

SABIÁ: Uma Arquitetura Inteligente para Negociação e Desenvolvimento Sustentável de Datacenters de IA no Brasil

Mauro Oliveira¹, Guido Lemos², Paulo Cunha³, Wendell Rodrigues¹, Carina Oliveira¹, Reinaldo Braga¹

¹Instituto Federal do Ceará (IFCE), ²Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

³Universidade Federal de Pernambuco (UFPE),

mauro@lar.ifce.edu.br, guido@lavid.ugpb.br, prfc@cin.ufpe.br,
wendell@ifce.edu.br, Carina.oliveira@ifce.edu.br, reinaldo@lar.ifce.br

Abstract. *The rapid expansion of Artificial Intelligence (AI) data centres has generated both opportunities and risks. In Brazil, this process has occurred in an asymmetric manner, strongly influenced by fiscal incentives and with limited incorporation of public metrics. This article presents **SABIÁ**, an analytical framework designed to guide the governance of AI data centres as critical infrastructure, integrating computational, energy, water, and territorial metrics in alignment with the Brazilian Artificial Intelligence Plan (PBIA). The paper discusses the framework's analytical contributions, its computational architecture, and the model's potential to support the equitable deployment of data centres while strengthening Brazil's digital Sovereignty.*

Keywords: *Data center, Artificial Intelligence, Digital Sovereignty, PUE/WUE metrics*

Resumo. *A rápida expansão dos datacenters de Inteligência Artificial (IA) tem gerado oportunidades e riscos. No Brasil, esse processo ocorre de forma assimétrica, fortemente influenciado por incentivos fiscais e com limitada incorporação de métricas públicas. Este artigo apresenta o SABIÁ, um arcabouço analítico destinado a orientar a governança de datacenters de IA como infraestruturas críticas, integrando métricas computacionais, energéticas, hídricas e territoriais em alinhamento com o Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA). São discutidas as contribuições analíticas do framework, sua arquitetura computacional e o potencial do modelo para a implementação equitativa de datacenters, fortalecendo a soberania do Brasil.*

Palavras-chave: *Data center, Inteligência Artificial, Soberania Digital, Métricas PUE/WUE*

1. Introdução

A infraestrutura computacional associada à Inteligência Artificial (IA) deixou de ser um componente meramente técnico para consolidar-se como um ativo estratégico de natureza econômica, ambiental e geopolítica. Datacenters de IA, especialmente aqueles dedicados ao treinamento e à inferência em larga escala, concentram consumo intensivo de energia, água, conectividade e capital, gerando impactos territoriais relevantes e externalidades de longo prazo. Nesse contexto, tais infraestruturas assumem papel central na competitividade econômica, na sustentabilidade ambiental, na segurança energética e na soberania digital dos países [World Health Organization 2021].

No Brasil, a implantação desses empreendimentos ocorre de forma assimétrica e fortemente orientada por incentivos fiscais e decisões empresariais, frequentemente dissociadas de instrumentos públicos robustos de avaliação e governança. Observa-se uma assimetria informacional significativa entre o Estado e os operadores privados, associada à ausência de métricas públicas consolidadas, critérios claros de sustentabilidade e modelos específicos de governança para datacenters de IA enquanto infraestruturas críticas, o que dificulta avaliações sistêmicas de riscos, benefícios e contrapartidas.

Embora o Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA) reconheça a importância da infraestrutura computacional para o desenvolvimento da IA no país, persistem desafios na operacionalização de suas diretrizes, sobretudo na tradução de princípios estratégicos em métricas verificáveis, instrumentos de governança e critérios aplicáveis a contextos territoriais concretos [Brasil. 2026].

Diante desse cenário, este trabalho propõe um arcabouço analítico *compute-aware*, integrando conceituação, arquitetura e framework, capaz de qualificar a implantação e a operação de datacenters de IA no Brasil, considerando dimensões técnicas, ambientais e institucionais. Para tanto, apresenta-se o SABIA (Soberania e Autonomia Brasileira em Inteligência Artificial), como um framework orientado à governança, à sustentabilidade e à soberania digital, a ser validado por meio do estudo de caso no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CE), território estratégico emergente para a infraestrutura de IA no país. [Oliveira A.M.B. 2025]

2. Fundamentação Teórica

2.1 Datacenters de IA como Infraestrutura Crítica Digital

A literatura internacional tem consolidado o entendimento de que datacenters de grande escala, especialmente aqueles dedicados a cargas de Inteligência Artificial, configuram **infraestruturas críticas digitais**, comparáveis, em relevância sistêmica, a redes de energia, transporte e telecomunicações.

Esses sistemas sustentam cadeias produtivas intensivas em dados, serviços essenciais e capacidades nacionais de inovação, de modo que sua indisponibilidade ou má governança pode gerar impactos sistêmicos significativos [Miyuru et al. 2016; U.S. Congress 2018; IEA 2024].

Relatórios da OECD e do World Economic Forum indicam que datacenters de IA introduzem uma nova classe de criticidade, associada à elevada densidade computacional, à dependência energética contínua e à forte interdependência com redes de telecomunicações de alta capacidade. Diferentemente de datacenters tradicionais, infraestruturas voltadas ao treinamento e à inferência de modelos de larga escala operam cargas intensivas em aceleradores computacionais (GPUs/TPUs), com impactos diretos sobre consumo energético, dissipação térmica e resiliência operacional [CRU 2021].

