

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (GE68A)

Tema 6: Suprimento de Energia de Alta Confiabilidade para Data Center Modular

Aleksander Da Silva Toth
Emanuel Dantas de Carvalho
Gabriel Eidi Lopes Yamashita

13 DE NOVEMBRO DE 2025

1 Etapa 1: Análise de Demanda e Metodologia

1.1 Introdução

A Etapa 1 constitui a fase inaugural do estudo técnico-econômico do projeto *Suprimento de Energia de Alta Confiabilidade para um Data Center Modular*. Nesta etapa, o foco recai sobre dois eixos complementares: (i) a caracterização da curva de carga e do comportamento energético de um data center de médio porte e (ii) a definição da metodologia de cálculo e seleção das tecnologias de suprimento de energia que comporão o sistema híbrido (Rede, geração fotovoltaica, BESS/UPS e gerador térmico de backup).

A caracterização da demanda elétrica é o ponto de partida para qualquer projeto de geração e armazenamento. No contexto específico de data centers, a carga apresenta características distintas de edificações comerciais típicas, notadamente pela operação contínua (24/7), pela elevada criticidade da continuidade de serviço e pela integração intensa entre sistemas de TI, climatização e conversão de potência [2, 15]. A compreensão dessas particularidades permite construir um modelo de demanda coerente com a realidade observada em estudos recentes de concessionárias e consultorias especializadas [21, 11], que, por sua vez, fundamenta o dimensionamento energético que será desenvolvido nas etapas subsequentes.

Além disso, a Etapa 1 estabelece a base metodológica sobre a qual serão avaliados, em fases posteriores, os indicadores de viabilidade técnico-econômica (como LCOE e VPL) e de desempenho ambiental (via Avaliação do Ciclo de Vida – ACV). Dessa forma, o presente capítulo combina uma fundamentação teórica consolidada com um estudo de caso numérico, construído a partir de premissas explicitadas e reproduzíveis no ambiente MATLAB.

1.2 Fundamentação Teórica E Estado da Arte

1.2.1 Perfil de Demanda em Data Centers Modulares

Estudos recentes de cooperativas elétricas e operadores de sistemas evidenciam que data centers modernos, especialmente aqueles voltados a aplicações de computação em nuvem e inteligência artificial, são cargas predominantemente contínuas, com poucas variações sazonais e horárias [21, 11]. Em termos quantitativos, observam-se **fatores de carga** (*load factor*) na faixa de 0,86 a 0,95, o que indica uma proximidade significativa entre a demanda média e a demanda máxima ao longo do ano. Tal comportamento contrasta com outras categorias comerciais, em que a demanda apresenta picos bem definidos nos horários de maior ocupação.

Para fins de planejamento energético, essa característica justifica o uso da **Curva de Duração de Carga** (CDC), ou *Load Duration Curve*, como ferramenta de análise. A metodologia proposta pela U.S. Environmental Protection Agency (EPA) [26] consiste em ordenar as 8760 horas do ano em função da demanda, em ordem decrescente, permitindo a identificação explícita da *carga de base* (demanda mantida durante a maior parte do tempo) e da *carga de ponta* (incrementos de curta duração). No contexto deste trabalho, a CDC é utilizada não apenas como instrumento de visualização, mas também como suporte conceitual à separação entre a parcela de carga que deve ser atendida continuamente pela combinação Rede + FV + BESS e a parcela que justifica o emprego de fontes de pico ou reserva.

Responsável principal: Aleksander.

1.2.2 Decomposição de Consumo, PUE e Impacto Térmico

Do ponto de vista energético, a potência demandada por um data center pode ser decomposta, de forma aproximada, em três grandes blocos: (i) cargas de TI (servidores, armazenamento e redes), (ii) sistemas de condicionamento de ar e climatização (HVAC) e (iii) cargas auxiliares (iluminação, sistemas de segurança, infraestrutura de apoio, entre outros). Trabalhos recentes de revisão e estudos de caso reportam que as cargas de TI tendem a representar cerca de 50% da demanda total, enquanto os sistemas HVAC respondem por aproximadamente 35–45% e as cargas auxiliares completam com uma faixa típica de 10–15% [2, 15].

A interação entre esses blocos é sintetizada pelo índice **PUE** (*Power Usage Effectiveness*), definido como a razão entre a potência total consumida pela instalação e a potência efetivamente destinada às cargas de TI. Instalações de referência, especialmente em configurações modulares e *edge*, operam com PUE na faixa de 1,4 a 1,6, podendo alcançar valores menores em climas amenos e com estratégias avançadas de *free cooling* [25, 8, 1]. A redução do PUE depende tanto da eficiência dos equipamentos de climatização quanto da melhoria nos sistemas de conversão de potência, o que reforça a natureza multidisciplinar do problema.

Do ponto de vista energético, a potência demandada por um data center pode ser decomposta, de forma aproximada, em três grandes blocos: (i) cargas de TI (servidores, armazenamento e redes), (ii) sistemas de condicionamento de ar e climatização (HVAC) e (iii) cargas auxiliares (iluminação, sistemas de segurança, infraestrutura de apoio, entre outros). Trabalhos recentes de revisão e estudos de caso reportam que as cargas de TI tendem a representar cerca de 50% da demanda total, enquanto os sistemas HVAC respondem por aproximadamente 35–45% e as cargas auxiliares completam com uma faixa típica de 10–15% [2, 15].

A interação entre esses blocos é sintetizada pelo índice **PUE** (*Power Usage Effectiveness*), definido como a razão entre a potência total consumida pela instalação e a potência efetivamente destinada às cargas de TI. Instalações de referência, especialmente em configurações modulares e *edge*, operam com PUE na faixa de 1,4 a 1,6, podendo alcançar valores menores em climas amenos e com estratégias avançadas de *free cooling* [25, 8, 1]. A redução do PUE depende tanto da eficiência dos equipamentos de climatização quanto da melhoria nos sistemas de conversão de potência, o que reforça a natureza multidisciplinar do problema.

