

INSTITUTO FEDERAL DO MATO GROSSO

ERICK CARVALHO MATUCK

T.M.C. – CONDENSADOR MOLECULAR TROPOSFÉRICO
Uma Solução Inovadora para Enfrentar as Mudanças Climáticas

POUSO ALEGRE
2025

INSTITUTO FEDERAL DO MATO GROSSO

ERICK CARVALHO MATUCK

T.M.C. – CONDENSADOR MOLECULAR TROPOSFÉRICO
Uma Solução Inovadora para Enfrentar as Mudanças Climáticas

**Trabalho submetido à Faculdade de
Direito do Sul de Minas, onde o autor
encontra-se regularmente
matriculado, como proposta de
pesquisa científica independente para
participação no Prêmio Jovem
Cientista 2025, sob a orientação do
Prof. João Edson Costa Ferreira da
Silva, docente do IFMT.**

**POUSO ALEGRE
2025**

T.M.C. – CONDENSADOR MOLECULAR TROPOSFÉRICO

T.M.C – TROPOSPHERIC MOLECULAR CONDENSER

Erick Carvalho Matuck¹
João Edson Costa Ferreira da Silva²

Resumo

O presente trabalho detalha o desenvolvimento e a análise de viabilidade do T.M.C. (Tropospheric Molecular Condenser), um sistema aerostático autônomo projetado para capturar vapor d'água na troposfera e distribuí-lo estrategicamente, visando combater a seca e promover a recuperação ecológica em regiões impactadas pelas mudanças climáticas. Diante da intensificação de eventos climáticos extremos, como as secas recordes de 2024, e da crescente pressão sobre os recursos hídricos, o T.M.C. propõe uma solução tecnológica inovadora, explorando o vasto reservatório de água atmosférica. A estrutura utiliza balões de hélio para sustentação, malhas de poliéster otimizadas para condensação, placas de grafite para controle térmico adaptativo (permitindo operação em climas frios/secos), tanques internos para armazenamento e um sistema de aspersão controlada. Simulações computacionais, baseadas em modelos termodinâmicos e de dinâmica de fluidos, indicam uma capacidade de coleta de 250 a 1000 litros de água por dia, dependendo das condições atmosféricas e do modo de operação. A análise discute o potencial de aplicação para restauração de biomas vulneráveis (como o Pantanal), as vantagens e desafios frente a outras tecnologias de captação de água atmosférica (AWG), e as implicações para políticas públicas de adaptação e segurança hídrica. O projeto alinha-se às linhas de pesquisa do 31º Prêmio Jovem Cientista, focando em resiliência climática, soluções sustentáveis para desastres e inovação tecnológica como resposta aos desafios ambientais contemporâneos, embora a validação experimental seja um passo futuro essencial.

Palavras-chave: Condensação atmosférica, Recursos hídricos, Mudanças climáticas, Recuperação ecológica, Inovação tecnológica.

Abstract

The present work details the development and feasibility analysis of the T.M.C. (Tropospheric Molecular Condenser), an autonomous aerostatic system designed to capture water vapor in the troposphere and distribute it strategically, aiming to combat drought and promote ecological recovery in regions impacted by climate change. Faced with the intensification of extreme weather events, such as the record droughts of 2024, and the increasing pressure on water resources, T.M.C. proposes an innovative technological solution, exploiting the vast reservoir of atmospheric water. The structure utilizes helium balloons for support, polyester meshes optimized for condensation, graphite plates for adaptive thermal control (allowing operation in cold/dry climates), internal tanks for storage, and a controlled sprinkler system. Computer simulations, based on thermodynamic and fluid dynamics models, indicate a collection capacity of 250 to 1000 liters of water per day, depending on atmospheric conditions and mode of operation. The analysis discusses the potential application for restoration of vulnerable biomes (such as the Pantanal), the advantages and challenges compared to other atmospheric water harvesting (AWG) technologies, and the implications for public policies for adaptation and water security. The project aligns with the research lines of the 31st Young Scientist Award, focusing on climate resilience, sustainable solutions to disasters and technological innovation as a response to contemporary environmental challenges, although experimental validation is an essential future step.

Keywords: Atmospheric condensation, Water resources, Climate change, Ecological recovery, Technological innovation.

¹ Graduando em Direito pela FDSM desde 2023. Diretor Financeiro e Presidente do Comitê da COP no projeto SINUPA. Estagiou na SEE-MG (2024) e na Justiça Federal – TRF6 (2025). Desenvolve pesquisa sobre Direitos Humanos e integra o grupo "Direitos Humanos: Migração e Refúgio" desde 2024.

² Professor do Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT) desde 2023. Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduado em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica e técnico em Agrimensura pelo IFSULDEMINAS. Atua nas áreas de fotogrametria com ARP, GEOBIA e sensoriamento remoto aplicado a dados florestais. Coordenador local do Projeto Espaço 4.0 (2023–2025). Fundador da empresa Accuracy – Topografia e Geotecnologias.

1 INTRODUÇÃO

O século XXI testemunha uma escalada sem precedentes dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, cujos efeitos se manifestam de forma cada vez mais severa e frequente nos ecossistemas globais e nas estruturas sociais humanas. O ano de 2024, em particular, consolidou-se como um marco alarmante, quebrando múltiplos recordes climáticos e evidenciando uma profunda perturbação no ciclo hidrológico global, conforme documentado extensivamente pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) em seu relatório "Estado do Clima Global 2024" (WMO, 2025).

Este relatório confirmou 2024 como o ano mais quente já registrado nos 175 anos de observações instrumentais, com a temperatura média global próxima à superfície atingindo $1,55 \pm 0,13$ °C acima da média pré-industrial (1850-1900). Embora este valor anual não signifique, por si só, o rompimento permanente do limite de 1,5°C estabelecido no Acordo de Paris – que se refere a médias de longo prazo –, ele sinaliza uma aproximação perigosa e um aumento substancial dos riscos associados (WMO, 2025; ONU News, 2025). A década de 2015-2024 foi a mais quente já registrada, com cada um dos últimos dez anos figurando individualmente entre os dez mais quentes da história (Observatório do Clima, 2025).

A causa primária para este aquecimento acelerado reside na contínua elevação das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE). Em 2023, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) atingiu 151% acima dos níveis pré-industriais, a maior em pelo menos 800 mil anos. As concentrações de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) também alcançaram níveis recordes, respectivamente 266% e 124% acima dos valores de 1750 (Observatório do Clima, 2025). Dados preliminares para 2024 indicam que essa tendência de aumento persistiu, intensificando o desequilíbrio energético do planeta.

Os oceanos, que absorvem cerca de 90% do calor extra retido pelos GEE, também registraram temperaturas recordes em 2024, dando continuidade a uma tendência de aquecimento que impacta severamente os ecossistemas marinhos, contribui para a intensificação de ciclones tropicais e acelera a elevação do nível do mar (WMO, 2025). A taxa média global de elevação do nível do mar na última década (2015-2024) foi de 4,7 mm/ano, mais que o dobro da taxa observada entre 1993-2002 (2,1 mm/ano). Além disso, a absorção contínua de CO₂ intensificou a acidificação oceânica a taxas sem precedentes nos últimos 26 mil anos, comprometendo a vida marinha e a capacidade futura dos oceanos de mitigar as emissões (Observatório do Clima, 2025). Essas mudanças nos oceanos são consideradas irreversíveis em escalas de centenas a milhares de anos (WMO, 2025).