Do ponto de vista técnico, estudos recentes apontam que essa criticidade decorre não apenas da função exercida, mas de propriedades mensuráveis, como potência instalada (MW), “*throughput* computacional” (FLOPs/ano), eficiência energética (PUE) e confiabilidade de conectividade. A literatura destaca que essas métricas devem ser analisadas de forma integrada, uma vez que avaliações fragmentadas podem induzir decisões locais com efeitos adversos em escala regional ou nacional [ISO/IEC 2022; CSO Ireland 2025].

Nesse contexto, o enquadramento de datacenters de IA como infraestrutura crítica exige **modelos analíticos sistêmicos**, capazes de capturar interdependências técnicas, energéticas e territoriais. A elevada densidade elétrica e térmica por *rack* torna insuficientes abordagens baseadas exclusivamente em métricas infraestruturais clássicas, uma vez que indicadores como PUE e WUE não capturam, isoladamente, a capacidade computacional efetiva nem a eficiência na conversão de recursos em desempenho computacional [CSO Ireland 2025]

2.2 PBIA e REDATA: Diretrizes Estratégicas e Limitações Operacionais

O Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA) [Brasil 2026] estabelece diretrizes estratégicas para o desenvolvimento da IA no país, incluindo a ampliação da capacidade computacional, a formação de recursos humanos e o estímulo à pesquisa e inovação. Em alinhamento com estratégias internacionais, como a *EU AI Strategy* e a *U.S. National AI Initiative*, o plano reconhece a infraestrutura computacional como pilar da competitividade em CT&I.

Entretanto, sob uma perspectiva técnico-operacional, o PBIA apresenta limitações na definição de métricas verificáveis que permitam caracterizar, comparar e monitorar datacenters de IA em termos de desempenho computacional, eficiência energética e sustentabilidade [Oliveira A.M.B. 2026]. Diferentemente de abordagens internacionais apoiadas por frameworks técnicos, como os do NIST e do EuroHPC, o plano carece de indicadores que conectem a infraestrutura física à capacidade computacional efetivamente disponibilizada ao ecossistema nacional [ISO/IEC 2022; CSO Ireland 2025]. De forma complementar, o Regime Especial de Tributação para Serviços de Datacenter (REDATA) [Brasil 2025] adota uma abordagem centrada na atração de investimentos, priorizando incentivos fiscais e a redução de barreiras regulatórias.

Na prática, as decisões tendem a ser orientadas pelo volume de investimento (CAPEX), em detrimento de parâmetros como FLOPs disponibilizados, eficiência energética ou integração com cadeias locais de inovação, relevando contrapartidas sociais e de CT&I,

Essa dissociação entre diretrizes estratégicas e instrumentos técnicos configura uma lacuna analítica que limita a capacidade do Estado de comparar alternativas tecnológicas, negociar contrapartidas baseadas em desempenho e avaliar riscos infraestruturais de médio e longo prazo.

Tabela 01: Métricas comparativas entre UE × EUA × China				
Região Referenciai		Energia	Resfriamento	Energia Limpa
UE	EU Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency (JRC) + iniciativas/relatórios ligados à eficiência e de DCs	PUE amplamente usado como KPI (Indicador de Desempenho) central; foco em consumo total vs TI.	Métricas de água aparecem como parte do pacote de sustentabilidade (ex.: WUE em discussões e relatórios de métricas).	Ênfase em sustentabilidade e reporte de KPIs de carbono associado e energia renovável
	DOE/EERE guidance + programas voluntários (ex.: ENERGY STAR para DCs)	DOE publica guidance e recomendações de PUE como métrica preferencial.	WUE aparece mais em guias e práticas (mercado/consórcios), não como exigência federal ampla.	Programas corporativas; carbono como contabilidade de emissões, mas sem padrão federal único.
China	Planos nacionais de “green & low-carbon data centers” + padrões/limites (ex.: GB)	Metas explícitas de PUE médio < 1.5 até 2025 em plano nacional.	Além de PUE, surgem critérios explícitos de relação água/ energia e limites em políticas de compras/ gestão (ex.: L/kWh).	Metas com maior participação de renováveis e foco em transição “low-carbon”.

2.3 Soberania Digital sob a Ótica da Infraestrutura Computacional

A noção de soberania digital adotada neste trabalho é compreendida como **capacidade técnica mensurável**, em consonância com a literatura internacional que a associa ao domínio, à governança e à auditabilidade de infraestruturas críticas, e não apenas a princípios normativos. Estudos da UNCTAD e da European Commission enfatizam que soberania digital depende da capacidade de medir, auditar e governar infraestruturas que sustentam fluxos de dados e processamento intensivo [Miyuru et al. 2016; IEA 2024].

