PESQUISA SOBRE ioT NA SUSTENBILIDADE DO MEIO AMBIENTE

**1. O que é IoT no contexto ambiental**

IoT se refere a dispositivos/sensores conectados que coletam e trocam dados pela internet. No contexto ambiental, isso envolve sensores de qualidade do ar, água, solo, monitoramento climático, rastreamento de biodiversidade, uso de energia, entre outros. Esses dispositivos permitem **monitoramento contínuo, automação, decisões baseadas em dados**, etc.

**2. Aplicações de IoT para sustentabilidade ambiental**

Aqui estão várias aplicações já em uso ou com potencial:

| **Aplicação** | **O que faz / exemplos práticos** |
| --- | --- |
| **Monitoramento da qualidade do ar** | Sensores em áreas urbanas ou industriais para medir poluentes como PM2.5, PM10, NO₂, CO, ozônio; identificar hotspots; ajudar políticas públicas. ([sodio.tech](https://sodio.tech/how-to-use-iot-for-environmental-monitoring/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Monitoramento da água** | Sensores para pH, turbidez, oxigênio dissolvido, contaminação, vazamentos em redes, qualidade da água de rios, lagos, reservatórios. ([sodio.tech](https://sodio.tech/how-to-use-iot-for-environmental-monitoring/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Solo / Agricultura de precisão** | Monitorar umidade do solo, nutrientes, temperatura, padrões climáticos; irrigação automatizada; reduzir uso de água, fertilizantes, pesticidas. ([blog.flux.id](https://blog.flux.id/en/iot-environmental-monitoring-sustainable-solutions/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Gestão de resíduos / lixo inteligente** | Lixeiras com sensores que avisam quando estão cheias; otimizar rotas de coleta; aumentar eficiência do sistema de reciclagem. ([iotindustryinsights.com](https://iotindustryinsights.com/iot-sustainability-5-ways-reducing-environmental-impact/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Cidades inteligentes (smart cities)** | Infraestrutura conectada para iluminação pública eficiente, monitoramento de tráfego, qualidade do ar, ruído, uso de energia em edifícios públicos. ([NEWS BBVA](https://www.bbva.com/en/sustainability/the-internet-of-things-and-its-impact-on-sustainability/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Energia renovável e eficiência energética** | Monitoramento em tempo real de painéis solares, turbinas eólicas, redes elétricas inteligentes (“smart grids”); previsão de demanda; manutenção preditiva para reduzir perdas. ([sirinsoftware.com](https://sirinsoftware.com/blog/5-use-cases-of-iot-in-environmental-monitoring?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Conservação ambiental, biodiversidade e clima** | Rastreamento de fauna (animais silvestres), monitoramento de ecossistemas, detecção de incêndios florestais, monitoramento climático local (chuva, temperatura, umidade) para prever fenômenos extremos. ([a3logics.com](https://www.a3logics.com/blog/iot-in-environmental-monitoring/?utm_source=chatgpt.com)) |

**3. Benefícios esperados**

* **Uso mais eficiente de recursos** (água, energia, fertilizantes etc.), reduzindo desperdícios.
* **Redução de emissões de gases do efeito estufa**, por meio de otimização de energia e transporte. ([NEWS BBVA](https://www.bbva.com/en/sustainability/the-internet-of-things-and-its-impact-on-sustainability/?utm_source=chatgpt.com))
* **Melhor tomada de decisão** por parte de gestores públicos, empresas, agricultores, graças ao monitoramento em tempo real e previsões.
* **Detecção rápida de problemas** ambientais (contaminações, vazamentos, incêndios), possibilitando ações mais rápidas.
* **Promoção de transparência e engajamento público**, com dados abertos ou visualizações que permitem à sociedade acompanhar a qualidade ambiental.

