - Geração de insumos técnicos para RFI/RFP, garantindo especificações claras e comparáveis entre fornecedores
- Modelagem integrada datacenter–rede–armazenamento
 - Construção de modelos que representem a carga do datacenter (incluindo UPS, climatização, BESS local) acoplada ao comportamento da rede (HVAC/HVDC)
 - Estudos de fluxo de carga, curto-circuito, estabilidade de tensão e frequência, com e sem atuação do BESS em diferentes modos de operação
 - Identificação de reforços ótimos na rede externa e de requisitos de arquitetura interna para cumprir metas de qualidade de energia e disponibilidade
- Estruturação de projetos-piloto e suporte à implantação
 - Conceituação de pilotos (por exemplo, BESS em escala intermediária, MVDC em um módulo de campus, enlace dedicado em pequena escala) com objetivos, KPIs e plano de testes bem definidos
 - Apoio técnico ao PMO (Project Management Office) do cliente durante a implantação: revisão de propostas, análise de trade-offs de fornecedores,

- avaliação de impactos de mudanças de escopo
- Definição de planos de comissionamento, testes integrados e critérios de aceitação técnica alinhados à arquitetura alvo

10.3. Integração com estratégia de negócio, ESG e roadmap de evolução

Além da camada puramente técnica, há ganhos relevantes ao alinhar a arquitetura de suprimento à estratégia corporativa, à agenda ESG (Environmental, Social and Governance) e a um roadmap claro de evolução:

- Alinhamento com a estratégia de negócios do datacenter
 - Tradução de requisitos comerciais (SLA, tiers, expansão planejada, modelo de colocation ou hyperscale) em requisitos elétricos e de resiliência
 - Avaliação de como diferentes arquiteturas de suprimento impactam a competitividade do site em custo de energia, previsibilidade e pegada de carbono
- Quantificação de impacto em emissões e indicadores ESG
 - Estimativa de redução de emissões associada a menor uso de diesel, maior eficiência (PUE) e integração com fontes renováveis remotas
 - Suporte à produção de indicadores e relatórios que conectam decisões de arquitetura (HVDC, BESS, MVDC) com compromissos públicos de descarbonização
- Roadmap de evolução em fases
 - Organização de um plano realista de migração: HVAC reforçado no curto prazo, inserção seletiva de BESS, avaliação de HVDC e MVDC em fases posteriores
 - Definição de marcos de decisão (“gates”) em que novos investimentos são reavaliados à luz do crescimento do cluster, da evolução regulatória e da maturidade tecnológica

10.4. Modos de engajamento e próximos passos

Dependendo da maturidade do projeto, o engajamento pode começar em diferentes níveis:

- Projetos em fase inicial (greenfield)
 - Estudos de site selection e enquadramento de cenário

- Análise de viabilidade de diferentes polos de geração renovável e rotas de transmissão até o cluster de datacenters
- Datacenters em operação ou em expansão
 - Diagnóstico da arquitetura elétrica atual (interna e de conexão)
 - Avaliação de oportunidades de retrofit com BESS, reforços seletivos de HVAC, eventual MVDC intramuros em novos módulos e participação em serviços ancilares
- Utilities e operadores de sistema
 - Estudos de impacto de clusters de datacenters em redes existentes
 - Avaliação de corredores HVAC/HVDC, nós estratégicos para BESS e opções de topologia híbrida para acomodar crescimento simultâneo de renováveis e cargas digitais

Em todos os casos, a lógica é a mesma: usar o framework analítico apresentado no artigo – cenários, critérios técnico-econômicos, requisitos de qualidade de energia e roadmap em fases – como base estruturada para decisões concretas de investimento.

A nMentors Engenharia é apresentada aqui como exemplo de player capaz de percorrer esse ciclo ponta a ponta: da modelagem conceitual ao suporte à implantação, ajudando a transformar a discussão sobre HVAC, HVDC, MVDC e BESS em ativos reais, operando com segurança para a rede e com competitividade para os datacenters.

11. REFERÊNCIAS

ACHA, Enrique et al. VSC-FACTS-HVDC: Analysis, Modelling and Simulation in Power Grids. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2019.

AKINTE, Oluwaseun O.; AINA, Taiwo Samuel. HVAC VS HVDC Power System: Contemporary Development in HVAC and HVDC Power Transmission System. v. 10, n. 06, 2021.

CAMURCA, Luis et al. Future MVDC Applications Using Modular Multilevel Converter. In: 2020 6TH IEEE INTERNATIONAL ENERGY CONFERENCE (ENERGYCON). 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon). set. 2020.

CAO, Dong et al. An ultra efficient composite modular power delivery architecture for solar farm and data center. In: 2018 IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION (APEC). 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). mar. 2018.

CHEN, Yiming et al. Techno-Economical Assessment of AC and DC Power Distribution Architectures for Data Centers. In: 2022 NORTH AMERICAN POWER

SYMPOSIUM (NAPS). 2022 North American Power Symposium (NAPS). out. 2022.