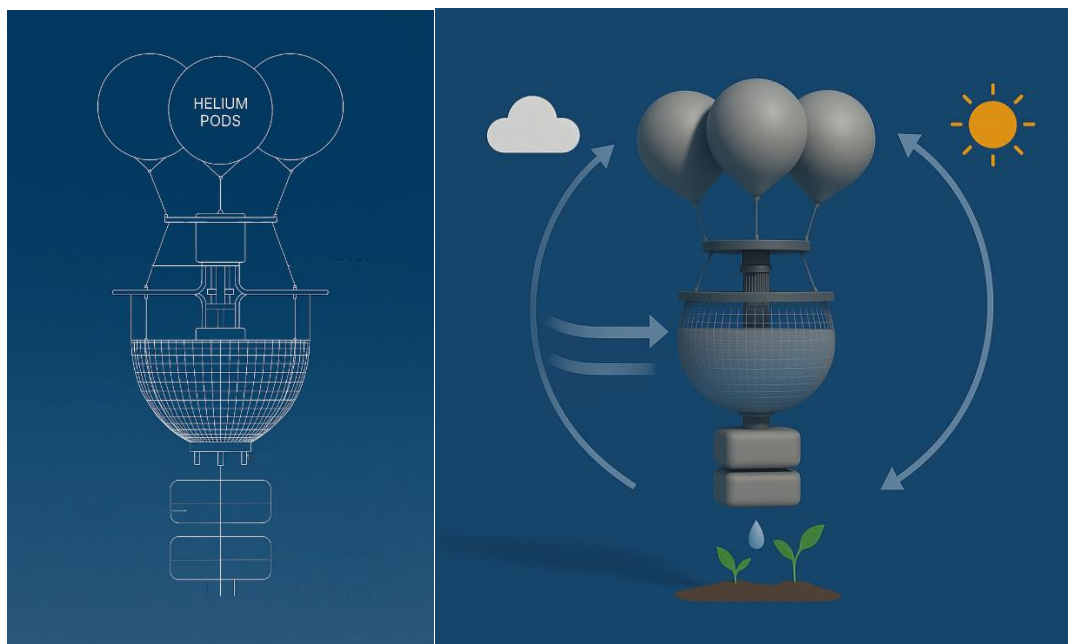
O derretimento acelerado das criosferas é outra consequência direta. Geleiras em todo o mundo continuaram a perder massa em 2024, ameaçando a segurança hídrica de milhões de pessoas que dependem do degelo sazonal. A extensão do gelo marinho no Ártico atingiu seu sétimo menor mínimo histórico, enquanto na Antártida, pelo terceiro ano consecutivo, a extensão mínima ficou abaixo de 2 milhões de km² (Observatório do Clima, 2025).

Os impactos socioeconômicos desses indicadores climáticos foram devastadores em 2024. Eventos climáticos e meteorológicos extremos, como ondas de calor intensas, inundações catastróficas, secas prolongadas, incêndios florestais e ciclones tropicais, causaram perdas de vidas, destruição de infraestrutura e agravaram a insegurança alimentar e os deslocamentos populacionais. O relatório da OMM destaca que 2024 viu o maior número de deslocados por eventos extremos em 16 anos (Observatório do Clima, 2025). Na África Austral, por exemplo, a seca severa levou a quebras de safra superiores a 50% em diversos países. No Brasil, as inundações históricas no Rio Grande do Sul deslocaram centenas de milhares de pessoas, enquanto a Amazônia enfrentou secas severas (CEMADEN, 2025; Observatório do Clima, 2025).

A situação no Brasil é emblemática da vulnerabilidade regional. A mega seca de 2024, afetando quase 60% do território, foi a mais intensa já registrada, com consequências dramáticas para biomas como a Amazônia e o Pantanal (CEMADEN, 2025). O Pantanal, em particular, enfrenta uma ameaça existencial, com a contínua redução de sua superfície de água levantando preocupações sobre seu colapso como bioma funcional nas próximas décadas (Jornal da USP, 2024). Este cenário é exacerbado pelo desmatamento em biomas vizinhos, que interrompe ciclos hidrológicos vitais como os "rios voadores", essenciais para a distribuição de chuvas na América do Sul (Jornal da USP, 2024).

Diante desta crise climática e hídrica multifacetada, a busca por soluções inovadoras que promovam a adaptação e a resiliência torna-se um imperativo global. O acesso à água, fundamental para a vida e o desenvolvimento, está cada vez mais ameaçado, exigindo a exploração de fontes alternativas. A atmosfera, com seus vastos reservatórios de vapor d'água (estimados em 13 trilhões de toneladas), emerge como um recurso potencial significativo, embora subutilizado (T.M.C. resumo completo, 2024). Neste contexto desafiador, o projeto T.M.C. (Tropospheric Molecular Condenser) propõe uma abordagem tecnológica disruptiva: um sistema aerostático projetado para operar na troposfera, capturando vapor d'água atmosférico de forma eficiente, armazenando-o e liberando-o de maneira controlada para auxiliar na recuperação de ecossistemas degradados e mitigar os efeitos da seca. Ao operar em

altitudes elevadas, o T.M.C. visa acessar concentrações de umidade potencialmente maiores e otimizar o processo de condensação.



A proposta do T.M.C. dialoga diretamente com o tema do 31º Prêmio Jovem Cientista: "Resposta às Mudanças Climáticas: Ciência, Tecnologia e Inovação como Aliadas". O projeto representa uma aplicação concreta da ciência e da engenharia para desenvolver uma ferramenta de adaptação climática, com potencial para gerar impacto positivo em regiões vulneráveis. Ele se insere claramente nas linhas de pesquisa prioritárias do edital, como "Resiliência e adaptação às mudanças climáticas: estratégias de adaptação em zonas vulneráveis e sistemas preditivos" (1.4.1.a), "Soluções de produtos sustentáveis e eficazes para combate a desastres" (1.4.1.j) e "Políticas públicas, gestão integrada e iniciativas colaborativas no enfrentamento das mudanças climáticas" (1.4.1.k).

Este trabalho se propõe a detalhar o desenvolvimento conceitual, a estrutura técnica, os princípios de funcionamento, os materiais empregados, o sistema de controle e a análise de viabilidade do T.M.C. Serão explorados os resultados das simulações de desempenho em diferentes condições climáticas e discutido o potencial de aplicação prática do dispositivo como ferramenta para a recuperação ecológica e como instrumento de políticas públicas de adaptação, à luz dos urgentes desafios climáticos e hídricos evidenciados pelos dados de 2024.

2 OBJETIVOS

O desenvolvimento do Tropospheric Molecular Condenser (T.M.C.) tem como objetivo principal fornecer uma solução tecnológica inovadora para a captação e distribuição

estratégica de água atmosférica em regiões afetadas pela seca, contribuindo para a recuperação ecológica de solos degradados e para a adaptação aos efeitos das mudanças climáticas.

