

Universidade Federal de Uberlândia
FACULDADE DE GESTÃO E NEGÓCIOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO ORGANIZACIONAL
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO ORGANIZACIONAL

NESTOR BRUNELI NETO

**SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA IMPLANTAÇÃO DE DATA CENTERS DE
IA: ANÁLISE DOS IMPACTOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS NA REGIÃO DO
TRIÂNGULO MINEIRO**

UBERLÂNDIA – MG

2026

NESTOR BRUNELI NETO

**SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA IMPLANTAÇÃO DE DATA CENTERS DE
IA: ANÁLISE DOS IMPACTOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS NA REGIÃO DO
TRIÂNGULO MINEIRO**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Mestrado Profissional em Gestão Organizacional da Faculdade de Gestão e Negócios da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para a conclusão do curso.

Orientação: Prof. Dra. Carla Bonato Marcolin

Linha de Pesquisa: Gestão Empresarial

UBERLÂNDIA

2026

NESTOR BRUNELI NETO

**SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA IMPLANTAÇÃO DE DATA CENTERS DE
IA: ANÁLISE DOS IMPACTOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS NA REGIÃO DO
TRIÂNGULO MINEIRO**

Dissertação de Mestrado apresentado ao
Programa de Mestrado Profissional em Gestão
Organizacional da Faculdade de Gestão e
Negócios da Universidade Federal de
Uberlândia, como requisito para a conclusão do
curso.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Carla Bonato Marcolin - Orientadora
Faculdade de Gestão e Negócios – UFU

Prof. Dr. José Eduardo Ferreira Lopes
Faculdade de Gestão e Negócios – UFU

Prof. Dr. Luiz Pereira Pinheiro Junior
Universidade Positivo

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B894s
2026

Bruneli Neto, Nestor, 1985-
Sustentabilidade ambiental na implantação de data centers de IA
[recurso eletrônico] : análise dos impactos energéticos e hídricos na
região do Triângulo Mineiro / Nestor Bruneli Neto. -- 2026.

Orientadora: Carla Bonato Marcolin.
Dissertação (Mestrado Profissional) -- Universidade Federal de
Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Gestão Organizacional.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.11065>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Administração. I. Marcolin, Carla Bonato, 1988-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Gestão Organizacional. III. Título.

CDU: 658

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1F, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3291-6333 - www.ppggo.fagen.ufu.br - ppggo@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Gestão Organizacional				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Profissional, 153, PPGGO				
Data:	Nove de Setembro de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	12:00	Hora de encerramento:	14:00
Matrícula do Discente:	12412GOM017				
Nome do Discente:	Nestor Bruneli Neto				
Título do Trabalho:	SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA IMPLANTAÇÃO DE DATA CENTERS DE IA: ANÁLISE DOS IMPACTOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS NA REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO				
Área de concentração:	Gestão Organizacional				
Linha de pesquisa:	Gestão Empresarial				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	-				

Reuniu-se por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Gestão Organizacional, assim composta: Professores Doutores: José Eduardo Ferreira Lopes (UFU), Luiz Pereira Pinheiro Júnior (UPPR) e Carla Bonato Marcolin, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof^a. Dr^a. Carla Bonato Marcolin, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu

dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Ata de Defesa - Pós-Graduação 19 (7636395) SEI 23117.060014/2026-18 / pg. 1

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Carla Bonato Marcolin, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/09/2026, às 18:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Eduardo Ferreira Lopes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/09/2026, às 18:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **LUIZ PEREIRA PINHEIRO JUNIOR, Usuário Externo**, em 10/09/2026, às 23:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7636395** e o código CRC **38FD881E**.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
REITORIA - SISTEMA DE BIBLIOTECAS
DIVISÃO DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO TÉCNICO
SETOR DE BIBLIOTECAS DIGITAIS



**DECLARAÇÃO SOBRE O USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL EM DISSERTAÇÃO
DE MESTRADO OU TESE DE DOUTORADO**

Nome completo: NESTOR BRUNELI NETO.

Matrícula nº: _____.

Programa de Pós-Graduação em: Gestão Organizacional.

Trabalho: _____.

☒ Dissertação de Mestrado

☐ Tese de Doutorado

**Intitulada: SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NA IMPLANTAÇÃO DE DATA
CENTERS DE IA: ANÁLISE
DOS IMPACTOS ENERGÉTICOS E HÍDRICOS NA REGIÃO DO TRIÂNGULO
MINEIRO**

Declaro, para fins de depósito junto à Universidade Federal de Uberlândia – UFU, que as informações abaixo refletem de forma verdadeira, completa e transparente eventual utilização de ferramentas de Inteligência Artificial – IA durante a elaboração do trabalho.

1. UTILIZAÇÃO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

☐ **Declaro que NÃO utilizei** ferramentas de Inteligência Artificial na elaboração da dissertação/tese.

☒ **Declaro que UTILIZEI** ferramentas de Inteligência Artificial na elaboração da dissertação/tese, conforme detalhamento abaixo.

Ferramenta(s), plataforma(s) e, quando possível, versão(ões) utilizada(s): ChatGPT, ferramenta de Inteligência Artificial generativa desenvolvida pela OpenAI

Período de utilização: 10/10/2025 a 30/08/2026

2. FINALIDADE DA UTILIZAÇÃO

Marcar todas as opções aplicáveis:

☒ Exploração inicial de ideias e brainstorming;

- ☒ Geração de estruturas, tópicos ou rascunhos iniciais, posteriormente submetidos à revisão e reescrita humana; ☒ Busca de fontes/literatura;
- ☒ Leitura assistida, sumarização ou extração de informações, com conferência humana;
- ☒ Revisão linguística, gramatical ou estilística;
- ☐ Tradução, com revisão humana;
- ☒ Formatação de referências e citações;
- ☐ Apoio à análise e visualização de dados;
- ☐ Geração ou revisão de código para análise de dados;
- ☐ Programação, depuração ou documentação de código;
- ☐ Desenvolvimento de protótipos, ferramentas ou simulações;
- ☐ Transcrição de áudios ou vídeos;
- ☐ Geração de tabelas, gráficos, figuras ou outras visualizações;
- ☐ Outra finalidade:_____.

3. DESCRIÇÃO SINTÉTICA DA UTILIZAÇÃO

Descrever como a(s) ferramenta(s) de IA foi(foram) utilizada(s), indicando, quando pertinente, exemplos de comandos ou prompts, de modo a permitir a compreensão e a rastreabilidade de seu emprego: A ferramenta foi utilizada como apoio auxiliar durante a elaboração da dissertação, principalmente para organização e revisão de textos, auxílio na busca e identificação de fontes bibliográficas, conferência de referências e DOI, além de apoio à revisão linguística e à estruturação de conteúdos. As sugestões geradas pela ferramenta foram analisadas criticamente pelo discente, sendo os conteúdos incorporados ao trabalho revisados, confrontados com as fontes originais e, quando necessário, reescritos pelo autor.

4. VALIDAÇÃO HUMANA

Descrever, de forma sintética, os procedimentos adotados para conferência, revisão, validação e análise crítica dos conteúdos ou resultados produzidos com auxílio de IA: Todo conteúdo produzido ou sugerido com auxílio da ferramenta foi submetido à análise e conferência do discente. Informações, dados e referências bibliográficas foram confrontados, sempre que aplicável, com fontes acadêmicas, documentos institucionais e demais fontes originais.

5. NÍVEL DE ENVOLVIMENTO DA IA NA PRODUÇÃO

- ☐ **Baixo:** uso pontual para tarefas auxiliares, tais como revisão gramatical, tradução ou formatação de referências. ☒ **Moderado:** uso para apoio à geração de ideias, organização textual, sumarização, programação ou atividades semelhantes, com substancial intervenção, validação e/ou reescrita humana.
- ☐ **Alto:** uso extensivo em etapas da pesquisa, tais como análise de dados complexos, produção de códigos, protótipos ou simulações, sempre submetido à supervisão humana e à validação crítica dos resultados.

6. DECLARAÇÕES DE INTEGRIDADE E RESPONSABILIDADE

Para efetivação do depósito, declaro que:

- ☒ Assumo responsabilidade integral e exclusiva pelo conteúdo final da dissertação/tese, incluindo a veracidade e a precisão das informações, a originalidade do trabalho e a validade das análises, conclusões e interpretações apresentadas; ☒ Toda utilização de IA foi submetida à minha supervisão, análise crítica, validação e, quando necessária, revisão ou reescrita, não sendo atribuída à ferramenta de IA autoria intelectual da dissertação/tese;
- ☒ Não apresentei como de minha autoria conteúdo produzido por IA sem a necessária revisão, validação e apropriação intelectual crítica;
- ☒ Verifiquei a precisão e a confiabilidade das informações incorporadas ao trabalho e não utilizei referências bibliográficas, dados ou informações geradas por IA sem a correspondente conferência em fontes idôneas; ☒ Não inseri em ferramentas de IA dados pessoais, sensíveis, sigilosos, inéditos, confidenciais ou informações protegidas da UFU ou de terceiros, salvo quando presentes condições institucionais e jurídicas adequadas de proteção; ☒ Respeitei os direitos autorais, a propriedade intelectual, as licenças de uso, a confidencialidade e as demais normas éticas, legais e institucionais aplicáveis;
- ☒ Quando houve utilização de transcrições, dados pessoais ou conteúdos envolvendo terceiros, foram observadas as exigências éticas e legais aplicáveis, inclusive quanto à anonimização, quando pertinente;
- ☒ Tenho ciência das limitações, riscos de erro, alucinações, vieses e demais restrições inerentes às ferramentas de IA utilizadas;

☒ Comprometo-me a prestar informações adicionais sobre a utilização de IA, caso solicitado pelo Programa de Pós-

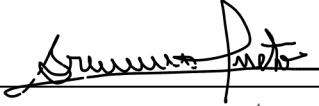
Graduação, pela banca examinadora ou por órgão competente da Universidade;

☒ Declaro que o eventual uso de Inteligência Artificial não afasta nem reduz minha responsabilidade acadêmica, ética, administrativa, civil ou de qualquer outra natureza pelo conteúdo depositado.

☒ Declaro, por fim, serem verdadeiras todas as informações prestadas neste documento.

Uberlândia, 22 de SETEMBRO de 2026.

Nome do(a) discente: NESTOR BRUNELI NETO.

Assinatura do(a) discente: .

Orientador(a): CARLA BONATO MARCOLIN .

CIÊNCIA do(a) orientador(a): _____.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Eurípedes Carlos Bruneli, in memoriam.

Educador por vocação e exemplo por toda a vida, trabalhou desde cedo para proporcionar à sua família, especialmente aos seus filhos, oportunidades que muitas vezes exigiram dele grandes esforços e renúncias.

Professor da rede pública federal até sua aposentadoria, sempre acreditou no poder transformador da educação. Graduado e especialista, carregou consigo o sonho de um dia cursar um mestrado.

Hoje, ao concluir esta etapa, sinto que uma parte desse sonho também se realiza por meio de mim.

A você, pai, dedico esta conquista, com amor, gratidão e saudade.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a espiritualidade, primeiramente, pela vida, pela força e por me permitir chegar até aqui. Nos momentos de tranquilidade e, sobretudo, naqueles em que o caminho pareceu mais difícil, foi na fé que encontrei serenidade para continuar.

À minha esposa, Lorenza Beatriz Lima Silva Bruneli, meu agradecimento mais especial. Foi uma das maiores incentivadoras para que eu aceitasse o desafio de fazer o mestrado e esteve ao meu lado durante toda essa caminhada. Obrigado pela parceria, pela compreensão diante das horas dedicadas aos estudos, pelo apoio nos momentos de dúvida e por acreditar em mim, muitas vezes antes mesmo que eu acreditasse que seria possível chegar até aqui. Esta conquista também é sua.

Ao meu filho, Henrique Silva Bruneli, pelo amor, pelo carinho e pela forma tão especial como, mesmo sem perceber, tornou mais leves os momentos difíceis dessa jornada. Seu abraço e sua presença foram, muitas vezes, exatamente o incentivo de que eu precisava para continuar.

À minha mãe, Tercília Maria Rissato Bruneli, mulher guerreira e trabalhadora, que sempre fez da educação dos filhos uma prioridade. Seu exemplo, sua força e seu permanente incentivo aos estudos contribuíram para formar não apenas o profissional que sou, mas também a pessoa que procuro ser.

Aos meus irmãos, pelo apoio, pelo carinho e pela presença incondicional ao longo da vida. Saber que podemos contar uns com os outros torna qualquer caminhada mais segura e significativa.

Aos familiares de minha esposa, pelo carinho, pela torcida e pelo apoio durante esta trajetória, meu sincero agradecimento.

À minha orientadora, Profa. Dra. Carla Bonato Marcolin, agradeço pela orientação, pela disponibilidade, pelos direcionamentos e pelas contribuições que foram fundamentais para o desenvolvimento e amadurecimento desta pesquisa. Obrigado também pelo incentivo para que o trabalho avançasse e se transformasse em algo efetivamente aplicável.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional da Universidade Federal de Uberlândia (PPGGO/UFU), agradeço pelo conhecimento compartilhado, pelas reflexões e pelas contribuições à minha formação acadêmica e profissional. Cada disciplina e cada discussão fizeram parte da construção desta caminhada.

Aos colegas do mestrado, companheiros de jornada, pelas conversas, trocas de experiências, aprendizados, incentivos e também pelos momentos de descontração que tornaram esse percurso mais leve. Algumas caminhadas são individuais em seus objetivos, mas se tornam muito melhores quando compartilhadas com pessoas que enfrentam os mesmos desafios.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta trajetória. Concluir um mestrado representa muito mais do que finalizar uma pesquisa ou obter um título. Representa um caminho de aprendizado, persistência, amadurecimento e superação, construído com a participação de muitas pessoas.

A todos vocês, minha mais sincera gratidão.

RESUMO

O avanço da digitalização global tem impulsionado a expansão de data centers de IA, infraestruturas essenciais para o armazenamento, processamento e transmissão de dados. Contudo, esses empreendimentos apresentam elevado consumo de energia elétrica e recursos hídricos, além de contribuírem para a emissão de gases de efeito estufa, levantando questionamentos sobre sua sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, esta dissertação tem como objetivo analisar a viabilidade hídrica e energética associados à implantação de um data center de IA no município de Uberlândia (MG), considerando as condições de oferta e demanda de recursos da região do Triângulo Mineiro. A pesquisa caracteriza-se como descritiva, de abordagem qualitativa, com apoio de dados secundários, utilizando como estratégias metodológicas a revisão integrativa da literatura, a análise documental e o estudo de caso. Inicialmente, são analisados casos internacionais de data centers de IA, com foco em impactos ambientais e estratégias de mitigação. Em seguida, realiza-se uma análise das condições energéticas e hídricas da região estudada, bem como uma estimativa do consumo do empreendimento a partir de métricas reconhecidas na literatura (PUE e WUE). Os resultados demonstraram que a região do Triângulo Mineiro dispõe, em termos agregados, de oferta hídrica compatível com a capacidade inicial do empreendimento, ainda que subsistam sinais de escassez localizada e sazonal, sobretudo na estação seca do Cerrado. Já os resultados da oferta energética demonstram uma preocupação um pouco mais acentuada em vista da maior competição pelo recurso, o que indica viabilidade extremamente condicionada, e não irrestrita, à implantação do data center de IA na região. Como Produto Técnico-Tecnológico (PTT), foi desenvolvido o METAS-DC – Método de Avaliação da Sustentabilidade de Data Centers, instrumento replicável estruturado nas dimensões ambiental, energética, hídrica, social e econômica, destinado a apoiar a avaliação da sustentabilidade de data centers e subsidiar a tomada de decisão por parte de gestores públicos e privados. Espera-se que os resultados contribuam para o debate sobre a sustentabilidade da expansão da infraestrutura digital, oferecendo subsídios para a implantação de data centers de IA de forma mais equilibrada e alinhada às condições regionais de onde serão instalados.

Palavras-chave: Data centers de IA; Sustentabilidade ambiental; Recursos hídricos; Energia elétrica; Risco climático.

ABSTRACT

The advancement of global digitalization has driven the expansion of AI data centers, which are essential infrastructures for data storage, processing, and transmission. However, these facilities require substantial amounts of electricity and water resources while also contributing to greenhouse gas emissions, raising concerns about their environmental sustainability. In this context, this dissertation aims to analyze the water and energy feasibility associated with the implementation of an AI data center in the municipality of Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, considering the regional supply and demand conditions of these resources in the Triângulo Mineiro region. The research is characterized as a descriptive study with a qualitative approach supported by secondary data, employing an integrative literature review, documentary analysis, and a case study as methodological strategies. Initially, international cases of AI data centers are examined, focusing on their environmental impacts and mitigation strategies. Subsequently, an assessment of the energy and water conditions of the study area is conducted, followed by an estimation of the facility's resource consumption based on internationally recognized metrics, namely Power Usage Effectiveness (PUE) and Water Usage Effectiveness (WUE). The results indicate that, in aggregate terms, the Triângulo Mineiro region has a water supply compatible with the project's initial operational capacity, although localized and seasonal water scarcity remains, particularly during the dry season of the Cerrado biome. Regarding energy availability, the findings reveal greater concern due to increasing competition for electricity resources, suggesting that the feasibility of implementing the AI data center in the region is highly conditional rather than unrestricted. As the Technical and Technological Product (TTP) of this research, the METAS-DC – Method for Assessing Data Center Sustainability was developed, a replicable instrument structured around environmental, energy, water, social, and economic dimensions, designed to support the sustainability assessment of data centers and to inform decision-making by public and private managers. It is expected that the findings will contribute to the ongoing debate on the sustainability of digital infrastructure expansion by providing evidence to support the implementation of AI data centers in a manner that is more balanced and aligned with the regional conditions in which they are established.

Keywords: AI data centers; Environmental sustainability; Water resources; Electric energy; Climate risk

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tripé da Sustentabilidade (Triple Bottom Line)

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Estrutura da Dissertação

Quadro 2- Síntese das Fontes Documentais Utilizadas na Coleta de Dados

Quadro 3- Matriz metodológica: objetivos, estratégias e técnicas de análise

Quadro 4- Síntese do Empreendimento Anunciado para Uberlândia

Quadro 5- Capacidade energética instalada e investimentos da CEMIG em Uberlândia e no Triângulo Mineiro (2023–2026)

Quadro 6- Sistema de abastecimento de água de Uberlândia (DMAE)

Quadro 7- Cenários de consumo energético e hídrico do empreendimento RT-One, segundo as métricas PUE e WUE (fator de utilização de 80%)

Quadro 8- Síntese do balanço entre oferta e demanda: potenciais e vulnerabilidades por dimensão

Quadro 9- Cenários recalculados de consumo hídrico a partir da estimativa do inquérito civil do Ministério Público Federal (MPF), em comparação com o cenário de pleno desenvolvimento (400 MW)

Quadro 10- Quadro de relevância do METAS-DC como Produto Técnico Tecnológico (PTT)

Quadro A 1- Dimensões e critérios de avaliação do METAS-DC

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	10
AGRADECIMENTOS.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Importância e delimitação do tema.....	20
1.2 Problema de Pesquisa.....	21
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo Geral.....	21
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
1.4 Justificativa.....	22
1.5 Estrutura do Trabalho.....	23
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	25
2.1 Marcos Históricos da Sustentabilidade.....	25
2.2 Riscos Climáticos (Físicos, Transição e Regulatórios) Associados aos Recursos Hídricos e Energéticos.....	27
2.2.1 Conceito, Evolução do Risco Climático e Pressões sobre os Recursos Naturais no Contexto das Mudanças Globais.....	28
2.2.2 Mudanças Climáticas e Impactos sobre os Recursos Hídricos e a Segurança Energética.....	29
2.2.3 Vulnerabilidade Regional e Resiliência Frente às Mudanças Climáticas.....	30
2.2.4 Tecnologia, Inovação e Desenvolvimento Sustentável.....	30
2.2.5 Os Impactos Ambientais das Tecnologias Digitais.....	31
2.3 Datacenters: Conceitos, Características e Sustentabilidade.....	32
2.3.1 Data Centers de IA versus Data Centers Convencionais: Distinções Operacionais e Implicações para o Sistema Elétrico.....	32
2.3.2 Data Centers e Sustentabilidade Ambiental.....	33
2.3.3 Consumo Energético e Eficiência em Data Centers.....	33
2.3.4 Consumo Hídrico, Sistemas de Refrigeração e Riscos Ambientais.....	34

2.3.5 Casos Internacionais de Data Centers de IA: Tensões Territoriais e Respostas Regulatórias.....	35
2.3.6 Governança Ambiental Corporativa: ESG, TCFD, GRI, SBTi e GHG Protocol no Contexto de Empreendimentos Tecnológicos.....	36
3 METODOLOGIA.....	38
4. RESULTADOS.....	43
4.1 Apresentação do Estudo de Caso - Data Center de IA em Uberlândia.....	43
4.2 Análise da Oferta Hídrica e Energética na Região do Triângulo Mineiro.....	46
4.2.1 Oferta Energética: CEMIG, ANEEL e ONS.....	46
4.2.2 Oferta Hídrica: ANA, IGAM, CBH-Paranaíba, CBH-Araguari e DMAE.....	48
4.3 Estimativa de Consumo do Empreendimento com Base nas Métricas PUE e WUE	51
4.4 Potenciais e Vulnerabilidades da Região do Triângulo Mineiro: Balanço entre Oferta e Demanda.....	53
5. DISCUSSÃO.....	57
5.1 Abundância Regional e Escassez Localizada na Disputa por Recursos Hídricos e Energéticos em Perspectiva.....	58
5.2 Discrepância entre as Estimativas Oficiais de Consumo e o Inquérito Civil do Ministério Público Federal.....	60
5.3 Picos de Consumo em Racks de Alta Densidade e a Disputa por Recursos entre Data Centers de IA e Convencionais.....	64
5.4 Equilíbrio entre os Pilares do Triple Bottom Line no Caso do Empreendimento RT-One.....	66
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
6.1 Limitações do Estudo e Sugestões para Estudos Futuros.....	70
6.2 Contribuições do Trabalho para a Gestão Pública, a Gestão Privada e a População	72
7. PTT – PRODUTO TÉCNICO-TECNOLÓGICO.....	74
7.1 Apresentação do METAS-DC.....	74
7.2 Estrutura e funcionamento do método.....	74
7.3 Aplicabilidade do METAS-DC.....	75
7.4 Relevância do Produto Técnico-Tecnológico.....	75
REFERÊNCIAS.....	77

APÊNDICE A – ESTRUTURA E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO METAS-DC....	92
A.1 Apresentação.....	92
A.2 Estrutura geral dos critérios.....	93
A.3.1 A1 – Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).....	94
A.3.2 A2 – Licenciamento Ambiental.....	94
A.3.3 A3 – Gestão de Resíduos.....	94
A.3.4 A4 – Compensação Ambiental.....	95
A.4.1 E1 – Eficiência Energética (PUE).....	95
A.4.2 E2 – Fontes de Energia.....	96
A.4.3 E3 – Resiliência Energética.....	96
A.5.1 H1 – Eficiência Hídrica (WUE).....	96
A.5.2 H2 – Disponibilidade e Segurança Hídrica.....	97
A.5.3 H3 – Reúso e Gestão da Água.....	97
A.6.1 S1 – Transparência e Divulgação de Informações.....	98
A.6.2 S2 – Relacionamento com a Comunidade.....	98
A.7.1 EC1 – Planejamento da Infraestrutura.....	99
A.7.2 EC2 – Sustentabilidade Econômica do Empreendimento.....	99

1. INTRODUÇÃO

Os data centers representam a espinha dorsal da infraestrutura da tecnologia da informação (TI) moderna, abrigando servidores, sistemas de armazenamento e equipamentos de rede que suportam o processamento, armazenamento e distribuição de grandes volumes de dados. Segundo Barroso, Clidaras e Hölzle (2018), esses ambientes físicos configuram “computadores de escala de depósito” essenciais para a computação em larga escala, viabilizando serviços digitais como computação em nuvem, hospedagem de sites e operações corporativas. A necessidade crescente de processamento intensivo decorrente da digitalização global impulsionou a expansão contínua desses centros (Azevedo & Santos, 2020).

No segmento de data centers de grande porte, os chamados hyperscale data centers, o número de instalações em operação no mundo alcançou 1.360 ao final de 2025, ante 1.136 em 2024, evidenciando a rápida expansão dessa infraestrutura digital. Os Estados Unidos concentram mais da metade da capacidade global desse segmento, enquanto Europa e China também figuram entre os principais polos de expansão (Synergy Research Group, 2026). Considerando também instalações menores espalhadas pelo mundo, esse número é ainda maior, revelando a magnitude da infraestrutura envolvida na economia digital moderna. Com essa escala, os data centers representam aproximadamente 1% a 3% do consumo total mundial de eletricidade, um percentual significativo que torna urgente a reflexão sobre sua eficiência energética e impactos socioambientais (Shehabi et al., 2016; Masanet et al., 2020).

Além da significativa demanda energética, essas instalações também exigem volumes consideráveis de água para sistemas de resfriamento, gerando potencial competição com as necessidades hídricas das populações locais, especialmente em regiões com disponibilidade limitada desse recurso (Masanet et al., 2020; Gao et al., 2021). A pressão sobre esses recursos naturais coloca em evidência a necessidade de planejamento sustentado e avaliação de risco ambiental específico para a implantação e operação de data centers, considerando a disponibilidade e a justiça no uso do recurso (Gao et al., 2021).