Sob essa perspectiva, datacenters de IA configuram-se como ativos estratégicos cuja relevância pode ser expressa por indicadores objetivos, como FLOPs disponíveis, eficiência energética por unidade de computação, latência de conectividade e resiliência operacional. Essa abordagem desloca o debate da soberania digital de um plano predominantemente jurídico para um domínio técnico-analítico, alinhado à Computação, à Engenharia de Sistemas e à Ciência de Dados.

Nesse enquadramento, soberania digital relaciona-se diretamente à capacidade computacional efetivamente instalada no território, à eficiência de sua operação e à possibilidade de orientá-la para finalidades científicas, produtivas e sociais. Assim, datacenters de IA deixam de ser avaliados apenas por localização ou propriedade formal e passam a ser compreendidos como infraestruturas críticas mensuráveis e comparáveis por métricas verificáveis de desempenho, eficiência e robustez.

2.4 O SABIA, o PBIA e o REDATA

O SABIA consolida-se como um **arcabouço analítico voltado à operacionalização da soberania digital** no domínio da infraestrutura de IA, atuando como ponte entre diretrizes estratégicas, métricas técnicas e instrumentos de governança. Diferentemente de abordagens abstratas ou meramente normativas, o framework propõe um conjunto integrado de critérios e indicadores auditáveis, orientados à qualificação de decisões públicas e privadas relacionadas à implantação de datacenters de IA.

O SABIA articula métricas computacionais (como FLOPs/ano e FLOPs/kWh), parâmetros energéticos (PUE e matriz elétrica), indicadores hídricos (WUE) e dimensões territoriais e institucionais. Essa integração possibilita uma caracterização sistêmica dos datacenters de IA como infraestrutura crítica, superando análises fragmentadas centradas apenas em eficiência energética ou localização.

As métricas propostas não visam interferir na operação interna dos empreendimentos, mas **qualificar suas condições externas de implantação e operação**, reduzindo assimetrias informacionais e fortalecendo a capacidade regulatória e negocial do Estado.

Nesse sentido, o SABIA posiciona-se como um **instrumento técnico intermediário**: contribui para tornar operacionais os objetivos estratégicos nacionais e, simultaneamente, mitiga limitações de regimes centrados exclusivamente na atração de investimentos, ao incorporar critérios explícitos de sustentabilidade, governança e soberania digital. Esse panorama reforça a necessidade de complementar métricas clássicas de datacenters com **métricas compute-aware** (como FLOPs/ano e FLOPs/kWh) e com *baselines* auditáveis, permitindo comparabilidade técnica e a avaliação de *trade-offs* entre eficiência, sustentabilidade e capacidade computacional.

A Tabela 2 sintetiza esse cenário ao comparar práticas adotadas na União Europeia, nos Estados Unidos e na China. Métricas como FLOPs/ano e FLOPs/kWh emergem na literatura internacional como candidatas naturais para expressar a capacidade e a eficiência de infraestruturas voltadas ao treinamento e à inferência de modelos de larga escala, mas permanecem utilizadas de maneira fragmentada, sobretudo em contextos acadêmicos ou corporativos.

Tabela 2: Métricas <i>compute-aware</i> para caracterização de Data Centers de IA (UE, EUA, China)				
Dimensão	Métrica /	UE	EUA	China
Capacidade computacional	FLOPs/ano	Em discussão em relatórios técnicos e estudos acadêmicos;	Usado em pesquisas e benchmarks (HPC/AI), não regulatório	Crescente referência a “poder computacional total” em planos nacionais
Eficiência computacional	FLOPs/kWh	Aparece em alguns estudos (HPC Green, EuroHPC)	Usado em literatura de HPC/AI efficiency	Referido como “eficiência por unidade de poder computacional”
Produtividade energética	Jobs treinados / kWh ou Tokens / kWh	Ainda experimental	Experimental (papers, benchmarks de LLMs)	Pouco explícito
Densidade computacional	FLOPs/rack ou kW/rack	Considerada em projetos de DCs avançados	Métrica operacional comum	Métrica explícita em DCs de alta densidade
Carbono por computação	kgCO ₂ e / FLOPs	Em estudos piloto (Green AI)	Em estudos acadêmicos e corporativos	Emergente
Escalabilidade	FLOPs por MW adicional	Avaliado em planejamento	Avaliado por hyperscalers	Planejado centralmente

Enquanto a União Europeia avança na articulação entre sustentabilidade e desempenho computacional, os Estados Unidos concentram-se em *benchmarks* operacionais internos de *cloud* e HPC, sem exigências regulatórias explícitas. A China adota uma abordagem mais diretiva, incorporando progressivamente o conceito de “poder computacional” em políticas nacionais, ainda que com definições técnicas heterogêneas.

Esse cenário evidencia a necessidade de **frameworks analíticos integrados**, capazes de relacionar métricas infraestruturais e computacionais, avaliando não apenas o custo energético, mas o valor computacional efetivamente entregue. É nesse contexto que o SABIÁ se posiciona, ao propor a incorporação sistemática de métricas *compute-aware* para qualificar a análise, a comparação e a governança de datacenters de IA como infraestrutura crítica.