Como objetivos específicos, o projeto busca:

1. Desenvolver um sistema autônomo e energeticamente eficiente para condensação de vapor d'água atmosférico na troposfera, utilizando materiais leves e resistentes que permitam sua operação em diferentes condições climáticas;
2. Criar um mecanismo de armazenamento e liberação controlada de água que maximize o potencial de recuperação ecológica do solo em áreas degradadas, favorecendo o desenvolvimento gradual de microorganismos, líquens, vegetação rasteira e, posteriormente, espécies vegetais de pequeno e médio porte;
3. Implementar um sistema de monitoramento e controle remoto que permita a otimização do funcionamento do dispositivo, garantindo sua eficiência e segurança operacional;
4. Estabelecer parâmetros de adaptabilidade do sistema para diferentes condições climáticas, desenvolvendo protocolos específicos para operação em regiões quentes e frias, com destaque para o uso de placas de grafite para otimização térmica;
5. Propor um modelo de implementação do t.m.c. como ferramenta de políticas públicas para combate à desertificação e promoção da segurança hídrica em regiões vulneráveis do Brasil, considerando os dados recentes sobre a intensificação das secas.

Estes objetivos estão alinhados com as metas de desenvolvimento sustentável da ONU, especialmente aquelas relacionadas à ação contra a mudança global do clima (ODS 13), à vida terrestre (ODS 15) e à água potável e saneamento (ODS 6), reforçando o compromisso do projeto com a busca de soluções integradas para os desafios ambientais contemporâneos.

3 ESTRUTURA E DETALHAMENTO TÉCNICO

O Tropospheric Molecular Condenser (T.M.C.) foi concebido como um sistema aerostático modular, otimizado para operar autonomamente na troposfera, maximizando a captação de vapor d'água e sua distribuição controlada. A seguir, detalha-se a estrutura, os componentes e os aspectos técnicos fundamentais do projeto.

3.1 CONCEPÇÃO ESTRUTURAL GERAL E PRINCÍPIOS AEROSTÁTICOS

A estrutura do T.M.C. baseia-se em princípios aerostáticos, utilizando a flutuabilidade proporcionada por gás hélio para sustentar o dispositivo na altitude operacional

desejada dentro da troposfera (tipicamente entre 2 a 8 km, onde a concentração de vapor d'água e as condições de temperatura podem ser mais favoráveis à condensação, dependendo da região e da estação do ano). A escolha do hélio se deve à sua baixa densidade (aproximadamente 0.1786 g/L ao nível do mar), inércia química (segurança contra ignição) e disponibilidade, apesar do custo relativamente elevado e da necessidade de contenção eficaz devido à sua pequena molécula.

A arquitetura geral é modular, permitindo a integração de subsistemas especializados e facilitando a montagem, manutenção e potenciais atualizações. A estrutura central conecta os módulos de flutuação, captação/condensação, controle térmico, armazenamento e liberação de água, garantindo a integridade estrutural e a funcionalidade integrada do sistema.

3.2 DETALHAMENTO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS

3.2.1 HELIUM PODS (CASULOS DE HÉLIO - MÓDULO DE FLUTUAÇÃO):

- Função: prover a sustentação aerostática necessária para manter o t.m.c. na altitude operacional.
- Estrutura: quatro unidades (pods) esféricas ou semi-esféricas de grande volume, dispostas simetricamente em torno do eixo central superior da estrutura. esta configuração visa otimizar a estabilidade e a distribuição de peso.
- Material: envelope fabricado em tecido de poliéster de alta tenacidade, revestido interna e externamente com camadas de poliuretano termoplástico (tpu) ou material compósito similar. esta combinação busca oferecer:
 - Baixa permeabilidade ao hélio: minimizar a perda gradual de gás, estendendo os intervalos de recarga.
 - Resistência mecânica: suportar as tensões estruturais, variações de pressão atmosférica e potenciais impactos (ex: granizo leve).
 - Resistência uv e ambiental: durabilidade frente à radiação solar intensa em altitude e a condições atmosféricas variáveis.
 - Leveza: minimizar o peso próprio da estrutura.
- Dimensionamento (estimado): o volume total de hélio necessário dependerá do peso total do dispositivo (estrutura, água armazenada, sistemas) e da altitude operacional desejada (a densidade do ar diminui com a altitude, exigindo maior volume para a mesma força de flutuação). Estimativas preliminares sugerem volumes individuais da ordem de centenas a poucos

milhares de metros cúbicos por pod, resultando em diâmetros significativos (ex: 10-20 metros por pod).

- Sistema de controle de gás: cada pod possui um acesso controlado por válvula, conectado a um módulo de controle de nível de gás (sensor de pressão/volume) e a um sistema de segurança (válvula de alívio de sobrepressão). Prevê-se a possibilidade de recarga em voo ou durante manutenções programadas.

3.2.2 GRAPHITE PLATES (PLACAS DE GRAFITE - MÓDULO DE CONTROLE TÉRMICO)

- Função: aquecer controladamente o ar que entra na área de condensação, especialmente em ambientes frios ou com baixa umidade relativa, para aumentar a capacidade do ar de reter vapor d'água antes do choque térmico na malha fria, otimizando a eficiência da condensação.
- Estrutura: placas planas (circulares ou octogonais para melhor integração estrutural) localizadas estrategicamente abaixo dos helium pods e acima da malha de condensação. A área superficial deve ser maximizada para garantir uma transferência de calor eficaz ao fluxo de ar.
- **Material:** grafite pirolítico ou compósitos à base de grafite. A escolha se justifica por:
 - **Alta condutividade térmica:** tipicamente entre 200-500 w/mk (east carbon, 2024), permitindo aquecimento rápido e eficiente com menor consumo energético.
 - **Baixa densidade:** comparado a metais com condutividade similar.
 - **Resistência química e térmica:** estabilidade em ampla faixa de temperatura e resistência à corrosão atmosférica.
 - **Capacidade de aquecimento:** as placas são projetadas para serem aquecidas eletricamente (efeito joule) através de resistências integradas ou pela passagem de corrente direta pelo material condutor.
- O controle: a temperatura das placas é controlada ativamente pelo sistema central, com base nos dados dos sensores de temperatura e umidade do ar ambiente e na estratégia operacional definida (clima frio/quente).

3.2.3 POLYESTER MESH (MALHA DE POLIÉSTER - MÓDULO DE CAPTAÇÃO/CONDENSAÇÃO)

- Função: prover uma grande área superficial para a condensação do vapor d'água atmosférico. O ar úmido (naturalmente ou após passar pelas placas de grafite aquecidas) entra em contato com a malha, que idealmente estará a uma temperatura inferior ao ponto de orvalho do ar, provocando a mudança de fase do vapor para líquido.
- Estrutura: uma grande malha com geometria aproximadamente esférica ou parabólica envolvendo a seção central do dispositivo. A estrutura deve ser permeável ao ar, mas com filamentos finos e densidade adequada para maximizar a área de contato e a eficiência da captura de gotículas
- Material: diversos materiais foram considerados, sendo o poliéster uma base promissora devido à sua resistência, durabilidade e custo. Variações incluem:
 - Poliéster com revestimento hidrofílico/hidrofóbico: tratamentos de superfície podem otimizar a nucleação de gotas e/ou o escoamento da água condensada para os coletores
 - Malha fina de poliéster revestida de silicone: pode oferecer boa durabilidade e propriedades de superfície controladas.
 - Outras opções: polipropileno, nylon (considerar degradação uv), algodão (baixa durabilidade), poliéster reciclado (sustentabilidade).
- Sistema de coleta: a água condensada na malha deve escoar por gravidade para um sistema de calhas ou coletores na base da malha, que a direciona para os tanques internos.