Além disso, o artigo técnico da Delta [8] enfatiza o papel dos sistemas de UPS e de *energy backup* como elementos estruturais para evitar interrupções de carga crítica e suavizar distúrbios da rede, reforçando a necessidade de considerar explicitamente a parcela de infraestrutura (UPS/BESS, painéis e sistemas auxiliares) na decomposição do PUE. De forma complementar, o *technical brief* da ESIG sobre sistemas BESS *grid-forming* [12] destaca que arquiteturas de armazenamento mais avançadas podem contribuir tanto para a estabilidade do sistema elétrico quanto para a redução de perdas, aspecto que será explorado nas etapas de dimensionamento e análise de confiabilidade.

Responsável principal: Gabriel.

1.2.3 Arquiteturas Modulares, Unidades Prefabricadas e Tendência DC

A literatura técnica e os catálogos de fabricantes apontam uma tendência consolidada à modularização de data centers, por meio de *all-in-one modules* ou contêineres pré-fabricados, com capacidades típicas entre 20 e 190 kW, integrando unidades UPS, distribuição de energia (PDU) e sistemas de refrigeração em uma única solução [25, 8]. Essa abordagem facilita a

expansão incremental da capacidade instalada, ao mesmo tempo em que padroniza interfaces elétricas e térmicas, simplificando o comissionamento e a operação.

Paralelamente, observa-se um avanço significativo em topologias de conversão de potência de alta eficiência, incluindo retificadores com correção de fator de potência (*Power Factor Correction* – PFC) híbridos, conversores *Zero-Voltage-Switching* (ZVS) do tipo *switched-tank* e arranjos modulares multinível em corrente contínua (MMCC) para barramentos em 380 Vdc e 48 Vdc [3, 28]. Esses desenvolvimentos são amplamente discutidos em obras clássicas de eletrônica de potência [23, 13] e têm impacto direto na redução das perdas por conversão, o que, por sua vez, diminui a carga térmica imposta aos sistemas HVAC e contribui para a melhoria do PUE.

Responsável principal: Aleksander.

1.2.4 Contexto Elétrico e Normativo Brasileiro

No contexto brasileiro, o suprimento em média tensão para instalações de grande porte é regido pela **ABNT NBR 14039**, que estabelece requisitos para instalações de 1,0 a 36,2 kV, incluindo critérios de coordenação de isolamento, especificação de cabos, transformadores e arranjos de subestação [20]. A análise de curto-circuito e a verificação de capacidade interruptiva dos equipamentos seguem as diretrizes da norma **IEC 60909-0** [14], amplamente adotada em estudos de sistemas elétricos industriais.

A contextualização macroenergética é fornecida pelo **Anuário Estatístico de Energia Elétrica** da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que apresenta a evolução do consumo nacional e setorial, incluindo o desempenho do setor comercial e de serviços [10]. Embora data centers ainda não constituam uma categoria isolada nas estatísticas nacionais, a literatura de mercado aponta para um crescimento acelerado da demanda, impulsionado por aplicações em nuvem e inteligência artificial [24]. Tais tendências reforçam a relevância de projetos que busquem soluções de suprimento mais eficientes e confiáveis para esse tipo de carga.

Responsável principal: Emanuel.

1.2.5 Requisitos de Alta Confiabilidade em Data Centers

A noção de *alta confiabilidade* é central no projeto de sistemas elétricos para data centers. Do ponto de vista de classificação, organizações do setor adotam a taxonomia por *Tiers*, na qual instalações Tier 3 e Tier 4 se distinguem por oferecer capacidade de manutenção simultânea e tolerância a falhas sem interrupção da carga crítica [15]. Em termos práticos, isso se traduz em redundância de caminhos de alimentação, equipamentos em arranjos N+1 ou 2N e coordenação cuidadosa entre fontes principais, fontes de reserva e sistemas de condicionamento de energia.

No âmbito elétrico, a alta disponibilidade é obtida pela combinação de múltiplas camadas de suprimento: (i) subestação em média tensão com ao menos uma alimentação principal (e, quando possível, alimentação em anel ou suprimento redundante da concessionária); (ii) barramentos de distribuição com seccionamento e caminhos alternativos; (iii) sistemas UPS/BESS em arranjos paralelos com redundância N+1; e (iv) geradores térmicos dimensionados para assumir, em modo ilhado, a potência total da carga crítica [17]. A análise de curto-circuito e seletividade, baseada em [14], garante que falhas sejam isoladas sem perda global de serviço.

No plano energético, a presença de múltiplas fontes (Rede, FV, BESS, geradores) não implica

que todas contribuam igualmente para a confiabilidade. A Rede e a geração fotovoltaica atuam predominantemente como fontes de *custo mínimo* e redução de OPEX; o BESS/UPS constitui a primeira linha de defesa frente a afundamentos de tensão, *swells* e interrupções de curtíssima duração; e os geradores térmicos assumem o papel de *fonte firme* em contingências de longa duração. Essa lógica de camadas será explicitamente explorada na definição da arquitetura de suprimento híbrido na Seção 1.5, e condiciona a forma como os resultados da curva de carga e da CDC são utilizados no dimensionamento das tecnologias.

Responsável principal: Emanuel.

1.2.6 Formas de Geração, SEI, UPS e Turbinas/Geradores (**pendente de aprofundamento**)

Nesta subseção será desenvolvida, em versão futura, a fundamentação teórica específica sobre as principais **formas de geração** aplicáveis ao projeto (FV, sistemas a Diesel e a gás natural, eventuais microturbinas), bem como as **topologias típicas de Sistemas Elétricos Industriais (SEI)** para data centers, incluindo arranjos em anel, barras principais e de transferência, e níveis de tensão usuais.