3. Arquitetura do SABIA

O SABIA (Soberania e Autonomia Brasileira em Inteligência Artificial) é proposto como um **arcabouço analítico computacionalmente orientado** para a caracterização e avaliação de datacenters de IA enquanto infraestruturas críticas. Sua abordagem baseia-se na integração de métricas computacionais, energéticas, hídricas e territoriais, possibilitando análises em nível macroanalítico voltadas à tomada de decisão estratégica e à formulação de políticas públicas.

Diferentemente de abordagens centradas apenas em aspectos financeiros, jurídicos ou regulatórios, o SABIA estrutura a avaliação a partir de **métricas técnicas verificáveis**, capazes de relacionar o consumo de recursos físicos à capacidade computacional efetivamente entregue. Nesse contexto, o indicador-síntese **FLOPs/kWh** é adotado como elemento central do modelo, por articular eficiência energética e desempenho computacional útil, em complemento a métricas clássicas como PUE e WUE.

O framework utiliza estruturas analíticas apoiadas por LLMs para consolidar, interpretar e comparar múltiplas dimensões métricas, sem interferir na operação interna dos datacenters.

3.1 Arquitetura Analítica do Framework

A arquitetura analítica do SABIA foi concebida para caracterizar datacenters de IA como **infraestrutura crítica** por meio de uma abordagem sistêmica, *compute-aware* e orientada à governança pública. Parte do reconhecimento de que métricas técnicas isoladas são insuficientes para sustentar decisões estratégicas em contextos marcados por assimetrias informacionais entre Estado e Mercado.



Figura 1: Arquitetura Analítica do SABIA

A arquitetura organiza-se em **cinco eixos analíticos complementares**, responsáveis pela coleta e estruturação de métricas primárias, articulados por um módulo central de **Integração Analítica e Mediação Técnica**, no qual essas métricas são contextualizadas, relacionadas e interpretadas de forma comparável:

O **Eixo Computacional** caracteriza a capacidade computacional efetivamente entregue, por meio de métricas como FLOPs/ano, FLOPs/kWh e densidade computacional, fornecendo a base *compute-aware* para distinguir eficiência infraestrutural de produtividade computacional real.

O **Eixo Energético** avalia consumo e eficiência energética, incorporando indicadores como potência instalada, PUE, composição da matriz elétrica e correlação entre consumo e carga computacional, permitindo analisar dependências da rede elétrica local

O **Eixo Hídrico** examina o uso de recursos hídricos nos sistemas de resfriamento, considerando WUE, volume de consumo, uso de água de reuso e variações sazonais, evidenciando impactos ambientais indiretos.

O **Eixo de Conectividade e Território** analisa requisitos de interconexão e impactos espaciais, incluindo largura de banda, latência, redundância e acoplamento com a infraestrutura logística e energética local.

Por fim, o **Eixo Institucional e de Governança** sistematiza informações sobre arranjos institucionais, contratos e contrapartidas, atuando como camada contextual para explicitar acordos entre Estado e Mercado, sem caráter normativo.

Os cinco eixos convergem para o módulo central de Integração Analítica e Mediação Técnica, que constitui o núcleo conceitual do SABIÁ.

Nesse módulo, métricas técnicas e compromissos institucionais são integrados por meio de uma plataforma analítica baseada em agentes, apoiada por LLMs. Seu papel não é automatizar decisões, mas construir cenários analíticos, explicitar correlações e revelar trade-offs verificáveis entre capacidade computacional, consumo energético, uso de água e impactos territoriais.

Nesse nível, acordos ambientais deixam de ser meras declarações normativas e passam a ser tratados como objetos analíticos, confrontados com métricas reais de desempenho e eficiência. A mediação técnica permite avaliar a compatibilidade entre compromissos de sustentabilidade e diferentes níveis de densidade computacional ou estratégias de resfriamento, tornando explícitas as escolhas e concessões envolvidas. Como resultado, a arquitetura do SABIÁ produz sínteses integradas, análises comparativas e visualizações de trade-offs que subsidiam processos de negociação, decisão estratégica e formulação de políticas públicas. O framework, assim, não substitui a decisão política, mas qualifica tecnicamente o espaço decisório, reduzindo assimetrias informacionais e estabelecendo uma base comum de evidências para a relação entre Estado e Mercado na infraestrutura de IA.

Assim, o SABIÁ organiza-se não como um repositório de indicadores, mas como uma arquitetura de integração analítica e mediação técnica, capaz de transformar métricas heterogêneas em cenários comparáveis e auditáveis para uma negociação “equitativa”.

3.2 Métricas-Chave e o Papel de FLOPs/kWh como Boundary Object

O SABIÁ adota um conjunto reduzido de métricas-chave, orientado pelos princípios de parcimônia analítica e comparabilidade internacional. Entre essas métricas, destaca-se o indicador FLOPs/kWh, definido como a razão entre o volume de operações em ponto flutuante efetivamente executadas e a energia elétrica total consumida, por sua capacidade de relacionar diretamente consumo energético a desempenho computacional útil:

$$\text{FLOPs/kWh} = \frac{\text{operações em ponto flutuante efetivamente executadas}}{\text{energia elétrica total consumida (kWh)}}$$

Diferentemente de métricas infraestruturais clássicas, como PUE e WUE, que avaliam a eficiência dos sistemas de suporte, o **FLOPs/kWh** expressa a produtividade computacional do consumo energético. Esse indicador permite distinguir cenários de alta eficiência infraestrutural com baixo retorno computacional, ou, inversamente, elevada capacidade computacional com custos energéticos desproporcionais.