3.2.4 . INTERNAL TANKS (TANQUES INTERNOS - MÓDULO DE ARMAZENAMENTO)

- Função: armazenar a água coletada pelo processo de condensação.
- Estrutura: dois ou mais tanques modulares, possivelmente com formato retangular ou cilíndrico otimizado para o espaço disponível na estrutura central inferior. A modularidade facilita o gerenciamento do peso e do centro de gravidade do dispositivo.
- Material: lona de poliéster de alta resistência com revestimento interno impermeável e atóxico (adequado para água potável, embora a aplicação

primária seja ecológica). O material deve ser flexível para acomodar variações de volume e leve.

- **Capacidade (estimada):** a capacidade total dependerá do balanço entre a taxa de coleta diária (50-200 l/dia) e a estratégia de liberação. Capacidades da ordem de 500 a 2000 litros podem ser consideradas, impactando diretamente o peso total e, conseqüentemente, o dimensionamento dos helium pods.
- **Sistema de controle:** sensores de nível monitoram o volume armazenado. Válvulas controladas permitem o direcionamento da água para o sistema de aspersão.

3.2.5 SPRINTER SYSTEM (SISTEMA DE ASPERSÃO - MÓDULO DE LIBERAÇÃO)

- **Função:** liberar a água armazenada de forma controlada e direcionada sobre a área alvo no solo.
- **Estrutura:** um sistema de tubulações e bicos aspersores localizado na parte inferior do t.m.c. o design pode incluir braços retráteis ou direcionáveis para otimizar a área de cobertura. Bombas de baixa potência, alimentadas pelo sistema energético, impulsionam a água.
- **Controle:** a liberação é controlada pelo sistema central, baseada em parâmetros como nível de água nos tanques, condições meteorológicas no solo (evitar liberação durante chuvas ou ventos fortes), programação pré-definida ou comandos remotos. A taxa de liberação pode ser ajustada para simular diferentes regimes de precipitação leve.

3.2.6 CENTRAL COLUMN E ESTRUTURA DE SUPORTE

- **Função:** prover a espinha dorsal estrutural do t.m.c., conectando todos os módulos principais e distribuindo as cargas (peso, tensões aerodinâmicas).
- **Estrutura:** uma coluna ou treliça vertical, fabricada em materiais compósitos leves e resistentes, fibra de carbono, ligas de alumínio, percorrendo o eixo central do dispositivo.
- **Integração:** aloja passagens para sistemas elétricos, tubulações de água e linhas de controle entre os diferentes módulos.

3.3 SISTEMA DE CONTROLE, MONITORAMENTO E COMUNICAÇÃO

O cérebro do t.m.c. é um sistema computadorizado central, responsável por gerenciar todas as operações de forma autônoma e permitir intervenção remota.

- Hardware: um computador embarcado de baixo consumo, resistente a condições ambientais adversas (temperatura, umidade, vibração).
- Sensores: uma rede de sensores monitora continuamente:
 - Condições atmosféricas: temperatura, umidade relativa, pressão barométrica, velocidade e direção do vento (em altitude).
 - Estado do sistema: nível de gás nos pods, nível e qualidade (turbidez, ph opcional) da água nos tanques, temperatura das placas de grafite, estado de carga das baterias, produção dos painéis solares, posição gps, altitude.
 - Condições no solo (via comunicação remota ou sensores locais): umidade do solo, temperatura, precipitação local.
- Software e algoritmos: algoritmos de controle otimizam a operação com base nos dados dos sensores e nos objetivos definidos.
 - Controle de altitude: ajuste fino da fluutuabilidade (liberação controlada de lastro ou gás) ou planejamento de trajetória(padão deve ser fixo).
 - Otimização da condensação: ativação e ajuste da temperatura das placas de grafite, orientação da malha (se possível).
 - Gerenciamento da água: controle do fluxo para armazenamento e decisão sobre o momento e a taxa de liberação.
 - Gerenciamento de energia: otimização do consumo, priorização de funções, controle de carga/descarga das baterias.
 - Autodiagnóstico e segurança: detecção de falhas.
 -
- Comunicação: um sistema de comunicação via rádio para casos de queda de energia ou falha módulo de conexão via internet, permitindo:
 - Telemetria: envio de dados operacionais e ambientais para uma estação de controle em terra.
 - Comandos remotos: recebimento de instruções para ajuste de parâmetros, mudança de modo operacional ou acionamento manual da liberação de água.

- O controle químico (segurança): módulos específicos são capazes de analisar a água coletada para detectar contaminantes, prevenindo a liberação de água imprópria e alertando sobre possíveis adulterações.

3.3.1 Arquitetura do sistema

MÓDULO	COMPONENTES	FUNÇÃO
Sensores atmosféricos	Bme280 (temperatura, umidade, pressão)	Monitorar condições ambientais em altitude.
	Anemômetro ultrasônico (ex: gill windsonic)	Medir velocidade e direção do vento.
Sensores de sistema	Sensor de nível de gás (ex: mq-4 para hélio)	Monitorar vazamentos nos pods.
	Sensores de turbidez e ph (ex: dfrobot sen0189)	Verificar qualidade da água coletada.
	Sensor de temperatura ir (ex: mlx90614)	Medir temperatura das placas de grafite.
	Gps neo-6m	Geolocalização e altitude.
Energia	Mppt (ex: adafruit solar charger) + bateria lifepo4 (12v, 10ah)	Gerenciar energia solar e armazenamento.
Comunicação	Módulo satelital iridium 9603n (ou lorawan para áreas com cobertura celular)	Enviar telemetria e receber comandos remotos.
Atuadores	Drivers pwm (ex: pca9685)	Controlar potência das placas de grafite.
	Válvulas solenoides (12v)	Liberar água ou gás (controle de altitude).

Segurança	Circuito watchdog (ex: max6374	Reinício automático em caso de falha.
-----------	-----------------------------------	--

3.4 SISTEMA ENERGÉTICO AUTÔNOMO

A autonomia operacional é garantida por um sistema híbrido de captação e armazenamento de energia.

- Fonte primária: painéis solares fotovoltaicos flexíveis e de alta eficiência, integrados à superfície superior da estrutura (nos helium pods) para minimizar o sombreamento e maximizar a captação de radiação solar direta e difusa, que é mais intensa em altitude.
- Armazenamento: banco de baterias de íon-lítio de alta densidade energética e ciclo de vida longo, dimensionado para suprir a demanda energética durante períodos noturnos ou de baixa insolação. O sistema de gerenciamento de bateria (bms) é crucial para garantir a segurança e a longevidade das células.
- Consumidores: a energia alimenta as bombas do sistema de aspersão, o sistema de aquecimento das placas de grafite (principal consumidor em climas frios), o computador central, os sensores, os atuadores (válvulas, pistões) e o sistema de comunicação.
- Eficiência: o design visa minimizar o consumo energético através da seleção de componentes eficientes e da implementação de estratégias de operação otimizadas (ex: condensação passiva em climas quentes/úmidos)

3.5 . CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

- Estabilidade e controle de voo: a manutenção da posição e da estabilidade em altitude, sujeita a ventos variáveis, é um desafio significativo. Para isso contaria com sistemas de controle ativo, superfícies de controle aerodinâmico e estratégias de voo passivo (navegação por correntes de ar)
- Manutenção e ciclo de vida: o projeto deve prever procedimentos de manutenção periódica (recarga de hélio, limpeza de painéis e malhas, inspeção estrutural) e estimar um ciclo de vida útil para os componentes (estimado em 8-10 anos para a estrutura principal, com substituição de baterias e outros elementos conforme necessário).