Também serão discutidas as **tipologias de UPS/BESS** (linha-interativa, dupla conversão online, topologias modulares, integração AC-coplada vs. DC-coplada com FV) e os **tipos de turbina/gerador** (motores Diesel de velocidade constante, grupos geradores a gás natural, possíveis configurações de microturbinas ou turbogeradores) que poderiam compor a solução, justificando, ao final, a escolha de uma alternativa de referência para o estudo de caso.

Pendente — aprofundar nesta subseção:

- *Revisão das topologias de SEI típicas para data centers (anéis, barras duplas, BYPASS de UPS) e escolha de uma topologia de referência para o projeto, alinhando com os arranjos de backup propostos pela Delta [8]. Responsável: Emanuel.*
- *Classificação e descrição dos tipos de UPS (linha-interativa, dupla conversão, modular) e alinhamento com os requisitos Tier 3, articulando os conceitos de PUE e os exemplos de energy backup em data centers apresentados pela Delta [8]. Responsável: Gabriel.*
- *Levantamento de tecnologias de geração térmica (motores Diesel, grupos a gás natural, microturbinas) e justificativa do arranjo adotado (por exemplo, motores Diesel 13,8 kV com excitação estática), integrando recomendações de confiabilidade e tempos de atendimento do sistema de backup. Responsável: Emanuel.*
- *Síntese comparativa das combinações FV + UPS/BESS + geradores (vantagens, limitações, impactos no PUE e na confiabilidade), incorporando os conceitos de sistemas BESS grid-forming discutidos pela ESIG [12]. Responsável: Aleksander.*

1.2.7 Relação entre decisões de projeto e evidências

Com base nas referências discutidas, as principais decisões de modelagem adotadas nesta etapa podem ser rastreadas diretamente para a literatura técnica e normativa. A seguir, são sumarizadas as justificativas de cada escolha:

- **Fator de carga elevado (FC ≈ 0,90):** estudos de carga de grandes clusters de data

centers mostram perfis quase planos, com fatores de carga típicos entre 0,86 e 0,95, o que motiva a adoção de $FC = 0,90$ como premissa deste estudo [21, 11].

- **Uso da Curva de Duração de Carga (CDC):** a CDC é uma ferramenta clássica de planejamento energético, recomendada pela EPA para análise de regimes de operação e identificação de carga de base e de ponta. Neste trabalho, ela é aplicada à carga do data center para separar explicitamente a parcela de base da parcela de ponta [26].
- **PUE alvo entre 1,4 e 1,6 e arquitetura modular:** catálogos de módulos *all-in-one* e estudos de eficiência em data centers modulares reportam PUE nessa faixa, especialmente em climas amenos e com uso de *economisers*, o que sustenta o intervalo adotado como referência [25, 8, 1].
- **HVAC representando 35–45% da potência total:** revisões sobre gestão de energia em data centers indicam que a climatização responde por parcela comparável ou superior à das cargas de TI, com faixas típicas de 35–45% da demanda total, justificando a importância dada a esta parcela na análise [2, 15].
- **Adoção de conversão eficiente (PFC, ZVS, MMCC em DC):** pesquisas recentes em eletrônica de potência aplicada a data centers mostram ganhos de eficiência relevantes com PFC híbrido, conversores ZVS do tipo *switched-tank* e arranjos modulares multinível em barramentos DC, reduzindo perdas e carga térmica [3, 28]; tais soluções se apoiam em fundamentos consolidados de eletrônica de potência [13, 23].
- **Suprimento em MT e proteção (NBR 14039 / IEC 60909):** a conexão em média tensão e o dimensionamento de equipamentos seguem a NBR 14039, enquanto o estudo de curto-circuito e a coordenação de proteção utilizam a IEC 60909, complementados por boas práticas de instalações industriais [20, 14, 17].
- **Contexto brasileiro de consumo e crescimento do setor:** o Anuário Estatístico de Energia Elétrica da EPE fornece o panorama de consumo nacional e setorial, enquanto relatórios de mercado destacam o crescimento acelerado de data centers, em especial impulsionado por aplicações de nuvem e IA [10, 24].
- **Análise econômica (LCOE e VPL):** a comparação econômico-financeira entre alternativas de suprimento baseia-se em conceitos clássicos de economia e engenharia econômica, com aplicação do LCOE conforme discutido no material da disciplina de Geração de Energia [4, 18, 27].
- **ACV e impactos ambientais:** a avaliação de impactos socioambientais do mix de suprimento (emissões de geradores, ciclo de vida de módulos FV e baterias) segue a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida e referências sobre controle de poluição e gestão de resíduos [19, 9, 7].

Responsável principal: Gabriel (síntese das evidências).

Essa subseção explica que as premissas adotadas na Etapa 1 não são arbitrárias, mas derivam de um *estado da arte* conciso, ainda que suficiente para sustentar o estudo de caso proposto.

1.3 Metodologia da Etapa 1

A metodologia da Etapa 1 está organizada em três blocos: (i) definição das premissas de demanda, (ii) construção da curva de carga diária e da CDC anual e (iii) cálculo dos indicadores fundamentais de consumo, que servirão de insumo às etapas seguintes.

1.3.1 Definição das Preamissas de Demanda

Com base nas evidências da Seção 1.2, adotou-se um estudo de caso representativo de um data center modular de médio porte, com as seguintes premissas principais:

- **Localização fictícia:** região Sul do Brasil (por exemplo, Paraná), em função do clima mais ameno e da possibilidade de aplicação de estratégias de *free cooling*, com potencial de redução do PUE [1].
- **Demandá máxima (D_{max}):** 10 MW, correspondente a um campus modular formado por múltiplas unidades *all-in-one* na faixa de 20–190 kW [25].
- **Fator de carga (FC):** 0,90, alinhado com os valores observados em estudos de carga de data centers em regiões de alta concentração desse tipo de instalação [21, 11].