GLASSMIRE, John et al. Accelerating data center decarbonization and maximizing renewable usage with grid edge solutions. In: 2021 DESIGN, AUTOMATION & TEST IN EUROPE CONFERENCE & EXHIBITION (DATE). 2021 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). fev. 2021.

HOSSAIN, Md Ismail et al. Battery Power Control Strategy for Intermittent Renewable Energy Integrated Modular Multilevel Converter-Based High-Voltage Direct Current Network. Sustainability, v. 15, n. 3, 31 jan. 2023.

JAVED, Umar et al. A Systematic Review of Key Challenges in Hybrid HVAC–HVDC Grids. Energies, v. 14, n. 17, p. 5451, 1 set. 2021.

LIN, Chung-Han; WU, Yuan-Kang. Coordinated Frequency Control Strategy for VSC-HVDC-Connected Wind Farm and Battery Energy Storage System. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 59, n. 5, p. 5314–5328, set. 2023.

WANG, Mian et al. Review and outlook of HVDC grids as backbone of transmission system. CSEE Journal of Power and Energy Systems, v. 7, n. 4, p. 797–810, jul. 2021.

WU, Haoke et al. Allowing Large Penetration of Concentrated RES in Europe and North Africa via a Hybrid HVAC-HVDC Grid. Energies, v. 16, n. 7, 29 mar. 2023.

YANG, Jiatao et al. Analysis and Design of Cascaded DC-DC Converter Based Battery Energy Storage System with Distributed Multimode Control in Data Center Application. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, v. 7, n. 3, p. 308–318, set. 2022.

ANEXO A – GLOSSÁRIO DE TERMOS E SIGLAS

Sigla / termo	Definição
BESS (Battery Energy Storage System)	Conjunto de baterias, conversores e sistemas de controle capaz de armazenar energia elétrica e liberá-la quando necessário. Em datacenters, pode reduzir picos de demanda, suavizar rampas de carga, apoiar a estabilidade da rede, diminuir o uso de geradores a diesel e, em alguns mercados, participar de serviços ancilares remunerados.
Black start	Capacidade de reiniciar o sistema elétrico, ou parte dele, sem depender de alimentação externa após um blecaute total. Arranjos com conversores VSC, BESS e, em certos casos, datacenters com

Sigla / termo	Definição
	arquitetura adequada podem auxiliar estratégias de black start, desde que projetados para esse fim.
Cluster de datacenters	Conjunto de datacenters localizados em um mesmo campus ou região, com infraestrutura compartilhada de energia, telecomunicações e acessos físicos. Do ponto de vista elétrico, é tratado como um polo de carga digital relevante.
Compensação reativa	Uso de equipamentos como bancos de capacitores, reatores, compensadores síncronos ou dispositivos FACTS para controlar potência reativa e manter níveis adequados de tensão, especialmente em linhas HVAC longas. Uma das principais ferramentas para estender a capacidade de HVAC antes de migrar para HVDC.
Datacenter hiperescalável	Datacenter de grande porte, normalmente operado por provedores de nuvem ou plataformas digitais globais, com demanda elétrica de dezenas ou centenas de megawatts, alta densidade de TI e requisitos rigorosos de disponibilidade, escalabilidade e eficiência.
ESG (Environmental, Social and Governance)	Conjunto de critérios utilizados para avaliar a sustentabilidade e a responsabilidade corporativa de empresas e projetos. Decisões sobre HVAC, HVDC, MVDC, BESS e hidrogênio verde impactam diretamente a agenda ESG de operadores de datacenters, utilities e investidores.
Flywheel (volante de inércia)	Dispositivo de armazenamento de energia cinética baseado em um rotor que gira em alta velocidade. Armazena energia mecânica que pode ser convertida em energia elétrica por alguns segundos, cobrindo transientes muito curtos

Sigla / termo	Definição
	até que UPS, BESS ou geradores assumam a carga de forma estável.
Geradores a diesel	Grupos geradores que utilizam diesel como combustível para fornecer energia em contingências prolongadas. Solução predominante de backup de longa duração em datacenters, com impactos ambientais relevantes, dependência de logística de combustível e crescente pressão por substituição em agendas de descarbonização.
Grade híbrida HVAC–HVDC	Arquitetura em que HVDC é utilizado como backbone de longa distância, interligando polos de geração e regiões de carga, enquanto HVAC permanece como malha regional de distribuição. Permite integrar múltiplos polos renováveis e múltiplos clusters de datacenters com maior flexibilidade de operação.
Hidrogênio verde	Hidrogênio produzido por eletrólise da água utilizando eletricidade de fontes renováveis, sem emissões diretas de dióxido de carbono. Pode ser usado em células a combustível ou motores dedicados para substituir, parcial ou totalmente, geradores a diesel em contingências de longa duração, em combinação com BESS. Ainda enfrenta desafios de custo, infraestrutura e normas de segurança.
HVAC (High Voltage Alternating Current)	Tecnologia padrão de transmissão em alta tensão em corrente alternada. Base da maioria das redes elétricas, com alta maturidade técnica e regulatória. Funciona muito bem em distâncias curtas e médias, mas enfrenta limites de perdas, estabilidade e necessidade de compensação reativa em longas distâncias e grandes blocos de potência.