No âmbito do SABIÁ, o FLOPs/kWh assume papel central ao ser tratado como um *boundary object* no processo de mediação entre Estado e Mercado. Trata-se de um indicador simultaneamente **tecnicamente mensurável**, compatível com exigências operacionais e de confidencialidade dos operadores, e **interpretável e auditável**, permitindo ao Estado avaliar contrapartidas, sustentabilidade e alinhamento a objetivos públicos sem interferir na operação interna dos datacenters.

Essa dupla natureza faz do FLOPs/kWh um ponto de ancoragem comum entre racionalidades distintas: para o Mercado, preserva a lógica de desempenho e eficiência operacional; para o Estado, viabiliza a comparação entre empreendimentos quanto ao uso de recursos críticos e ao valor computacional efetivamente entregue ao território. O indicador não prescreve decisões, mas estrutura o espaço de negociação, reduzindo assimetrias informacionais.

Para assegurar comparabilidade, as métricas são normalizadas temporalmente e analisadas sob cenários típicos de carga, como treinamento, inferência ou operação mista.

3.3 FLOPs/kWh como Boundary Object na Governança de Datacenters de IA

No framework SABIÁ, o indicador **FLOPs/kWh** atua como um *boundary object*, viabilizando a coordenação entre Estado e Mercado sem exigir consenso prévio sobre objetivos ou métodos. Do ponto de vista técnico-operacional, trata-se de uma métrica rigorosa que relaciona diretamente consumo energético e computação útil, preservando a lógica de eficiência e a autonomia operacional dos datacenters.

No domínio da governança pública, esse mesmo indicador torna-se interpretável, auditável e comparável quando integrado a métricas infraestruturais clássicas (PUE, WUE), a características territoriais e a compromissos institucionais. Nessa condição, o FLOPs/kWh permite ao Estado avaliar contrapartidas ambientais, energéticas e sociais associadas à implantação de datacenters de IA, sem recorrer a mecanismos intrusivos de regulação técnica.

Como *boundary object*, o FLOPs/kWh não prescreve decisões nem impõe limiares normativos automáticos, mas estrutura o espaço de negociação ao reduzir assimetrias informacionais e explicitar trade-offs entre capacidade computacional, eficiência energética e sustentabilidade. As decisões emergem não da métrica isolada, mas de sua integração relacional no módulo de Integração Analítica e Mediação Técnica, que conecta desempenho computacional e interesse público.

Arquiteturalmente, o FLOPs/kWh emerge da relação entre o Eixo Computacional e o Eixo Energético, sendo tecnicamente correto, porém semanticamente limitado. É somente no módulo de Integração Analítica e Mediação Técnica que o indicador se consolida como *boundary object*, ao ser cruzado com PUE, WUE, matriz elétrica, densidade computacional, características territoriais e acordos institucionais. Assim, a métrica deixa de responder apenas se o datacenter é eficiente e passa a explicitar **eficiente em relação a quê, para quem e sob quais compromissos**, consolidando-se como instrumento de mediação sociotécnica no SABIÁ.

4 Aspectos de implementação

4.1 Plataforma Analítica e Uso de Agentes

O SABIÁ é implementado por meio de uma plataforma analítica *agent-based*, apoiada em IA generativa, que materializa o módulo de Integração Analítica e Mediação Técnica.

A arquitetura orquestra agentes especializados responsáveis pela ingestão, curadoria, cálculo e análise de dados heterogêneos, produzindo sínteses analíticas, cenários comparativos e evidências estruturadas de apoio à decisão ambiental e estratégica [Sousa et al. 2024].

A plataforma integra métricas computacionais, energéticas e hídricas, como FLOPs/kWh, densidade computacional e consumo hídrico ponderado por carga, tratando indicadores *compute-aware* como *boundary objects*: tecnicamente rigorosos para o domínio computacional e, simultaneamente, interpretáveis e auditáveis no âmbito da governança pública, sem caráter normativo.

Por meio da construção de cenários hipotéticos e análises comparativas, o sistema explicita trade-offs verificáveis entre capacidade computacional, consumo energético e uso de água, sem automatizar decisões. A atuação dos agentes limita-se ao plano analítico externo, sem interferência na operação interna dos datacenters.

Assim, a plataforma consolida o SABIÁ como uma infraestrutura cognitiva de mediação sociotécnica, reduzindo assimetrias informacionais e qualificando processos de negociação e formulação de políticas públicas no domínio da infraestrutura de IA.

4.2 Descrição da Arquitetura em Linguagem Computacional

4.2.1 Camada de Orquestração Técnica

A Camada de Orquestração Técnica é responsável pela execução determinística, pelo agendamento e pela rastreabilidade dos processos do SABIÁ, sem realizar qualquer forma de raciocínio analítico. Sua função é assegurar que a ingestão de dados, o cálculo de métricas e a geração de cenários ocorram de modo reproduzível, auditável e independente de interpretações institucionais.