Essas premissas foram implementadas no script `analise_demanda_g6.m`, desenvolvido em MATLAB (R2024b), que centraliza a definição dos parâmetros de projeto em uma *struct* de premissas e automatiza a geração das curvas e dos resultados numéricos.

Responsável principal: Aleksander (script e parametrização).

1.3.2 Construção da Curva de Carga Diária e da CDC

A partir das premissas de demanda, a curva de carga diária foi construída assumindo um perfil essencialmente plano em torno da demanda média, com pequenas variações aleatórias de baixa amplitude para representar oscilações típicas de carga térmica (ligadas à climatização) e picos de processamento. Em seguida, foram forçados picos localizados de demanda para garantir que a curva atinge a demanda máxima de 10 MW em horários específicos, representando momentos de maior estresse térmico ou computacional.

Para a CDC, a metodologia da EPA [26] foi aplicada: as 8760 horas do ano foram simuladas a partir da combinação entre períodos de operação em carga de base e períodos de operação em carga de ponta, de forma a reproduzir o fator de carga global de 0,90. Em seguida, os valores de demanda foram ordenados em ordem decrescente, permitindo evidenciar visualmente a proporção de horas em que a instalação opera próxima da demanda média e da demanda máxima.

Responsável principal: Aleksander (simulação e geração de gráficos).

1.3.3 Cálculo dos Indicadores Fundamentais

Dos dados de demanda, foram derivados os indicadores fundamentais de interesse para o projeto:

$$D_{média} = D_{max} \times FC \quad (1)$$

$$E_{\text{anual}} = D_{\text{média}} \times 8760 \text{ h} \quad (2)$$

Essas grandezas permitem quantificar, de forma sintética, o nível de utilização da capacidade instalada e o consumo anual de energia elétrica, sendo diretamente utilizadas nas análises de dimensionamento de geração e de custos nivelados (LCOE) nas etapas seguintes.

De forma análoga, a metodologia de dimensionamento das tecnologias de suprimento (particularmente geração fotovoltaica, BESS e geradores térmicos) seguirá, nas etapas subsequentes, a formulação padrão:

$$E_i = P_{\text{inst},i} \cdot FC_i \cdot 8760 \text{ h} \quad (3)$$

em que $P_{\text{inst},i}$ é a potência instalada da tecnologia i e FC_i é o respectivo fator de capacidade. Na Etapa 1, essa fórmula é apenas estabelecida como premissa metodológica; a aplicação numérica ficará a cargo das etapas seguintes, conforme solicitado na Issue #9.

Responsável principal: Gabriel (formalização da metodologia).

1.4 Resultados da Análise de Demanda (Issue #8)

1.4.1 Resultados Numéricos

Com as premissas estabelecidas, obtiveram-se os seguintes resultados para a demanda média e o consumo anual:

$$D_{\text{média}} = D_{\text{max}} \times FC = 10 \text{ MW} \times 0,90 = \mathbf{9,0 \text{ MW}}$$

$$E_{\text{anual}} = D_{\text{média}} \times 8760 \text{ h} = \mathbf{78,840 \text{ MWh/ano}} = 78,84 \text{ GWh/ano}$$

Esses valores caracterizam um data center de médio porte com elevada taxa de utilização da capacidade instalada, coerente com os fatores de carga reportados em [21, 11].

Responsável principal: Aleksander (cálculos e validação numérica).

1.4.2 Curva de Carga Diária

A Figura 1 apresenta a curva de carga diária simulada no script `analise_demanda_g6.m`. Observa-se que a demanda permanece próxima de 9 MW ao longo das 24 horas, com oscilações em torno de $\pm 2\%$, e atinge a demanda máxima de 10 MW em janelas específicas de horário.