Sigla / termo	Definição
HVDC (High Voltage Direct Current)	Tecnologia de transmissão em alta tensão em corrente contínua. Adequada para transportar grandes blocos de potência por longas distâncias, com menores perdas em determinados cenários e maior controle de fluxo do que HVAC. Em projetos que conectam polos renováveis remotos a clusters de datacenters, pode atuar como “autoestrada” elétrica dedicada ou semidedicada.
Load shifting (deslocamento de carga)	Uso de armazenamento para deslocar o consumo de energia no tempo. O sistema é carregado em horários de baixa demanda ou menor custo e descarregado em horários de alta demanda ou maior custo, otimizando o custo total de energia e, em alguns casos, contribuindo para a operação da rede.
LCC (Line Commutated Converter)	Tecnologia clássica de conversores HVDC baseada em tiristores. Robusta e amplamente utilizada em projetos de grande porte, depende de uma rede em corrente alternada forte para comutação e consome potência reativa de forma significativa. Indicada para transmissão em massa entre grandes sistemas.
MVDC (Medium Voltage Direct Current)	Arquitetura em corrente contínua em níveis de média tensão, aplicada principalmente dentro do campus de datacenters (intramuros). Permite reduzir etapas de conversão CA/CC, simplificar a distribuição interna, melhorar a eficiência e facilitar a conexão direta de sistemas de armazenamento, cargas eletrônicas e células a combustível.
Peak shaving (corte de ponta)	Estratégia em que sistemas BESS ou outras fontes são usados para atender parte da demanda nos horários de pico, reduzindo a demanda máxima registrada na rede. Ajuda a aliviar a

Sigla / termo	Definição
	infraestrutura, reduzir custos de demanda e melhorar a utilização global dos ativos elétricos.
Polo renovável	Região com grande concentração de geração renovável (solar, eólica, entre outras), muitas vezes distante dos centros de consumo. A conexão eficiente entre polos renováveis e clusters de datacenters é um dos eixos centrais do artigo.
PUE (Power Usage Effectiveness)	Indicador de eficiência energética de datacenters, definido como a razão entre a energia total consumida pelo site e a energia consumida apenas pela infraestrutura de TI. Valores mais próximos de 1 indicam maior eficiência. Arquiteturas com MVDC e menor número de conversões tendem a contribuir para PUE mais baixo.
Rede fraca	Rede elétrica com baixa capacidade de curto-circuito, poucas rotas alternativas de alimentação e maior sensibilidade a variações de carga e geração. Mais desafiadora para conversores LCC, mas melhor gerenciável com VSC-HVDC, BESS e controles avançados.
Redundância N, N+1, 2N	Conceitos de redundância aplicados a sistemas de missão crítica. N: capacidade igual à carga. N+1: capacidade N mais uma unidade redundante capaz de assumir em caso de falha. 2N: duplicação completa dos sistemas, com duas cadeias independentes que podem atender a carga integralmente.
Ride-through	Capacidade de um equipamento ou sistema (UPS, inversores, BESS, conversores HVDC) de permanecer conectado e operando durante distúrbios de curta duração na tensão ou na frequência, sem desconectar da rede. Fundamental

Sigla / termo	Definição
	para datacenters, que exigem continuidade mesmo em eventos transitórios.
Serviços ancilares	Serviços prestados ao sistema elétrico além da entrega de energia ativa, como regulação de frequência, suporte de tensão, reserva rápida e amortecimento de oscilações. Sistemas BESS e, em alguns casos, cargas flexíveis como datacenters, podem prestar serviços ancilares mediante remuneração específica.
Tier III / Tier IV	Classificações de datacenters definidas por padrões de mercado, que indicam níveis de redundância e disponibilidade. Datacenters Tier III e Tier IV exigem arquiteturas elétricas mais robustas, com redundâncias N+1 ou 2N, múltiplas rotas de alimentação e sistemas de backup dimensionados para tempos de indisponibilidade extremamente reduzidos.
UPS (Uninterruptible Power Supply)	Equipamento que garante continuidade imediata da alimentação e filtra distúrbios para as cargas de TI. Opera em milissegundos, cobrindo a transição entre a rede e fontes de backup como baterias, BESS ou geradores. Em arquiteturas modernas, tende a ser integrado ou coordenado com sistemas BESS.
VSC (Voltage Source Converter)	Tecnologia moderna de conversores utilizada em HVDC e, em alguns casos, em MVDC. Baseada em semicondutores como IGBTs, permite controle independente de potência ativa e reativa, operação em redes fracas, suporte de tensão local e topologias multi-terminais. Adequada para integração de renováveis intermitentes e grandes cargas sensíveis.
VSC-HVDC	Aplicação da tecnologia Voltage Source Converter em sistemas

Sigla / termo	Definição
	High Voltage Direct Current. Combina benefícios da transmissão em corrente contínua com elevada capacidade de controle, suporte de tensão e operação em redes fracas, sendo indicada para conexão de parques renováveis e polos de datacenters em topologias mais flexíveis.