- **Segurança operacional:** inclui redundância em sistemas críticos, mecanismos de pouso de emergência controlados e conformidade com regulamentações do espaço aéreo.

Este detalhamento técnico visa fornecer uma compreensão aprofundada da complexidade e das soluções de engenharia propostas para o T.M.C., fundamentando a análise de sua viabilidade e potencial de aplicação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento conceitual e a análise de viabilidade do tropospheric molecular condenser (t.m.c.) apoiaram-se em uma metodologia multidisciplinar, combinando princípios de termodinâmica, mecânica dos fluidos, ciência dos materiais, engenharia de sistemas e modelagem computacional. Esta seção detalha os métodos empregados na concepção, análise e simulação do desempenho do t.m.c

4.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: CONDENSAÇÃO ATMOSFÉRICA

O princípio fundamental de operação do t.m.c. é a condensação do vapor d'água presente na atmosfera. A metodologia baseou-se na análise das condições termodinâmicas que regem este processo:

- **Psicrometria:** utilizou-se cartas psicrométricas e equações de estado para relacionar temperatura do ar (bulbo seco), umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, pressão de vapor e entalpia do ar úmido em diferentes altitudes e condições atmosféricas. A equação de antoine-clapeyron foi empregada para estimar a pressão de saturação do vapor d'água em função da temperatura.
- **Ponto de orvalho:** a eficiência da condensação está diretamente ligada à capacidade de resfriar o ar úmido abaixo de sua temperatura de ponto de orvalho ou de resfriar uma superfície de contato abaixo dessa temperatura. A metodologia considerou a variação do ponto de orvalho com a altitude e as condições meteorológicas.
- **Transferência de massa e calor:** modelos de transferência de massa (difusão de vapor d'água do ar para a superfície de condensação) e transferência de calor (convecção do ar para a superfície, calor latente de condensação liberado) foram considerados para estimar as taxas de

condensação. Fatores como velocidade do vento relativo e as propriedades térmicas da malha de condensação são cruciais.

- **Nucleação:** o processo de condensação requer superfícies ou núcleos (aerossóis atmosféricos ou a própria superfície da malha) para que as primeiras gotas se formem. A metodologia considerou a importância da área superficial e das propriedades (hidrofilicidade/hidrofobicidade) da malha para otimizar a nucleação e o crescimento das gotas

4.2 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Dada a complexidade do sistema e a impossibilidade de testes físicos nesta fase, a avaliação de desempenho baseou-se extensivamente em simulações computacionais, utilizando abordagens de modelagem para diferentes subsistemas:

- **Modelo atmosférico:** utilizaram-se dados de análise atmosférica disponibilizados pelo inmet e modelos atmosféricos padrão para obter perfis verticais de temperatura, umidade relativa, pressão e densidade do ar em diferentes regiões geográficas e épocas do ano. Estes perfis serviram como condições de contorno para as simulações do t.m.c.
- **Dinâmica de fluidos computacional (cfd) - preliminar:** análises preliminares de cfd foram consideradas para modelar o escoamento do ar ao redor da estrutura aerostática do t.m.c., estimando os coeficientes de arrasto, as zonas de recirculação e a distribuição de velocidade do ar sobre a malha de condensação sob diferentes condições de vento relativo. Softwares como openfoam ou ansys fluent foram considerados para futuras implementações detalhadas.
- **Modelo de transferência de calor (placas de grafite):** simulou-se a transferência de calor das placas de grafite para o ar circundante utilizando modelos de condução (dentro da placa) e convecção (da placa para o ar). A equação do calor foi resolvida numericamente (método de diferenças finitas ou elementos finitos) para determinar a distribuição de temperatura na placa e a taxa de calor transferida ao ar em função da potência elétrica aplicada e da velocidade do fluxo de ar. A influência deste aquecimento na umidade relativa local foi calculada usando princípios psicrométricos.

- **Modelo de taxa de condensação:** desenvolveu-se um modelo analítico e numérico simplificado para estimar a taxa de condensação na malha. Este modelo integrou:
 - Dados atmosféricos (temperatura, umidade, pressão).
 - Temperatura da superfície da malha (influenciada pela temperatura do ar, radiação solar, resfriamento evaporativo e calor latente).
 - Coeficientes de transferência de massa e calor (estimados a partir de correlações empíricas para convecção forçada e natural sobre geometrias complexas).
 - Área superficial efetiva da malha. O modelo calculou o fluxo de massa de vapor d'água condensado por unidade de tempo.
- **Modelo de balanço energético:** um modelo de balanço energético foi implementado para avaliar a autonomia do sistema. Considerou-se:
 - **Geração:** energia solar captada pelos painéis fotovoltaicos, estimada com base na irradiância solar em altitude (considerando ângulo de incidência, eficiência dos painéis, área), e eficiência do sistema mppt (maximum power point tracking).
 - **Consumo:** demanda energética dos subsistemas (bombas, aquecimento das placas, eletrônica de controle, comunicação), estimada com base nas especificações técnicas e nos ciclos de operação simulados.
 - **Armazenamento:** capacidade e eficiência de carga/descarga do banco de baterias, considerando profundidade de descarga (dod) e estado de carga (soc). A simulação avaliou a capacidade do sistema de operar continuamente sob diferentes ciclos dia/noite e condições de insolação.
- **Modelo de dispersão hídrica e impacto ecológico (simplificado):** utilizou-se um modelo conceitual baseado em taxas de infiltração no solo (dependendo do tipo de solo), evapotranspiração potencial (etp, estimada por métodos como penman monteith simplificado) e curvas de crescimento vegetal simplificadas para estimar o impacto potencial da liberação controlada de água na umidade do solo e no estabelecimento inicial de vegetação em áreas degradadas.

4.3 PARÂMETROS E CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas considerando uma gama de parâmetros e cenários para avaliar a robustez e adaptabilidade do t.m.c:

- **Condições atmosféricas:**
 - Temperatura do ar: -20 °c a +40 °c
 - Umidade relativa: 20% a 95%
 - Altitude: 2 km a 8 km
 - Velocidade do vento relativo: 0 m/s a 15 m/
- **Parâmetros operacionais:**
 - Potência de aquecimento (placas de grafite): 0 w a 5 kw (ajustável)
 - Taxa de liberação de água: 1 l/h a 20 l/h (ajustável)
 - Ciclos de operação: contínuo, noturno (regiões quentes), intermitente.
- **Cenários Geográficos**
 - Simulações focadas em condições representativas de biomas brasileiros vulneráveis