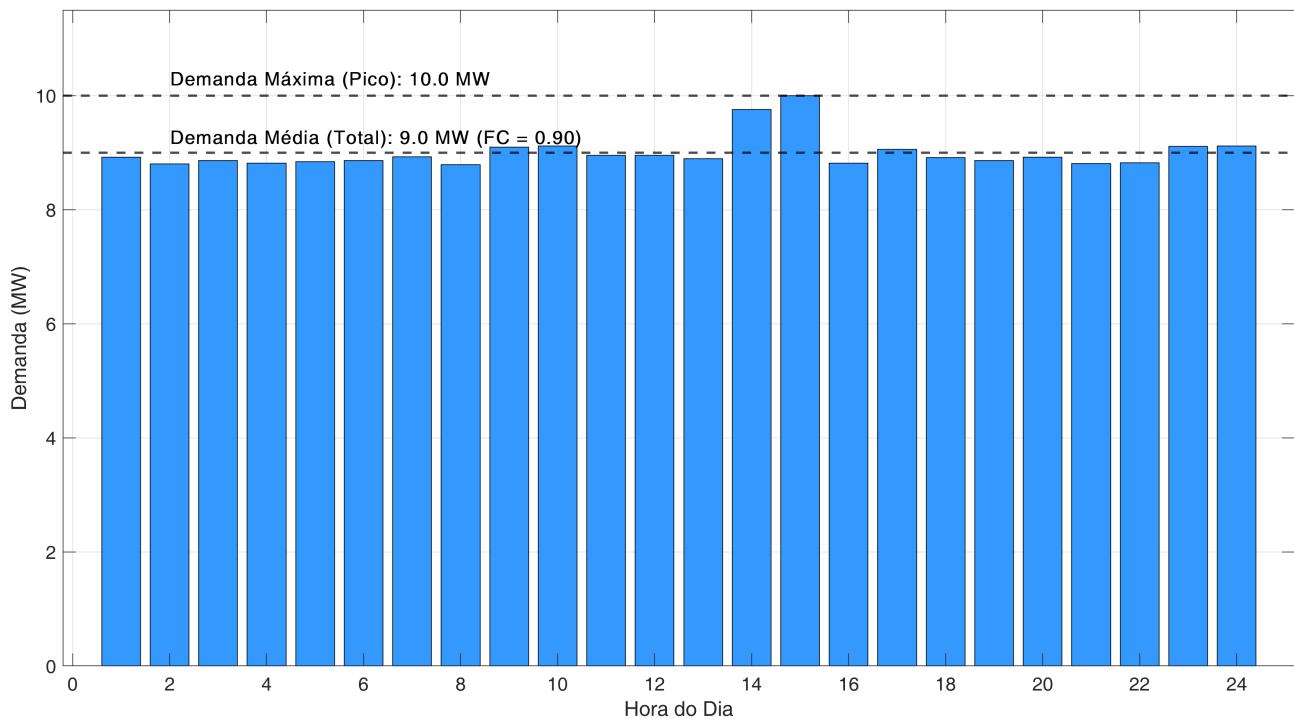


Figura 1: Curva de carga diária simulada para o data center modular (Fonte: Simulação G6; base metodológica em [21, 11]).

Esse comportamento reforça a ideia de que, para fins de planejamento de suprimento, o data center deve ser tratado essencialmente como uma carga de base, com pouca flexibilidade para redução ou deslocamento de consumo ao longo do dia.

Responsável principal: Aleksander.

1.4.3 Curva de Duração de Carga (CDC)

A Figura 2 mostra a CDC anual obtida a partir da ordenação das 8760 horas simuladas. Nota-se que a demanda permanece próxima de 9 MW durante cerca de 90% das horas do ano, enquanto a faixa entre 9 e 10 MW ocorre em apenas aproximadamente 10% das horas, caracterizando a carga de ponta.

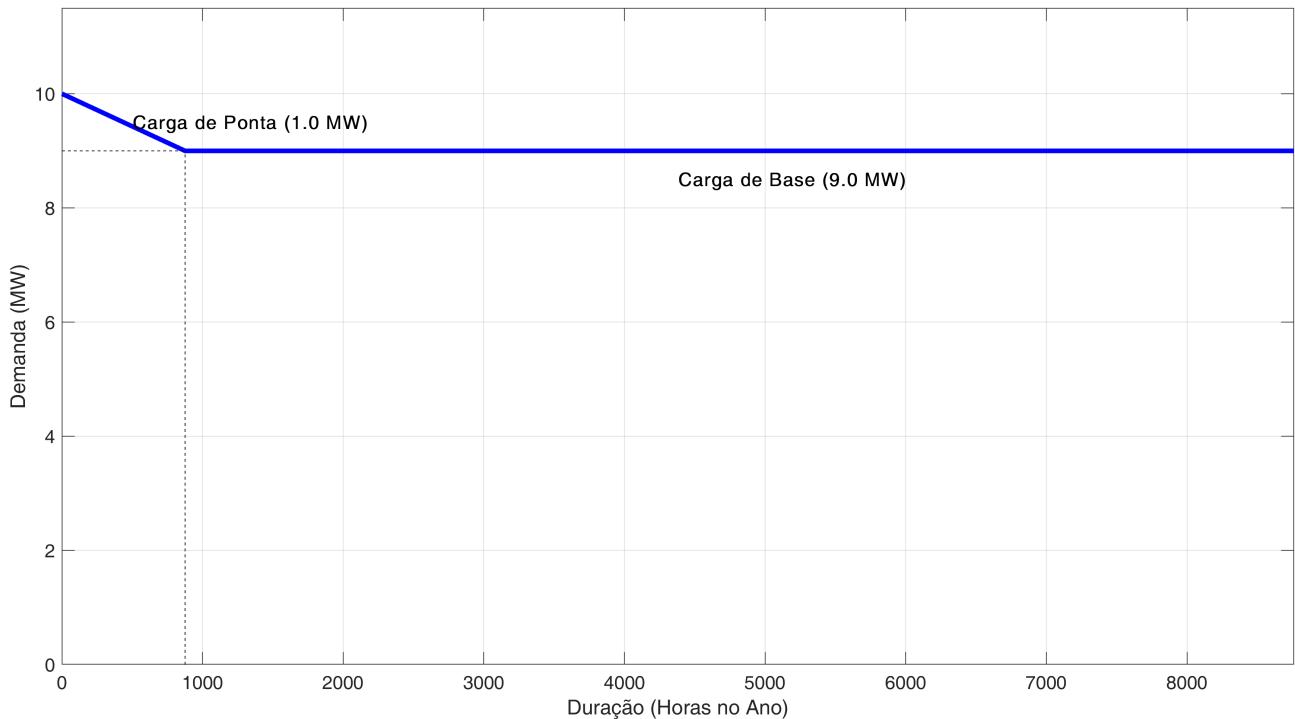


Figura 2: Curva de Duração de Carga (CDC) anual, evidenciando a predominância da carga de base (9 MW) ao longo do ano [26].

A forma da CDC é compatível com perfis de data centers reportados na literatura internacional [6, 2] e confirma a elevada uniformidade de consumo, um dos fatores que tornam a análise energético-econômica particularmente sensível aos preços de energia e às estratégias de eficiência.

Responsável principal: Aleksander.

1.4.4 Decomposição da Demanda Média e PUE

Além da curva de carga diária e da CDC, foi realizada uma decomposição da demanda média de 9 MW entre parcela de TI e parcela de infraestrutura (HVAC, UPS e perdas), com base em dois cenários de referência:

- **Cenário 1 — Baseline (Fracalossi, 2015):** decomposição inspirada no estudo de caso de Fracalossi [15], em que a carga de TI representa aproximadamente 36% da demanda total, enquanto a infraestrutura (HVAC + UPS + auxiliares) responde por cerca de 64%, resultando em um PUE da ordem de 2,8.
- **Cenário 2 — Projeto G6 (Data Center Modular Moderno):** cenário-alvo para o presente projeto, em que se busca operar com $\text{PUE} \approx 1,5$, coerente com instalações modulares modernas em clima ameno e com estratégias de *free cooling* e UPS mais eficientes [25, 8, 1]. Nesse caso, a carga de TI passa a representar fração significativamente maior da demanda média, reduzindo a participação relativa da infraestrutura.