Outra dimensão crítica dos impactos ambientais relacionados aos data centers refere-se à emissão de gases de efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO₂), que contribui para o aumento do efeito estufa e o aquecimento global. Conforme o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), os GEE são responsáveis pela manutenção do calor atmosférico, com consequências severas para o clima e para a saúde dos ecossistemas e das populações humanas. Os data centers emitem diretamente e indiretamente esses gases, sobretudo em função do consumo de energia derivada de fontes fósseis e da cadeia

de produção e descarte dos equipamentos tecnológicos (Shehabi et al., 2016; Patterson et al., 2022). Estima-se que as emissões do setor podem variar de 2,5% a 3% do total global de GEE, podendo aumentar com a expansão da digitalização e adoção de novas tecnologias (Masanet et al., 2020; Li et al., 2023).

Diante dessa realidade, a sustentabilidade dos data centers torna-se um tema central, exigindo estratégias como a adoção de energias renováveis, práticas de refrigeração eficiente e gestão do ciclo de vida dos equipamentos para mitigar os impactos ambientais (Gao et al., 2021). Este estudo propõe analisar os riscos climáticos, energéticos e hídricos associados à instalação de data centers regionais, a fim de contribuir para processos decisórios informados e conscientes sobre as previsões dessas infraestruturas ambientais considerando relevância em gestão da sustentabilidade empresarial, ESG (Environmental, Social and Governance), viabilidade de investimentos, análise de risco corporativo e governança ambiental.

1.1 Importância e delimitação do tema

A região do Triângulo Mineiro, onde está localizada a cidade de Uberlândia, possui abundância de recursos naturais, em especial hídricos e energéticos, que sustentam sua dinâmica econômica e social. Essa região é abastecida por diversas hidrelétricas e por um sistema hidrográfico rico, vinculado às bacias do Rio Paranaíba e seus afluentes, que desempenham papel significativo na geração de energia e no abastecimento hídrico da população e dos setores produtivos (Silva et al., 2019; Alves et al., 2023).

Além da água superficial, o Sistema Aquífero Bauru fornece importante suporte hídrico, complementando a oferta para usos diversos, como agricultura irrigada, indústria e consumo urbano (Oliveira & Miranda, 2023; Rocha et al., 2021). A matriz energética local possui boa participação de fontes renováveis, sobretudo hidrelétricas, embora o aumento no consumo represente desafios para a estabilidade do abastecimento (ANEEL, 2024).

No entanto, a implantação de um data center, como o anunciado para Uberlândia, exige avaliação criteriosa sobre a capacidade desses recursos para suportar nova demanda de energia elétrica e água. Apesar da riqueza hídrica da região, a pressão crescente pelo consumo, a sazonalidade das fontes e a concorrência entre usos podem comprometer a sustentabilidade ambiental e a segurança no abastecimento (Mendes et al., 2022; Ferreira et al., 2023).

O anúncio refere-se ao projeto de um data center de Inteligência Artificial no município, liderado pela empresa norte-americana RT-One, com investimento inicial de R\$ 6 bilhões. O empreendimento ocupará uma área de 245 mil m² na região Oeste da cidade, às margens da MGC-497, com capacidade inicial de 100 MW (expansível para 400 MW), usando 100% de

energia renovável e buscando certificação internacional de sustentabilidade. As obras estão previstas para começar em maio de 2026, após análises técnicas finais, consolidando Uberlândia como polo tecnológico no Sudeste. (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2026; Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG), 2026; O Tempo, 2026; Arandanet, 2025; Mobile Time, 2026).

Este estudo delimita-se a analisar os riscos climáticos, energéticos e hídricos vinculados à construção e operação do data center em Uberlândia, buscando fornecer subsídios científicos para decisões públicas e privadas, integrando sustentabilidade ambiental e desenvolvimento tecnológico.

1.2 Problema de Pesquisa

A expansão acelerada dos data centers de IA, intensiva em consumo de energia elétrica e de água, tenciona a capacidade de suporte socioambiental dos territórios em que se instala. Uberlândia, inserida na região do Triângulo Mineiro, anuncia a implantação de um empreendimento dessa natureza com capacidade inicial de 100 MW e expansão prevista para 400 MW, magnitude equivalente à demanda de uma cidade de médio porte. Neste contexto, coloca-se a seguinte pergunta que irá orientar a pesquisa: *Qual viabilidade hídrica e energética associada à implantação de um data center de IA no município de Uberlândia (MG), considerando as condições de oferta e demanda de recursos da região do Triângulo Mineiro?*

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Considerando cenários de risco climático e propondo um instrumento aplicável de análise de viabilidade para empreendimentos tecnológicos de grande porte em contextos regionais semelhantes, o presente estudo tem por objetivo geral analisar a viabilidade hídrica e energética associados à implantação de um data center de IA no município de Uberlândia (MG), considerando as condições de oferta e demanda de recursos da região do Triângulo Mineiro.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a oferta hídrica e energética da região do Triângulo Mineiro, com ênfase em Uberlândia.

- Estimar a demanda hídrica e energética do empreendimento anunciado, a partir de métricas internacionalmente reconhecidas (PUE e WUE) aplicadas à capacidade declarada, apresentando cenários de baixo, médio e alto consumo.
- Identificar, a partir de casos internacionais documentados, padrões de risco climático e estratégias de mitigação associados a data centers de IA em contextos territoriais comparáveis.
- Analisar o balanço entre oferta regional e demanda projetada, identificando gargalos e zonas de risco socioambiental a partir do confronto dos resultados dos objetivos anteriores.
- Elaborar, como Produto Técnico-Tecnológico, um método estruturado para avaliação da sustentabilidade de data centers, aplicável a diferentes contextos regionais e organizado em dimensões, critérios e indicadores de avaliação.

1.4 Justificativa

A relevância do presente estudo está relacionada à necessidade de conciliar o avanço tecnológico com a sustentabilidade ambiental e social. O crescimento exponencial da digitalização e a ampliação do uso de data centers, que são intensivos em consumo de energia e recursos hídricos, coloca em pauta a responsabilidade socioambiental na tomada de decisões para implantações desse tipo de infraestrutura. O Triple Bottom Line, conceito desenvolvido por John Elkington, enfatiza a importância de buscar não apenas o lucro econômico, mas também o equilíbrio social e a preservação ambiental como fundamentos inseparáveis para o desenvolvimento sustentável (Elkington, 1997).

Neste contexto, Uberlândia, enquanto polo tecnológico em expansão no Triângulo Mineiro, enfrenta o desafio de acompanhar o crescimento econômico com a gestão responsável dos recursos naturais disponíveis. A instalação de um data center na região exige dos sistemas locais de energia e água, que, embora abundantes, não são ilimitados. A tomada de decisões sem uma avaliação precisa pode gerar desequilíbrios ambientais, impactos sobre a saúde pública, conflitos de uso e fragilização da resiliência regional diante das mudanças climáticas e pressões populacionais (Mendes et al., 2022; Ferreira et al., 2023).

Além disso, a sustentabilidade em empreendimentos tecnológicos deve ir além do aspecto ambiental, incluindo responsabilidade social e governança. O desenvolvimento sustentável exige que as organizações – públicas e privadas – incorporem práticas que promovam o benefício coletivo, a equidade e a minimização de impactos, garantindo que as tecnologias contribuam para um futuro justo e viável para as próximas gerações (Elkington,

2018; Gao et al., 2021). Baseada nisso, a análise crítica e científica oferecida por esta dissertação pode subsidiar políticas públicas e estratégias de gestão empresariais que considerem este tripé de sustentabilidade, auxiliando Uberlândia a consolidar sua vocação tecnológica sem comprometer a qualidade de vida e o meio ambiente local.

Portanto, este trabalho não se justifica apenas pela urgência em compreender os riscos hídricos e energéticos associados à instalação de data centers pelo mundo, mas também pela importância de analisar se um projeto de desenvolvimento tecnológico na região está em equilíbrio com a sustentabilidade ambiental, social e econômica, voltada às tendências globais de inovação consciente e resiliente.

Do ponto de vista acadêmico, estudos regionalizados sobre viabilidade hídrico-energética de data centers de IA no Cerrado brasileiro são escassos, o que confere caráter inovador ao trabalho no campo da produção científica nacional. Na perspectiva prática, o Produto Técnico-Tecnológico proposto tem potencial de uso direto por atores como a Prefeitura Municipal de Uberlândia, a CEMIG, o DMAE, o Comitê da Bacia Hidrográfica do Paranaíba e as próprias empresas proponentes, para decisões sobre licenciamento, planejamento hídrico e energético.

A aderência ao Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional e à linha de pesquisa Gestão Empresarial reside precisamente nessa articulação entre governança ambiental corporativa, análise de viabilidade de investimentos, gestão de riscos socioambientais e os princípios ESG (*Environmental, Social and Governance*), que são referenciais centrais na gestão de grandes empreendimentos contemporâneos.

1.5 Estrutura do Trabalho

Para facilitar a compreensão e organização dos conteúdos apresentados nesta dissertação, o Quadro 1 apresenta a estrutura geral do trabalho, detalhando os principais capítulos e tópicos abordados, desde a introdução até a conclusão. Essa seção busca guiar o leitor pelo desenvolvimento lógico e sequencial da pesquisa, evidenciando a progressão das análises e resultados que embasam a avaliação dos riscos climáticos, energéticos e hídricos na implantação do data center em Uberlândia.

Quadro 1- Estrutura da Dissertação

Capítulo	Descrição
Introdução	Contextualização do tema, problema de pesquisa, objetivos, justificativa e estrutura do trabalho.
Referencial Teórico	Discussão dos fundamentos conceituais sobre sustentabilidade ambiental, risco climático e tecnologia, com foco em data centers.
Metodologia	Descrição da abordagem metodológica, tipologia da pesquisa, fontes de dados, variáveis analisadas e procedimentos de análise.
Resultados e Discussões	Apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos à luz do referencial teórico.
Considerações Finais	Síntese dos principais achados, limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras.
PTT (Produto Técnico Tecnológico)	METAS-DC – Método de Avaliação da Sustentabilidade de Data Centers, instrumento de apoio à decisão aplicável à avaliação de empreendimentos em diferentes contextos territoriais.

Fonte: Elaboração Própria (2026)

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este referencial teórico está organizado em quatro eixos centrais. Primeiro, são apresentados os marcos históricos da sustentabilidade, desde a origem do conceito até o modelo de desenvolvimento sustentável fundamentado no Triple Bottom Line e nos compromissos internacionais mais recentes, como a Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A seguir, aborda-se o risco climático em suas dimensões física, de transição e regulatória, e seus efeitos sobre os recursos hídricos e energéticos, bem como as questões de vulnerabilidade e resiliência em nível regional. Na sequência, discute-se a interseção entre sustentabilidade e tecnologia, com ênfase na expansão das tecnologias digitais e em seus efeitos ambientais. Por fim, aprofunda-se a discussão sobre data centers, seus conceitos, características operacionais e desafios de sustentabilidade, incluindo casos internacionais e os principais marcos de governança ambiental corporativa aplicáveis ao setor.

2.1 Marcos Históricos da Sustentabilidade

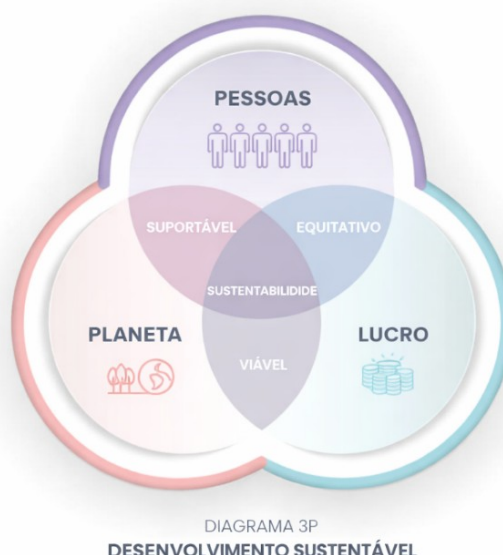
Ao longo do século XX, a sustentabilidade ambiental surgiu como um conceito estruturante, ganhando destaque nos debates científicos e políticos à medida que a deterioração ecológica passou a ameaçar os limites do planeta. Inicialmente ligada à preservação dos recursos naturais, a ideia foi se desenvolvendo para incluir elementos sociais e econômicos, admitindo a interdependência entre os sistemas naturais e as ações humanas (Bennemann, 2024). Essa mudança conceitual se fortaleceu com a divulgação do relatório "Nosso Futuro Comum" pela Comissão Brundtland em 1987, que estabeleceu o termo "desenvolvimento sustentável", definindo-o como aquele que satisfaz as necessidades atuais sem prejudicar as gerações futuras (Oliveira & Gentil, 2024), e com a Conferência de Estocolmo (1972), que introduziu a governança ambiental internacional (Milaré, 2020).

Um marco central nessa trajetória foi o relatório "Os Limites do Crescimento", divulgado pelo Clube de Roma em 1972, que, com base em modelos matemáticos do MIT, alertou que a exploração excessiva dos recursos naturais e o crescimento populacional poderiam resultar em colapso ambiental e econômico (Meadows et al., 1972). Ao trazer o conceito de limites ecológicos para a discussão global sobre desenvolvimento, o relatório fundamentou trabalhos posteriores, como a teoria dos "limites planetários" de Rockström et al. (2009), e

permanece uma referência para análises críticas do modelo de desenvolvimento dominante (Di Domenico, 2023).

A partir da década de 1990, consolidou-se a noção de que o desenvolvimento sustentável se apoia na interdependência de três pilares: o econômico, o social e o ambiental. Essa metodologia, conhecida como Tripé da Sustentabilidade ou Triple Bottom Line, foi difundida por John Elkington, que propôs avaliar o desempenho das organizações a partir de três indicadores: lucro (profit), pessoas (people) e planeta (planet) (Elkington, 1997), rompendo com a lógica que restringia o desenvolvimento ao crescimento econômico.

Figura 1- Tripé da Sustentabilidade (Triple Bottom Line)



Fonte: Adaptado de Elkington (1997)

A implementação prática do Triple Bottom Line, contudo, encontra obstáculos consideráveis: os interesses financeiros frequentemente se sobrepõem aos sociais e ambientais (Andrade & Piacente, 2017), e o próprio Elkington (2018) publicou uma autocrítica ao conceito, argumentando que o TBL foi por vezes utilizado como instrumento de legitimidade discursiva, sem promover transformações estruturais reais. Essa ressalva reforça a necessidade de que projetos como data centers de IA sejam avaliados não apenas pelo cumprimento de indicadores, mas pela efetiva capacidade de compatibilizar operação tecnológica e equilíbrio socioambiental regional.

A partir da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO-92 ou Rio-92), realizada no Rio de Janeiro com a participação de mais de 170 países, o

desenvolvimento sustentável se consolidou como compromisso político global, tendo sido ratificados documentos como a Declaração do Rio e a Agenda 21, além de convenções sobre biodiversidade, mudança do clima e desertificação (Santos & Medeiros, 2020; Azevedo, 2024). A Agenda 21, plano de ação com 40 capítulos voltado à promoção de práticas sustentáveis em escala global, nacional e local, deu origem, no Brasil, à Agenda 21 Brasileira, conduzida pela Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável (CPDS) a partir de 1997 (Azevedo, 2024).

Diversos princípios da Agenda 21 foram posteriormente integrados e modernizados na Agenda 2030, ratificada pela Organização das Nações Unidas em 2015, formada por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas que abrangem desde a erradicação da pobreza até a ação contra as mudanças climáticas e a promoção da igualdade de gênero e da justiça social (ONU, 2015). De acordo com Longo et al. (2020), os ODS representam a evolução do debate iniciado na Agenda 21, ainda que enfrentem desafios semelhantes, como a desarticulação das políticas públicas. No mesmo ano, o Acordo de Paris, firmado na 21ª Conferência das Partes (COP-21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, definiu compromissos voluntários para todos os países signatários, com o objetivo de restringir o aumento da temperatura média global a menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para limitá-lo a 1,5°C (Braz et al., 2020).

Em conjunto, a Agenda 2030 e o Acordo de Paris consolidam o arcabouço normativo contemporâneo da sustentabilidade, situando a descarbonização da economia e a gestão responsável dos recursos hídricos e energéticos como imperativos do século XXI. É nesse arcabouço histórico e normativo, do Tripé da Sustentabilidade aos ODS, que se insere a discussão sobre o risco climático associado à expansão de infraestruturas digitais intensivas em água e energia, tema tratado na seção seguinte.

2.2 Riscos Climáticos (Físicos, Transição e Regulatórios) Associados aos Recursos Hídricos e Energéticos

A literatura especializada classifica os riscos climáticos associados a empreendimentos intensivos em recursos naturais em três categorias analíticas complementares: riscos físicos, decorrentes diretamente de eventos climáticos extremos e da variabilidade hidrológica, como secas, ondas de calor e inundações, que afetam a disponibilidade de água e a geração de energia; riscos de transição, associados às mudanças na matriz produtiva e energética exigidas pela descarbonização, incluindo a obsolescência de ativos e a reconfiguração de cadeias de

suprimento; e riscos regulatórios, relacionados a novas normas, metas obrigatórias de eficiência e mecanismos de precificação de carbono que podem impor restrições operacionais a empreendimentos de grande porte (Stern, 2021; Freitas & Soito, 2008). Essa tripla classificação orienta a discussão desenvolvida ao longo desta seção, que trata primeiramente do conceito de risco climático, em seguida de suas causas estruturais, de seus efeitos sobre os recursos hídricos e energéticos e, por fim, da vulnerabilidade e da resiliência regional diante desses riscos.

2.2.1 Conceito, Evolução do Risco Climático e Pressões sobre os Recursos Naturais no Contexto das Mudanças Globais

O conceito de risco climático surgiu no contexto do aumento das preocupações ambientais na segunda metade do século XX. O risco climático, que antes era visto apenas como um evento natural, como secas e enchentes, passou a ser entendido como um fenômeno com várias dimensões, relacionado à interação entre ameaças naturais e fragilidades socioeconômicas (IPCC, 2021). Dessa forma, o risco climático é hoje entendido como o resultado de três elementos interdependentes: a exposição a eventos extremos, a vulnerabilidade dos sistemas impactados e a capacidade de adaptação (Stern, 2021).

O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) alterou a perspectiva de risco climático ao destacar a importância de respostas integradas entre mitigação e adaptação, que passam a abranger os efeitos sociais e econômicos, particularmente nos países em desenvolvimento, onde a vulnerabilidade é historicamente alta (Jacobi, 2025). O aumento na ocorrência e gravidade de eventos extremos nos últimos anos — como ondas de calor, inundações e secas — destaca a importância do risco climático como elemento central nas políticas de planejamento urbano, agricultura, saúde pública e infraestrutura crítica (Godoy & Benini, 2024), o que exige, na gestão de riscos, a incorporação de instrumentos de monitoramento, índices de vulnerabilidade e sistemas de alerta antecipado (Matos & Dias, 2023).

Nas últimas décadas, o rápido aumento da população e a intensificação da atividade econômica geraram pressões sem precedentes sobre os recursos naturais do planeta. A teoria dos limites planetários, apresentada por Rockström et al. (2009), destaca que algumas fronteiras ecológicas, como as relacionadas ao clima, à biodiversidade e ao uso da água doce, já foram ultrapassadas, sendo o modelo econômico fundamentado no crescimento constante um dos principais fatores que impulsionam essas transgressões (Jacobi, 2025).

A intensificação da demanda por água em decorrência do crescimento populacional é um fator especialmente relevante para esta dissertação: em diversas áreas, a demanda sobre aquíferos e rios já ultrapassa a capacidade de renovação dos recursos hídricos, intensificando os conflitos pelo uso da água (Naitzel, 2023). Esse contexto impacta igualmente a segurança energética, pois, em regiões onde a produção de energia depende principalmente de fontes hidrelétricas, a variação climática e os períodos de seca afetam diretamente a capacidade de fornecimento, evidenciando a relação entre crescimento, recursos naturais e segurança energética (Freitas & Soito, 2008).

2.2.2 Mudanças Climáticas e Impactos sobre os Recursos Hídricos e a Segurança Energética

As mudanças climáticas têm causado impactos significativos no ciclo da água, afetando a disponibilidade, a qualidade e a distribuição dos recursos hídricos em todo o mundo. O aumento das temperaturas médias, a maior ocorrência de eventos extremos, como secas e inundações, e a alteração nos padrões de precipitação constituem riscos consideráveis para a segurança hídrica de populações humanas, ecossistemas e setores econômicos que dependem da água (Matos & Dias, 2023). Em áreas semiáridas e de forte sazonalidade, como o Cerrado, a evaporação elevada e a diminuição das precipitações prejudicam a recarga dos aquíferos e a manutenção dos fluxos superficiais (Jacobi, 2025).

O termo "segurança hídrica" tem ganhado relevância nas discussões sobre clima, englobando elementos como disponibilidade, acessibilidade, qualidade da água e competência institucional para gestão, deixando de ser vista apenas como um aspecto técnico para ser entendida como condição essencial para o desenvolvimento sustentável (Freitas & Soito, 2008). Para serem eficazes, as políticas públicas precisam de planejamento de longo prazo, base científica sólida e articulação entre os diversos setores e níveis de governo (Pereira & Rodriguez, 2022).

A conexão entre mudanças climáticas e segurança energética é caracterizada por interdependências complexas. Os riscos climáticos afetam diretamente a produção, distribuição e consumo de energia, expondo fragilidades significativas nos sistemas energéticos, principalmente em países cuja matriz energética depende fortemente de fontes hidrelétricas (Freitas & Soito, 2008). A geração hidrelétrica depende diretamente da disponibilidade de água: a capacidade dos reservatórios diminui devido a secas prolongadas e mudanças no padrão de chuvas, o que afeta o fornecimento de energia e já provocou crises em diferentes momentos no

Brasil (Paiva et al., 2024), demandando a diversificação da matriz energética com fontes menos sensíveis à variabilidade climática, como solar, eólica e biomassa.

Além dos riscos físicos descritos acima, a transição energética mundial — que exige a substituição gradual dos combustíveis fósseis por fontes renováveis — impõe riscos de transição às organizações que dependem de petróleo e carvão, que passam a lidar com incertezas regulatórias e de mercado, ao passo que novas fontes exigem investimentos em inovação e transformações estruturais nas redes de distribuição (Stern, 2021). Nesse contexto, mecanismos de integração entre os setores de água, energia e alimentos — o Nexo Água-Energia-Alimentos, retomado como lente analítica na Metodologia desta dissertação — permitem a visualização de interdependências e a otimização de recursos em situações de escassez (Mariani et al., 2016).

2.2.3 Vulnerabilidade Regional e Resiliência Frente às Mudanças Climáticas

A vulnerabilidade de uma região às mudanças climáticas é consequência de uma combinação complexa de elementos ambientais, sociais, econômicos e institucionais, não se distribuindo de forma equitativa pelo território (Matos & Dias, 2023). Por outro lado, a resiliência diz respeito à habilidade dos sistemas socioecológicos de resistir, adaptar-se e se transformar frente a choques ou pressões externas, dependendo de mecanismos de governança adaptativa, redes comunitárias ativas e acesso a informações climáticas atualizadas (Jacobi, 2025).

Pesquisas como as de Jacobi (2025), Silva (2024) e Vieira (2025) indicam que a capacidade de adaptação às mudanças climáticas está diretamente ligada à qualidade da governança local, o que é particularmente relevante para a análise de viabilidade proposta nesta dissertação: municípios que promovem maior integração entre setores de água, energia e planejamento urbano tendem a apresentar maior capacidade de absorver novas demandas, como a de empreendimentos tecnológicos de grande porte, sem comprometer a segurança hídrica e energética da população já estabelecida (Puga et al., 2025).

2.2.4 Tecnologia, Inovação e Desenvolvimento Sustentável

Nas últimas décadas, a conexão entre sustentabilidade e tecnologia tem se intensificado em resposta às demandas ambientais e sociais do século XXI. As tecnologias emergentes, particularmente no âmbito digital, apresentam desafios ao meio ambiente, ao mesmo tempo em que proporcionam soluções para reduzir seus impactos negativos (Viana & Scheidegger, 2025). A sustentabilidade tecnológica incorpora aspectos como eficiência energética, gestão da água e uso responsável de recursos naturais ao ciclo de vida dos ativos digitais, especialmente no setor de data centers (Curtolo & Peixoto, 2025).

O desafio de equilibrar o desenvolvimento tecnológico e a sustentabilidade ambiental é ainda mais evidente em setores que consomem muita energia e água. O aumento da digitalização das atividades humanas, juntamente com o surgimento de economias fundamentadas em dados e algoritmos, intensifica a utilização de infraestruturas de processamento e armazenamento, como os data centers (Samuel, 2025). O conceito de inovação responsável, que visa criar soluções técnicas que reduzam os impactos ambientais e aumentem os benefícios sociais, ajuda a entender essa conexão: o avanço tecnológico deve estar alinhado à preservação dos ecossistemas e à responsabilidade com as futuras gerações (Pigatto & Pigatto, 2024).

2.2.5 Os Impactos Ambientais das Tecnologias Digitais

A rápida transformação digital, alimentada por inovações como inteligência artificial, big data, internet das coisas e computação em nuvem, gerou uma necessidade crescente de infraestruturas físicas de suporte, como servidores, centros de processamento de dados e redes de comunicação ao redor do mundo. Este progresso tecnológico, apesar de ser essencial para a inovação e o crescimento econômico atual, também tem gerado sérios impactos ambientais, sobretudo devido ao alto consumo de energia elétrica e à exploração intensiva de recursos naturais (Brochado, 2025).