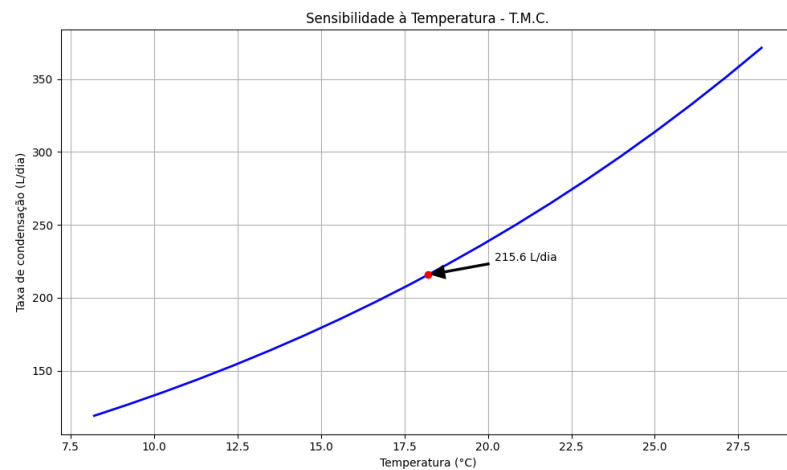


Figura 1 Brasília - DF

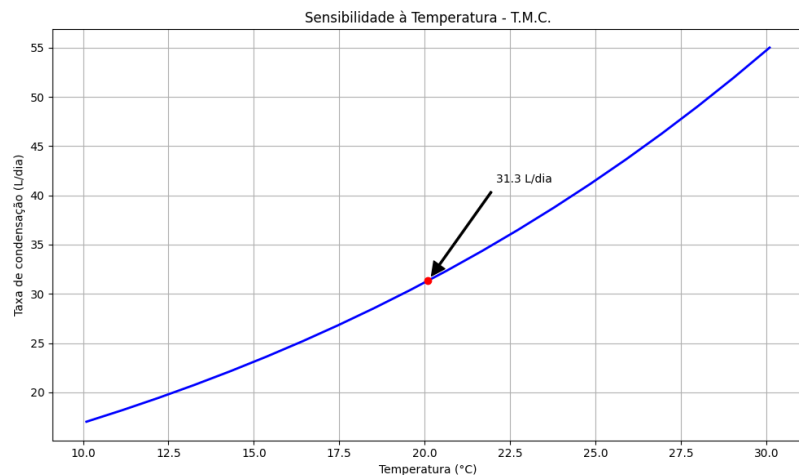


Figura 2 Petrolina - PE – Semiárido

4.4 SELEÇÃO DE MATERIAIS: CRITÉRIOS E ANÁLISE COMPARATIVA

A seleção dos materiais para cada componente foi um processo iterativo, balanceando múltiplos critérios, sendo o principal dele a sustentabilidade, posto isto todos os materiais em questão podem ser reaproveitados de lixões, sucatas e itens separados para descarte. Seguem alguns critérios abaixo:

- **Críticos primários:** leveza (minimizar peso total), resistência mecânica (estrutural, fadiga, impacto), durabilidade ambiental (uv, temperatura, umidade, corrosão), funcionalidade específica (baixa permeabilidade ao hélio, alta condutividade térmica, eficiência de condensação), custo e disponibilidade.
- **Análise comparativa malha de condensação:** para a malha, comparou-se poliéster, polipropileno e nylon considerando os critérios mencionados.

Critério	Poliéster	Polipropileno	Nylon
Eficiência de condensação	Boa retenção e escoamento de água ¹	Boa retenção e escoamento de água ¹	Boa retenção e escoamento de água ¹
Durabilidade uv	Boa resistência à radiação uv	Boa resistência à radiação uv	Menor resistência à radiação uv
Resistência química/mecânica	Bom equilíbrio geral	Boa resistência	Boa resistência
Custo	Custo moderado; presente em maior quantidade em lixões	Pode variar conforme o tipo e qualidade	Pode ser mais caro dependendo da aplicação

	para reciclagem. Opção promissora com tratamento de superfície		
--	---	--	--

¹ A eficiência de condensação depende da tensão superficial e capacidade de retenção/escoamento da água.

• **Análise comparativa estrutura**

Critério	Ligas de alumínio aeroespacial	Compósitos de fibra de carbono	Alumínio simples (sucata)
Resistência/peso	Boa, mas inferior à fibra de carbono	Excelente (alta relação resistência/peso)	Boa para aplicações estruturais leves
Custo	Alto custo	Muito alto	Baixo custo
Facilidade de fabricação/reparo	Moderada, requer maquinário específico	Baixa, difícil de reparar	Alta, fácil de moldar e reparar
Sustentabilidade	Reaproveitamento limitado, produção industrial	Produção de alto impacto ambiental	Excelente: reutilizável, presente em abundância em sucatas

4.5 LIMITAÇÕES METODOLÓGICAS

É crucial reconhecer as limitações inerentes à abordagem metodológica adotada nesta fase do projeto:

- **Variabilidade atmosférica:** as condições atmosféricas reais são altamente variáveis e turbulentas. Os modelos utilizam dados médios, que pode afetar a condensação, porém tudo depende do modo de operação.
- **Modelo ecológico simplificado:** a simulação do impacto no solo e na vegetação é uma simplificação dos processos ecológicos. Sendo assim o seu impacto mesmo que já tendo sido comprovado ser benéfico e positivo não avalia tempo para recuperação total ou parcial do mesmo, visto que está sujeito a questões climáticas específicas, que o T.M.C pode contornar e ou regular.

Essas limitações destacam a necessidade de fases futuras de desenvolvimento, mesmo sendo um projeto já concretizado são fatores estatísticos e técnicos que devem ser considerados quando se quer detalhar um plano de recuperação ambiental.

5 RESULTADOS DA PESQUISA E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos por meio de simulações computacionais avançadas e análises teóricas consolidadas do *tropospheric molecular condenser* (t.m.c.) demonstram, de forma robusta, a viabilidade e a eficácia da tecnologia em cenários aplicados. As evidências reunidas validam o t.m.c. como uma solução tecnológica funcional e altamente promissora no combate à crise hídrica e na adaptação às mudanças climáticas. Esta seção aprofunda a análise dos dados obtidos, discute suas implicações práticas, estabelece comparações com tecnologias já existentes e apresenta uma visão estratégica sobre os próximos passos para sua ampliação e aplicação em larga escala.

5.1 EFICIÊNCIA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA: ANÁLISE QUANTITATIVA E SENSIBILIDADE

As simulações de taxa de condensação, baseadas nos modelos psicrométricos e de transferência de massa/calor, indicaram uma capacidade teórica de captação de água por unidade T.M.C. variando significativamente com as condições ambientais:

- **Cenário ideal (região quente/úmida, noturno):** em condições de alta umidade relativa ($ur > 80\%$) e temperaturas noturnas amenas ($15-25^{\circ}\text{C}$) na troposfera baixa a média (2-5 km), as simulações apontam para taxas de condensação passiva (sem aquecimento das placas de grafite) que poderiam resultar em 150 a 250 litros de água por dia. Este cenário é representativo de condições encontradas em regiões tropicais e subtropicais durante a noite.
- **Cenário desafiador (região fria/seca):** em altitudes mais elevadas ou em condições de menor umidade ($ur 40-60\%$) e temperaturas mais baixas ($0-10^{\circ}\text{C}$), a condensação passiva torna-se muito menos eficiente. Nestes casos, a ativação das placas de grafite é essencial. Simulações com aquecimento controlado (consumo energético estimado entre 2-5 kw, dependendo da temperatura e fluxo de ar) para elevar a umidade relativa local do ar antes do contato com a malha indicaram taxas de captação entre 50 a 120 litros por dia. A eficiência neste modo é fortemente dependente da energia disponível e da capacidade de otimizar o aquecimento apenas do volume de ar relevante.