Essa camada coordena a ingestão e atualização periódica de dados heterogêneos, o disparo de *workflows* analíticos sob demanda ou por agendamento, a integração com sistemas e repositórios externos, bem como o registro de logs, monitoramento e rastreamento completo de proveniência das execuções. Ao separar explicitamente a orquestração técnica do módulo analítico, o SABIÁ garante transparência operacional, reprodutibilidade dos resultados e robustez metodológica, criando uma base confiável para análises comparativas, negociação informada e formulação de políticas públicas.

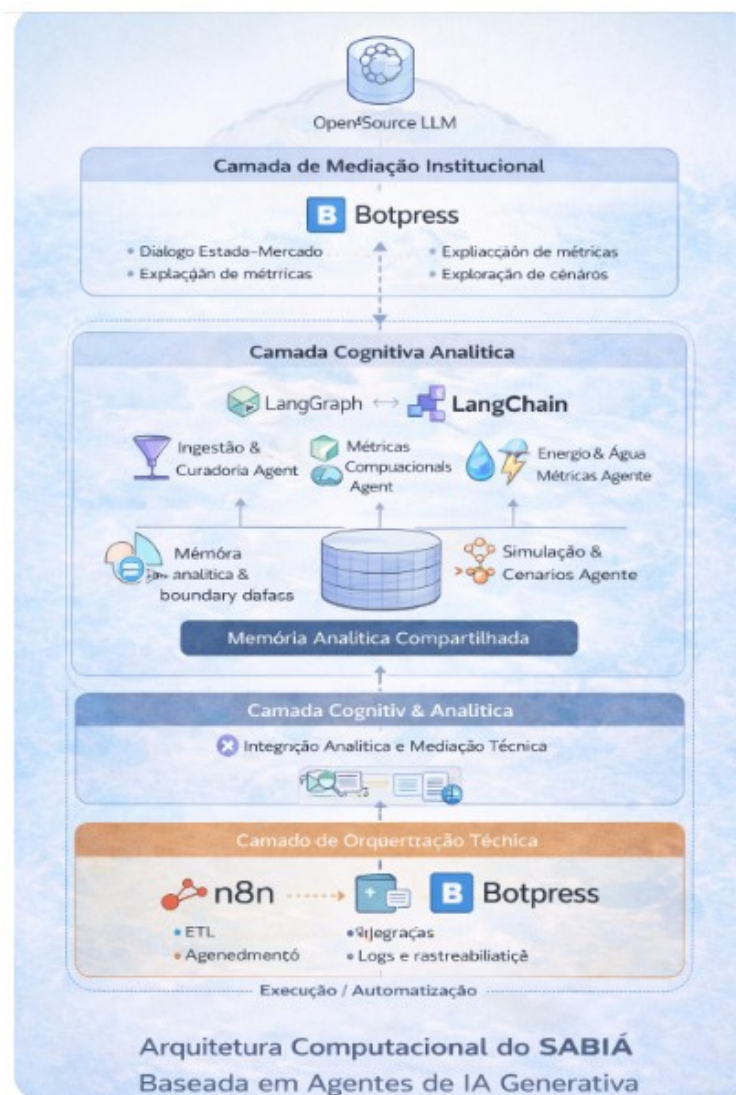
4.2.2 Camada Cognitiva Analítica

A Camada de Integração Analítico-Cognitiva constitui o núcleo do framework SABIÁ, materializando o módulo de Integração Analítica e Mediação Técnica. Nela, métricas computacionais, energéticas, hídricas, territoriais e institucionais são integradas e transformadas em análises relacionais, cenários comparáveis e trade-offs explícitos. Agentes de IA especializados operam sobre dados heterogêneos para calcular métricas primárias e derivadas (como FLOPs/kWh, PUE e WUE), integrar domínios e baselines temporais e gerar análises baseadas em cenários típicos de carga (treinamento, inferência ou operação mista).

O objetivo não é classificar ou prescrever decisões, mas explicitar relações, dependências e limites físicos verificáveis. Nesse contexto, o indicador FLOPs/kWh é tratado como *boundary object*: tecnicamente rigoroso para operadores privados e, ao mesmo tempo, interpretável e auditável no âmbito da governança pública. Seu significado emerge apenas da integração com outras métricas e restrições contextuais, evitando leituras isoladas ou normativas. Essa camada assegura que nenhuma métrica individual domine a análise, estruturando o processo decisório a partir de mediação analítica explícita, redução de assimetrias informacionais e construção de evidências comparáveis para negociação e políticas públicas.

4.2.3 Camada de Mediação Institucional

A Camada de Mediação Institucional provê a interface de interação entre o sistema analítico do SABIÁ e os atores humanos — formuladores de políticas, reguladores e operadores privados. Seu papel é mediar compreensão, interpretação e negociação, sem executar cálculos ou orquestrar processos.



Essa camada oferece interação em linguagem natural com os resultados analíticos, explicação de métricas, pressupostos e limitações, além da exploração interativa de cenários e trade-offs. Com isso, viabiliza o diálogo baseado em evidências entre Estado e Mercado. Ao separar a mediação institucional da execução analítica, a arquitetura preserva o rigor técnico e assegura acessibilidade e interpretabilidade.