Esse consumo crescente de energia elétrica vem sendo provocado por data centers e redes de telecomunicações, que funcionam ininterruptamente para garantir que os dados estejam sempre disponíveis e seguros, exigindo não apenas energia para o processamento computacional, mas também para os sistemas de resfriamento. Em muitas partes do planeta, essa energia ainda vem, em sua maioria, de fontes fósseis, o que aumenta a emissão de gases de efeito estufa e a contribuição do setor digital para as mudanças climáticas globais (Brochado, 2025). Além da energia, data centers consomem milhões de litros de água anualmente para refrigeração, o que se torna ainda mais alarmante em áreas que já sofrem com a falta de água (Da

Cruz, 2025). Caso não sejam implementadas estratégias eficazes de mitigação e gestão ambiental, a indústria digital poderá ser responsável por até 8% das emissões globais de carbono até 2030 (Da Cruz, 2025).

Diante disso, torna-se essencial desenvolver estratégias tecnológicas sustentáveis, como a utilização de fontes renováveis para alimentar data centers, a otimização de algoritmos para um consumo energético menor e a adoção de políticas de economia circular no setor eletrônico. Essas ações simbolizam direções viáveis para harmonizar inovação tecnológica e responsabilidade ambiental, fomentando um modelo de transformação digital em sintonia com os princípios do desenvolvimento sustentável apresentados na seção 2.1 (Da Cruz, 2025; Brochado, 2025). É nesse cenário de expansão da infraestrutura digital que os data centers, objeto central desta dissertação, emergem como o principal ponto de tensão entre inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental, conforme se detalha na seção seguinte.

2.3 Datacenters: Conceitos, Características e Sustentabilidade

2.3.1 Data Centers de IA versus Data Centers Convencionais: Distinções Operacionais e Implicações para o Sistema Elétrico

A distinção entre data centers tradicionais e data centers dedicados à Inteligência Artificial vai muito além da nomenclatura: trata-se de infraestruturas com perfis operacionais, de consumo e de impacto territorial substancialmente distintos, e essa diferença é central para a análise de viabilidade proposta nesta dissertação. Os data centers convencionais, voltados ao armazenamento de dados, hospedagem de aplicações e serviços em nuvem, foram projetados para cargas de trabalho previsíveis e relativamente estáveis, com densidade energética por rack tipicamente entre 5 e 15 kW. Os data centers de IA, ao contrário, são concebidos para processamento intensivo e paralelo, com servidores equipados com GPUs (Unidades de Processamento Gráfico) e aceleradores especializados, como TPUs (Tensor Processing Units) e FPGAs (Field-Programmable Gate Arrays), que elevam a densidade energética por rack para faixas de 40 a 100 kW ou mais (Strubell et al., 2019; de Vries, 2023).

Uma distinção operacional crítica reside no perfil de carga: os data centers de IA alternam entre dois regimes completamente diferentes. O treinamento de modelos, fase em que grandes volumes de dados são processados para ajustar os parâmetros de redes neurais, é extremamente intensivo e pode durar semanas ou meses, com consumo de energia próximo à capacidade máxima da instalação. Já a inferência, fase em que o modelo treinado responde a

consultas de usuários, opera com cargas mais variáveis, porém igualmente significativas à medida que a base de usuários cresce. Patterson et al. (2022) estimaram que o treinamento de um único modelo de linguagem de grande escala pode emitir tanto carbono quanto cinco automóveis ao longo de toda a sua vida útil. Essa variabilidade extrema de carga coloca pressões específicas sobre a infraestrutura elétrica local: picos súbitos de demanda podem sobrecarregar subestações e linhas de transmissão, especialmente em regiões cujo sistema elétrico não foi dimensionado para essa intensidade (IEA, 2025). Empreendimentos de grande porte nessa magnitude exigem o fornecimento de energia em condições de alta confiabilidade (uptime de 99,999%), o que demanda não apenas disponibilidade de potência instalada, mas redundância no fornecimento, subestações dedicadas e coordenação com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) — exigências muito mais severas do que as de um data center convencional de mesma capacidade nominal (Mobile Time, 2026; Viana & Scheidegger, 2025). Os dados específicos do caso de Uberlândia relativos a essas exigências são apresentados no Capítulo 4 (Resultados).

2.3.2 Data Centers e Sustentabilidade Ambiental

Os data centers são o núcleo da economia digital e, ao mesmo tempo, um dos principais desafios em relação à sustentabilidade. Essas infraestruturas têm a função de armazenar, processar e distribuir grandes volumes de dados, porém seu funcionamento requer grandes quantidades de energia e água (Prieto et al., 2025). Pesquisas indicam que os maiores centros de dados do mundo consomem energia equivalente a cidades inteiras, o que evidencia a necessidade urgente de adotar práticas mais sustentáveis (Eccard, 2025). O efeito ambiental dos data centers depende da sua localização, da fonte de energia utilizada e das tecnologias de resfriamento adotadas: regiões que utilizam fontes fósseis como base para sua matriz energética apresentam maior pegada de carbono relacionada aos seus centros de dados (Fernandes et al., 2025).

2.3.3 Consumo Energético e Eficiência em Data Centers

Um dos maiores obstáculos à sustentabilidade digital é o alto consumo de energia dos data centers, que funcionam 24 horas por dia, necessitando de energia contínua para o

processamento e armazenamento de dados, direcionada majoritariamente à operação de servidores, sistemas de resfriamento e infraestrutura de rede (Santos & Silva, 2025). A eficiência energética tem sido perseguida por meio de táticas como a virtualização de servidores, o resfriamento com ar externo e a utilização de fontes renováveis, sendo a métrica PUE (Power Usage Effectiveness) um padrão mundial para essa análise (Prieto et al., 2025). Contudo, o PUE mensura apenas a relação entre o consumo total de energia e o consumo computacional; o The Green Grid padronizou métricas complementares igualmente fundamentais: o WUE (Water Usage Effectiveness), que quantifica a pegada hídrica operacional; o CUE (Carbon Usage Effectiveness), que relaciona as emissões de carbono ao consumo de energia de TI; e o ERE (Energy Reuse Effectiveness), que mede a energia reaproveitada externamente ao data center. Para data centers de IA, cujos picos de consumo são mais intensos e variáveis que os convencionais, a adoção conjunta dessas quatro métricas é indispensável para uma avaliação completa da sustentabilidade operacional (The Green Grid, 2011; 2012; Li et al., 2025).

Embora haja avanços em eficiência, o crescimento exponencial da demanda digital compensa os ganhos, levando a um aumento absoluto no consumo de energia, o que demonstra que a eficiência por si só não é suficiente para assegurar a sustentabilidade (Oliveira Nusdeo & Martins, 2025). Empresas como Google e Microsoft têm investido em centros de dados autossustentáveis alimentados por energia solar ou eólica, ainda que essas soluções correspondam a uma fração pequena do total global (Viana & Scheidegger, 2025). Certificações ambientais, como o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), tornaram-se um fator de competitividade, estimulando os data centers a implementarem práticas sustentáveis em sua construção e operação (Pinto & Campos, 2021), sendo fundamental que as políticas regulatórias definam limites, metas de eficiência e penalidades para operações que violam os padrões ambientais globais (Eccard, 2025).

2.3.4 Consumo Hídrico, Sistemas de Refrigeração e Riscos Ambientais

O consumo de água em data centers está diretamente associado aos sistemas de refrigeração necessários para manter os servidores em temperaturas operacionais seguras, aspecto que se torna ainda mais crítico em regiões de clima quente, onde a demanda por resfriamento é intensificada, ampliando o uso de recursos hídricos e a competição com o abastecimento urbano e agrícola (Curtolo & Peixoto, 2025). Estudos indicam que alguns data centers podem consumir milhões de litros de água por dia, sobretudo aqueles que utilizam

sistemas de resfriamento evaporativo, o que tem provocado crescente contestação por parte de comunidades locais em regiões já sujeitas a estresse hídrico (Pigatto & Pigatto, 2024).

Diante dessas críticas, o setor tem buscado alternativas tecnológicas para reduzir a dependência hídrica, como sistemas de refrigeração líquida com reaproveitamento de água e tecnologias de resfriamento a seco, ainda que essas soluções enfrentem limitações relacionadas ao alto custo de implementação (Reis, 2024). Além do volume consumido, é necessário considerar os riscos associados à qualidade da água, uma vez que vazamentos e o descarte inadequado de líquidos de resfriamento podem provocar contaminação de corpos hídricos (Lauande & Lauande, 2025). Algumas empresas globais têm adotado metas de "water positivity", comprometendo-se a devolver ao meio ambiente volumes de água superiores aos que consomem, por meio de iniciativas como o reabastecimento de aquíferos (Viana & Scheidegger, 2025), embora tais iniciativas ainda sejam concentradas em grandes corporações e nem sempre reflitam a realidade de países em desenvolvimento, especialmente no Sul Global, onde o acesso à água potável é desigual (Brochado, 2025).

2.3.5 Casos Internacionais de Data Centers de IA: Tensões Territoriais e Respostas Regulatórias

Diversos estudos internacionais já documentam casos em que a instalação de data centers gerou conflitos com recursos hídricos e energéticos ou provocou respostas regulatórias dos governos. Esses casos fornecem parâmetros de risco, estratégias de mitigação testadas e um repertório de instrumentos de governança que informam a construção do Produto Técnico-Tecnológico proposto nesta dissertação (The Maybe, 2025).

Na Irlanda, o rápido crescimento da infraestrutura de data centers, impulsionado pela presença de grandes empresas de tecnologia como Google, Meta e Microsoft, levou o operador do sistema elétrico (EirGrid) a suspender novas conexões na região de Dublin em 2022, por risco de colapso no fornecimento; em 2023, o regulador estimou que os data centers já respondiam por 21% do consumo elétrico nacional, proporção que poderia dobrar até 2031 (IEA, 2025; The Maybe, 2025). Na Holanda, a moratória imposta em 2022 pelo município de Haarlemmermeer, que abriga o maior hub de data centers da Europa, foi motivada tanto pela pressão sobre a rede elétrica quanto pela competição por espaço com outros usos do solo e pelo aquecimento de corpos d'água (The Maybe, 2025).

No Chile, os conflitos hídricos em torno de data centers instalados no município de Quilicura, na Região Metropolitana de Santiago, tornaram-se emblemáticos: em uma região que já enfrenta estresse hídrico severo, comunidades locais questionaram o uso intensivo de água

para resfriamento, situação particularmente relevante para o Triângulo Mineiro, dada a similaridade hidrológica entre o semiárido andino e a sazonalidade do Cerrado (The Maybe, 2025; Brochado, 2025). Nos Estados Unidos, o estado do Arizona e em particular a região metropolitana de Phoenix, tornou-se palco de intensa disputa pela água entre data centers e a população local, abastecida em grande parte pelo Rio Colorado, cujos níveis de reservatório atingiram mínimas históricas, levando o estado a revisar suas políticas de concessão de água (de Vries, 2023; IEA, 2025). Singapura, por sua vez, impôs uma moratória sobre novas licenças para data centers entre 2019 e 2022, motivada pelas altas temperaturas ambiente e pela escassez de espaço; quando a moratória foi levantada, novos critérios de eficiência (PUE máximo de 1,3 e metas obrigatórias de WUE) passaram a ser exigidos, demonstrando a viabilidade de instrumentos regulatórios baseados em métricas operacionais, exatamente o tipo de abordagem sistematizada pelo METAS-DC, o PTT desta dissertação (The Maybe, 2025).

A revisão desses casos revela padrões recorrentes: (i) a concentração territorial de data centers satura mais rapidamente a infraestrutura do que o planejamento convencional antecipa; (ii) os conflitos hídricos emergem com igual ou maior intensidade que os energéticos, especialmente em contextos de estresse climático; (iii) as respostas regulatórias mais eficazes combinam métricas operacionais obrigatórias, moratórias temporárias e processos participativos de licenciamento; e (iv) a transparência sobre o consumo real dos empreendimentos é condição necessária, mas raramente suficiente, para a construção de confiança social (The Maybe, 2025; IEA, 2025). Esses padrões constituem o repertório comparativo mobilizado na discussão do caso de Uberlândia, apresentada nos Capítulos 4 e 5.

2.3.6 Governança Ambiental Corporativa: ESG, TCFD, GRI, SBTi e GHG Protocol no Contexto de Empreendimentos Tecnológicos

A inserção desta dissertação no campo da Gestão Organizacional exige que a análise de viabilidade de um data center de IA incorpore os referenciais da governança ambiental corporativa, que constituem hoje o arcabouço central pelo qual organizações públicas e privadas respondem às pressões por transparência, responsabilidade e mitigação de riscos socioambientais. Cinco marcos conceituais e normativos são especialmente relevantes para o recorte proposto (Friede et al., 2015).

O conceito de ESG (Environmental, Social and Governance) consolidou-se como a principal lente de avaliação de riscos e oportunidades de sustentabilidade para investidores e gestores corporativos, sendo empresas do setor de tecnologia crescentemente avaliadas por suas

metas de neutralidade de carbono, eficiência hídrica e governança de riscos climáticos (Friede et al., 2015). A Task Force on Climate-related Financial Disclosures (TCFD), criada pelo Financial Stability Board em 2015, estabeleceu um framework para que empresas reportem seus riscos climáticos em quatro dimensões, governança, estratégia, gestão de riscos e métricas e metas, sinalizando que os riscos de disponibilidade de água e energia são reconhecidos como riscos financeiros materiais (Task Force on Climate-Related Financial Disclosures, 2017).

O Global Reporting Initiative (GRI) oferece os padrões mais amplamente adotados para o relato de sustentabilidade, sendo os padrões GRI 303 (Água e Efluentes) e GRI 302 (Energia) especialmente pertinentes ao contexto de data centers (Global Reporting Initiative, 2023). A Science Based Targets initiative (SBTi) estabelece metodologias para que empresas definam metas de redução de emissões consistentes com o limite de 1,5°C do Acordo de Paris, o que, para data centers, implica compromissos com a descarbonização da fonte energética e a redução do consumo hídrico. Finalmente, o GHG Protocol, padrão internacional para inventários corporativos de gases de efeito estufa, define a metodologia de contabilização das emissões diretas (escopo 1), indiretas de energia (escopo 2) e demais emissões indiretas (escopo 3), constituindo a base técnica sobre a qual ESG, TCFD e SBTi são operacionalizados (World Business Council for Sustainable Development & World Resources Institute, 2004). A incorporação dessas referências ao METAS-DC, Produto Técnico-Tecnológico desenvolvido a partir desta dissertação, fortalece sua aderência ao campo da Gestão e amplia seu potencial de uso por gestores corporativos e reguladores.

3 METODOLOGIA

Como o objetivo principal deste trabalho é analisar a viabilidade hídrica e energética associados à implantação de um data center de IA no município de Uberlândia (MG), considerando as condições de oferta e demanda de recursos da região do Triângulo Mineiro, este estudo classifica-se, quanto aos fins, como uma pesquisa descritiva. Segundo Marconi e Lakatos (2017), a pesquisa descritiva tem como propósito observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos sem manipulá-los, buscando conhecer sua natureza, suas características, causas e relações com outros fenômenos; no caso desta dissertação, isso significa descrever a oferta e a demanda hídrica e energética associadas ao empreendimento anunciado, sem intervenção direta sobre as variáveis observadas.

Quanto à abordagem, a pesquisa é de natureza qualitativa. Para Minayo (2021), a pesquisa qualitativa se ocupa de um nível de realidade que não pode ser quantificado, trabalhando com o universo de significados, motivos, aspirações, crenças, valores e atitudes, o que corresponde a um espaço mais profundo das relações e dos processos que não podem ser reduzidos à operacionalização de variáveis; nesta pesquisa, a abordagem qualitativa permite compreender as interdependências entre oferta hídrica, oferta energética e demanda projetada do empreendimento para além de uma leitura puramente numérica.

Quanto ao método de procedimento, utilizou-se um estudo de caso único sobre o empreendimento anunciado para Uberlândia. Yin (2018) define o estudo de caso como uma investigação empírica que analisa um fenômeno contemporâneo em profundidade e em seu contexto de vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes, o que se aplica diretamente ao objeto desta dissertação, uma vez que a viabilidade hídrica e energética do empreendimento não pode ser compreendida isoladamente das condições regionais de oferta.

Em termos de estratégias metodológicas, a pesquisa articula três abordagens complementares: (i) um estudo de caso único sobre o empreendimento anunciado em Uberlândia, tomando como unidade de análise o confronto entre a demanda projetada do empreendimento e a capacidade regional de suporte hídrico e energético, com múltiplas fontes documentais e triangulação de evidências (Yin, 2018); (ii) uma revisão integrativa da literatura sobre sustentabilidade em data centers de IA, com ênfase em métricas operacionais e casos internacionais (Whittemore & Knafl, 2005; Souza et al., 2010); e (iii) análise documental de fontes institucionais oficiais sobre a oferta hídrica e energética regional (Cellard, 2008; Sá-Silva et al., 2009). A triangulação dessas três estratégias sustenta a análise de viabilidade e

fundamenta o Produto Técnico-Tecnológico proposto. Bardin (2016) e Minayo (2021) ressaltam que a análise documental possibilita a compreensão dos significados, implicações e efeitos dos dados, indo além de uma leitura puramente descritiva. Opta-se pela revisão integrativa e não pela revisão sistemática de literatura (RSL) no modelo Kitchenham/Tranfield, por ser esta mais adequada ao mestrado profissional: aborda evidências qualitativas e quantitativas, documentos técnicos e relatórios institucionais, e tem como finalidade informar a prática (Grant & Booth, 2009), exatamente o que se espera neste trabalho.

Em relação aos procedimentos de coleta de dados, este estudo utilizou documentos de fontes institucionais oficiais sobre a oferta hídrica e energética regional, provenientes de diferentes tipos de fontes, conforme sintetizado a seguir.

Quadro 2- Síntese das Fontes Documentais Utilizadas na Coleta de Dados

Tipo de Fonte	Recurso	Instituição / Origem
Relatórios e planos institucionais	Hídrico	ANA, IGAM, CBH-Paranaíba, CBH-Araguari, DMAE, PMSB-Uberlândia
Bases de dados e boletins técnicos	Energético	ANEEL, ONS, CEMIG, BIG
Documentos e comunicados da proponente	Hídrico e energético	Relatórios técnicos e comunicados públicos da empresa proponente; imprensa especializada
Legislação e normas técnicas	Hídrico e energético	Legislação ambiental federal e estadual; normas ABNT; Portaria CAPES nº 60/2019 (aplicável ao PTT)

Fonte: Elaboração própria (2026).

No que diz respeito aos procedimentos técnicos, o estudo está classificado como uma pesquisa documental, uma vez que utiliza principalmente dados secundários provenientes de relatórios institucionais, documentos oficiais, bases estatísticas públicas, legislações ambientais, relatórios técnicos governamentais e estudos de caso já divulgados. Segundo Gil (2019), a pesquisa documental é particularmente adequada para entender fenômenos contemporâneos a partir de registros oficiais e institucionais, permitindo análises históricas, comparativas e prospectivas.

No que diz respeito à avaliação do risco climático associado a data centers de inteligência artificial em todo o mundo, são examinados estudos de casos internacionais documentados na literatura científica e em relatórios de organizações multilaterais, com destaque para os casos da Irlanda, da Holanda, do Chile, do Arizona (EUA) e de Singapura, detalhados no Referencial Teórico (seção 2.3). Essa análise comparativa permite identificar

padrões consistentes de vulnerabilidade climática, particularmente no que diz respeito à falta de água, ondas de calor e pressão sobre os sistemas energéticos regionais, conforme abordado por Masanet et al. (2020) e IPCC (2021).

O estudo sobre o uso de energia verde e práticas sustentáveis em data centers baseia-se na análise de relatórios de sustentabilidade corporativa, pesquisas acadêmicas e documentos técnicos de empresas globais do setor tecnológico. São levados em conta indicadores como a adoção de fontes renováveis, objetivos de neutralidade de carbono e certificações ambientais, alinhando-se às abordagens metodológicas propostas por Gao et al. (2021) e Shehabi et al. (2016).

A análise da disponibilidade de água e energia na região do Triângulo Mineiro, com ênfase no município de Uberlândia, fundamenta-se em dados oficiais fornecidos por instituições como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), o Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), assim como outros relatórios municipais. A utilização dessas fontes possibilita a análise da capacidade de fornecimento regional em relação à demanda extra gerada pela construção de um data center de grande escala, conforme apontam os estudos de planejamento territorial sustentável (Freitas & Soito, 2008).

Em relação à avaliação do consumo de energia e água do novo data center em Uberlândia, são utilizados dados documentais disponíveis publicamente (relatórios técnicos, comunicados da proponente, EIA/RIMA caso existam) e, na sua ausência, estimativas fundamentadas em benchmarks internacionais de PUE e WUE para data centers de IA hyperscale, conforme Patterson et al. (2022), Masanet et al. (2020) e Li et al. (2025). A estimativa é apresentada em três cenários (conservador, intermediário e intensivo), a partir das faixas de referência disponíveis na literatura, o que permite analisar a sensibilidade do balanço oferta-demanda às diferentes hipóteses operacionais e reduz a dependência de dados que possam não estar disponíveis.

Para calcular e interpretar o consumo de energia previsto do projeto, utiliza-se a métrica de eficiência amplamente empregada na literatura internacional, o Power Usage Effectiveness (PUE), sistematizada por Patterson (2008), que permite avaliar a relação entre o consumo total de energia da instalação e o consumo efetivamente utilizado para o processamento computacional. Complementarmente, Ren et al. (2025) propõem a utilização da métrica Water Usage Effectiveness (WUE) como indicador central para mensurar a eficiência hídrica de data centers, definida como a razão entre o volume de água consumido e a energia de TI utilizada

(L/kWh), permitindo avaliar de forma comparável o impacto hídrico operacional de modelos de IA.

Como lente analítica adotada para a interpretação dos dados coletados nesta pesquisa, recorre-se ao conceito de Nexo Água-Energia-Alimentos (Water-Energy-Food Nexus). Formulado de forma sistematizada na Conferência de Bonn de 2011, o nexo parte do reconhecimento de que água, energia e alimentos são interdependentes de maneira não linear: o uso de água afeta a disponibilidade de energia, especialmente em matrizes hidrelétricas; o consumo de energia interfere no ciclo da água, por meio do bombeamento, tratamento e dessalinização; e a produção de alimentos compete por ambos os recursos (Hoff, 2011; Bazilian et al., 2011).

Para a análise proposta nesta dissertação, o nexo água-energia é a lente analítica mais direta: o data center de IA consome energia elétrica em grande parte gerada por hidrelétricas que dependem da disponibilidade hídrica e consome água diretamente para resfriamento, competindo com usos urbanos, agrícolas e industriais já estabelecidos na bacia do Rio Paranaíba. A sazonalidade do Cerrado, com estação seca prolongada entre maio e setembro, agrava o nexo, pois os períodos de menor disponibilidade hídrica coincidem com eventual aumento no consumo de energia para resfriamento e com maior risco de restrições ao fornecimento hidrelétrico (Mariani et al., 2016).

Hoff (2011) propõe que a análise do nexos deve identificar os trade-offs entre setores usuários de recursos, avaliar a eficiência sistêmica e mapear os pontos de maior vulnerabilidade à variabilidade climática. Bazilian et al. (2011) complementam ao argumentar que modelos integrados de nexos permitem visualizar cenários em que ganhos de eficiência em um setor geram cobenefícios em outro; por exemplo, a adoção de sistemas de resfriamento de alta eficiência hídrica (baixo WUE) reduz a demanda sobre a bacia, aliviando pressões sobre a geração hidrelétrica e o abastecimento urbano. Esse referencial fundamenta metodologicamente a elaboração dos cenários de balanço oferta-demanda que constituem o núcleo analítico desta dissertação e do PTT proposto.

A análise dos dados coletados utiliza uma metodologia qualitativa, ligando os resultados empíricos ao referencial teórico estabelecido nos capítulos anteriores, à luz das categorias analíticas do risco climático, da segurança hídrica, da segurança energética, da sustentabilidade tecnológica e do nexos água-energia descrito acima. Para orientar a articulação entre os objetivos específicos, as fontes e as técnicas de análise, o Quadro 3 sintetiza a matriz metodológica do estudo, permitindo ao leitor visualizar de forma integrada o desenho da pesquisa.

A etapa de discussão inclui uma análise crítica dos resultados empíricos em comparação com as evidências encontradas na literatura científica, com o objetivo de identificar pontos de concordância, discordância e lacunas no conhecimento atual. Eisenhardt (1989) sugere essa metodologia dialógica, particularmente em estudos que envolvem estudos de caso e fenômenos complexos situados em contextos institucionais e territoriais específicos.

Quadro 3- Matriz metodológica: objetivos, estratégias e técnicas de análise

Objetivo Específico	Estratégia e Fonte	Técnica de Análise
OE1: Caracterizar a oferta hídrica e energética regional	Análise documental: ANA, ANEEL, ONS, IGAM, CBH-Paranaíba, CBH-Araguari, CEMIG, DMAE, PMSB-Uberlândia	Análise documental descritiva; consolidação de séries temporais
OE2: Estimar a demanda hídrica e energética do empreendimento	Dados públicos do projeto + benchmarks internacionais de PUE e WUE para AI data centers (Patterson et al., 2022; Masanet et al., 2020; Li et al., 2025)	Cálculo de cenários (conservador, intermediário e intensivo) a partir de métricas padrão
OE3: Identificar padrões de risco e estratégias em casos internacionais (Irlanda, Holanda, Chile, Arizona e Singapura)	Revisão integrativa (Scopus, Web of Science, Science Direct); relatórios IEA, Uptime Institute, The Green Grid	Análise de conteúdo temática; categorias a priori: energia, água, clima, governança, mitigação
OE4: Analisar o balanço oferta × demanda	Síntese dos resultados de OE1, OE2 e OE3	Análise comparativa; matriz de risco (probabilidade × impacto); identificação de gargalos e zonas de risco socioambiental
OE5: Elaborar o PTT	Sistematização dos achados dos OE1-OE4 em instrumento aplicável	Estruturação do instrumento (dimensões, indicadores, critérios e passos de aplicação); validação por confronto com literatura e casos internacionais

Fonte: Elaboração própria (2026).