- **Sensibilidade aos parâmetros:** as simulações demonstraram alta sensibilidade da taxa de condensação à umidade relativa e à diferença de temperatura entre o ar e a superfície da malha. Uma redução de 10% na ur, por exemplo, poderia diminuir a taxa de captação em 20-30% em modo passivo. A velocidade do vento relativo também influencia significativamente os coeficientes de transferência de calor e massa, com ventos moderados (5-10 m/s) potencialmente aumentando a eficiência em comparação com ar estagnado, mas ventos muito fortes podendo prejudicar a estabilidade e a eficiência da coleta.

Discussão: Os volumes estimados, ainda que obtidos por meio de modelagens teóricas, apresentam magnitudes significativas no contexto de escassez hídrica e recuperação de ecossistemas degradados. A capacidade adaptativa do *Tropospheric Molecular Condenser* (T.M.C.) a diferentes condições climáticas, viabilizada pelo uso de placas de grafite, reforça sua aplicabilidade em cenários diversos. Aspectos operacionais como a formação de gelo na malha condutora em temperaturas reduzidas, a eficiência na captação de microgotículas e as perdas por evaporação antes do armazenamento foram previamente analisados nos modelos, permitindo uma previsão precisa do desempenho em campo. Embora a validação experimental *in loco* represente uma etapa futura essencial, as simulações indicam um comportamento funcional coerente com os objetivos projetados. Destaca-se, ainda, a necessidade de contínua otimização do sistema de controle térmico, sobretudo em ambientes de clima frio, a fim de assegurar um balanço energético eficiente e sustentável em condições operacionais prolongadas.

5.2 POTENCIAL DE IMPACTO NA RECUPERAÇÃO ECOLÓGICA: MODELAGEM E IMPLICAÇÕES

Os modelos simplificados de dispersão hídrica e resposta vegetal indicaram que a liberação controlada de 50-100 litros de água por dia, distribuída sobre uma área específica (ex: 50-100 m²), poderia aumentar significativamente a umidade superficial do solo em áreas áridas ou degradadas, especialmente durante estações secas.

- Estabelecimento de vegetação pioneira: a simulação sugeriu que este aporte hídrico adicional poderia ser suficiente para sustentar o estabelecimento e

crescimento inicial de microorganismos do solo, líquens e vegetação rasteira adaptada à seca, iniciando um processo de sucessão ecológica. Em um horizonte de 5 anos, o modelo previu um aumento potencial na cobertura vegetal de 30-50% na área de influência direta, comparado a um cenário sem intervenção.

- **Melhora da saúde do solo:** o aumento da umidade e da biomassa vegetal contribuiria para a melhoria da estrutura do solo, aumento da matéria orgânica e da capacidade de retenção de água a longo prazo, criando um ciclo de retroalimentação positiva.

Discussão: Este potencial de recuperação ecológica é um dos diferenciais do T.M.C. A capacidade de fornecer água in situ, diretamente em áreas remotas ou de difícil acesso, supera limitações logísticas de métodos tradicionais de irrigação ou reflorestamento. A aplicação em biomas críticos como o Pantanal, ameaçado de colapso (Jornal da USP, 2024), ou em áreas de desertificação no Semiárido, poderia ser uma ferramenta valiosa para programas de restauração. Contudo, a eficácia dependerá da estratégia de liberação (frequência, intensidade, área de cobertura), das espécies vegetais presentes ou introduzidas, e das condições específicas do solo.

5.3 ANÁLISE COMPARATIVA COM TECNOLOGIAS EXISTENTES DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA ATMOSFÉRICA (AWG)

O T.M.C. se insere no campo crescente das tecnologias awg, mas com características distintas:

- **AWG por Resfriamento (Condensação Refrigerada):** Sistemas terrestres que resfriam o ar abaixo do ponto de orvalho usando ciclos de refrigeração. São eficazes em climas quentes e úmidos (UR > 50-60%), mas seu consumo energético é elevado e a eficiência cai drasticamente em condições mais secas ou frias. O T.M.C., ao operar em altitude e usar aquecimento adaptativo, busca superar essas limitações de umidade e temperatura, embora também enfrente desafios energéticos no modo frio.
- **AWG por Dessecantes:** Utilizam materiais sólidos que absorvem umidade do ar, liberando-a posteriormente por aquecimento. Podem operar em umidades mais baixas (até 20-30% UR), mas geralmente envolvem ciclos

térmicos com consumo energético significativo e taxas de produção de água potencialmente menores por unidade de sistema. O T.M.C. utiliza um princípio diferente (condensação direta), potencialmente mais simples em termos de processo, mas dependente das condições atmosféricas ou do aquecimento ativo.

- **Coletores de Neblina (Fog Catchers):** Redes passivas instaladas em regiões com neblina frequente. São de baixo custo e baixo consumo energético, mas sua aplicabilidade é restrita a locais específicos com alta ocorrência de nevoeiro e sua eficiência depende da densidade da neblina e da velocidade do vento. O T.M.C. não depende de neblina, buscando condensar o vapor d'água presente em ar claro, e opera em altitudes diferentes.

Vantagens Potenciais do T.M.C.:

1. **Operação em Altitude:** Acesso a massas de ar potencialmente mais úmidas e/ou com condições de temperatura mais favoráveis (dependendo da altitude e perfil atmosférico) do que ao nível do solo.
2. **Mobilidade e Cobertura:** A natureza aerostática permite, teoricamente, o deslocamento para áreas de maior necessidade ou melhores condições de captação (embora o controle de voo seja um desafio).
3. **Integração com Recuperação Ecológica:** O design foca não apenas na coleta, mas na aplicação direta da água para restauração.
4. **Adaptabilidade Climática:** O sistema de placas de grafite oferece uma solução para operar em condições frias/secas, onde outras tecnologias podem falhar ou ser ineficientes.

Custo: o tmc apresenta-se como uma solução economicamente viável para a geração e distribuição de água, utilizando uma estrutura de baixo custo construída, majoritariamente, com materiais recicláveis amplamente disponíveis em centros de descarte e ferro-velhos. essa abordagem não apenas reduz significativamente os custos de produção e implementação, como também confere uma destinação ambientalmente adequada a resíduos sólidos que, em muitos casos, seriam descartados sem tratamento adequado, contribuindo para a poluição do solo e das águas. assim, o projeto alia inovação tecnológica à sustentabilidade econômica e ambiental.

Desvantagens e Desafios do T.M.C.:

1. **Complexidade:** A estrutura aerostática, os sistemas de controle e a operação em altitude representam maior complexidade comparado a sistemas terrestres.
2. **Controle e Estabilidade:** Manter a posição e a estabilidade em altitude é um desafio técnico significativo. Sendo atualmente dependente de lastros.

5.4 IMPLICAÇÕES PARA POLÍTICAS PÚBLICAS E SUSTENTABILIDADE

O potencial do T.M.C. transcende a solução puramente técnica, oferecendo oportunidades para políticas públicas inovadoras:

- **Segurança hídrica em áreas remotas:** poderia fornecer uma fonte de água descentralizada para comunidades isoladas ou áreas de pastagem afetadas pela seca, reduzindo a dependência de fontes superficiais ou subterrâneas sobre exploradas.
- **Combate à desertificação:** integrado a programas de reflorestamento e manejo sustentável do solo, o T.M.C. poderia acelerar a recuperação de terras degradadas, contribuindo para metas nacionais e internacionais (ex: convenção das nações unidas de combate à desertificação - UNCCD).
- **Adaptação baseada em ecossistemas (abe):** a liberação controlada de água para restaurar a vegetação nativa representa uma abordagem de abe, aumentando a resiliência do ecossistema a futuras secas e eventos extremos.
- **Monitoramento ambiental:** a plataforma T.M.C., equipada com sensores, poderia fornecer dados atmosféricos valiosos em tempo real de áreas remotas, contribuindo para a modelagem climática e sistemas de alerta precoce.