A Figura 3 apresenta a comparação entre esses cenários, a partir dos resultados do script `analise_demandas_g6.m` (opções de decomposição de PUE).

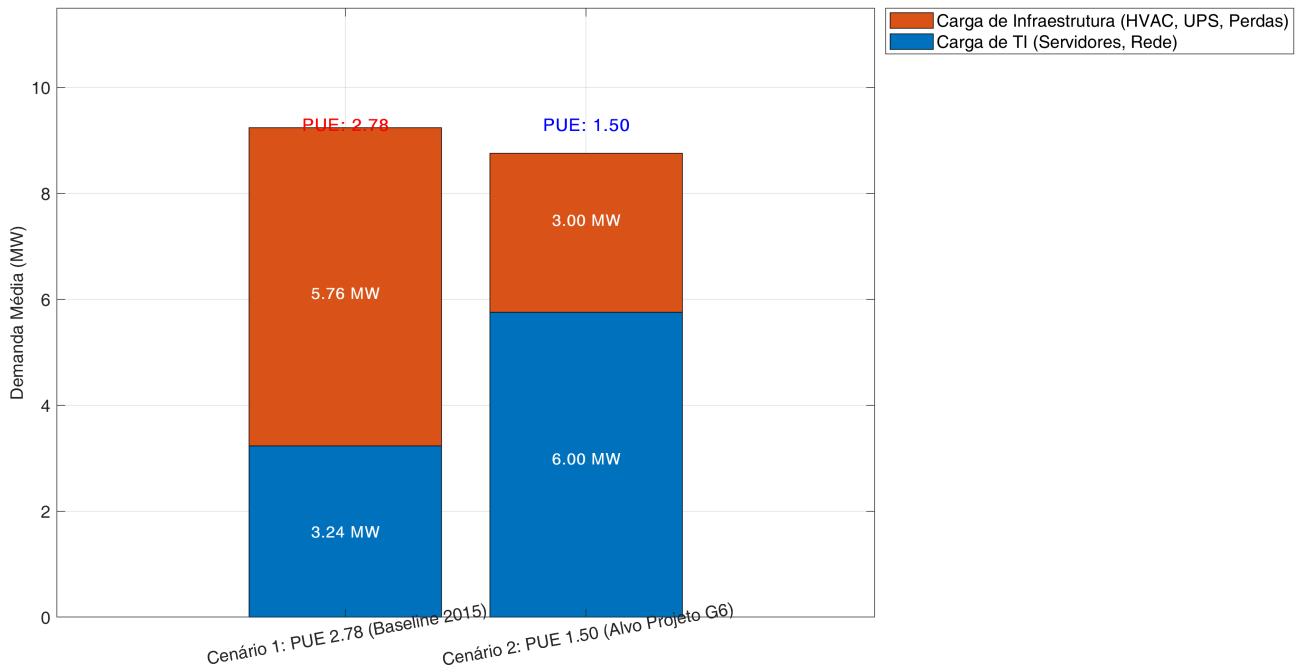


Figura 3: Decomposição da demanda média de 9 MW entre TI e infraestrutura para um cenário *baseline* (PUE elevado) e para o cenário-alvo do Projeto G6 (PUE reduzido). Fonte: Simulação G6; parâmetros inspirados em [15, 25, 8].

Os resultados reforçam que, no cenário *baseline*, a maior parte da potência é consumida pela infraestrutura de suporte, enquanto no cenário-alvo do Projeto G6 a parcela de TI torna-se dominante, com redução da fração destinada a HVAC e UPS. Essa transição é consistente com a literatura de eficiência energética em data centers [2] e com as boas práticas de *energy backup* e integração de UPS modulares destacadas pela Delta [8]. Nas etapas seguintes, os conceitos de BESS *grid-forming* apresentados pela ESIG [12] serão utilizados para refinar o modelo de infraestrutura elétrica e a análise de confiabilidade.

Responsável principal: Aleksander (implementação e gráficos); Gabriel (interpretação dos resultados).

Pendente — refinamento da decomposição:

- *Atualizar, na Etapa 2, os percentuais de infraestrutura (HVAC, UPS, BESS) com base em cenários de BESS grid-forming e tempos de autonomia discutidos em [8, 12]. Responsável: Aleksander e Gabriel.*

1.4.5 Implicações da Curva de Carga para o Dimensionamento do Suprimento

Do ponto de vista de engenharia de suprimento, a curva de carga diária e a CDC permitem decompor a demanda em dois componentes com papéis distintos no projeto: (i) a **carga de base**, próxima de 9 MW, que representa o patamar mínimo que deve ser garantido ininterruptamente e (ii) a **carga de ponta**, correspondente ao incremento de aproximadamente 1 MW, associado a situações de maior estresse térmico ou computacional.

A carga de base constitui o principal *driver* para o dimensionamento da combinação Rede +

geração fotovoltaica + BESS/UPS, uma vez que essas tecnologias são responsáveis por garantir tanto o atendimento contínuo quanto a competitividade econômica do sistema. Já a carga de ponta, por ocorrer em uma fração relativamente pequena das horas do ano, influencia principalmente a definição da potência nominal dos geradores de backup e da margem de segurança das instalações em média tensão. Em termos de confiabilidade, a leitura conjunta da CDC e dos requisitos Tier 3 discutidos na Seção 1.2 indica que o sistema deve ser capaz de manter, mesmo em condições de contingência, ao menos a carga de base de 9 MW, enquanto a manutenção da capacidade de atender aos picos de 10 MW depende da estratégia de redundância e da filosofia de operação adotada.

Responsável principal: Emanuel (interpretação para confiabilidade).