Como desdobramento metodológico, a dissertação inclui a elaboração de um Produto Técnico-Tecnológico (PTT), de acordo com as diretrizes do mestrado profissional. O PTT enquadra-se na tipologia de Relatório Técnico Conclusivo, nos termos da Portaria CAPES nº 60/2019 e dos critérios da Área 27 (aderência, impacto, aplicabilidade, inovação e complexidade), e denomina-se METAS-DC – Método de Avaliação da Sustentabilidade de Data Centers (CAPES, 2019; UFU/PPGGO, 2024).

O METAS-DC sistematiza os conhecimentos e achados desta pesquisa em um instrumento prático de apoio à decisão, estruturado nas dimensões ambiental, energética, hídrica, social e econômica, avaliadas por meio de critérios, evidências documentais e níveis de desempenho. Possui caráter replicável e pode ser utilizado em diferentes localidades e fases do empreendimento, ampliando os conhecimentos obtidos no estudo de caso de Uberlândia para uma avaliação multidimensional da sustentabilidade de data centers.

A elaboração do PTT se baseia na integração dos dados documentais examinados durante a pesquisa, conectando indicadores de consumo, disponibilidade de recursos e riscos climáticos a um conjunto de dimensões fundamentais para o planejamento sustentável de projetos tecnológicos.

Por último, as limitações metodológicas do estudo estão ligadas à dependência de dados secundários e à acessibilidade de informações públicas atualizadas sobre o projeto em questão. No entanto, Gil (2019) e Yin (2018) afirmam que essas limitações não afetam a validade do estudo, pois a triangulação de fontes e a consistência do referencial teórico fortalecem a solidez dos resultados.

4. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa, obtidos a partir da análise documental de fontes institucionais primárias e secundárias, em consonância com a matriz metodológica detalhada no Capítulo 3. A exposição inicia-se com a apresentação do estudo de caso do data center de IA anunciado para Uberlândia, seguida da caracterização da oferta hídrica e energética da região do Triângulo Mineiro, da estimativa da demanda hídrica e energética do empreendimento a partir das métricas Power Usage Effectiveness (PUE) e Water Usage Effectiveness (WUE) e, por fim, do confronto entre oferta e demanda projetada para identificar os potenciais e as vulnerabilidades socioambientais da região, resultados que subsidiarão diretamente a Discussão (Capítulo 5).

4.1 Apresentação do Estudo de Caso - Data Center de IA em Uberlândia

O estudo de caso é baseado na análise da implementação de um Data Center de Inteligência Artificial na cidade de Uberlândia. Em 2025, a Prefeitura Municipal de Uberlândia anunciou a vinda de um Data Center de IA de uma empresa multinacional de tecnologia que

atua nos Estados Unidos, México, Suíça e Brasil. A empresa é especializada em infraestrutura de inteligência artificial (IA), segurança cibernética e computação em nuvem soberana (TI Inside Online, 2025).

Em 2025, a companhia oficializou a aquisição de uma área superior a 1 milhão de m² na região Oeste do município de Uberlândia (MG), às margens da rodovia MGC-497, no trajeto entre Uberlândia e o município de Prata, para a implantação do que a empresa classifica como o maior data center de inteligência artificial da América Latina (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025d; Data Center Dynamics Brasil, 2025).

O investimento inicial anunciado foi da ordem de R\$ 6 bilhões (aproximadamente US\$ 1,2 bilhão), com potencial de aportes adicionais nas fases subsequentes de expansão (Diário do Comércio, 2025; Technology Magazine, 2025). O empreendimento será construído em módulos, segundo metodologia construtiva já empregada pela empresa em projeto similar em Maringá (PR), permitindo a entrada em operação progressiva de blocos operacionais (Diário do Comércio, 2025). Do total de mais de 1 milhão de m² adquiridos, a Technology Magazine (2025) detalha que aproximadamente 630.000 m² correspondem a área edificável e 300.000 m² compõem uma reserva ambiental permanente, incorporada ao desenho arquitetônico do campus, característica apresentada pela empresa como evidência de conciliação entre expansão tecnológica e preservação ambiental (TI Inside Online, 2025; Technology Magazine, 2025). Outras fontes referem-se a uma área construída de 245.000 m² dentro do parque tecnológico planejado (Inforchannel, 2025; Diário do Comércio, 2025).

Em termos de capacidade energética, a primeira fase do empreendimento prevê capacidade instalada de 100 MW, com plano de expansão para até 400 MW (Diário do Comércio, 2025; Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025d; Technology Magazine, 2025). Esses valores constituem o principal parâmetro de entrada para a estimativa de consumo hídrico e energético desenvolvida adiante neste capítulo, na medida em que representam a magnitude declarada publicamente pela empresa e pela administração municipal. A empresa proponente afirma que toda a infraestrutura será alimentada por energia 100% renovável, como parte de seu compromisso corporativo de neutralidade de carbono (“Zero Carbono”), e que o projeto buscará certificação internacional de sustentabilidade (TI Inside Online, 2025; Technology Magazine, 2025). Em entrevista concedida à BNamericas e reproduzida pela Data Center Dynamics Brasil (2025), o presidente executivo da empresa declarou a meta de operar com Power Usage Effectiveness (PUE) de 1,2 ou até 1,1, o que posicionaria o empreendimento de Uberlândia como o primeiro data center de grande porte no Brasil a alcançar PUE inferior a 1,2 (Technology Magazine, 2025). A empresa também menciona o uso de tecnologias de

refrigeração avançadas e de sistemas de baixo consumo de água para resfriamento, sem, contudo, divulgar publicamente uma meta numérica de Water Usage Effectiveness (WUE) específica para o sítio de Uberlândia (Technology Magazine, 2025), lacuna tratada adiante como vulnerabilidade analítica desta pesquisa.

Do ponto de vista da geração de emprego e renda, estima-se a criação de aproximadamente 2.000 postos de trabalho permanentes (diretos e indiretos) nos primeiros três anos de operação, além de centenas de vagas temporárias durante a fase de obras (Diário do Comércio, 2025; Inforchannel, 2025). A empresa relata parcerias com fornecedores globais de infraestrutura crítica como Hitachi, WEG, Siemens, Vertiv, Schneider Electric, Munters e Supermicro, entre outros e com instituições locais, incluindo a Universidade de Uberaba (UNIUBE), voltadas à qualificação de mão de obra especializada em IA, computação em nuvem e cibersegurança (TI Inside Online, 2025; Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025d).

Segundo declarações do prefeito de Uberlândia e do CEO global da empresa proponente por ocasião do anúncio do projeto, a escolha do município se deu, entre outros fatores, à capacidade energética e hídrica da região, à colocação de Uberlândia em rankings nacionais de qualidade de vida e gestão municipal, à disponibilidade de mão de obra qualificada e à proximidade com os principais polos econômicos do Centro-Sul do país (Diário do Comércio, 2025; Inforchannel, 2025). Em particular, a Inforchannel (2025) e a Data Center Dynamics Brasil (2025) destacam que um estudo conjunto entre a empresa proponente e a CEMIG já teria confirmado a capacidade do sistema elétrico regional para suportar a demanda de 100 MW da primeira fase, informação essa muito relevante para a análise de oferta energética desenvolvida adiante neste capítulo. O Quadro 4 sintetiza os principais parâmetros técnicos, financeiros e socioambientais do empreendimento, tal como divulgados pela empresa, pela administração municipal e pela imprensa especializada até a conclusão desta pesquisa.

Quadro 4- Síntese do Empreendimento Anunciado para Uberlândia

Dimensão	Característica declarada
Capacidade energética	100 MW (Fase 1); expansão prevista para até 400 MW
Investimento inicial	R\$ 6 bilhões (aprox. US\$ 1,2 bilhão)
Área do terreno	Superior a 1.000.000 m ² , dos quais aprox. 630.000 m ² edificáveis e 300.000 m ² de reserva ambiental permanente
Localização	Região Oeste de Uberlândia (MG), rodovia MGC-497, sentido Prata

Tipo construtivo	Modular, com entrega progressiva de blocos operacionais
Fonte energética	100% renovável (compromisso corporativo declarado)
Meta de eficiência energética (PUE)	1,1 a 1,2 (meta declarada pela empresa)
Meta de eficiência hídrica (WUE)	Não divulgada publicamente para o sítio de Uberlândia
Empregos estimados	Aprox. 2.000 diretos e indiretos (3 primeiros anos), além de centenas temporários durante as obras
Parceiros de infraestrutura	Hitachi, WEG, Siemens, Vertiv, Schneider Electric, Munters, Supermicro, entre outros

Fonte: Elaboração própria (2026), com base em Diário do Comércio (2025), Ti Inside Online (2025), Technology Magazine (2025), Data Center Dynamics Brasil (2025), Inforchannel (2025) e Prefeitura Municipal de Uberlândia (2025d).

4.2 Análise da Oferta Hídrica e Energética na Região do Triângulo Mineiro

Em atendimento ao Objetivo Específico 1, esta seção caracteriza a oferta regional de energia elétrica e de recursos hídricos a partir de fontes institucionais oficiais, condição estabelecida na Metodologia (Capítulo 3) como requisito de fundamentação empírica da análise de viabilidade proposta. A seção está dividida em duas subseções: a primeira trata da oferta energética, com base em dados da CEMIG, da ANEEL e do ONS; a segunda, da oferta hídrica, com base em dados da ANA, do IGAM, do CBH-Paranaíba e do DMAE.

4.2.1 Oferta Energética: CEMIG, ANEEL e ONS

O sistema elétrico que atende Uberlândia integra o Sistema Interligado Nacional (SIN), sendo a distribuição local operada pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Conforme exposto no Referencial Teórico, a matriz de geração da Bacia do Paranaíba é predominantemente hidrelétrica, com usinas de grande porte como Emborcação, Itumbiara, São Simão, Cachoeira Dourada e Ilha Solteira (Silva et al., 2019; Alves et al., 2023). No nível da distribuição urbana, contudo, a oferta depende diretamente da capacidade de transformação instalada nas subestações locais, parâmetro mais diretamente comparável à demanda projetada do empreendimento RT-One.

Até 2023, a área urbana de Uberlândia era atendida por cinco subestações — Uberlândia 1 (Jardim Patrícia), Uberlândia 2 (Distrito Industrial), Uberlândia 6 (Vigilato Pereira), Uberlândia 7 (Dom Almir/BR-452) e Uberlândia 8 (Shopping Park, esta última inaugurada em dezembro de 2023) —, que juntas somavam capacidade instalada de aproximadamente 350 MVA e atendiam mais de 400 mil clientes (Diário de Uberlândia, 2023). A inauguração da Subestação 8 integrava um programa de investimentos de R\$ 1,35 bilhão da CEMIG na região do Triângulo Mineiro, que previa a construção de 18 novas subestações, das quais duas em Uberlândia, em resposta, entre outros fatores, a um histórico de quedas de energia que motivou audiência pública e cobrança do Ministério Público sobre a concessionária (Diário de Uberlândia, 2023).

Em 2024, a CEMIG concluiu a conexão da Subestação Uberlândia 10 ao sistema elétrico, construída pela ISA CTEEP, beneficiando mais de 1,1 milhão de pessoas em Uberlândia, Uberaba e Araguari, com investimento adicional de R\$ 27 milhões em obras de adequação nas subestações de Miranda, Uberlândia 6 e Uberlândia 8 (CEMIG, 2024). Em 2025, a Prefeitura Municipal de Uberlândia e a CEMIG anunciaram novo aporte de R\$ 160 milhões para a construção de duas subestações adicionais, Uberlândia 11 e Uberlândia 12, alimentadas em 138 kV, com capacidade de transformação de 50 MVA cada e entrega prevista para o primeiro semestre de 2026. Segundo a mesma fonte, a capacidade total instalada nas subestações urbanas do município evoluiria de aproximadamente 300 MVA para 450 MVA, incremento de 50% na oferta energética da cidade (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025c). Observa-se divergência entre os valores de capacidade total relatados por fontes de datas distintas (350 MVA em 2023; base de cálculo de 300 MVA em 2025), divergência que decorre provavelmente de mudanças na configuração da rede e de arredondamentos jornalísticos, reforçando a necessidade de validação direta junto à concessionária na fase de elaboração do PTT.

Em escala estadual, esses investimentos integram o programa Mais Energia da CEMIG, que prevê aporte de R\$ 6,7 bilhões somente em 2026 e a meta de instalar 200 novas subestações em Minas Gerais até 2027, ritmo seis vezes superior ao observado entre 2009 e 2018 (Agência Minas Gerais, 2026). Entre 2021 e 2028, a companhia projeta investimento total de R\$ 35 bilhões no estado, dos quais R\$ 23 bilhões destinados à distribuição, beneficiando mais de 9 milhões de clientes em 774 municípios mineiros (Agência Minas Gerais, 2026). Esse volume de investimento é compatível com declarações da própria RT-One e da Prefeitura de Uberlândia, segundo as quais um estudo conjunto entre a empresa e a CEMIG já teria confirmado a capacidade do sistema para suportar a demanda de 100 MW da primeira fase do data center

(Inforchannel, 2025; Data Center Dynamics Brasil, 2025) embora, até a conclusão desta pesquisa, não tenham sido localizados documentos técnicos públicos detalhando os termos desse estudo, o que constitui lacuna informacional relevante para a análise de viabilidade.

Quadro 5- Capacidade energética instalada e investimentos da CEMIG em Uberlândia e no Triângulo Mineiro (2023–2026)

Período / fonte do investimento	Capacidade ou investimento reportado
2023 – 5 subestações urbanas (UBL 1, 2, 6, 7, 8)	Aprox. 350 MVA instalados; mais de 400 mil clientes atendidos
2023 – Programa regional Triângulo Mineiro	R\$ 1,35 bilhão; 18 novas subestações (2 em Uberlândia)
2024 – Subestação Uberlândia 10 (ISA CTEEP)	Reforço para 1,1 milhão de pessoas (Uberlândia, Uberaba, Araguari); R\$ 27 milhões em obras associadas
2025–2026 – Subestações Uberlândia 11 e 12 (138 kV)	R\$ 160 milhões; 50 MVA cada; capacidade total de aprox. 300 para 450 MVA (+50%)
2026 – Programa Mais Energia (estadual)	R\$ 6,7 bilhões no ano; meta de 200 novas subestações até 2027
2021–2028 – Investimento total CEMIG em MG	R\$ 35 bilhões (R\$ 23 bilhões em distribuição); 9 milhões de clientes; 774 municípios

Fonte: Elaboração própria (2026), com base em Diário de Uberlândia (2023), CEMIG (2024), Prefeitura Municipal de Uberlândia (2025c) e Agência Minas Gerais (2026).

A leitura conjunta desses dados indica que a expansão da oferta energética em Uberlândia está em curso, mas em ritmo e magnitude que precisam ser comparados, na seção 4.4, à demanda projetada do empreendimento RT-One em suas diferentes fases. Adicionalmente, o histórico recente de instabilidade no fornecimento (quedas de energia registradas em 2023) sinaliza que a capacidade nominal das subestações não equivale automaticamente à confiabilidade operacional do sistema, ponto retomado na discussão dos potenciais e vulnerabilidades regionais.

4.2.2 Oferta Hídrica: ANA, IGAM, CBH-Paranaíba, CBH-Araguari e DMAE

A oferta hídrica regional foi caracterizada a partir de duas escalas complementares: a escala da bacia hidrográfica, com base em dados da ANA, do IGAM e do CBH-Paranaíba, CBH-Araguari e a escala do sistema municipal de abastecimento, com base em dados do DMAE.

Em sua porção mineira, a Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba drena área de aproximadamente 70.634 km², respondendo por cerca de 10,5% da vazão mínima (Q7,10) produzida no estado de Minas Gerais, o que a posicionava, segundo o levantamento utilizado pelo Atlas Digital das Águas de Minas, como a quarta maior produção de água em termos de vazões mínimas entre as bacias mineiras (UFV, [2010?]). No recorte estadual, Uberlândia está inserida na unidade PN2 Rio Araguari, vinculada à Bacia do Rio Paranaíba. Os dados históricos do Atlas já indicavam pressões localizadas sobre os recursos hídricos nessa unidade, especialmente relacionadas à intensidade dos usos consumidos. Documentos mais recentes do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari demonstram que essas questões permanecem relevantes para a gestão. Em 2024, processo participativo de planejamento registrou problemas relacionados à escassez, disputas pelo uso da água e elevada demanda para irrigação em diferentes áreas da bacia (CBH Araguari, 2024). Em 2025, o próprio Comitê reconheceu a necessidade de revisão do Plano Diretor de Recursos Hídricos, elaborado em 2008, justamente para atualizar as informações de referência utilizadas no planejamento e na gestão quantitativa e qualitativa dos recursos hídricos (CBH Araguari, 2026).

No nível municipal, o abastecimento de água de Uberlândia é operado pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), autarquia com mais de 50 anos de atuação, reconhecida pelo Instituto Trata Brasil como a segunda cidade com melhor saneamento do país e a primeira de Minas Gerais (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025a). O sistema é sustentado por três Estações de Tratamento de Água (ETAs): a ETA Sucupira, abastecida pelo Rio Uberabinha; a ETA Bom Jardim, abastecida pelo Ribeirão Bom Jardim; e a ETA Capim Branco, abastecida pela represa de Capim Branco, no Rio Araguari, cuja captação remonta a convênio firmado entre a Prefeitura de Uberlândia e a própria CEMIG em 1991 (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025a, 2025b). Em conjunto, as três ETAs têm capacidade declarada para abastecer até 1,5 milhão de habitantes, por meio de rede de distribuição superior a 3.200 km (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025a), capacidade que excede em quase o dobro a população atualmente residente no município, estimada pelo IBGE em 761.835 habitantes em 2025 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2025).

Em termos de produção, o DMAE distribuiu 37.277.955,63 m³ de água tratada apenas no primeiro semestre de 2025, mantendo a eficiência mesmo em cenário nacional de pressão

crescente sobre os recursos hídricos (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025a). Projetando-se essa média para o ano civil, a produção anual aproximada do sistema se situa entre 74,5 e 76,5 milhões de m³, ordem de grandeza compatível com o consumo médio diário por habitante informado pela autarquia, que passou de 273,38 litros/habitante/dia em 2024 para 275,05 litros/habitante/dia em 2025, variação que a própria autarquia descreve como comportamento de consumo equilibrado mesmo durante os meses mais secos (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025b). O DMAE relata ainda que, em 2024, enquanto diversos municípios brasileiros enfrentaram racionamento e desabastecimento por estiagem, Uberlândia manteve fornecimento regular, atribuído pela autarquia ao planejamento estratégico do sistema (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025a). Entre as ações de reforço da segurança hídrica mais recentes, destacam-se o Programa Buriti, de proteção e recuperação de Áreas de Preservação Permanente nas bacias contribuintes, com 292 propriedades cercadas, 7.606 hectares de APP protegidos, 557 mil mudas replantadas e 1.112 barraginhas construídas para infiltração, além de investimentos pontuais em reservação, como o novo Centro de Reservação Grand Ville (6 milhões de litros; R\$ 12,8 milhões) e a ampliação do Centro de Reservação São Jorge (12 milhões de litros; R\$ 9 milhões) (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025b).

Por outro lado, os mesmos relatórios institucionais reconhecem sinais de sazonalidade hídrica: durante o período de estiagem, o DMAE prioriza o uso de motores elétricos em detrimento de turbinas hidráulicas nas ETAs Sucupira e Bom Jardim. Em razão da redução da vazão captada nos mananciais os níveis das represas Bom Jardim e Sucupira recuaram de 3,11 m e 3,04 m em maio para 3,10 m e 3,03 m em junho, segundo dados internos da autarquia (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025b). Esse padrão de sazonalidade é consistente com a caracterização do clima do Cerrado já apresentada no Referencial Teórico, estação seca prolongada entre maio e setembro (Mariani et al., 2016) e será retomado na seção 4.4 como elemento central de vulnerabilidade regional.

Quadro 6- Sistema de abastecimento de água de Uberlândia (DMAE)

Componente	Característica
Estações de Tratamento de Água	ETA Sucupira (Rio Uberabinha); ETA Bom Jardim (Ribeirão Bom Jardim); ETA Capim Branco (Rio Araguari)
Capacidade declarada de atendimento	1,5 milhão de habitantes

Rede de distribuição	Superior a 3.200 km
Produção – 1º semestre de 2025	37.277.955,63 m ³
Produção anual estimada (projeção)	Aprox. 74,5 a 76,5 milhões de m ³ /ano
Consumo médio per capita	273,38 L/hab./dia (2024) para 275,05 L/hab./dia (2025)
Reservação recente	CR Grand Ville (6 milhões de L; R\$ 12,8 milhões); CR São Jorge ampliado (12 milhões de L; R\$ 9 milhões)
Programa de proteção de mananciais	Programa Buriti: 7.606 ha de APP protegidos; 1.112 barraginhas; 557 mil mudas replantadas

Fonte: Elaboração própria (2026), com base em Prefeitura Municipal de Uberlândia (2025a, 2025b) e IBGE (2025).

4.3 Estimativa de Consumo do Empreendimento com Base nas Métricas PUE e WUE

Em atendimento ao Objetivo Específico 2, esta seção estima a demanda hídrica e energética do empreendimento RT-One a partir da aplicação das métricas Power Usage Effectiveness (PUE) e Water Usage Effectiveness (WUE) à capacidade declarada publicamente (100 MW na Fase 1; até 400 MW no pleno desenvolvimento), seguindo a orientação metodológica do Quadro 1 (Capítulo 3).

O PUE é definido como a razão entre a energia total consumida pela instalação (incluindo refrigeração, iluminação e demais cargas não computacionais) e a energia efetivamente consumida pelos equipamentos de Tecnologia da Informação (TI); quanto mais próximo de 1,0, maior a eficiência da instalação (The Green Grid, 2012). O WUE, por sua vez, relaciona o volume anual de água utilizado para refrigeração e controle de umidade, em litros, à energia consumida pelos equipamentos de TI, em quilowatts-hora, sendo expresso em litros por kWh (The Green Grid, 2011). Segundo o Uptime Institute, a média global de PUE em operação situa-se entre 1,57 e 1,58, ao passo que instalações de ponta já alcançam valores inferiores a 1,2 (Kron Digital, 2025). Para o WUE, a média global é de aproximadamente 1,9 litros por kWh, sendo o valor “zero” (resfriamento exclusivamente a ar) inalcançável na maioria dos climas, e instalações consideradas eficientes situando-se na faixa de 0,2 a 0,5 L/kWh (EESI, 2023; Microsoft, 2026).

Para os cálculos desta seção, adotaram-se as seguintes premissas metodológicas: (i) a capacidade contratada divulgada (100 MW e 400 MW) representa a demanda total da

instalação, já incluindo cargas de TI e de infraestrutura de suporte; (ii) aplicou-se fator de utilização (fator de carga) de 80%, compatível com a operação contínua e de alta disponibilidade característica de data centers de IA e computação em nuvem (Shehabi et al., 2016; Jones, 2023); e (iii) foram construídos três cenários sendo eles baixo, médio e alto consumo, combinando diferentes níveis de PUE e WUE, conforme detalhado no Quadro 7. O cenário baixo adota a meta de eficiência declarada pela própria RT-One (PUE 1,2) combinada a WUE otimista de instalações de resfriamento líquido fechado (0,2 L/kWh); o cenário médio adota valores intermediários entre a meta da empresa e a média global (PUE 1,4; WUE 1,0 L/kWh); e o cenário alto adota os valores médios globais relatados pela indústria (PUE 1,6; WUE 1,9 L/kWh), representando cenário conservador caso as metas de eficiência da empresa não sejam plenamente alcançadas na operação real.

A energia elétrica total anual foi calculada multiplicando-se a capacidade declarada (em MW) pelo fator de utilização (80%) e pelo número de horas do ano (8.760 h). A energia consumida pelos equipamentos de TI foi obtida dividindo-se a energia total pelo PUE de cada cenário. O consumo hídrico anual foi obtido multiplicando-se o WUE de cada cenário pela energia de TI correspondente, com conversão de litros para metros cúbicos. Os resultados são apresentados no Quadro 7, tanto para a Fase 1 (100 MW) quanto para o pleno desenvolvimento do empreendimento (400 MW).

Quadro 7- Cenários de consumo energético e hídrico do empreendimento RT-One, segundo as métricas PUE e WUE (fator de utilização de 80%)

Cenário (PUE / WUE)	Energia total – Fase 1 100 MW (GWh/ano)	Água – Fase 1 100 MW (mil m³/ano)	Energia total – Pleno 400 MW (GWh/ano)	Água – Pleno 400 MW (mil m³/ano)
Baixo (PUE 1,2 / WUE 0,2 L/kWh)	700,8	117	2.803,2	467
Médio (PUE 1,4 / WUE 1,0 L/kWh)	700,8	501	2.803,2	2.002
Alto (PUE 1,6 / WUE 1,9 L/kWh)	700,8	832	2.803,2	3.329

Fonte: Elaboração própria (2026), com base nas capacidades declaradas (Diário do Comércio, 2025; Technology Magazine, 2025), na metodologia PUE/WUE (The Green Grid, 2011, 2012) e em parâmetros de referência (Kron Digital, 2025; EESI, 2023; Microsoft, 2026).