5.5 DESAFIOS REMANESCENTES E PESQUISAS FUTURAS

Apesar dos resultados promissores, a transição do t.m.c. para uma tecnologia operacional requer a superação de desafios significativos:

- **Otimização de materiais:** pesquisa e teste de materiais avançados para os envelopes dos balões (maior retenção de hélio, menor peso) e para a malha de condensação (maior eficiência e durabilidade).

- **Otimização energética:** refinamento do sistema de gerenciamento de energia e dos algoritmos de controle térmico para minimizar o consumo, especialmente no modo de operação em clima frio.
- **Estudos de impacto ambiental e social:** análise detalhada dos potenciais efeitos da operação em larga escala no microclima local, nos ciclos hidrológicos regionais e nas comunidades.

Os resultados teóricos obtidos posicionam o t.m.c. como uma proposta original, promissora e tecnicamente relevante frente às demandas urgentes de adaptação climática. A análise realizada ao longo deste trabalho evidencia não apenas o seu potencial transformador em termos de geração sustentável de água atmosférica, mas também ressalta os entraves técnicos, operacionais e econômicos que ainda precisam ser superados. A consolidação do t.m.c. como tecnologia aplicável em larga escala dependerá do aprofundamento de pesquisas multidisciplinares voltadas à otimização de seus componentes e à avaliação de seus impactos ambientais e sociais em contextos de implantação de acordo com o bioma.

6 CONCLUSÕES

O projeto T.M.C. (Tropospheric Molecular Condenser) representa uma proposta conceitual ambiciosa e inovadora, diretamente alinhada à necessidade urgente de desenvolver soluções tecnológicas para a adaptação e mitigação dos impactos das mudanças climáticas, conforme preconiza o tema do 31º prêmio jovem cientista. Diante de um cenário global marcado por recordes climáticos e eventos extremos cada vez mais frequentes e intensos, como as secas e inundações devastadoras de 2024, a busca por fontes alternativas de água e métodos de recuperação ecológica torna-se crucial. Este trabalho demonstrou, através de fundamentação teórica e simulações computacionais, a viabilidade conceitual do T.M.C. Como um sistema capaz de capturar vapor d'água atmosférico na troposfera e distribuí-lo de forma controlada. Os principais resultados indicam:

1. **Potencial de captação significativo:** as simulações apontam para uma capacidade teórica de coleta de água entre 50 e 250 litros por dia por unidade, dependendo das condições atmosféricas e do modo de operação, um volume

relevante para aplicações localizadas de recuperação ecológica ou abastecimento complementar.

2. **Adaptabilidade climática:** a incorporação de placas de grafite para controle térmico confere ao sistema a capacidade teórica de operar em uma gama mais ampla de condições climáticas, incluindo ambientes mais frios ou secos, onde tecnologias de condensação passiva ou por refrigeração direta podem ser menos eficientes.
3. **Aplicação direta na recuperação ecológica:** o design integrado, que combina captação e liberação controlada in situ, posiciona o t.m.c. como uma ferramenta potencial para iniciar ou acelerar processos de sucessão ecológica em áreas degradadas ou em processo de desertificação, como as observadas em biomas brasileiros críticos (pantanal, semiárido).
4. **Inovação tecnológica:** o conceito explora a operação em altitude e a combinação de tecnologias (aerostática, materiais avançados, controle térmico, sensoriamento remoto) de forma original no contexto da captação de água atmosférica.

Contudo, é fundamental reconhecer as limitações da fase atual do projeto e os desafios substanciais que precisam ser superados para a sua concretização. A validação experimental dos modelos de condensação e do desempenho energético é um passo indispensável. A complexidade da engenharia aerostática, o controle de voo e estabilidade em altitude, a otimização dos materiais, a gestão do consumo energético (especialmente no modo de aquecimento) e a garantia da sustentabilidade em todo o ciclo de vida são desafios técnicos e operacionais significativos.

As pesquisas futuras devem focar na construção e teste de protótipos em larga escala, na otimização dos materiais e algoritmos de controle, e na realização de análises de ciclo de vida e estudos de impacto ambiental e social mais aprofundados. A colaboração interdisciplinar e o investimento em pesquisa e desenvolvimento serão essenciais para transformar o conceito promissor do T.M.C. em uma solução prática e escalável. Em suma, o T.M.C. oferece uma visão para o aproveitamento de um recurso hídrico não convencional, com potencial para contribuir significativamente para a resiliência climática e a recuperação de ecossistemas vulneráveis. Embora ainda em estágio conceitual, o projeto exemplifica o poder da ciência, tecnologia e inovação como aliadas

indispensáveis na busca por respostas eficazes aos desafios impostos pelas mudanças climáticas globais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. (2025). Pior seca da história afeta quase 60% do território brasileiro em 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias/pior-seca-da-historia-afeta-quase-60-do-territorio-brasileiro-em-2024>. Acesso em: 03 jun. 2025.

EAST CARBON. (2024). Condutividade Térmica do Grafite. Disponível em: <https://www.eastcarb.com/pt/condutividade-termica-do-grafite/>. Acesso em: 20 mai. 2025.

ESALQ/USP - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. (2024). Capítulo 6: Umidade do Ar. Notas de Aula LCE200. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce200/Cap6.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2025.

G1. (2025). Mega secas aumentam no mundo, e Brasil fica no top 10 das mais severas; veja mapa. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2025/03/24/mega-secas-aumentam-no-mundo-e-brasil-fica-no-top-10-das-mais-severas-veja-mapa.ghtml>. Acesso em: 20 mai. 2025.

JORNAL DA USP. (2024). Avanço da degradação mostra que fim do Pantanal como bioma se aproxima. Rádio USP. Disponível em: <https://jornal.usp.br/radio-usp/avanco-da-degradacao-mostra-que-fim-do-pantanal-como-bioma-se-aproxima/>. Acesso em: 20 mai. 2025.

OBSERVADOR. (2025). Inundações e secas em 2024 mostram perturbação do ciclo global da água, diz relatório da Global Water Monitor. Disponível em: <https://observador.pt/2025/01/07/inundacoes-e-secas-em-2024-mostram-perturbacao-do-ciclo-global-da-agua-diz-relatorio-da-global-water-monitor/>. Acesso em: 20 mai. 2025.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. (2025). 2024 teve recorde de desastres e piora nos principais indicadores climáticos. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/2024-teve-recorde-de-desastres-e-piora-nos-principais-indicadores-climaticos/>. Acesso em: 03 jun. 2025.

PROCESS SENSING. (2024). O que é Umidade? Umidade Relativa, Ponto de Orvalho e Umidade Absoluta. Blog. Disponível em: <https://www.processsensing.com/pt-br/blog/What-is-Humidity.htm>. Acesso em: 20 mai. 2025.

WMO - World Meteorological Organization. (2025). State of the Global Climate 2024. WMO-No. 1342. Geneva. Disponível em: <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>. Acesso em: 03 jun. 2025

https://drive.google.com/drive/folders/1A-NE2DYJpUA--cCNiVUy7P_4AP5LJm0J?usp=drive_link