Nesse contexto, *boundary objects* como FLOPs/kWh podem ser analisados e negociados de forma transparente, sem exposição da complexidade interna do sistema ou de informações operacionais sensíveis.

5. Resultados Já Alcançados

Os resultados do SABIÁ organizam-se em três dimensões, refletindo seu caráter de framework analítico compute-aware e sua validação progressiva em contextos reais.

5.1 Resultados científicos e conceituais

No plano científico, o principal resultado é a formalização de um arcabouço analítico para a caracterização de datacenters de IA como infraestrutura crítica, integrando métricas clássicas (PUE, WUE) a métricas computacionais (FLOPs/ano, FLOPs/kWh).

Essa integração supera abordagens fragmentadas da literatura, que tratam eficiência energética, sustentabilidade e desempenho computacional de forma dissociada. A consolidação conceitual do SABIÁ foi estruturada em duas obras de referência: *Soberania Digital: Colonialismo e Letramento*, que enquadra a soberania digital como capacidade técnica mensurável, e *SABIÁ Soberania e Autonomia Brasileira em Inteligência Artificial*, que estabelece os fundamentos analíticos do framework.

Complementarmente, o SABIÁ foi discutido e criticamente avaliado em ambientes científicos da área de Computação, incluindo seminários e debates técnicos no âmbito da comunidade acadêmica brasileira, com destaque para a Sociedade Brasileira de Computação (SBC), contribuindo para a validação conceitual e a difusão do framework.

5.2 Resultados metodológicos e analíticos

Do ponto de vista metodológico, o principal resultado do SABIÁ foi a definição e operacionalização de um conjunto parcimonioso de métricas-chave, com destaque para FLOPs/kWh como indicador-síntese da eficiência computacional energética de datacenters de IA. A adoção dessa métrica evidenciou, de forma analítica, que boas práticas infraestruturais (como baixos valores de PUE) não implicam, necessariamente, alta produtividade computacional, reforçando a necessidade de métricas que relacionem consumo energético a desempenho efetivo.

A aplicação experimental do framework possibilitou a construção de cenários comparativos que relacionam capacidade computacional e potência instalada, bem como a análise de trade-offs entre eficiência energética, densidade computacional e escalabilidade. Adicionalmente, permitiu avaliar impactos hídricos ponderados pelo perfil de carga computacional e identificar gargalos infraestruturais associados à conectividade e ao acoplamento territorial. Esses resultados confirmam a adequação do SABIÁ como instrumento de análise macro-analítica, capaz de subsidiar decisões estratégicas e negociações informadas sem interferir na operação micro-operacional.

5.3 Validação empírica e resultados institucionais

A validação empírica do SABIÁ deu-se por sua aplicação ao Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CE), território em preparação para receber um datacenter de IA de grande escala (≈ 300 MW), permitindo testar a coerência e a aplicabilidade do framework em um contexto real de elevada complexidade técnica, energética e territorial. Como resultado institucional, dez proposições derivadas da análise integrada de métricas computacionais, energéticas e territoriais foram incorporadas pelo Governo do Estado do Ceará como referência para políticas públicas de atração e governança de datacenters de IA, evidenciando a transferência de conhecimento científico para a esfera decisória sem perda do caráter analítico do framework.

Adicionalmente, o SABIÁ passou a orientar debates técnicos no ecossistema IRACEMA Digital, indicando um nível de maturidade compatível com TRL 3–4 e potencial de evolução com sua incorporação a instrumentos institucionais e plataformas de avaliação.

6. Conclusão

Este artigo apresentou o SABIÁ como um arcabouço analítico *compute-aware* integrando conceituação, arquitetura e framework voltado à caracterização e à governança de datacenters de Inteligência Artificial enquanto infraestruturas críticas computacionais. Parte-se do diagnóstico de que métricas infraestruturais clássicas, como PUE e WUE, embora necessárias, são insuficientes para avaliar infraestruturas intensivas em IA, justificando a incorporação sistemática de métricas computacionais, com destaque para FLOPs/kWh.

A principal contribuição do SABIÁ reside no tratamento de FLOPs/kWh como um *boundary object*, capaz de mediar a relação entre Estado e Mercado ao reduzir assimetrias informacionais sem interferir na operação interna ou nos segredos industriais dos datacenters. Essa mediação é operacionalizada por uma arquitetura em camadas, na qual o módulo de Integração Analítica e Mediação Técnica transforma métricas isoladas em cenários comparáveis e *trade-offs* verificáveis.

A análise evidencia que, apesar da convergência internacional em torno de métricas infraestruturais tradicionais, persiste uma lacuna na incorporação sistemática de métricas de desempenho computacional em frameworks de governança, em grande parte devido à interdependência entre variáveis técnicas e fatores subjetivos que permeiam as negociações entre Estado e Mercado. O SABIÁ contribui para preencher essa lacuna ao articular, em nível macroanalítico, computação, energia, água e território, permitindo que aspectos como contrapartidas equitativas, participação social e impactos sobre comunidades locais sejam explicitamente considerados.