Os resultados evidenciam que, independentemente do cenário de eficiência considerado, a energia elétrica total anual da instalação é a mesma, pois decorre diretamente da capacidade contratada e do fator de utilização adotado, e não do PUE, enquanto o consumo de água varia em até sete vezes entre o cenário baixo e o cenário alto, tanto na Fase 1 quanto no pleno desenvolvimento. Esse padrão ilustra, em termos quantitativos, o trade-off entre eficiência energética (PUE) e eficiência hídrica (WUE) já discutido no Referencial Teórico a partir do conceito de Nexso Água-Energia: tecnologias de resfriamento que reduzem o WUE, como sistemas fechados a líquido, tendem a exigir maior consumo elétrico para acionamento de compressores e chillers, ao passo que o resfriamento evaporativo, mais intensivo em água, costuma reduzir a carga elétrica de refrigeração e, conseqüentemente, o PUE (Hoff, 2011; Bazilian et al., 2011; Mariani et al., 2016). Dado que a RT-One declara meta agressiva de PUE (1,1 a 1,2) sem divulgar meta correspondente de WUE, não é possível, com os dados públicos disponíveis, determinar se a empresa pretende perseguir a meta de eficiência energética por meio de tecnologias de baixo consumo hídrico (cenário baixo do Quadro 7) ou por meio de resfriamento evaporativo mais intensivo em água (o que aproximaria o consumo hídrico real dos cenários médio ou alto), ambigüidade que constitui vulnerabilidade analítica relevante, retomada na seção 4.4.

Ainda que o cenário baixo seja tecnicamente factível com tecnologias atualmente disponíveis no mercado (The Green Grid, 2011; Gao et al., 2021), a sazonalidade climática do Cerrado, com temperaturas mais elevadas e menor disponibilidade hídrica concentradas entre maio e setembro, tende a pressionar os sistemas de refrigeração na direção de maior consumo de água ou de energia nos meses mais críticos, de forma análoga ao padrão observado nas próprias Estações de Tratamento de Água do DMAE durante a estiagem (seção 4.2.2). Esse comportamento sazonal recomenda que os cenários do Quadro 7 sejam interpretados como médias anuais, podendo a demanda mensal de pico, principalmente no componente hídrico, superar substancialmente os valores médios apresentados.

4.4 Potenciais e Vulnerabilidades da Região do Triângulo Mineiro: Balanço entre Oferta e Demanda

Em atendimento ao Objetivo Específico 4, esta seção confronta os resultados da caracterização da oferta regional (seção 4.2) com as estimativas de demanda do

empreendimento (seção 4.3), identificando gargalos e zonas de risco socioambiental, conforme a técnica de análise comparativa e matriz de risco prevista no Quadro 3 (Capítulo 3).

No componente energético, a capacidade declarada da Fase 1 do empreendimento (100 MW) corresponde a fração expressiva da capacidade total atualmente instalada nas subestações urbanas de Uberlândia, entre aproximadamente 22% (considerando a base de 450 MVA, já com as subestações em conclusão) e 29% (considerando a base de 350 MVA relatada em 2023), ao passo que o pleno desenvolvimento do empreendimento (400 MW) excederia, isoladamente, a totalidade da capacidade hoje instalada na área urbana do município. Esse confronto numérico evidencia que a viabilidade energética do projeto, sobretudo em suas fases mais avançadas, depende criticamente da execução continuada do cronograma de investimentos da CEMIG tanto o programa regional de R\$ 1,35 bilhão no Triângulo Mineiro quanto o programa estadual Mais Energia (R\$ 6,7 bilhões em 2026; R\$ 35 bilhões até 2028), e não apenas da capacidade já instalada (Diário de Uberlândia, 2023; Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025c; Agência Minas Gerais, 2026).

No componente hídrico, mesmo o cenário alto de consumo do pleno desenvolvimento do empreendimento (aprox. 3,33 milhões de m³/ano, conforme Quadro 7) representaria cerca de 4,4% da produção anual estimada do sistema DMAE (aprox. 75,5 milhões de m³/ano), e o cenário médio equivalente representaria cerca de 2,6%, parcelas que isoladamente não comprometeriam a capacidade declarada do sistema (1,5 milhão de habitantes, quase o dobro da população atual do município). Esse resultado aponta um potencial relevante: a infraestrutura municipal de abastecimento, dimensionada com margem de segurança considerável em relação à população atual, dispõe de folga técnica para absorver, em tese, consumo adicional da magnitude estimada desde que tal consumo seja efetivamente atendido pela rede municipal, o que não está confirmado pelas fontes públicas consultadas.

A análise integrada permite sistematizar os principais potenciais e vulnerabilidades identificados, descritos a seguir.

Entre os potenciais, destacam-se: (i) programa ativo e financeiramente robusto de expansão da rede elétrica, tanto em escala municipal (subestações 10, 11 e 12) quanto regional e estadual (Mais Energia), reduzindo o risco de desabastecimento energético caso os cronogramas anunciados sejam cumpridos (Agência Minas Gerais, 2026; Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025c); (ii) estudo de viabilidade conjunto já realizado entre a RT-One e a CEMIG para a Fase 1 do projeto, indicativo de coordenação prévia entre concessionária e empreendedor (Inforchannel, 2025); (iii) sistema municipal de abastecimento de água reconhecido nacionalmente por sua qualidade e resiliência, inclusive durante o período de

estiagem de 2024, quando outros municípios brasileiros enfrentaram racionamento (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025a); (iv) programas ativos de proteção de mananciais (Programa Buriti) capazes de amortecer, ainda que parcialmente, a variabilidade hidrológica sazonal do Cerrado (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025b); e (v) compromissos corporativos declarados pela RT-One quanto a energia 100% renovável, meta agressiva de PUE e incorporação de área de preservação permanente ao projeto arquitetônico, elementos que, se efetivamente implementados e verificados, alinham o empreendimento aos princípios do Triple Bottom Line discutidos no Referencial Teórico (Elkington, 1997; TI Inside Online, 2025).

Entre as vulnerabilidades, destacam-se: (i) histórico recente e documentado de instabilidade no fornecimento de energia em Uberlândia, anterior aos investimentos em curso, que relativiza a leitura puramente otimista da capacidade nominal das subestações (Diário de Uberlândia, 2023); (ii) magnitude da demanda projetada para o pleno desenvolvimento do empreendimento (400 MW), que excede a capacidade total atualmente instalada na área urbana do município, tornando a viabilidade de longo prazo do projeto dependente da execução ininterrupta de cronograma plurianual de obras sujeito a riscos de atraso, típicos de grandes projetos de infraestrutura; (iii) sinais documentados de pressão localizada sobre os recursos hídricos na bacia do Rio Araguari, onde se insere parte da captação de água de Uberlândia, com registros recentes de conflitos pelo uso, escassez localizada e elevada demanda associada, entre outros usos, à irrigação, circunstâncias que reforçam a necessidade de acompanhamento contínuo da disponibilidade hídrica regional (CBH Araguari, 2024); (iv) sazonalidade hídrica do Cerrado, evidenciada nos próprios dados operacionais do DMAE durante a estiagem, que tende a coincidir com períodos de maior demanda de refrigeração e, portanto, de maior consumo energético e/ou hídrico do data center, configurando sobreposição temporal de riscos (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025b; Mariani et al., 2016); (v) ausência de divulgação pública, até a conclusão desta pesquisa, de meta de WUE específica para o sítio de Uberlândia e da estratégia de captação de água a ser adotada (rede municipal do DMAE versus outorga própria de água bruta), o que impede estimativa mais precisa do impacto hídrico real do empreendimento e constitui lacuna informacional crítica para a análise de viabilidade (Technology Magazine, 2025); e (vi) competição já existente pelo uso dos recursos hídricos na região, associada à presença simultânea de demandas urbanas, agrícolas, industriais e ambientais, inserindo o empreendimento RT-One em um território no qual a gestão da água exige compatibilização entre diferentes usuários, especialmente durante períodos de menor disponibilidade hídrica (CBH Araguari, 2024; ANA, 2025).

O Quadro 8 sintetiza esse balanço, organizando potenciais e vulnerabilidades por dimensão (energética e hídrica) e relacionando-os aos respectivos indicadores quantitativos discutidos nesta seção.

Quadro 8- Síntese do balanço entre oferta e demanda: potenciais e vulnerabilidades por dimensão

Dimensão	Indicador-síntese	Principal potencial	Principal vulnerabilidade
Energética	Fase 1 (100 MW) = aprox. 22% a 29% da capacidade urbana atual; Pleno (400 MW) excede a capacidade urbana atual	Programa de investimentos ativo (Mais Energia; R\$ 1,35 bi regional) e estudo de viabilidade CEMIG–RT-One já realizado	Histórico de instabilidade no fornecimento; dependência de execução ininterrupta de cronograma plurianual
Hídrica	Cenário médio (pleno) = aprox. 2,6% da produção anual do DMAE; cenário alto (pleno) = aprox. 4,4%	Sistema DMAE com folga técnica (1,5 milhão hab. de capacidade vs. 761.835 hab. atuais) e resiliência comprovada na estiagem de 2024	Pressão hídrica já documentada na sub-bacia do Araguari; sazonalidade do Cerrado; ausência de meta pública de WUE e de estratégia de captação definida

Fonte: Elaboração própria (2026).

Em síntese, os resultados apresentados neste capítulo indicam que a região do Triângulo Mineiro, e Uberlândia em particular, reúne condições de oferta hídrica e energética compatíveis, em termos agregados, com a demanda projetada do empreendimento RT-One principalmente na Fase 1 (100 MW), mas que essa compatibilidade depende de fatores cuja confirmação extrapola os dados secundários disponíveis nesta pesquisa: a execução tempestiva dos investimentos anunciados pela CEMIG, a estratégia efetiva de captação de água do empreendimento e o desempenho real, em operação, das metas de eficiência declaradas pela

RT-One. Esses resultados serão retomados e interpretados à luz do Referencial Teórico no Capítulo 5 (Discussão) e fundamentarão diretamente as dimensões e os critérios de avaliação do METAS-DC, instrumento proposto como Produto Técnico-Tecnológico (Capítulo 7).

5. DISCUSSÃO

Este capítulo retoma os resultados apresentados no Capítulo 4, o perfil do empreendimento RT-One, a caracterização da oferta hídrica e energética regional, as estimativas de consumo construídas a partir das métricas PUE e WUE e o balanço entre potenciais e vulnerabilidades socioambientais e os interpreta à luz do Referencial Teórico (Capítulo 2), com o objetivo de qualificar o debate público sobre viabilidade e disputa por recursos associado à instalação de um data center de inteligência artificial em Uberlândia. Cabe registrar, de início, que não é objetivo desta discussão emitir um juízo conclusivo sobre a viabilidade ou inviabilidade do empreendimento, questão que, como já indicado nas limitações metodológicas do Capítulo 3, depende de dados operacionais que ainda não existem nesta fase pré-operacional do projeto, mas sim oferecer à sociedade uberlandense e aos gestores públicos e privados envolvidos uma leitura informativa e tecnicamente fundamentada sobre os termos em que essa disputa por recursos se configura. A discussão está organizada em quatro seções complementares. A seção 5.1 examina a relação entre a abundância hídrica e energética agregada, identificada na seção 4.2, e os episódios de escassez localizada ou sazonal associados, no Brasil e em outros países, à instalação de data centers de grande porte. A seção 5.2 confronta as estimativas oficiais de consumo da Prefeitura, da empresa e desta dissertação (Quadro 9), com os dados apurados pelo inquérito civil do Ministério Público Federal (MPF), recalculando cenários de WUE a partir dessas novas informações. A seção 5.3 retoma a distinção entre data centers convencionais e data centers de IA, discutida no Referencial Teórico, enfatizando como os picos de consumo de racks com GPUs de alta densidade reconfiguram os termos da disputa regional por recursos. Por fim, a seção 5.4 discute se o empreendimento RT-One reflete uma aplicação homogênea do Triple Bottom Line (Elkington, 1997) entre os pilares lucro, social e meio ambiente, ou se há sobreposição do pilar econômico em detrimento das demais dimensões.

5.1 Abundância Regional e Escassez Localizada na Disputa por Recursos Hídricos e Energéticos em Perspectiva

Os resultados do Capítulo 4 evidenciam, em termos agregados, um quadro de relativa abundância regional: o sistema DMAE produz entre 74,5 e 76,5 milhões de m³ de água tratada por ano e possui capacidade declarada para atender 1,5 milhão de habitantes para a cidade, o que é quase o dobro da população residente em Uberlândia, enquanto a matriz energética do Triângulo Mineiro é predominantemente hidrelétrica e vem recebendo aportes da ordem de R\$ 1,35 bilhão (regional) e R\$ 6,7 bilhões (estadual, apenas em 2026) para expansão da capacidade de distribuição (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025a; Agência Minas Gerais, 2026). Essa leitura agregada, contudo, convive com sinais igualmente documentados de vulnerabilidade localizada e sazonal. Na bacia do Rio Araguari, documentos recentes de planejamento registram problemas relacionados a conflitos pelo uso da água, escassez localizada e elevada demanda para irrigação, enquanto a própria necessidade de atualização do Plano Diretor de Recursos Hídricos evidencia a importância do acompanhamento contínuo das condições de oferta e demanda da bacia (CBH Araguari, 2024, 2026). A sazonalidade do Cerrado, com estação seca prolongada entre maio e setembro pressiona simultaneamente a disponibilidade hídrica e a demanda energética para resfriamento (Mariani et al., 2016). Rockström et al. (2009) oferecem uma chave de leitura útil para esse aparente paradoxo: a noção de limites planetários e regionais de uso de recursos não opera de forma homogênea no espaço e no tempo, de modo que indicadores agregados de disponibilidade como a produção anual do DMAE ou a capacidade instalada da CEMIG podem mascarar pontos de saturação localizada, sazonal ou distributiva que só se tornam visíveis quando a análise é desagregada por sub-bacia, por período do ano ou por categoria de usuário.

Essa tensão entre abundância agregada e escassez localizada é especialmente relevante para data centers de IA, cuja narrativa corporativa dominante sustentada por termos como “computação em nuvem”, “infraestrutura elástica” e “capacidade ilimitada” tende a obscurecer o caráter profundamente material, territorial e finito dos recursos que sustentam essa infraestrutura. Crawford (2021) argumenta que a inteligência artificial, apesar de frequentemente representada como um fenômeno imaterial e abstrato, depende de uma cadeia extensa de extração mineral, consumo energético e hídrico e ocupação territorial concentrada, cujos custos socioambientais recaem, em proporção desigual, sobre as comunidades situadas no entorno imediato das instalações físicas e não sobre os usuários finais dos serviços digitais, geograficamente dispersos e em geral alheios à origem desses recursos. No caso do empreendimento RT-One, essa dissociação entre a escala global do serviço prestado (computação em nuvem, IA generativa, cibersegurança) e a escala estritamente local dos recursos consumidos (a bacia do Rio Paranaíba, o sistema DMAE, a rede de distribuição da

CEMIG) é precisamente o que torna a discussão sobre abundância e escassez uma questão de justiça distributiva, e não apenas de suficiência técnica agregada.

O caso do data center anunciado para Caucaia (CE) por exemplo, vinculado a uma plataforma global de redes sociais, ilustra de forma direta esse tipo de conflito em contexto brasileiro. Segundo Brochado (2025), a região do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, onde o empreendimento está previsto, é historicamente marcada por estresse hídrico e por disputas entre o abastecimento industrial e o abastecimento de comunidades rurais e indígenas, que já enfrentam restrições de acesso à água potável independentemente da chegada do data center; a autora descreve esse cenário como uma fronteira entre a “revolução tecnológica” anunciada pelos governos e o risco de agravamento do que chama de “ecocídio” regional. O caso cearense não é isolado: cidades da Região Metropolitana de São Paulo como Vinhedo e Barueri, que abrigam data centers de grande porte da Ascenty e da Scala, respectivamente, conviveram em 2024 e 2025 com rodízio de abastecimento e redução de pressão na rede de água atribuídos pelas concessionárias locais à necessidade de “recuperação dos mananciais”, ainda que os bairros onde se concentram os data centers não tenham sido, segundo mapeamento da própria prefeitura de Vinhedo, diretamente afetados pelos cortes uma assimetria espacial que, por si só, já configura uma forma de disputa distributiva por recursos entre usos industriais e usos residenciais do mesmo sistema de abastecimento.

Em escala internacional, o padrão se repete com variações de intensidade. Nos Estados Unidos, levantamento do InfoMoney (2026) documenta que um data center da Meta no Condado de Newton, no estado da Geórgia, teria afetado poços particulares de famílias vizinhas, obrigando-as a transportar água por meios próprios e a substituir eletrodomésticos danificados pelo acúmulo de sedimentos na rede hídrica local, um caso em que a disputa por recursos se traduziu, de forma concreta, na perda parcial e localizada de acesso à água por parte da população residente no entorno do empreendimento. No mesmo levantamento, os data centers da Google na cidade de The Dalles, no Oregon, município de aproximadamente 16 mil habitantes, consumiram, em 2021, o equivalente a cerca de um quarto de todo o abastecimento de água da cidade, proporção que a empresa buscou manter em sigilo por meio de disputa judicial contra um jornal local que solicitou os dados via lei de acesso à informação (InfoMoney, 2026). Em ambos os casos, a constatação do problema partiu de moradores que notaram alterações na pressão ou na qualidade do abastecimento e não de mecanismos institucionais de monitoramento preventivo, padrão que ecoa diretamente a lacuna de transparência sobre estratégia de captação de água já identificada na seção 4.4 desta dissertação para o caso de Uberlândia.

A leitura conjunta desses casos não autoriza a conclusão de que o empreendimento RT-One necessariamente reproduzirá, em Uberlândia, os mesmos padrões de conflito distributivo observados em Caucaia, em Newton County ou em The Dalles, pois a aplicabilidade dessas experiências depende de variáveis específicas, como o regime de outorga de água bruta, a robustez institucional do DMAE e o cumprimento efetivo dos cronogramas de investimento da CEMIG, fatores já discutidos na seção 4.4. O que esses casos permitem afirmar, com mais segurança, é que a coexistência entre indicadores agregados de abundância e episódios localizados ou sazonais de escassez não é uma anomalia, mas um padrão recorrente na literatura internacional sobre data centers (Curtolo; Peixoto, 2025; Pigatto; Pigatto, 2024), e que a ausência de mecanismos de monitoramento transparente e de divulgação pública de metas quantificáveis, como a meta de WUE ainda não divulgada pela RT-One para o sítio de Uberlândia (seção 4.1) pode dificultar a identificação antecipada e a gestão de situações localizadas de pressão ou disputa por recursos. Essa constatação justifica, metodologicamente, o exame mais detido das estimativas de consumo realizado na seção a seguir, que confronta os dados oficiais com os dados levantados pelo inquérito civil do Ministério Público Federal.

5.2 Discrepância entre as Estimativas Oficiais de Consumo e o Inquérito Civil do Ministério Público Federal

A seção 4.3 desta dissertação estimou, a partir da capacidade declarada do empreendimento (100 MW na Fase 1; até 400 MW no pleno desenvolvimento) e de três cenários de eficiência (PUE de 1,2 a 1,6; WUE de 0,2 a 1,9 L/kWh), que o consumo energético total da Fase 1 seria de 700,8 GWh/ano, com consumo hídrico variando entre 117 mil e 832 mil m³/ano conforme o cenário de eficiência efetivamente alcançado (Quadro 7). Essas estimativas foram construídas a partir de parâmetros públicos à partir da capacidade contratada divulgada pela empresa e pela Prefeitura (Diário do Comércio, 2025; Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025d) e a meta de PUE declarada pela própria RT-One (1,1 a 1,2) (Technology Magazine, 2025), mas, como já registrado na seção 4.1, a empresa não divulgou publicamente, até a conclusão desta pesquisa, uma meta numérica de WUE para o sítio de Uberlândia, lacuna que motivou a construção de três cenários alternativos, e não de uma estimativa única.

Paralelamente à tramitação administrativa do projeto junto à Prefeitura, o Ministério Público Federal (MPF) instaurou inquérito civil para apurar possíveis danos ambientais associados à implantação do data center em Uberlândia, no âmbito de uma investigação mais ampla sobre projetos de data centers de IA em diferentes cidades brasileiras (Aos Fatos, 2026).

Segundo a apuração da agência de checagem Aos Fatos, o procurador responsável destacou que, de acordo com informações veiculadas pela imprensa e não com estudo técnico submetido pela própria empresa, o empreendimento consumiria energia elétrica equivalente à de 1,6 milhão de residências; o inquérito solicitou formalmente à RT-One informações detalhadas sobre o consumo de água e energia do estabelecimento, sem que houvesse, até a conclusão da reportagem consultada, registro de resposta da empresa. A única manifestação técnica obtida no âmbito do inquérito partiu da CEMIG, que informou ter realizado levantamento próprio segundo o qual o sistema elétrico regional apresenta condições técnicas adequadas para absorver a carga adicional solicitada pelo empreendimento, sem comprometer a qualidade e a continuidade do fornecimento local (Aos Fatos, 2026), manifestação consistente com os dados de investimento em expansão da rede já discutidos na seção 4.2.1, mas que não substitui a divulgação, pela própria RT-One, de seus parâmetros reais de consumo de água e energia. A peça do inquérito também recuperou um precedente relevante do mesmo grupo empresarial em Maringá (PR): segundo a apuração, a empresa admitiu, naquele município, a possibilidade de captar água do subsolo para o resfriamento do data center (Aos Fatos, 2026), exatamente a mesma ambiguidade sobre estratégia de captação (rede municipal do DMAE versus outorga própria de água bruta) já identificada como lacuna informacional crítica na seção 4.4 desta dissertação para o caso de Uberlândia.

Até a conclusão desta pesquisa, não foram localizadas nas fontes públicas consultadas, incluindo os canais oficiais de comunicação da Prefeitura Municipal de Uberlândia já citados ao longo do Capítulo 4, manifestações que confirmassem ou contestassem expressamente as informações levantadas pelo inquérito civil do MPF. Essa ausência de posicionamento público não permite, por si, qualquer inferência sobre a veracidade dos dados apurados pelo Ministério Público nem sobre eventual omissão deliberada por parte do poder municipal; é possível, por exemplo, que o trâmite do inquérito ainda não tenha exigido manifestação formal da Prefeitura, ou que tal manifestação exista em canal não indexado pelas fontes consultadas nesta pesquisa. De toda forma, o fato relevante para esta discussão é que, na ausência de uma posição pública conciliando os dois conjuntos de informação, a sociedade uberlandense passa a dispor de duas narrativas institucionais paralelas e não reconciliadas sobre a magnitude do consumo do empreendimento, a da Prefeitura e da empresa, baseada na capacidade contratada em megawatts por fase do projeto, e a do inquérito do MPF, expressa em uma métrica distinta (residências-equivalentes), o que por si constitui um obstáculo à transparência informacional à sociedade Uberlandense, independentemente de qual das duas estimativas se revele, no futuro, mais precisa.

A estimativa de “1,6 milhão de residências” citada no inquérito, embora não tenha origem em metodologia tecnicamente explicitada nas fontes consultadas, permite um exercício de ordem de grandeza relevante para esta discussão. O consumo médio mensal por unidade consumidora residencial no Brasil varia, segundo a Empresa de Pesquisa Energética, entre aproximadamente 136 kWh/mês (Região Nordeste) e 220 kWh/mês (Região Norte), conforme dados regionais do consumo médio por consumidor (CMC) residencial (Empresa de Pesquisa Energética [EPE], 2025). Adotando-se, de forma conservadora, um parâmetro próximo ao limite inferior dessa faixa de 150 kWh/mês, a cifra citada no inquérito equivaleria a um consumo elétrico anual de aproximadamente 2.880 GWh/ano (1,6 milhão de residências $\times$ 150 kWh/mês $\times$ 12 meses). Esse valor, mesmo na hipótese mais conservadora, supera o próprio cenário de pleno desenvolvimento do empreendimento (400 MW), cuja energia total anual foi estimada em 2.803,2 GWh/ano no Quadro 9 e equivale a mais de quatro vezes a energia total estimada para a Fase 1 atualmente em licenciamento (700,8 GWh/ano). Esse achado sugere uma possível discrepância de escala entre o discurso institucional, que enfatiza a Fase 1 do projeto como parâmetro de referência para a aprovação ambiental e hídrica em curso, e a magnitude de consumo que parece estar implícita, ainda que sem explicitação metodológica, na própria fundação do inquérito do Ministério Público Federal.

A partir desse exercício de ordem de grandeza, é possível recalcular os cenários de consumo hídrico segundo a mesma metodologia PUE/WUE aplicada na seção 4.3 (The Green Grid, 2011, 2012), substituindo-se a energia total da Fase 1 (700,8 GWh/ano) pela energia total implícita no inquérito do MPF (aproximadamente 2.880 GWh/ano). O Quadro 9 apresenta esse recálculo, comparando-o com o cenário de pleno desenvolvimento (400 MW) já apresentado no Quadro 8.

Quadro 9- Cenários recalculados de consumo hídrico a partir da estimativa do inquérito civil do Ministério Público Federal (MPF), em comparação com o cenário de pleno desenvolvimento (400 MW)

Cenário (PUE / WUE)	Energia total estimada – Inquérito MPF (GWh/ano)	Água estimada – Inquérito MPF (mil m³/ano)	Água – Pleno 400 MW (Quadro 7) (mil m³/ano)	Varição em relação ao Pleno (%)
Baixo (PUE 1,2 / WUE 0,2 L/kWh)	2.880,0	480	467	+2,8%

Médio (PUE 1,4 / WUE 1,0 L/kWh)	2.880,0	2.057	2.002	+2,7%
Alto (PUE 1,6 / WUE 1,9 L/kWh)	2.880,0	3.420	3.329	+2,7%

Fonte: Elaboração própria (2026), com base nas estimativas do inquérito civil do Ministério Público Federal (Aos Fatos, 2026), nos dados de consumo residencial da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025) e na metodologia PUE/WUE aplicada no Quadro 7 desta dissertação (The Green Grid, 2011, 2012).