1.5 Definição da Solução e Metodologia Global (Issue #9)

Com o perfil de demanda caracterizado, a Issue #9 avança para a definição da arquitetura do sistema híbrido de suprimento e da metodologia de avaliação técnico-econômica que será empregada nas etapas seguintes.

1.5.1 Arquitetura de Suprimento Híbrido

A solução proposta integra quatro fontes principais:

1. **Geração fotovoltaica (FV)** — dimensionada para suprir uma fração relevante (por exemplo, da ordem de 30%) da demanda média anual, reduzindo o consumo de energia da rede e o custo operacional (*OPEX*) [16].
2. **Sistema de armazenamento por baterias (BESS/UPS)** — com capacidade da ordem de 10 MW por alguns minutos (e.g., 15 min), garantindo a continuidade de serviço durante afundamentos de tensão, curtas interrupções da rede e transitórios até a partida dos geradores térmicos.
3. **Gerador de backup (Diesel ou Gás Natural)** — dimensionado para atender integralmente a demanda de 10 MW em modo ilhado, assegurando a operação em contingências prolongadas.
4. **Conexão à rede de média tensão** — responsável pelo suprimento principal, em nível de tensão compatível com a NBR 14039 (por exemplo, 13,8 kV) [20].

Essa arquitetura busca compatibilizar os requisitos de confiabilidade de um data center Tier 3, as oportunidades de redução de custos via geração distribuída fotovoltaica e armazenamento, e as restrições normativas e ambientais associadas ao uso de geradores térmicos.

Responsáveis principais: Aleksander (FV e BESS), Emanuel (rede e geradores).

1.5.2 Cenários de Suprimento Híbrido a Serem Comparados

Para que a análise técnico-econômica seja estruturada de forma comparativa, a Etapa 1 define, de forma preliminar, os cenários de suprimento híbrido que serão detalhados nas etapas seguintes:

- **Cenário A — Rede + FV + BESS + Gerador a Diesel:** configuração de referência, em que o gerador a Diesel é adotado como fonte térmica de backup. Este cenário reflete

a solução mais tradicional em instalações industriais e de missão crítica, com elevada robustez logística (armazenamento local de combustível), porém maior impacto ambiental e OPEX de combustível [5, 22].

- **Cenário B — Rede + FV + BESS + Gerador a Gás Natural:** alternativa em que o gerador a gás natural substitui o Diesel, reduzindo emissões específicas de poluentes e gases de efeito estufa, mas introduzindo dependência de infraestrutura de gasodutos e de uma segunda concessionária.
- **Cenário C — Variação da penetração fotovoltaica e da autonomia do BESS:** família de subcenários em que se avaliam diferentes graus de participação da FV na energia anual (por exemplo, 20%, 30% e 40% de E_{anual}) e diferentes autonomias do BESS (5, 15 e 30 min), de modo a quantificar a sensibilidade dos indicadores de CAPEX, OPEX, LCOE e confiabilidade a essas escolhas.

Pendente — detalhamento numérico dos cenários (Etapa 2):

- *Tabela-resumo com P_{inst} , FC_i , E_i e principais premissas de cada cenário (A, B, C).* Responsável: Aleksander.
- *Resumo dos impactos em confiabilidade (nível de redundância, autonomia efetiva, papel de cada fonte em faltas prolongadas).* Responsável: Emanuel.
- *Quadro-síntese com LCOE e indicadores econômicos (VPL, payback) comparando os cenários.* Responsável: Gabriel.

1.5.3 Metodologia de Cálculo: Confiabilidade, Economia e Ambiente

A avaliação da solução híbrida será conduzida a partir de três eixos principais:

- **Confiabilidade (Tier 3):** análise das camadas de redundância e da coordenação entre os elementos de suprimento, com suporte em cálculos de curto-circuito e seletividade baseados na IEC 60909 [14] e em boas práticas de instalações industriais [17].
- **Análise econômica (LCOE/VPL):** aplicação do Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost of Energy* – LCOE) e de indicadores financeiros (como VPL) para comparar alternativas de arranjo do mix de suprimento, de acordo com [4, 18, 27]:

$$LCOE = \frac{\sum_t \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+i)^t}}{\sum_t \frac{E_t}{(1+i)^t}}$$

- **Avaliação ambiental (ACV):** análise qualitativa e, quando possível, quantitativa dos impactos associados às emissões dos geradores térmicos e ao ciclo de vida de módulos fotovoltaicos e sistemas de baterias, com base em [19, 9, 7].

Responsável principal: Gabriel (estruturação da metodologia econômica e ambiental); Emanuel (confiabilidade).

Pendente — aplicação prática da metodologia:

- *Preencher, na Etapa 2, os fluxos de caixa de CAPEX/OPEX e calcular o LCOE de cada cenário.* Responsável: Gabriel.

- Selecionar indicadores qualitativos/quantitativos de ACV relevantes (emissões de CO_2 , NO_x , SO_x , resíduos) para cada tecnologia. Responsável: Gabriel.

1.6 Síntese da Etapa 1

A Etapa 1 consolidou um modelo de demanda para um data center modular de médio porte, fundamentado em referências técnicas e normativas recentes e representativo da realidade de instalações críticas modernas. Em termos quantitativos, o estudo de caso adotado apresenta:

- Demanda máxima: $D_{\max} = 10$ MW;
- Demanda média: $D_{\text{média}} = 9$ MW, resultando em $FC = 0,90$;
- Consumo anual de energia: $E_{\text{anual}} = 78,84$ GWh;
- PUE de referência adotado na análise: faixa de 1,4 a 1,6.

A forma da curva de carga diária e da CDC confirma a predominância de uma carga de base robusta, com pouca participação relativa de picos. Essa constatação é consistente com o estado da arte em data centers e tem implicações diretas sobre o dimensionamento da geração fotovoltaica, da capacidade do BESS/UPS e da potência dos geradores de backup.