A aplicação do framework ao estudo de caso do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CE) demonstra sua viabilidade em um contexto real de grande escala, compatível com um nível de maturidade tecnológica TRL 3–4. Do ponto de vista estratégico, o SABIÁ oferece subsídios técnicos para orientar decisões nacionais sobre infraestrutura de IA com base em critérios auditáveis de capacidade computacional, sustentabilidade ambiental e soberania digital.

Em síntese, o mantra que orienta o SABIÁ é claro:

datacenters representam uma oportunidade relevante de desenvolvimento econômico para o país, desde que acompanhados de contrapartidas sociais efetivas, investimentos locais em ciência, tecnologia e inovação, e respeito rigoroso aos acordos ambientais e territoriais.

Declaração de Uso de IA Generativa

Declaramos o uso de ferramentas de Inteligência Artificial generativa na revisão deste artigo, em conformidade com o **Código de Conduta para Autores em Publicações da Sociedade Brasileira de Computação (SBC)**.

Referências

- Ayers, J. W., Poliak, A., Dredze, M., et al. (2023). Comparing physician and artificial intelligence chatbot responses to patient questions posted to a public social media forum. *JAMA Internal Medicine*, 183(6):589–596.
- Bommasani, R., Hudson, D. A., Adeli, E., Altman, R., Arora, S., von Arx, S., Bernstein, M. S., Bohg, J., Bosselut, A., Brunskill, E., Brynjolfsson, E., et al. (2021). On the opportunities and risks of foundation models. *arXiv*.
- Agência Brasil. 2025. Governo do ceará promete água de reuso para instalar data center. (Sept. 2025). Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2025-09/governo-do-ceara-promete-agua-de-reusopara-instalar-data-center>.
- Brasil. 2025. Medida provisória n. 1.318/2025 (REDATA): institui regime especial de tributação para serviços de data center. Retrieved Jan. 16, 2026 from https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2025/Mpv/mpv1318.htm.
- Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. 2025. Plano brasileiro de inteligência artificial (pbia) 2024–2028: ia para o bem de todos. (June 2025). Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-mcti/noticias/2025/06/mcti-lanca-plano-brasileiro-de-inteligencia-artificial-ia-para-o-bem-de-todos/pbia-ia-para-o-bem-de-todos.pdf>.
- Central Statistics Office (Ireland). 2025. Data centres metered electricity consumption 2024: key findings. Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://www.cso.ie/en/releasesandpublications/ep/p-dmec/datacentresmeteredelectricityconsumption2024/keyfindings/>.
- Commission for Regulation of Utilities (CRU). 2021. Data centre connection policy: Decision paper. Tech. rep. CRU/21/124. CRU. Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://cru.ie/live.storage.googleapis.com/cru-media/documents/CRU212124.pdf>.
- Miyuru Dayarathna, Yonggang Wen, and Rui Fan. 2016. Data center energy consumption modeling: a survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18, 1, 732–794. doi:10.1109/COMST.2015.2481183.
- International Energy Agency. 2024. Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026. Tech. rep. IEA. Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>.

- ADVANCE, 2026. SABIÁ: A Guideline for the installation of AI Data Centers as Critical Infrastructure in Brazil. Submetido ao ADVANCE'2026, March 25–28, 2026, Florianopolis, SC-Brazil
- ISO/IEC. 2022. Iso/iec 30134-9:2022: data centres — key performance indicators — part 9: water usage effectiveness (wue). (2022). Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://www.iso.org/contents/data/standard/07/76/77692.html>.
- Oliveira A.M.B and Lemos G. 2025. Sabiá: soberania e autonomia brasileira em inteligência artificial. Retrieved Jan. 16, 2026 from https://amauroboliveira.wordpress.com/wp-content/uploads/2026/01/2025_jan12_-_sabiá_-_draft_25.pdf.
- Oliveira A.M.B. 2025. Datacenters de ia no ceará: estratégia para negociação, governança e desenvolvimento sustentável. Public policy proposal document. Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://maurooliveira.blog/0-datacenters/>.
- Oliveira A.M.B. 2025. Soberania Digital. Omni Editora. isbn: 9786501684239.
- Reuters. 2025. Omnia joins \$9 billion tiktok data center project in brazil, expected to have 300 mw capacity. (Nov. 2025). Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://www.reuters.com/business/omnia-joins-9-billion-tiktok-data-centerproject-brazil-expected-have-300-mw-capacity-2025-11-04/>.
- U.S. Congress. 2018. Clarifying lawful overseas use of data (cloud) act. Retrieved Jan. 16, 2026 from <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/housebill/4943>.
- Sousa, F. J. G., Freitas, U. D., Torres, A. N. C., Freire Neto, J. B., Freire, A. F. A. A., Ramos, R. F., Moura Filho, C. O., Barreto, I. C. H. C., Andrade, L. O. M., and Oliveira, A. M. B. (2024). Giselle, uma plataforma que analisa sentimentos da pessoa idosa, apoiada por inteligencia artificial generativa. Volume 1, pages 174–194. Editorial Casa, Curitiba, PR, Brazil, 1 edition
- World Health Organization (2021). Ethics and Governance of Artificial Intelligence for Health. World Health Organization, Geneva.