Os resultados do Quadro 9 revelam um padrão proporcional: em todos os três cenários de eficiência, o consumo hídrico recalculado a partir da magnitude implícita no inquérito do MPF supera o cenário de pleno desenvolvimento (400 MW) já projetado nesta dissertação em aproximadamente 2,7% a 2,8%, variação essa que decorre diretamente da diferença entre as duas estimativas de energia total (2.880 GWh/ano versus 2.803,2 GWh/ano), e não dos parâmetros de PUE ou WUE aplicados, que permanecem idênticos aos do Quadro 7. Esse resultado reforça a hipótese de que a magnitude de consumo subjacente à fundação do inquérito civil se aproxima mais do cenário de pleno desenvolvimento da RT-One do que da Fase 1 atualmente em processo de licenciamento ambiental e hídrico junto aos órgãos municipais.

Esse confronto de estimativas ilustra, de forma concreta, um problema mais geral discutido por Mytton (2021) na literatura técnica sobre consumo hídrico de data centers: a comparabilidade entre diferentes fontes de dados é sistematicamente prejudicada pela ausência de padronização metodológica e de transparência sobre o que exatamente está sendo medido, se o consumo total da instalação, o consumo exclusivo dos sistemas de resfriamento, ou uma estimativa indireta baseada em proxies como a capacidade contratada. No caso de Uberlândia, a Prefeitura e a empresa comunicam a demanda em megawatts por fase do projeto, a CEMIG responde ao inquérito em termos de capacidade técnica do sistema de distribuição, e o inquérito do MPF expressa a estimativa em residências-equivalentes, três métricas que não são diretamente conversíveis sem premissas adicionais, como as construídas neste exercício, e cuja falta de padronização constitui, por si, mais um elemento de risco informacional para a sociedade uberlandense, que carece de um parâmetro único e oficial para acompanhar a magnitude real do empreendimento ao longo de suas fases de implantação.

5.3 Picos de Consumo em Racks de Alta Densidade e a Disputa por Recursos entre Data Centers de IA e Convencionais

O Referencial Teórico desta dissertação (seção 2.3.1) já estabeleceu que a distinção entre data centers convencionais e data centers de inteligência artificial não é meramente nominal, mas reflete perfis operacionais e de consumo substancialmente distintos. Enquanto os data centers convencionais destinados a armazenamento de dados, hospedagem de aplicações e serviços em nuvem operam com densidade energética por rack tipicamente entre 5 e 15 kW e cargas de trabalho relativamente previsíveis, os data centers de IA empregam servidores equipados com GPUs e aceleradores especializados (TPUs, FPGAs) que elevam a densidade energética por rack para a faixa de 40 a 100 kW ou mais (Strubell et al., 2019; de Vries, 2023). Essa diferença de densidade não é um detalhe técnico menor: ela determina diretamente a intensidade da disputa por recursos energéticos e hídricos em escala local, pois um mesmo espaço físico de data center passa a demandar um volume de energia e, consequentemente, de água de resfriamento muito superior ao que demandaria caso operasse com a tecnologia convencional.

Além da densidade média mais elevada, os data centers de IA apresentam um perfil de carga bimodal que amplia a complexidade da disputa por recursos. A fase de treinamento de modelos de aprendizado de máquina, que pode durar semanas ou meses, opera com consumo próximo à capacidade máxima da instalação de forma contínua, enquanto a fase de inferência, embora menos intensiva por consulta individual, tende a crescer proporcionalmente à base de usuários do serviço. Patterson et al. (2022) estimam que o treinamento de um único modelo de linguagem de grande escala pode emitir tanto carbono quanto cinco automóveis ao longo de toda a sua vida útil, uma magnitude que, transposta para o consumo hídrico associado ao resfriamento dessas cargas computacionais, ajuda a explicar por que pesquisas recentes identificam os data centers de IA como uma categoria de consumo hídrico qualitativamente distinta da dos data centers tradicionais (Li et al., 2025). Essa variabilidade extrema de carga e não apenas o volume médio anual de consumo, que é a métrica utilizada no Quadro 8 desta dissertação, constitui um elemento de risco adicional, pois picos súbitos de demanda podem sobrecarregar subestações e sistemas de resfriamento dimensionados para uma carga média, e não para o pico (IEA, 2025).

Para o caso de Uberlândia, essa distinção tem implicações diretas sobre a forma como a disputa por recursos deve ser monitorada. Reportagem do Mobile Time (2026) já registrou que o empreendimento RT-One deverá contar com subestação dedicada, em razão das exigências de confiabilidade características de data centers de IA, uptime de 99,999%, redundância no fornecimento e coordenação direta com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), muito mais severas do que as de um data center convencional de mesma capacidade nominal (Viana &

Scheidegger, 2025). Essa exigência de infraestrutura dedicada é, em si, um indicador indireto da intensidade da disputa por recursos: um data center convencional de 100 MW poderia, em tese, ser absorvido de forma mais gradual pela rede de distribuição já existente, ao passo que um data center de IA da mesma capacidade nominal demanda investimento específico e coordenação regulatória adicional, exatamente o tipo de investimento (Subestações 11 e 12, programa Mais Energia) já identificado na seção 4.2.1 como condição crítica, e não automática, para a viabilidade energética do projeto.

Um aspecto pouco explorado na literatura consultada, mas relevante para o caso de Uberlândia, é a possível coincidência temporal entre os picos de consumo característicos de data centers de IA concentrados nas fases de treinamento intensivo de modelos, que podem ou não estar alinhadas ao calendário climático local e os períodos de maior estresse hídrico e energético do Cerrado, concentrados entre maio e setembro (Mariani et al., 2016). Caso o empreendimento opere, na prática, com picos de treinamento sobrepostos à estação seca regional, o nexo água-energia discutido por Hoff (2011) e Bazilian et al. (2011) se manifestaria de forma agravada: o aumento de demanda elétrica para resfriamento ocorreria justamente no período de menor disponibilidade hídrica para geração hidrelétrica e para abastecimento urbano, ampliando a pressão sobre um sistema que, como discutido na seção 4.2.2, já opera com margens reduzidas durante a estiagem (priorização de motores elétricos sobre turbinas hidráulicas nas ETAs do DMAE). Essa possibilidade não pode ser confirmada ou descartada com os dados secundários disponíveis nesta pesquisa, mas constitui um indicador adicional a ser monitorado por meio do METAS-DC, instrumento de avaliação proposto como Produto Técnico-Tecnológico (Capítulo 7).

A distinção entre data centers convencionais e data centers de IA, portanto, não é apenas uma questão de classificação técnica: ela reconfigura os termos em que a disputa regional por recursos hídricos e energéticos deve ser compreendida e monitorada, exigindo atenção a picos de demanda, à coordenação regulatória dedicada e à possível sobreposição temporal com a sazonalidade climática do Cerrado. Essa reconfiguração técnica tem, por sua vez, implicações diretas sobre a forma como o empreendimento RT-One equilibra ou deixa de equilibrar os três pilares do Triple Bottom Line, questão discutida na seção a seguir.

5.4 Equilíbrio entre os Pilares do Triple Bottom Line no Caso do Empreendimento RT-One

O conceito de Triple Bottom Line, formulado por Elkington (1997) a partir da articulação entre os pilares lucro (profit), pessoas (people) e planeta (planet), oferece a lente analítica mais direta para examinar se o empreendimento RT-One distribui de forma equilibrada seus compromissos econômicos, sociais e ambientais, ou se há sobreposição de um pilar sobre os demais. Complementarmente, a teoria dos stakeholders de Freeman (1984) contribui para essa análise ao deslocar o foco da avaliação corporativa exclusivamente dos acionistas (shareholders) para o conjunto mais amplo de partes interessadas afetadas pela operação de uma organização, no caso do empreendimento de Uberlândia, não apenas investidores e parceiros de infraestrutura, mas também a população residente no entorno, os usuários do sistema DMAE e da rede CEMIG, e as gerações futuras potencialmente afetadas pela alocação atual de recursos hídricos e energéticos finitos.

O pilar econômico do empreendimento é sustentado por dados quantitativos específicos e consistentes entre múltiplas fontes: investimento inicial de R\$ 6 bilhões, com potencial de aportes adicionais (Diário do Comércio, 2025; Technology Magazine, 2025); capacidade energética contratada de 100 MW na Fase 1, com expansão prevista para até 400 MW (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2025d); e meta declarada de eficiência energética (PUE) entre 1,1 e 1,2, o que posicionaria o empreendimento como o primeiro data center de grande porte no Brasil a alcançar PUE inferior a 1,2 (Technology Magazine, 2025). Esses números são divulgados de forma consistente em comunicados da empresa, da Prefeitura e da imprensa especializada, e permitiram, inclusive, a construção dos cenários quantitativos detalhados no Capítulo 4 desta dissertação, o que evidencia, por si, o grau de precisão e verificabilidade do pilar econômico em comparação com os demais.

O pilar social, em contraste, é sustentado majoritariamente por estimativas de menor precisão e por compromissos não verificáveis com os dados secundários disponíveis. A empresa estima a criação de aproximadamente 2.000 postos de trabalho permanentes nos primeiros três anos de operação (Diário do Comércio, 2025; Inforchannel, 2025), número que, segundo análise do economista Lourenço Galvão Diniz Faria, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), destoa do padrão observado internacionalmente em data centers de IA, cuja regra de referência aproximada é de um posto de trabalho permanente por megawatt de capacidade instalada, o que para os 100 MW da Fase 1 do empreendimento, resultaria em algo da ordem de 100 empregos diretos, e não 2.000 (Comunica UFU, 2025). O mesmo economista observa que termos amplamente utilizados na comunicação institucional do projeto, “fontes renováveis de energia”, “tecnologia de ponta”, “baixo consumo de água”, são qualitativamente vagos e não informam à sociedade quais serão, de fato, os impactos reais do empreendimento, problema que se agrava

justamente no contexto de estiagem prolongada que caracteriza o regime climático regional (Comunica UFU, 2025). Essa discrepância entre a precisão do pilar econômico e a fragilidade verificável do pilar social é, em si, um indicador da assimetria de tratamento entre as dimensões do Triple Bottom Line no caso analisado.

O pilar ambiental, por sua vez, é apresentado por meio de compromissos majoritariamente declaratórios: energia 100% renovável, neutralidade de carbono (“Zero Carbono”), incorporação de aproximadamente 300 mil m² de reserva ambiental permanente ao desenho arquitetônico do campus, e tecnologias de refrigeração descritas de forma genérica como avançadas e de baixo consumo hídrico (TI Inside Online, 2025; Technology Magazine, 2025). Contudo, como já registrado na seção 4.1 e retomado na seção 5.2 desta discussão, a empresa não divulgou, até a conclusão desta pesquisa, uma meta numérica de WUE para o sítio de Uberlândia, lacuna qualitativamente distinta da precisão observada no pilar econômico, onde a empresa comunica valores específicos de investimento, capacidade em megawatts e metas de PUE. Essa ausência de indicador quantificável para o consumo hídrico é, justamente, o tipo de lacuna informacional que motivou a abertura do inquérito civil pelo Ministério Público Federal discutido na seção 5.2 (Aos Fatos, 2026), e ilustra como a precisão do discurso ambiental do empreendimento se concentra nos compromissos de fácil verificação fotográfica ou arquitetônica (a área de reserva ambiental, visível e mensurável em mapas), e não nos indicadores operacionais mais diretamente associados à disputa por recursos discutida nesta dissertação (consumo hídrico real de resfriamento).

A comparação entre os três pilares permite uma resposta qualificada à pergunta que orienta esta seção: não há, no caso do empreendimento RT-One em Uberlândia, plena homogeneidade no tratamento informacional dos pilares lucro, social e meio ambiente do Triple Bottom Line. O pilar econômico é sustentado por dados quantitativos, específicos e verificáveis entre múltiplas fontes; os pilares social e ambiental, por compromissos majoritariamente declaratórios, projeções não verificadas e ausência recorrente de metas quantificáveis, padrão que, em contexto distinto, ecoa a constatação de Andrade e Piacente (2017) de que interesses econômicos tendem a se sobrepor às dimensões social e ambiental quando confrontados com a urgência de viabilizar um projeto. Essa assimetria é também o tipo de risco que o próprio formulador do conceito já havia antecipado: Elkington (2018), em revisão crítica de sua própria proposta publicada vinte e cinco anos depois de sua formulação original, alertou que o Triple Bottom Line corria o risco de ser apropriado como instrumento de legitimidade discursiva, ou seja, um selo de sustentabilidade e não como compromisso operacional efetivamente verificável pelas partes interessadas externas à organização. Tudo isso baseado claramente na falta de

dados apresentados pelo empreendimento e não opinião expressamente taxativa e conclusiva por esse autor.

À luz desses elementos, os dados disponíveis sugerem um padrão no qual o pilar econômico do empreendimento RT-One dispõe de evidências mais consolidadas e verificáveis do que os pilares social e ambiental, sem que se possa, nem se pretenda, encerrar a questão de forma definitiva. Esse padrão não permite concluir, com os dados secundários disponíveis nesta pesquisa, que a operação real do empreendimento será socioambientalmente irresponsável; essa verificação dependeria de dados operacionais que ainda não existem, dado que a planta não está em funcionamento. Contudo, permite afirmar que a forma como o projeto tem sido comunicado à sociedade e à administração municipal já reproduz, na própria fase de divulgação, a assimetria informacional entre os pilares que tanto Crawford (2021) quanto Elkington (2018) identificam como um risco recorrente em empreendimentos de infraestrutura digital de grande escala: o uso do discurso de sustentabilidade como instrumento de legitimação social do projeto, antecedendo e por vezes substituindo a divulgação de indicadores operacionais verificáveis sobre seus reais impactos hídricos, energéticos e sociais.

Em conjunto, as quatro seções que compõem este capítulo evidenciam que a discussão sobre viabilidade e disputa por recursos associada ao empreendimento RT-One em Uberlândia não se resolve por meio de um julgamento binário entre viabilidade e inviabilidade, mas requer a consideração simultânea de pelo menos quatro planos analíticos complementares: a relação dinâmica entre abundância regional agregada e escassez localizada ou sazonal, ilustrada tanto por casos nacionais quanto internacionais de conflito distributivo em torno de data centers (seção 5.1); a qualidade e a consistência da informação disponível sobre o consumo real de água e energia do empreendimento, hoje fragmentada entre estimativas da Prefeitura, da empresa e do inquérito civil do Ministério Público Federal, sem que exista, até a conclusão desta pesquisa, uma posição institucional que reconcilie essas narrativas (seção 5.2); as especificidades operacionais dos data centers de inteligência artificial, cujos picos de demanda e perfil de carga bimodal impõem riscos distintos e potencialmente subestimados pelas médias anuais utilizadas no Capítulo 4 dos associados a data centers convencionais (seção 5.3); e o grau efetivo de equilíbrio entre os pilares econômico, social e ambiental do Triple Bottom Line, hoje marcado por assimetria informacional favorável ao pilar econômico (seção 5.4). Esses quatro planos, interpretados conjuntamente e sem pretensão de encerrar o debate, fundamentam as Considerações Finais apresentadas no Capítulo 6 e os indicadores e critérios de avaliação estruturados no Produto Técnico-Tecnológico apresentado no Capítulo 7, cuja função precípua é justamente transformar essa discussão informativa em um instrumento replicável de

acompanhamento da disputa por recursos em empreendimentos tecnológicos de grande escala, na região do Triângulo Mineiro ou em qualquer outra localização, baseado em dados, projetos de leis e normativas Brasileiras no campo da sustentabilidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo geral analisar a viabilidade hídrica e energética associados à implantação de um data center de IA no município de Uberlândia (MG), considerando as condições de oferta e demanda de recursos da região do Triângulo Mineiro, a partir do confronto entre a demanda projetada do empreendimento e a capacidade regional de suporte hídrico e energético, considerando cenários de risco climático e propondo um instrumento aplicável de análise de viabilidade para empreendimentos tecnológicos de grande porte em contextos regionais semelhantes. A pergunta de pesquisa que orientou o estudo foi: qual a viabilidade hídrica e energética associada à implantação de um data center de IA no município de Uberlândia (MG), considerando as condições de oferta e demanda de recursos da região do Triângulo Mineiro?

Os resultados obtidos permitem oferecer uma resposta qualificada, e não definitiva, a essa pergunta. Em termos agregados, a região do Triângulo Mineiro dispõe de oferta hídrica e energética compatível com a magnitude da Fase 1 do empreendimento (100 MW), sustentada pela capacidade declarada do sistema DMAE e pelos investimentos em expansão da rede de distribuição da CEMIG. Essa leitura agregada, contudo, convive com sinais de escassez localizada e sazonal, sobretudo na sub-bacia do Rio Araguari e durante a estação seca do Cerrado, entre maio e setembro, que tornam a disputa por recursos uma questão de distribuição no espaço e no tempo, e não apenas de suficiência média anual. O confronto entre as estimativas oficiais de consumo e os dados apurados pelo inquérito civil do Ministério Público Federal revelou, ainda, a coexistência de narrativas institucionais não reconciliadas sobre a magnitude real do empreendimento, o que constitui, por si, um obstáculo à transparência informacional, independentemente de qual estimativa se revele mais precisa no futuro. A distinção entre data centers convencionais e data centers de inteligência artificial mostrou-se relevante para qualificar essa disputa, na medida em que os picos de consumo característicos das cargas de treinamento de modelos de IA tendem a ser subestimados por médias anuais de consumo, podendo coincidir, em tese, com os períodos de maior estresse hídrico regional. Por fim, a análise à luz do Triple Bottom Line indicou assimetria informacional entre os pilares

econômico, social e ambiental do empreendimento, com o pilar econômico sustentado por dados quantitativos verificáveis e os pilares social e ambiental apoiados, majoritariamente, em compromissos declaratórios e em metas ainda não quantificadas publicamente, caso da meta de eficiência hídrica (WUE) para o sítio de Uberlândia.

Esse conjunto de achados fundamentou o desenvolvimento do METAS-DC – Método de Avaliação da Sustentabilidade de Data Centers, Produto Técnico-Tecnológico (PTT) apresentado no Capítulo 7, cuja função é transformar os resultados científicos desta pesquisa em um instrumento replicável de apoio à avaliação e à tomada de decisão sobre empreendimentos tecnológicos de grande escala. Atingidos os objetivos geral e específicos propostos para esta dissertação, cabe ainda situar o alcance e os limites do que foi produzido, bem como apontar caminhos de continuidade para a investigação do tema, conforme se discute nas seções seguintes.

6.1 Limitações do Estudo e Sugestões para Estudos Futuros

A principal limitação desta dissertação decorre de sua natureza documental: o estudo foi realizado integralmente a partir de dados secundários, relatórios institucionais, comunicados da empresa proponente, reportagens da imprensa especializada e documentos oficiais da administração municipal, sem acesso a dados primários de consumo operacional, uma vez que o empreendimento se encontra em fase pré-operacional e ainda não dispõe de séries históricas de consumo real de água e energia. As estimativas de demanda apresentadas no Capítulo 4 foram, portanto, construídas a partir de benchmarks internacionais de eficiência (PUE e WUE) aplicados à capacidade declarada do projeto, e não a partir de medições efetivas, o que impõe um limite inerente à precisão dos cenários propostos.

Constitui limitação adicional o fato de os cenários do Quadro 7 terem sido construídos a partir de médias anuais de consumo, calculadas com base em fator de utilização constante de 80% ao longo de todo o ano (Shehabi et al., 2016; Jones, 2023). Essa premissa, adequada para uma estimativa de ordem de grandeza, tende a subestimar sistematicamente a demanda em períodos de pico, sobretudo durante campanhas intensivas de treinamento de modelos de IA, exatamente o tipo de evento que, segundo Patterson et al. (2022) e a experiência internacional discutida na seção 5.1 (casos da Irlanda e do Arizona, conforme The Maybe, 2025), tem historicamente precedido episódios de saturação da infraestrutura elétrica local. Reconhecer essa limitação não invalida o exercício de cenários realizado no Capítulo 4, mas reforça a necessidade de que qualquer instrumento de monitoramento contínuo do empreendimento,

como o proposto no Capítulo 7, incorpore indicadores de pico de demanda, e não apenas médias anuais, na avaliação da disputa por recursos.

Soma-se a essa limitação a fragmentação e a falta de padronização entre as fontes consultadas: a Prefeitura e a empresa comunicam a demanda em megawatts por fase do projeto, a CEMIG responde em termos de capacidade técnica do sistema de distribuição, e o inquérito civil do Ministério Público Federal expressa sua estimativa em residências-equivalentes, métricas que não são diretamente conversíveis sem premissas adicionais, e cuja conciliação, até a conclusão desta pesquisa, ainda não havia sido formalizada por nenhuma das partes envolvidas. A ausência de uma meta numérica de eficiência hídrica (WUE) divulgada publicamente pela empresa para o sítio de Uberlândia exigiu, ainda, a construção de três cenários alternativos, e não de uma estimativa única, o que amplia a margem de incerteza dos resultados. Constitui limitação adicional o fato de os casos internacionais utilizados como referência comparativa entre outros, os de Caucaia, Vinhedo, Barueri, Newton County e The Dalles operarem sob regimes regulatórios, hidrológicos e institucionais distintos dos de Uberlândia, o que restringe a transposição direta de seus padrões de conflito distributivo para o contexto regional analisado nesta dissertação. Por fim, a natureza qualitativa e documental do estudo não permite testes estatísticos de significância sobre o balanço entre oferta e demanda, restando a triangulação de fontes como principal mecanismo de fortalecimento da validade dos resultados.

Por fim, o recorte documental adotado não contemplou a coleta de dados primários junto à população residente no entorno do empreendimento ou à sociedade uberlandense em geral, o que limita a capacidade desta dissertação de avaliar a percepção social sobre o projeto. Essa lacuna, em particular, abre o principal caminho de continuidade sugerido para estudos futuros: recomenda-se a realização de pesquisa de campo, de natureza quantitativa (levantamento por amostragem) e/ou qualitativa (entrevistas, grupos focais, análise de audiências públicas e de manifestações em canais de imprensa local e em redes sociais), que verifique, em primeiro lugar, em que medida a população de Uberlândia está, de fato, ciente da construção do data center de inteligência artificial anunciado para o município; em segundo lugar, e de forma mais específica, se a população informada sobre o empreendimento tem conhecimento dos achados detalhados nesta dissertação, a discrepância entre as estimativas oficiais de consumo e os dados apurados pelo inquérito civil do Ministério Público Federal, a ausência de meta pública de eficiência hídrica e a assimetria informacional entre os pilares do Triple Bottom Line identificada no Capítulo 5; e, em terceiro lugar, qual é o posicionamento da população quanto à instalação do empreendimento, se favorável, contrário ou ambivalente, e quais fatores explicam

esse posicionamento, como a expectativa de geração de emprego e renda em contraposição ao risco percebido sobre a disponibilidade e disputa de água e energia.

Recomenda-se, complementarmente, o monitoramento longitudinal dos dados reais de consumo hídrico e energético do empreendimento a partir de sua entrada em operação, de modo a validar ou refutar os cenários de PUE e WUE construídos nesta pesquisa; o acompanhamento de eventual sobreposição entre os picos de consumo associados a campanhas de treinamento de modelos de inteligência artificial e os períodos de maior estresse hídrico do Cerrado, entre maio e setembro; e a aplicação do METAS-DC, Produto Técnico-Tecnológico (Capítulo 7), a outros empreendimentos de data centers em fase de implantação no Brasil, de modo a testar sua replicabilidade em contextos regionais distintos do Triângulo Mineiro.

6.2 Contribuições do Trabalho para a Gestão Pública, a Gestão Privada e a População

Para a gestão pública, esta dissertação oferece subsídios técnicos que podem orientar a Prefeitura Municipal de Uberlândia, os órgãos ambientais responsáveis pelo licenciamento e o Ministério Público Federal na avaliação e no acompanhamento do empreendimento. O METAS-DC, instrumento estruturado como Produto Técnico-Tecnológico (Capítulo 7), sistematiza dimensões, critérios e evidências de avaliação replicáveis, que podem ser incorporados a processos de licenciamento ambiental e hídrico, à exigência de metas quantificáveis de eficiência energética e hídrica por parte das empresas proponentes, e à definição de mecanismos de transparência e de monitoramento contínuo, lacunas hoje evidentes na comunicação institucional do projeto analisado. O trabalho contribui, ainda, para qualificar o debate público sobre a disputa por recursos hídricos e energéticos associada a empreendimentos tecnológicos de grande escala, oferecendo aos gestores públicos uma leitura que concilia a abundância regional agregada com os riscos de escassez localizada e sazonal.

Para a gestão privada, o estudo oferece à empresa proponente e a outras organizações do setor de data centers de inteligência artificial um referencial externo e tecnicamente fundamentado sobre as lacunas de transparência identificadas em sua comunicação institucional, sobretudo no que se refere à divulgação de metas numéricas de eficiência hídrica (WUE) e à precisão das estimativas de geração de emprego. A análise à luz do Triple Bottom Line e da governança ambiental corporativa (ESG) evidencia que a conversão de compromissos declaratórios em indicadores quantificáveis e verificáveis tende a reduzir riscos reputacionais e regulatórios incluindo a exposição a inquéritos civis e a contestação pública, fortalecendo a legitimidade social do empreendimento e antecipando, de forma proativa, disputas distributivas

que, segundo a experiência nacional e internacional revisada nesta dissertação, costumam emergir apenas quando já configurado um quadro de escassez localizada.

Para a população, finalmente, esta dissertação busca reduzir a assimetria informacional que hoje caracteriza o debate sobre o empreendimento RT-One em Uberlândia, oferecendo, em linguagem tecnicamente fundamentada e de acesso público, uma leitura organizada sobre a magnitude da demanda projetada, os riscos socioambientais envolvidos e as lacunas de transparência identificadas nas narrativas institucionais disponíveis. Ao sistematizar essas informações, o trabalho fornece subsídios para que a sociedade uberlandense, suas associações de moradores e a imprensa local possam participar de forma mais qualificada de audiências públicas e de outros espaços de controle social sobre a implantação do projeto, bem como acompanhar, ao longo do tempo, se os compromissos socioambientais anunciados pela empresa se traduzem, de fato, em indicadores operacionais verificáveis.