Os resultados aqui apresentados endereçam os itens da Issue #8 (curva de carga, CDC, indicadores de demanda) e estabelecem, por meio da definição da arquitetura e dos cenários de suprimento híbrido, o *framework* metodológico solicitado na Issue #9. As pendências explicitadas ao longo das subseções indicam os pontos em que serão aprofundadas, nas etapas seguintes, a fundamentação teórica das tecnologias de geração, das topologias de SEI e dos aspectos econômicos e ambientais, com responsáveis claramente associados a cada atividade.

Referências

- [1] M. K. Al-Khasawneh et al. «The Energy-Saving Potential of Air-Side Economisers in Modular Data Centres». Em: *Applied Sciences* 9.21 (2019). Arquivo: The Energy-Saving Potential of Air-Side Economisers...pdf.
- [2] S. F. Aghaei et al. «Energy Management in Data Centers from Design to Operations and Maintenance». Em: *IEEE Access* 8 (2020), pp. 206385–206411.
- [3] A. Askari e M. S. J. M. S. Asl. «Efficient data center design using novel modular DC UPS». Em: *Journal of Energy Management and Technology* 3.3 (2019). Arquivo: Efficient _ data _ center _ design _ using...pdf, pp. 48–55.
- [4] Prof. Vinicius Dario Bacon. *Apresentação Slides: Geração de Energia (LCOE)*. Material da Disciplina - UTFPR-AP. Arquivo: Apresentação Slides Geração de Energia.pdf. 2024.
- [5] Prof. Vinicius Dario Bacon. *Slide05 - Centrais a Diesel Vapor e Gas*. Material da Disciplina - UTFPR-AP. Arquivo: Slide05 - Centrais a Diesel Vapor e Gas.pdf. 2024.
- [6] Y. Berezovskaya et al. «Modular Model of a Data Centre as a Tool for Improving Its Energy Efficiency». Em: *IEEE Access* 8 (2020). Arquivo: Modular _ Model _ of _ a _ Data _ Centre...pdf, pp. 46559–46573.
- [7] Benedito et al. Braga. *Engenharia Ambiental e Sanitária*. 2^a. Pearson Prentice Hall, 2005.
- [8] Delta Electronics. *The Importance of Energy Backup for Data Centers*. Artigo Técnico. Arquivo: Technical Article _ 2 - DELTA.pdf. 2017.
- [9] José Carlos Derisio. *Introdução ao Controle de Poluição Ambiental*. 4^a. Bookman, 2012.
- [10] Empresa de Pesquisa Energética - EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2024 (ano base 2023) - Versão 20 anos*. Rel. téc. Ministério de Minas e Energia, 2024. URL: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica-2024>.
- [11] Energy and Environmental Economics (E3). *Load Growth Is Here to Stay, but Are Data Centers?* Rel. téc. Arquivo: E3-White-Paper-2024-Load-Growth-Is-Here-to-Stay-but-Are-Data-Centers-2.pdf. E3, jul. de 2024.
- [12] Energy Systems Integration Group (ESIG). *Grid-Forming Battery Energy Storage Systems: Technical Brief*. Rel. téc. Arquivo: ESIG-GFM-BESS-brief-2025.pdf. ESIG, 2025.

- [13] Daniel W Hart. *Power electronics*. Referência da IC. McGraw-Hill Education, 2011.
- [14] IEC 60909-0: *Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents*. International Electrotechnical Commission (IEC), 2016.
- [15] Juarez Santana Fracalossi Junior. *Eficiência Energética em Data Center: Estudo de Caso Univates*. Monografia (Engenharia da Computação). Lajeado, 2015.
- [16] Arno Krenzinger e Hélio M. Gomes. *Energia Solar Fotovoltaica: Manual de Engenharia*. Editora LTC, 2014.
- [17] João Mamede. *Instalações Elétricas Industriais*. 8^a. Editora LTC, 2012.
- [18] N. Gregory Mankiw. *Introdução à Economia*. 5^a. Cengage Learning, 2009.
- [19] Evandro M. et al. Moretto. *Avaliação de Impactos Ambientais: Aplicações Práticas*. Editora da UFSC, 2012.
- [20] NBR 14039: *Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV*. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2005.
- [21] Northern Virginia Electric Cooperative (NOVEC). *NOVEC Data Center Load Forecast*. Apresentação para PJM Load Analysis Subcommittee (LAS). Arquivo: 20241025-item-03b—novec-large-load-request.pdf. Out. de 2024.
- [22] Prof. Dr. Fabio Orssatto. *Ciências do Ambiente - Aula: Poluição Atmosférica*. Notas de Aula (22/09/2025) - UTFPR-AP. Arquivo: CA68A_aula_22sep2025.pdf. 2025.
- [23] Muhammad H Rashid. *Power electronics: circuits, devices, and applications*. Referência da IC. Pearson Education, 2009.
- [24] S&P Global Ratings. «Data Centers: Surging Demand Will Benefit And Test U.S. Public Power Utilities». Em: (jul. de 2024). Relatório de Mercado. Arquivo: Data Centers_Surging Demand...pdf.
- [25] Schneider Electric. *Modular Data Center All-in-One Essential 20kW*. Rel. téc. Datasheet. Arquivo: Schneider Electric_Modular-Data-Center-AllinOne-Essential...pdf. 2024.
- [26] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *An Approach for Using Load Duration Curves in the Development of TMDLs*. Rel. téc. Arquivo: 2007_08_23_tmdl_duration_curve_guide EPA, ago. de 2007.
- [27] Marco Antonio S. Vasconcellos e Manuel E. Garcia. *Manual de Economia*. 6^a. Editora Atlas, 2011.

- [28] H. Li Z. Ye Y. Han e G. Li. «Zero-Voltage-Switching Switched-Tank Modular Converter for Data Center Application». Em: *IEEE Transactions on Power Electronics* 38.1 (2023). Arquivo: Zero_Voltage_Switching_Switched-Tank_Modular...pdf, pp. 933–945.