Em síntese, esta dissertação conclui que a viabilidade hídrica e energética do empreendimento RT-One em Uberlândia não pode ser respondida de forma binária, mas depende da consideração simultânea da relação entre abundância agregada e escassez localizada, da qualidade e da consistência da informação disponível sobre o consumo real do empreendimento, das especificidades operacionais dos data centers de inteligência artificial e do efetivo equilíbrio entre os pilares econômico, social e ambiental de sua operação. O METAS-DC, instrumento de avaliação apresentado no Capítulo 7, busca precisamente oferecer aos gestores públicos, privados e à sociedade uberlandense um caminho replicável para acompanhar essa disputa por recursos ao longo das próximas fases de implantação do empreendimento. O método também pode ser aplicado a outros empreendimentos de data centers, em diferentes fases e regiões, observando as particularidades de cada contexto para uma análise fiel.

Portanto, após toda a análise relatada nesta dissertação, a pergunta que pauta o problema de pesquisa — em que medida a oferta regional de recursos hídricos e energéticos é capaz de suportar, de forma sustentável, a demanda projetada do empreendimento, considerando a concorrência por uso dos recursos e os cenários de risco climático — encontra, nos resultados apresentados, uma resposta qualificada, ainda que não definitiva, delimitada pelas limitações metodológicas e pelos dados secundários disponíveis até a conclusão desta pesquisa. O monitoramento longitudinal do empreendimento e a aplicação do METAS-DC em suas próximas fases permitirão aprofundar e atualizar essa resposta ao longo do tempo.

7. PTT – PRODUTO TÉCNICO-TECNOLÓGICO

7.1 Apresentação do METAS-DC

O METAS-DC – Método de Avaliação da Sustentabilidade de Data Centers constitui o Produto Técnico-Tecnológico (PTT) desta dissertação, elaborado a partir dos achados obtidos na análise de viabilidade hídrica e energética do caso de Uberlândia (MG) e ampliado para uma avaliação multidimensional da sustentabilidade de data centers. O método foi concebido como instrumento de apoio à decisão, destinado a gestores públicos, empresas, consultores, pesquisadores e à sociedade, com aplicação nas fases de planejamento, implantação, operação e expansão do empreendimento.

O produto está materializado em um Guia Técnico, que orienta a aplicação do método, com apoio de uma Ferramenta Digital que processa os resultados registrados. O METAS-DC possui caráter replicável, podendo ser utilizado em diferentes empreendimentos e contextos territoriais, para além do caso de Uberlândia que originou esta pesquisa.

O detalhamento da estrutura e dos critérios que compõem o método é apresentado no Apêndice A desta dissertação, enquanto o Guia Técnico reúne as orientações necessárias à sua aplicação operacional.

7.2 Estrutura e funcionamento do método

O METAS-DC está estruturado em cinco dimensões – ambiental, energética, hídrica, social e econômica –, que totalizam 14 critérios de avaliação. Cada critério é avaliado com base em evidências documentais e classificado em um dos seguintes níveis: I – Inexistente ou insuficiente; II – Inicial; III – Adequado; IV – Avançado; V – Referência; ou NE – Não Evidenciado, quando não há evidência suficiente para a classificação.

O funcionamento do método segue um fluxo sequencial: conhecer o empreendimento, levantar evidências, avaliar os critérios, registrar os resultados na Ferramenta Digital, gerar o diagnóstico e apoiar a decisão. A Ferramenta Digital consolida os resultados registrados e apresenta o Índice METAS-DC, o Índice de Cobertura da Avaliação (ICA), o perfil de desempenho por dimensão, recomendações associadas aos critérios avaliados e um Parecer Técnico. O detalhamento da estrutura e dos critérios que compõem o METAS-DC é apresentado no Apêndice A desta dissertação. O Guia Técnico do METAS-DC complementa essa descrição com as orientações operacionais para aplicação do método, incluindo fichas de avaliação, evidências, exemplos de classificação e ações recomendadas.

7.3 Aplicabilidade do METAS-DC

O METAS-DC pode ser aplicado em diferentes fases do empreendimento, planejamento, implantação, operação e expansão, servindo de apoio ao planejamento, à análise da sustentabilidade, à identificação de vulnerabilidades, à avaliação de riscos, ao acompanhamento de compromissos socioambientais, à tomada de decisão e à organização e transparência das evidências utilizadas na avaliação.

O método destina-se a gestores públicos, empresas, consultores, pesquisadores e à sociedade em geral, conforme previsto no Guia Técnico. Embora tenha sido desenvolvido a partir de uma pesquisa envolvendo um data center de inteligência artificial, o METAS-DC foi concebido para a avaliação de data centers de forma geral, não se restringindo a empreendimentos de IA.

7.4 Relevância do Produto Técnico-Tecnológico

A relevância do METAS-DC como Produto Técnico-Tecnológico está associada à sistematização de evidências dispersas em um instrumento estruturado de apoio à decisão, à sua multidimensionalidade, que integra aspectos ambientais, energéticos, hídricos, sociais e econômicos, e ao seu caráter replicável, aplicável a diferentes fases do empreendimento e a distintos contextos territoriais. O método articula, dessa forma, o conhecimento produzido nesta pesquisa acadêmica com uma aplicação prática voltada a gestores públicos, privados e à sociedade.

Quadro 10- Quadro de relevância do METAS-DC como Produto Técnico Tecnológico (PTT)

Impacto	Contribui para a tomada de decisão de gestores públicos e privados ao sistematizar, em cinco dimensões, evidências ambientais, energéticas, hídricas, sociais e econômicas associadas à sustentabilidade de data centers.
Aplicabilidade	Pode ser utilizado como instrumento prático de avaliação da sustentabilidade de data centers em diferentes fases do empreendimento e em contextos territoriais diversos, não se restringindo ao caso de Uberlândia que originou a pesquisa.
Inovação	Apresenta um método multidimensional e replicável de avaliação da sustentabilidade de data centers, integrando critérios ambientais, energéticos, hídricos, sociais e econômicos, tema ainda pouco explorado de forma

	sistematizada no Brasil.
Complexidade	Integra cinco dimensões e 14 critérios de avaliação, baseados em evidências documentais e níveis de desempenho, permitindo diagnosticar e acompanhar a sustentabilidade de data centers ao longo de diferentes fases do empreendimento.

Fonte: Elaboração própria (2026).

REFERÊNCIAS

Agência Minas Gerais. (2026). *Governo de Minas e Cemig entregam 100ª subestação do Mais Energia e beneficiam 600 mil pessoas na RMBH.*

<https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/governo-de-minas-e-cemig-entregam-100-subestacao-do-mais-energia-e-beneficiam-600-mil-pessoas-na-rmbh>

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2023). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe anual*. <https://www.gov.br/ana/>

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2025). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2025*.

<https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura-dos-recursos-hidricos?utm>

Agência Nacional de Energia Elétrica. (2024). *Relatório de energia renovável no Triângulo Mineiro*.

Alves, J. P., Silva, M. R., & Rocha, A. C. (2023). Hidrologia do Triângulo Mineiro: Balanço hídrico e potencial energético. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 28(1), 112–130.

Andrade, D., & Piacente, F. J. (2017). A inserção da variável ambiental no ambiente empresarial: Uma breve evolução histórica. *XII Workshop de Pós-Graduação e Pesquisa do CPS*.
<http://www.pos.cps.sp.gov.br/files/artigo/file/227/c8ad46bb96c592278fd0e00ecf55f809.pdf> <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n59-019>

Aos Fatos. (2026). *Corrida dos data centers no Brasil ignora impacto ambiental e tem até uso de identidades falsas*. <https://www.aosfatos.org/noticias/corrida-data-centers-brasil-ignora-impacto-ambiental-uso-identidades-falsas/>

Arandanet. (2025, December 15). *RT-One compra terreno de 1 milhão de m² em Uberlândia para construir data center de IA*.
<https://www.arandanet.com.br/revista/rti/noticia/11684-RT-One-compra-terreno-de-1-milhao-de-1-milhao-m%C2%B2-em-Uberlandia-para>

Azevedo, J. M. S. (2024). Convenções ambientais globais e a resposta brasileira: Uma análise da influência do Acordo de Paris e o papel dos biocombustíveis. *Boletim Petróleo Royalties e Região*.

<https://boletimpetroleoroyaltieseregiao.ucam-campos.br/index.php/bpr/article/view/182> <https://doi.org/10.36398/bpr.v23i2.182>

Azevedo, R., & Santos, P. (2020). Infraestrutura de data centers: Conceitos e aplicações. *Revista Brasileira de Computação*.

Bardin, L. (2016). *Análise de conteúdo*. Edições 70.

Barroso, L. A., Clidas, J., & Hölzle, U. (2018). *O data center como computador: Uma introdução ao projeto de máquinas em escala de armazém*. Morgan & Claypool.

Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R. S. J., & Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39(12), 7896–7906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.039>

Bennemann, C. B. (2024). *A evolução histórica da sustentabilidade: Uma análise bibliográfica*. Editora Científica.
<https://downloads.editoracientifica.com.br/articles/240416262.pdf>
<https://doi.org/10.37885/240416262>

Booth, A., Sutton, A., & Papaioannou, D. (2016). *Systematic approaches to a successful literature review* (2nd ed.). SAGE Publications.

Braz, S. N., Lucon, F. A. P., & Longo, R. M. (2020). Conferências das Partes no contexto do desenvolvimento sustentável: Um panorama desses eventos ambientalistas. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/348884390>

Brochado, D. (2025). Data centers no Ceará: As fronteiras entre a revolução tecnológica e o “risco ecocídio”. *Revista Jurídica Constitucional*.
<https://periodicos.apps.uern.br/index.php/jcd/article/view/7630>
<https://doi.org/10.59776/2965-3290.2025.7630>

Cellard, A. (2008). A análise documental. In J. Poupart, J.-P. Deslauriers, L.-H. Groulx, A. Laperrière, R. Mayer, & A. Pires (Eds.), *A pesquisa qualitativa: Enfoques epistemológicos e metodológicos* (pp. 295–316). Vozes.

Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. (n.d.). *Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paranaíba*. <https://cbhparanaiba.org.br>

Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari. (2024, November 19). *Síntese da 3ª Reunião Ordinária da Câmara Técnica de Planejamento e Controle – CTPLAN*. https://cbharaguari.org.br/uploads/1_o_comite/4_reunioes/2_camaras_tecnicas/ctplan/2024/3a.-reuniao-ordinaria.19.11.2024/Sintese-3-RO-CTPLAN-19.11.2024.pdf?utm

Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Araguari. (2026). *Relatório descritivo das ações: Execução do Plano de Aplicação Plurianual – exercício 2025*. CBH Araguari; ABHA Gestão de Águas. https://cbharaguari.org.br/uploads/4_contrato_de_gestao/003_2024_IGAM/Relatorio-Anual-2025-Execucao-do-PAP-CBH-ARAGUARI-03-03-2026.pdf?utm

Companhia Energética de Minas Gerais. (2024). *Cemig conecta nova subestação ao sistema elétrico de Uberlândia e Região*. <https://www.cemig.com.br/release/cemig-conecta-nova-subestacao-ao-sistema-eletrico-de-uberlandia-e-regiao/>

Comunica UFU. (2025). *Cientistas alertam: Data centers podem causar crise de água e energia*. Universidade Federal de Uberlândia. <https://comunica.ufu.br/noticias/2025/09/cientistas-alertam-data-centers-podem-causar-crise-de-agua-e-energia>

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. (2019). *Grupo de Trabalho de Produção Técnica: Relatório*. CAPES/DAV. <https://www.gov.br/capes/pt-br/centrais-de-conteudo/10062019-producao-tecnica-pdf>

Crawford, K. (2021). *Atlas of AI: Power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence*. Yale University Press. <https://doi.org/10.12987/9780300252392>

Creswell, J. W., & Poth, C. N. (2018). *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches* (4th ed.). SAGE Publications.

- Data Center Dynamics Brasil. (2025). *RT-One compra terreno em Minas Gerais para construção de um data center*. <https://www.datacenterdynamics.com/br/noticias/rt-one-compra-terreno-em-minas-gerais-para-construcao-de-um-data-center/>
- de Vries, A. (2023). The growing energy footprint of artificial intelligence. *Joule*, 7(10), 2191–2194. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004>
- Di Domenico, B. V. C. (2023). *A sustentabilidade como pressuposto para o desenvolvimento: Obstáculos contemporâneos para a implementação das metas ambientais da Agenda 2030*. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. <https://dspace.unila.edu.br/items/47b8997d-ebd1-4273-bd0b-5ca0e12d02ea>
- Diário de Uberlândia. (2023, December 15). *Nova subestação de energia elétrica é inaugurada em Uberlândia*. <https://diariodeuberlandia.com.br/noticia/34897/nova-subestacao-de-energia-eletrica-inaugurada-em-uberlandia>
- Diário do Comércio. (2025, July 8). *RT-One oficializa investimento em data center em Uberlândia; aporte inicial será de R\$ 6 bilhões*. <https://diariodocomercio.com.br/economia/rt-one-confirma-investimento-data-center-ia-uberlandia/>
- Dias, R., & Matos, F. (2023). Impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos: Desafios e implicações para a humanidade. *Revista Sociedade Científica*. <https://www.researchgate.net/publication/374142896>
<https://doi.org/10.61411/rsc100003>
- Domingos, C. de O. (2026). Desenvolvimento sustentável e direito ambiental no Brasil: Atuação da comissão nacional e do conselho empresarial na Agenda 21. *Revista Ilustração*. <https://journal.editorailustracao.com.br/index.php/ilustracao/article/view/491> <https://doi.org/10.46550/ilustracao.v7i1.491>
- Eccard, W. T. de C. (2025). Inteligência artificial e sustentabilidade: Desafios regulatórios e impacto ambiental. *Revista da Faculdade de Direito da UFMG*. <https://revista.direito.ufmg.br/index.php/revista/article/download/2985/2168>
<https://doi.org/10.12818/p.0304-2340.2025v86p225>

- Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532–550. <https://doi.org/10.2307/258557>
- Elkington, J. (2018, June 25). 25 years ago I coined the phrase “Triple Bottom Line.” Here’s why it’s time to rethink it. Harvard Business Review. <https://hbr.org/2018/06/25-years-ago-i-coined-the-phrase-triple-bottom-line-heres-why-im-giving-up-on-it>
<https://doi.org/10.4324/9781849773348-1>
- Elkington, J. (1997). *Canibais com garfos: A tripla sustentabilidade dos negócios do século XXI*. Capstone.
- Empresa de Pesquisa Energética. (2025). *Anuário estatístico de energia elétrica 2025*.
<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf>
<https://doi.org/10.32614/cran.package.epe4md>
- Environmental and Energy Study Institute. (2023). *Data centers and water consumption*.
<https://www.eesi.org/articles/view/data-centers-and-water-consumption>
- Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais. (2026, February 23). *FIEMG e Prefeitura de Uberlândia reforçam parceria para viabilizar primeiro data center de IA da região Sudeste*. <https://www.fiemg.com.br/fiemg/noticias/fiemg-e-prefeitura-de-uberlandia-reforcam-parceria-para-viabilizar-primeiro-data-center>
<https://doi.org/10.35786/1645-1384.v21.n1.15>
- Fernandes, A. L., Leyendecker, H., & Mendes, C. (2025). *IA, data centers e os impactos ambientais*. Instituto de Políticas Públicas Recife.
<https://ip.rec.br/wp-content/uploads/2025/05/Policy-Paper-Data-Centers.pdf>
- Ferreira, L. A., Mendes, R. F., & Souza, T. P. (2023). Gestão de recursos hídricos em regiões de alta demanda: Desafios do Triângulo Mineiro. *Revista de Estudos Ambientais*, 17(3), 45–61.
- Flick, U. (2014). *An introduction to qualitative research* (5th ed.). SAGE Publications.
- Freeman, R. E. (1984). *Strategic management: A stakeholder approach*. Pitman.

- Freitas, M. A. V., & Soito, J. L. S. (2008). Energia e recursos hídricos. *Parcerias Estratégicas*. <https://scholar.google.com/scholar?cites=12383617477326515644>
- Freitas, M. E., & Soito, J. L. F. (2008). Segurança energética e mudanças climáticas no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, 14(2), 45–62.
- Friede, G., Busch, T., & Bassen, A. (2015). ESG and financial performance: Aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, 5(4), 210–233. <https://doi.org/10.1080/20430795.2015.1118917>
- Gao, X., et al. (2021). Consumo e conservação de água em data centers: Desafios e perspectivas. *Journal of Cleaner Production*, 267, 121875.
- Gao, X., et al. (2021). Water consumption and sustainability of data centers. *Nature Sustainability*, 4, 1018–1026. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00767-w>
- Gil, A. C. (2019). *Como elaborar projetos de pesquisa* (6th ed.). Atlas.
- Global Reporting Initiative. (2023). *Consolidated set of GRI sustainability reporting standards*. <https://www.globalreporting.org>
- Godoy, J. A. R., & Benini, S. M. (2024). Resiliência urbana: Políticas para enfrentar desastres naturais e mudanças climáticas. *Revista Políticas Públicas & Cidades*. <https://journalppc.com/RPPC/article/view/775> <https://doi.org/10.23900/2359-1552v13n1-34-2024>
- Gonçalves, P. G. S. (2022). *O direito (humano) à água potável no quadro do tripé da sustentabilidade*. Repositório UFMS. <https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/4561> <https://doi.org/10.48021/978-65-270-6003-1>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information and Libraries Journal*, 26(2), 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Hoff, H. (2011). *Understanding the nexus: Background paper for the Bonn 2011 Nexus Conference*. Stockholm Environment Institute.

- InfoMoney. (2026). *Data centers nos EUA roubam até água subterrânea de desertos em cidades rurais*. <https://www.infomoney.com.br/business/global/data-centers-nos-eua-roubam-ate-agua-subterranea-de-desertos-em-cidades-rurais/>
<https://doi.org/10.31501/esf.v1i33.15665>
- Inforchannel. (2025, July 11). *RT-One investe R\$ 6 bi em novo data center em Uberlândia com foco em IA*. <https://inforchannel.com.br/2025/07/14/rt-one-investe-r-6-bi-em-novo-data-center-em-uberlandia-com-foco-em-ia/>
<https://doi.org/10.17771/pucrio.acad.19064>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). *Estimativas da população residente nos municípios brasileiros: Uberlândia (MG)*.
<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberlandia/panorama>
- Instituto Mineiro de Gestão das Águas. (n.d.). *Plano estadual de recursos hídricos de Minas Gerais*. <https://www.igam.mg.gov.br> <https://doi.org/10.19177/rgsa.v10e22021150-170>
- International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: Impacts, adaptation and vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
<https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Mudanças climáticas 2021: A base da ciência física: Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas*.
<https://doi.org/10.54499/2024.18467.prt>
- Kitchenham, B., Brereton, O. P., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. G. (2009). Systematic literature reviews in software engineering: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 51(1), 7–15.
<https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>

- Kron Digital. (2025). *Data centers de inteligência artificial: O custo energético da revolução digital*. <https://www.kron.digital/data-centers-de-inteligencia-artificial-o-custo-energetico-da-revolucao-digital/> <https://doi.org/10.14483/22486798.24643>
- Latouche, S. (2009). *Pequeno tratado do decrescimento sereno*. Martins Fontes.
- Lauande, P. S. F., & Lauande, D. P. (2025). A economia digital é uma ameaça à sustentabilidade? In *Construyendo puentes: Colaboración jurídica entre Chile y Brasil em temas de derecho económico*. https://repositorio.idp.edu.br/bitstream/123456789/5385/1/Construyendo%20puentes_E-book_2%20ed.pdf
- Li, F., et al. (2023). Emissões de gases de efeito estufa de tecnologias digitais emergentes: Desafios e direções futuras. *Ciência e Tecnologia Ambiental*. <https://doi.org/10.31414/adm.2016.d.128195>
- Li, P., Yang, J., Islam, M. A., & Ren, S. (2025). *Making AI less “thirsty”: Uncovering and addressing the secret water footprint of AI models*. arXiv. <https://doi.org/10.1145/3724499>
- Luccioni, A. S., Viguier, S., & Ligozat, A.-L. (2023). Estimating the carbon footprint of BLOOM, a 176B parameter language model. *Journal of Machine Learning Research*, 24(253), 1–15. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.02001>
- Marconi, M. de A., & Lakatos, E. M. (2017). *Fundamentos de metodologia científica* (8th ed.). Atlas.
- Mariani, L., Guarenghi, M. M., & Mito, J. Y. L. (2016). Análise de oportunidades e desafios para o nexo água-energia. *Ambiente & Sociedade*. <https://www.researchgate.net/publication/304012841> <https://doi.org/10.5380/dma.v37i0.45046>
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W., III. (1972). *The limits to growth*. Universe Books. <https://doi.org/10.1349/ddlp.1>
- Medeiros, E. O., & Costa, B. S. (2025). A Agenda 21 no Brasil após 30 anos da conferência Rio-92: A importância do ensino da educação ambiental sobre as mudanças

- climáticas. *Revista Científica Intelletto*.
<https://revista.grupofaveni.com.br/index.php/revista-intelletto/article/view/1583>
- Microsoft. (2026). *Measuring energy and water efficiency for Microsoft datacenters*.
<https://datacenters.microsoft.com/sustainability/efficiency/>
- Minayo, M. C. de S. (2021). *O desafio do conhecimento: Pesquisa qualitativa em saúde* (14th ed.). Hucitec.
- Mobile Time. (2026, February 26). *Data center de IA em Uberlândia terá subestação dedicada*. <https://www.mobiletime.com.br/noticias/27/02/2026/data-center-uberlandia/>
- Moreira, A. (2025). *Mudança climática: Planejando municípios resilientes com inteligência artificial*. Google Books. <https://books.google.com/books?id=zsBgEQAAQBAJ>
<https://doi.org/10.24824/978652517505.8>
- Mytton, D. (2021). Data centre water consumption. *npj Clean Water*, 4, Article 11.
<https://doi.org/10.1038/s41545-021-00101-w>
- Naitzel, L. T. (2023). *Projeção de indicadores de segurança hídrica em escala nacional para diferentes cenários de mudanças climáticas e consumo de água utilizando big data*. UFRGS. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/270468>
- Ngomane, J. S. (2025). Mudanças climáticas, defesa e segurança: Uma abordagem global e emergente para agenda de forças de defesa e segurança. *O Cadete*, 4(1).
https://revistacientifica.am.ac.mz/wp-content/uploads/2025/09/J.-S.-Ngomane-O-cadete_Vol.4_No.1-2025-36-49.pdf <https://doi.org/10.21544/2359-3075.29280>
- O Tempo. (2026, February 23). *Obras de data center de IA em Uberlândia podem começar em maio; prefeitura tenta atrair*.
<https://www.otempo.com.br/economia/2026/2/23/obras-de-data-center-de-ia-em-uberlandia-podem-comecar-em-maio-prefeitura-tenta-atr>
<https://doi.org/10.56238/2ndcongresssevenmultidisciplinarystudies-037>
- Oliveira, M. L. G., & Gentil, B. G. (2024). Desenvolvimento sustentável: Em busca de um conceito. *Revista Binacional Brasil*.
<https://periodicos2.uesb.br/rbba/article/view/15972>
<https://doi.org/10.22481/rbba.v14i2.15145>

Operador Nacional do Sistema Elétrico. (n.d.). *Dados abertos*. <https://dados.ons.org.br>

Organização das Nações Unidas. (2015). *Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>

Miranda, P. T., Dias de Paiva, R. C., Petry, I., Matte Rios Fernandez, G., Rodrigues Galvão Alves, W., Collischonn, W., Brusso Rossi, J., de Oliveira Fagundes, H., Abdalla Araujo, A., & Aires de Souza, S. (2024). Mudanças climáticas ameaçam a resiliência a extremos hidrológicos e a segurança hídrica no Brasil. *IV Encontro Nacional de Desastres da ABRHidro*. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/282142>

Patterson, D., Gonzalez, J., Hölzle, U., Le, Q., Liang, C., Munguia, L.-M., Rothchild, D., So, D. R., Texier, M., & Dean, J. (2022). The carbon footprint of machine learning training will plateau, then shrink. *Computer*, 55(7), 18–28.
<https://doi.org/10.1109/MC.2022.3148714>

Patterson, M. K. (2008). The effect of data center temperature on energy efficiency. *Intel Technology Journal*, 12(3), 1–7.
<https://www.intel.com/content/www/us/en/research/technology-journal.html>
<https://doi.org/10.1109/ITHERM.2008.4544393>

Pessini, L., & Sganzerla, A. (2016). Evolução histórica e política das principais conferências mundiais da ONU sobre o clima e meio ambiente. *Revista Iberoamericana de Bioética*. <https://www.researchgate.net/publication/323698162>
<https://doi.org/10.14422/rib.i01.y2016.009>

Pigatto, G. M., & Pigatto, F. M. (2024). Sustentabilidade tecnológica: Inovações em sustentabilidade a partir de inteligências artificiais. *Caderno Pedagógico*.
<https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/12271>
<https://doi.org/10.54033/cadpedv21n13-293>

Pinto, M. M. F., & Campos, P. K. de. (2021). Sustentabilidade de data centers com o uso da TI-verde. *Revista Científica e-Locução*. <https://periodicos.faex.edu.br/index.php/e-Locucaao/article/download/420/291> <https://doi.org/10.57209/e-locucaao.v1i20.420>

Prefeitura Municipal de Uberlândia. (2025a). *Dmae destaca ações e investimentos no abastecimento de água no primeiro semestre de 2025.*

<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2025/06/26/dmae-destaca-acoes-e-investimentos-no-abastecimento-de-agua-no-primeiro-semester-de-2025/>

Prefeitura Municipal de Uberlândia. (2025b). *Dmae mantém regularidade no abastecimento durante a estiagem e reforça ações de preservação e investimentos na rede.*

<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2025/10/21/dmae-mantem-regularidade-no-abastecimento-durante-a-estiagem-e-reforca-acoes-de-preservacao-e-investimentos-na-rede/>

Prefeitura Municipal de Uberlândia. (2025c). *Uberlândia recebe R\$ 160 milhões em investimentos para ampliar a oferta de energia elétrica no município.*

<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2025/05/08/uberlandia-recebe-r-160-milhoes-em-investimentos-para-ampliar-a-oferta-de-energia-eletrica-no-municipio/>

Prefeitura Municipal de Uberlândia. (2025d). *Maior data center de inteligência artificial da América Latina será construído na região Oeste de Uberlândia.*

<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2025/09/24/maior-data-center-de-inteligencia-artificial-da-america-latina-sera-construido-na-regiao-oeste-de-uberlandia/>

Prefeitura Municipal de Uberlândia. (2026, February 23). *Projeto do primeiro data center de IA da região Sudeste do país avança em Uberlândia.*

<https://www.uberlandia.mg.gov.br/2026/02/23/projeto-do-primeiro-data-center-de-ia-da-regiao-sudeste-do-pais-avanca-em-uberlandia>

Prieto, R. B. P., Souza, I. S. de, & Cisotto, M. H. (2025). Sustentabilidade energética e ambiental em data centers de inteligência artificial: Estudo de caso Google Data Centers (2024–2025). *Revista DELOS*.

<https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/7760>
<https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n75-008>

Puga, B., Oliveira Silva, J. I. A., Jacobi, P. R., & Empinotti, V. L. (2025). *Do território ao município: Um novo olhar sobre a segurança hídrica e suas respostas às mudanças climáticas*. Instituto de Energia e Ambiente – USP. https://www.iee.usp.br/wp-content/uploads/2025/05/Cap.1Puga_compressed.pdf

- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., III, Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Sachs, I. (2008). *Desenvolvimento includente, sustentável e sustentado*. Garamond.
- Samuel, P. A. C. (2025). O paradoxo do capital digital: Inteligência artificial, crise climática e flexibilização ambiental. *Textos & Contextos*.
<https://pucrs.emnuvens.com.br/fass/article/view/49024> <https://doi.org/10.15448/1677-9509.2025.1.49024>
- Santos, D. M. C., & Medeiros, T. A. (2020). Desenvolvimento sustentável e Agenda 21 brasileira. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/339181696>
- Sá-Silva, J. R., Almeida, C. D. de, & Guindani, J. F. (2009). Pesquisa documental: Pistas teóricas e metodológicas. *Revista Brasileira de História & Ciências Sociais*, 1(1), 1–15. <https://doi.org/10.63595/rbhcs.v1i1.10351>
- Shehabi, A., Smith, S. J., Sartor, D. A., Brown, R. E., Herrlin, M., Koomey, J. G., Masanet, E. R., Horner, N., Azevedo, I. L., & Lintner, W. (2016). *United States data center energy usage report*. Lawrence Berkeley National Laboratory.
<https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy>
<https://doi.org/10.2172/1372902>
- Silva, D. O., Souza, P. R., & Lima, G. F. (2019). Análise da matriz energética no Triângulo Mineiro: Papel das hidrelétricas. *Boletim Brasileiro de Energia*, 2, 55–72.
- Silva, J. F. da. (2024). *Resiliência e complexidade econômica: Uma nova abordagem para o desenvolvimento sustentável*. UFMG. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/74289>
- Souza, M. T. de, Silva, M. D. da, & Carvalho, R. de. (2010). Revisão integrativa: O que é e como fazer. *Einstein*, 8(1), 102–106. <https://doi.org/10.1590/S1679-45082010RW1134>

- Stoll, S. L. (2024). Mudanças climáticas urbanas e o direito à moradia sustentável: Desafios, perspectivas e estratégias para cidades resilientes. *Revista de Derecho, Cultura y Proceso*. <https://nexuscientia.free.nf/index.php/revistadcp/article/view/33>
<https://doi.org/10.22409/conflu.v26i1.61838>
- Strubell, E., Ganesh, A., & McCallum, A. (2019). Energy and policy considerations for deep learning in NLP. In *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (pp. 3645–3650). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/P19-1355>
- Synergy Research Group. (2026, April 7). *Hyperscale operators to account for 67% of all data center capacity by 2031*. https://www.srgresearch.com/articles/hyperscale-operators-to-account-for-67-of-all-data-center-capacity-by-2031?utm_
- Task Force on Climate-Related Financial Disclosures. (2017). *Final report: Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*. <https://www.fsb-tcfd.org>
- Technology Magazine. (2025). *RT-One to build LATAM's largest data centre in Uberlândia*. <https://technologymagazine.com/news/rt-one-to-build-latin-americas-largest-ai-data-centre>
- Reis, T. N. F. dos. (2024). *Sustentabilidade na nuvem: Um modelo de eficiência energética em ambientes de computação verde* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Maranhão]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da UFMA. <https://tedebc.ufma.br/jspui/handle/tede/5704>
- The Green Grid. (2012). *PUE: A comprehensive examination of the metric* (White Paper No. 49). The Green Grid.
- The Green Grid. (2011). *Water usage effectiveness (WUE): A Green Grid data center sustainability metric* (White Paper No. 35). The Green Grid.
- The Maybe. (2025, June 29). *Learnings from five cases of data center development and defiance*. Tech Policy Press. <https://techpolicy.press/learnings-from-five-cases-of-data-center-development-and-defiance>

- TI Inside Online. (2025, September 24). *RT-One oficializa a compra do terreno para construção do data center de IA em Uberlândia*. <https://tiinside.com.br/24/09/2025/rt-one-oficializa-a-compra-do-terreno-para-construcao-do-data-center-de-ia-em-uberlandia/>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>
- Tranjan, L. K., Rosa, A., Procopiuck, M., & Turbay, A. L. B. (2024). Mudanças climáticas e a diversificação das fontes de energia: Revisão de políticas públicas. *Boletim de Conjuntura*, 20(60), 286–320. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14715644>
- Universidade Federal de Uberlândia. (2024). *Programa de Pós-Graduação em Gestão Organizacional (PPGGO/FAGEN/UFU): Produto Técnico-Tecnológico (PTT) — Área de Administração CAPES*. <https://ppggo.fagen.ufu.br/servicos/produto-tecnico-tecnologico-ptt-area-de-administracao-capes>
- Universidade Federal de Viçosa. (n.d.). *Atlas Digital das Águas de Minas: Consulta informativa – bacia do rio Paranaíba*. http://www.atlasdasaguas.ufv.br/paranaiba/resumo_paranaiba.html
- Viana, M. E. F., & Scheidegger, O. F. C. R. (2025). *Infraestrutura computacional para a era da IA: Desafios e políticas em data centers no Brasil*. BNDES. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/29008>
- Vieira, J. (2025). Água e sustentabilidade em tempos de mudança: Desafios e soluções face às alterações climáticas. In *O desafio crítico da sustentabilidade*. <https://www.researchgate.net/publication/394317139>
<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.206.6>
- Whittemore, R., & Knafl, K. (2005). The integrative review: Updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, 52(5), 546–553. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x>

- World Business Council for Sustainable Development, & World Resources Institute. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Rev. ed.). WBCSD/WRI.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

APÊNDICE A – ESTRUTURA E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO METAS-DC

A.1 Apresentação

O METAS-DC – Método de Avaliação da Sustentabilidade de Data Centers constitui o Produto Técnico-Tecnológico (PTT) desenvolvido a partir dos resultados desta dissertação. O método foi concebido como instrumento de apoio à decisão para avaliação da sustentabilidade

de data centers em diferentes fases de seu ciclo de vida, incluindo planejamento, implantação, operação e expansão.

Embora a pesquisa empírica tenha concentrado sua análise na oferta e na demanda de recursos hídricos e energéticos associadas ao empreendimento objeto do estudo de caso, o METAS-DC foi estruturado de forma multidimensional, incorporando aspectos ambientais, energéticos, hídricos, sociais e econômicos. Essa ampliação busca permitir que o instrumento seja aplicado a diferentes empreendimentos e contextos territoriais, não se restringindo ao caso analisado nesta pesquisa. Essa distinção entre o recorte empírico da investigação e o alcance do produto técnico é apresentada no Capítulo 7 desta dissertação.

O método está organizado em cinco dimensões e 14 critérios de avaliação. Cada critério é analisado a partir de evidências documentais e classificado em uma escala composta pelos níveis I a V ou pela categoria NE – Não Evidenciado. Os níveis representam diferentes graus de desenvolvimento ou desempenho, enquanto o NE é utilizado quando não há evidência suficiente para fundamentar uma classificação.

A aplicação do METAS-DC segue uma sequência composta pelo conhecimento do empreendimento, levantamento das evidências, avaliação dos critérios, registro das informações, processamento dos resultados e elaboração do diagnóstico. A Ferramenta Digital associada ao método consolida as avaliações e produz o Índice METAS-DC, o Índice de Cobertura da Avaliação (ICA), o perfil de desempenho por dimensão, as recomendações e o Parecer Técnico.

O presente apêndice tem como finalidade complementar a apresentação do PTT realizada no Capítulo 7, tornando explícita a estrutura interna do METAS-DC e apresentando, de maneira sintética, os 14 critérios que compõem o instrumento. O detalhamento operacional completo, incluindo fichas de avaliação, matrizes de classificação e orientações de aplicação, permanece apresentado no Guia Técnico do METAS-DC.

A.2 Estrutura geral dos critérios

O Quadro A1 apresenta a estrutura geral do METAS-DC, organizando os 14 critérios segundo as cinco dimensões que compõem o método.

Quadro A 1- Dimensões e critérios de avaliação do METAS-DC

Dimensão	Código	Critério
Ambiental	A1	Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

	A2	Licenciamento Ambiental
	A3	Gestão de Resíduos
	A4	Compensação Ambiental
Energética	E1	Eficiência Energética (PUE)
	E2	Fontes de Energia
	E3	Resiliência Energética
Hídrica	H1	Eficiência Hídrica (WUE)
	H2	Disponibilidade e Segurança Hídrica
	H3	Reúso e Gestão da Água
Social	S1	Transparência e Divulgação de Informações
	S2	Relacionamento com a Comunidade
Econômica	EC1	Planejamento da Infraestrutura
	EC2	Sustentabilidade Econômica

Fonte: Elaboração própria (2026), com base no METAS-DC.

A distribuição dos critérios procura representar diferentes aspectos relacionados à sustentabilidade de empreendimentos de data centers. A dimensão ambiental concentra-se nos impactos e na conformidade ambiental; a energética contempla eficiência, origem da energia e segurança do fornecimento; a hídrica considera eficiência, disponibilidade e gestão da água; a dimensão social aborda transparência e relacionamento com partes interessadas; e a dimensão econômica considera o planejamento e as condições necessárias à sustentação econômica das ações de sustentabilidade.

A.3 Dimensão Ambiental

A dimensão ambiental busca avaliar aspectos relacionados aos impactos ambientais associados ao empreendimento, sua conformidade com as exigências aplicáveis e a adoção de medidas destinadas à prevenção, mitigação e compensação desses impactos.

A.3.1 A1 – Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE)

O critério A1 avalia se o data center identifica, monitora e adota medidas destinadas à redução das emissões de gases de efeito estufa associadas às suas atividades de implantação e operação.

A avaliação considera a existência de instrumentos de identificação e quantificação das emissões, bem como a presença de mecanismos de monitoramento, metas de redução e ações de mitigação. Entre as principais evidências consideradas estão inventários de GEE, relatórios ESG, estudos ambientais, documentos de monitoramento e planos de gestão ambiental.

O critério procura diferenciar compromissos declaratórios de medidas efetivamente documentadas. Dessa forma, a existência de uma declaração de compromisso ambiental, isoladamente, não é suficiente para caracterizar elevado desempenho. A avaliação considera a existência de evidências que demonstrem monitoramento e ações efetivas de mitigação.

A.3.2 A2 – Licenciamento Ambiental

O critério A2 verifica o atendimento às exigências legais relacionadas ao licenciamento ambiental do empreendimento.

São consideradas evidências como licenças aplicáveis, autorizações, condicionantes ambientais, pareceres e registros do processo de licenciamento. A avaliação busca verificar não apenas a existência das licenças, mas também sua vigência, o cumprimento das condicionantes e a existência de eventuais pendências.

O desempenho é analisado considerando a regularidade documental e o atendimento às exigências ambientais aplicáveis ao empreendimento. A ausência ou o vencimento de licenças constitui elemento relevante para a avaliação do critério.

A.3.3 A3 – Gestão de Resíduos

O critério A3 avalia a existência e a efetividade de procedimentos destinados ao gerenciamento, à segregação, ao transporte e à destinação adequada dos resíduos gerados pelo empreendimento.

Entre as evidências consideradas encontram-se o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS), comprovantes de destinação, contratos com empresas licenciadas, manifestos de transporte e relatórios ambientais.

A análise considera aspectos como rastreabilidade, conformidade legal e adoção de boas práticas ambientais. A simples contratação de serviço de coleta não é considerada suficiente para comprovar a destinação ambientalmente adequada dos resíduos.

A.3.4 A4 – Compensação Ambiental

O critério A4 verifica a existência e a implementação de medidas destinadas à compensação dos impactos ambientais associados ao empreendimento.

São consideradas evidências os programas de compensação, registros de execução, relatórios de resultados, condicionantes ambientais e programas de recuperação. A avaliação considera a existência das medidas, sua abrangência, implementação, acompanhamento e efetividade.

Nesse critério, diferencia-se a previsão de determinada medida de sua efetiva implementação e comprovação. Assim, ações apenas previstas em documentos não são consideradas equivalentes a medidas efetivamente executadas e acompanhadas.

A.4 Dimensão Energética

A dimensão energética considera a eficiência no uso da energia, a origem dos recursos energéticos utilizados e a capacidade do empreendimento de manter sua operação diante de interrupções ou oscilações no fornecimento.

Essa dimensão possui particular importância para data centers em razão da elevada dependência de fornecimento elétrico contínuo e das implicações ambientais associadas à demanda energética.

A.4.1 E1 – Eficiência Energética (PUE)

O critério E1 avalia a eficiência energética do data center por meio do Power Usage Effectiveness (PUE), indicador que relaciona a energia total consumida pela instalação à energia destinada aos equipamentos de tecnologia da informação.

A avaliação considera relatórios de PUE, memórias de cálculo, dados de energia total e energia de TI e históricos de medições. Além do valor apresentado, considera-se a confiabilidade dos dados e a existência de monitoramento periódico.

O critério procura evitar uma interpretação isolada do indicador. Um PUE reduzido representa maior eficiência na relação entre energia total e energia de TI, mas não é considerado, isoladamente, suficiente para caracterizar a sustentabilidade global do empreendimento. Essa interpretação é particularmente relevante quando analisada conjuntamente com a dimensão hídrica e o nexa água-energia.

A.4.2 E2 – Fontes de Energia

O critério E2 avalia a origem da energia utilizada pelo empreendimento, com ênfase na participação de fontes renováveis e de menor emissão.

Entre as evidências consideradas estão contratos de energia, estudos energéticos, relatórios ESG, inventários de emissões e certificados relacionados à origem renovável da energia.

A avaliação considera a identificação da origem da energia, a participação de fontes renováveis, a existência de geração própria, metas relacionadas à transição energética e a

comprovação documental dessas informações. A contratação de energia da rede elétrica, por si só, não é considerada evidência suficiente de que a energia utilizada seja renovável.

A.4.3 E3 – Resiliência Energética

O critério E3 verifica a capacidade do empreendimento de manter sua operação diante de interrupções ou oscilações no fornecimento de energia.

A avaliação considera projetos elétricos, planos de continuidade e contingência, sistemas de backup, registros de testes e planos de manutenção. Entre os elementos observados estão redundância, sistemas de alimentação ininterrupta (UPS), geradores, planos para situações de falha e realização periódica de testes.

A existência de geradores isoladamente não é considerada suficiente para caracterizar elevada resiliência. O critério considera o conjunto formado pela redundância, capacidade de continuidade operacional e comprovação de testes periódicos dos sistemas de contingência.

A.5 Dimensão Hídrica

A dimensão hídrica avalia a eficiência do uso da água, a compatibilidade entre demanda e disponibilidade regional e a existência de práticas destinadas ao reúso, monitoramento e redução de perdas.

A dimensão possui relação direta com um dos eixos centrais desta dissertação, embora sua aplicação no METAS-DC seja ampliada para outros aspectos da gestão hídrica dos data centers.

A.5.1 H1 – Eficiência Hídrica (WUE)

O critério H1 avalia a eficiência do uso da água por meio do Water Usage Effectiveness (WUE), indicador que relaciona o consumo de água à energia utilizada pelos equipamentos de tecnologia da informação.

Entre as principais evidências consideradas estão relatórios de consumo, projetos hidráulicos, memoriais descritivos, estudos de refrigeração, sistemas de monitoramento e relatórios ESG.

A avaliação considera a existência e a confiabilidade do cálculo do WUE, o monitoramento do consumo, a disponibilidade de histórico e a existência de metas de eficiência. O indicador deve ser interpretado em conjunto com a disponibilidade hídrica regional e com as características do sistema de refrigeração, evitando que a eficiência seja analisada de maneira isolada.

A.5.2 H2 – Disponibilidade e Segurança Hídrica

O critério H2 verifica se a disponibilidade hídrica regional é compatível com a demanda do empreendimento sem comprometer outros usuários ou os ecossistemas associados.

São consideradas evidências estudos hidrológicos, outorgas, planos de recursos hídricos, estudos ambientais e pareceres técnicos relacionados ao abastecimento.

A avaliação considera a existência de estudos atualizados, a disponibilidade hídrica, as condições de estiagem, os usuários existentes e a possibilidade de expansão futura da demanda. Dessa forma, a disponibilidade atual não é interpretada automaticamente como garantia de segurança hídrica futura.

O critério procura, portanto, deslocar a análise de uma simples comparação entre consumo e disponibilidade média para uma avaliação que considere também a segurança futura e a possibilidade de competição pelo recurso.

A.5.3 H3 – Reúso e Gestão da Água

O critério H3 avalia práticas destinadas ao uso eficiente da água, incluindo reúso, monitoramento do consumo e redução de perdas.

Entre as evidências consideradas encontram-se planos de gestão hídrica, projetos hidráulicos, relatórios operacionais, relatórios ESG e estudos específicos de reúso.

A avaliação considera a existência de sistemas de reúso, monitoramento do consumo, metas, tecnologias eficientes e registros que permitam acompanhar a gestão hídrica ao longo do tempo. O critério parte do princípio de que a adoção de equipamentos ou tecnologias modernas, isoladamente, não garante uma gestão hídrica adequada.

A.6 Dimensão Social

A dimensão social incorpora elementos relacionados à transparência das informações e ao relacionamento do empreendimento com a comunidade e demais partes interessadas.

A inclusão desses critérios busca reconhecer que a sustentabilidade de grandes infraestruturas tecnológicas não se limita aos indicadores técnicos de consumo de recursos,

envolvendo também a qualidade da comunicação e das relações estabelecidas com o território em que o empreendimento está inserido.

A.6.1 S1 – Transparência e Divulgação de Informações

O critério S1 verifica se o empreendimento disponibiliza informações relevantes relacionadas ao seu desempenho ambiental, energético e hídrico.

São consideradas evidências relatórios ESG, relatórios de sustentabilidade, portais institucionais, relatórios anuais e publicações oficiais.

A avaliação considera a disponibilidade das informações, sua atualização, qualidade, abrangência e facilidade de acesso. A existência de informações exclusivamente internas não é considerada suficiente para caracterizar transparência institucional.

O critério procura, portanto, avaliar não apenas a existência de informações, mas a capacidade do empreendimento de disponibilizar dados relevantes de forma acessível e periódica às partes interessadas.

A.6.2 S2 – Relacionamento com a Comunidade

O critério S2 avalia a existência de mecanismos estruturados de relacionamento com a comunidade e demais partes interessadas.

Entre as evidências consideradas estão planos de comunicação, registros de audiências públicas, relatórios sociais, canais de atendimento e relatórios ESG.

A avaliação considera a existência de canais permanentes de comunicação, registro e tratamento das manifestações recebidas, programas sociais e mecanismos de diálogo periódico. Ações isoladas ou pontuais não são consideradas suficientes para caracterizar um relacionamento institucional estruturado.

A.7 Dimensão Econômica

A dimensão econômica considera a capacidade de planejamento e sustentação do empreendimento, especialmente no que se refere à implantação, operação, expansão e manutenção das ações relacionadas à sustentabilidade.

O objetivo não é avaliar apenas a rentabilidade do empreendimento, mas verificar se existem condições de planejamento e recursos capazes de sustentar as ações necessárias ao longo do ciclo de vida do data center.

A.7.1 EC1 – Planejamento da Infraestrutura

O critério EC1 verifica se existe planejamento técnico e financeiro compatível com as necessidades de implantação, operação e expansão do empreendimento.

Entre as principais evidências consideradas estão plano diretor, projeto executivo, memorial descritivo, cronograma físico-financeiro e estudos de viabilidade.

A avaliação considera a existência e a qualidade do planejamento, sua compatibilidade com as necessidades atuais e futuras, a possibilidade de expansão, a atualização tecnológica e a integração entre planejamento técnico e financeiro.

O critério considera o ciclo de vida do empreendimento, buscando identificar se o planejamento existente é capaz de acompanhar o crescimento da infraestrutura e suas necessidades futuras.

A.7.2 EC2 – Sustentabilidade Econômica do Empreendimento

O critério EC2 verifica se existem condições econômicas para manter, ao longo do tempo, as ações relacionadas à sustentabilidade do empreendimento.

São consideradas evidências estudos de viabilidade econômica, planos de negócios, planejamentos financeiros, relatórios de investimentos e documentos de planejamento estratégico.

A avaliação considera a existência de recursos destinados às ações de sustentabilidade, a previsão de investimentos futuros, a capacidade de manutenção das iniciativas e o acompanhamento da viabilidade econômica.

Nesse sentido, sustentabilidade econômica não é compreendida simplesmente como obtenção de lucro, mas como a existência de condições para implantar, manter e acompanhar as ações necessárias à sustentabilidade do empreendimento ao longo de seu ciclo de vida.

A.8 Classificação dos critérios e registro das evidências

Os 14 critérios do METAS-DC são avaliados a partir de evidências documentais e classificados em uma escala de cinco níveis de desempenho, complementada pela categoria NE – Não Evidenciado.

Os níveis são definidos da seguinte forma:

- Nível I – Inexistente ou insuficiente: ausência ou insuficiência significativa das práticas ou evidências avaliadas;
- Nível II – Inicial: existência de iniciativas ou mecanismos ainda em estágio inicial;
- Nível III – Adequado: atendimento considerado adequado aos elementos avaliados;
- Nível IV – Avançado: desempenho superior, com práticas estruturadas e evidências consistentes;
- Nível V – Referência: desempenho de referência, caracterizado por práticas consolidadas e evidências robustas;
- NE – Não Evidenciado: ausência de evidências suficientes para fundamentar a classificação.

A utilização da categoria NE tem por finalidade evitar que a ausência de informação seja automaticamente interpretada como baixo desempenho. Ao mesmo tempo, a ocorrência de critérios não evidenciados é registrada no Índice de Cobertura da Avaliação (ICA), permitindo distinguir o desempenho observado da extensão e confiabilidade das evidências disponíveis.

Essa separação é importante para o método porque um empreendimento pode apresentar determinado nível de desempenho nos critérios avaliados, mas possuir baixa cobertura documental em outras dimensões. O METAS-DC, portanto, procura não apenas produzir uma pontuação, mas também explicitar a qualidade e a abrangência das informações que sustentam o diagnóstico. A ferramenta do método incorpora essa distinção ao apresentar conjuntamente o Índice METAS-DC e o ICA.

A.9 Síntese do funcionamento do METAS-DC

A estrutura apresentada neste apêndice permite visualizar o METAS-DC como um sistema integrado de avaliação, no qual os critérios não devem ser interpretados de forma isolada. As cinco dimensões procuram representar diferentes componentes da sustentabilidade dos data centers, enquanto os 14 critérios permitem organizar as evidências necessárias para a análise.

A aplicação inicia-se pelo conhecimento do empreendimento e pelo levantamento das informações disponíveis. Em seguida, são reunidas e registradas as evidências documentais,

que subsidiam a classificação de cada critério. Os resultados são posteriormente processados pela Ferramenta Digital, permitindo a obtenção dos indicadores consolidados, do perfil de desempenho por dimensão, das recomendações e do Parecer Técnico.

O método foi concebido para utilização nas diferentes fases do empreendimento e para diferentes contextos territoriais. Dessa forma, sua aplicação não depende exclusivamente de data centers de inteligência artificial ou do caso estudado em Uberlândia, podendo ser adaptada a outros empreendimentos conforme as características, evidências e condições locais disponíveis.

Por fim, ressalta-se que o METAS-DC constitui instrumento de apoio à avaliação e à tomada de decisão, não substituindo estudos técnicos específicos, processos de licenciamento, autorizações administrativas ou demais avaliações exigidas pelos órgãos competentes. Seu propósito é organizar evidências multidimensionais, identificar potencialidades e vulnerabilidades e apoiar decisões relacionadas à sustentabilidade dos empreendimentos.