**4. Desafios e impactos negativos**

Apesar do grande potencial, há várias barreiras e impactos a considerar:

| **Desafio / Problema** | **Detalhes** |
| --- | --- |
| **Consumo de energia** | Dispositivos IoT (especialmente se muitos deles) demandam energia — para operação, comunicação, processamento. Se estiverem ligados a fontes que não são renováveis, há impacto de carbono. ([AWS Docs](https://docs.aws.amazon.com/pt_br/wellarchitected/latest/iot-lens/sustainability.html?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Pegada de carbono embutida (embodied carbon)** | A produção, transporte, montagem dos dispositivos, bem como sua fabricação, uso de materiais, têm impacto ambiental. Estima-se que a produção possa ter emissão significativa de CO₂. ([arXiv](https://arxiv.org/abs/2105.02082?utm_source=chatgpt.com)) |
| **E‑waste (resíduos eletrônicos)** | Quando dispositivos quebram ou ficam obsoletos, descartam-se componentes que podem conter metais pesados e gerar poluição, se descartados inadequadamente. ([Rishan Solutions](https://rishandigital.com/iot/iot-and-environmental-impact/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Segurança e privacidade** | Vulnerabilidades de IoT podem causar vazamentos de dados, manipulação de dispositivos, ou uso indevido, afetando a confiança e causando perdas. ([primafelicitas.com](https://www.primafelicitas.com/iot/exploring-iot-role-in-environmental-sustainability/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Custo inicial e retorno (ROI incerto)** | Implantar redes de sensores, infraestrutura de comunicação, processamento de dados pode ser caro. Empresas menores ou regiões com menos recurso sofrem mais. ([Avigna](https://avigna.ai/iot-implementation-for-a-sustainable-future-iot-and-sustainable-solutions-for-environmental-impact/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Interoperabilidade e padrões** | Existência de muitos fabricantes diferentes, protocolos distintos, falta de padronização pode complicar integração e escalabilidade. ([theswissquality.ch](https://theswissquality.ch/challenges-of-sustainable-iot-implementation-overcoming-barriers-for-a-greener-future/?utm_source=chatgpt.com)) |
| **Manutenção, durabilidade** | Dispositivos em ambientes externos ou remotos precisam suportar condições adversas (chuva, temperaturas extremas, etc.), exigem manutenção, substituição. Se falharem ou tiverem vida útil curta, custo ambiental sobe. |
| **Gestão dos dados** | Volume de dados gerado é enorme; armazenamento, processamento pode consumir muitos recursos computacionais; também há desafios em filtragem, veracidade, compartilhamento. |

**5. Estudos e dados recentes relevantes**

* Um estudo acadêmico demonstrou um **nó IoT multi-sensor** (11 sensores) com **processamento de IA na borda** (edge AI), resultando em economia de energia em cerca de 42% em comparação a transmissão constante de dados. ([arXiv](https://arxiv.org/abs/2507.14165?utm_source=chatgpt.com))
* Avaliações de ciclo de vida (“life-cycle assessments”) mostram que para alguns dispositivos IoT, a maior parte da emissão de carbono está associada à **fase de fabricação** (produção, transporte, montagem), não só ao uso. ([arXiv](https://arxiv.org/abs/2105.02082?utm_source=chatgpt.com))
* Projeções estimam que, com adoção ampla de IoT alinhada a metas de energia inteligente, pode haver **economias de energia expressivas até 2030**, além de redução de emissões. Por exemplo, BBVA relata que edifícios com sensores reduziram consumo energético entre 12‑15%. ([NEWS BBVA](https://www.bbva.com/en/sustainability/the-internet-of-things-and-its-impact-on-sustainability/?utm_source=chatgpt.com))

**6. Boas práticas para maximizar os benefícios e mitigar os danos**

Para que IoT seja realmente sustentável ambientalmente, é importante seguir algumas diretrizes:

1. **Design sustentável**: escolher componentes reutilizáveis, recicláveis, usar materiais com menor impacto ambiental, modularidade para reparo/upgrades.
2. **Eficiência energética**: dispositivos com baixo consumo, uso de modos de repouso (sleep), edge computing para processar dados localmente e evitar transmissão desnecessária.
3. **Fontes de energia renovável**: usar energia solar ou outras formas limpas para alimentar sensores remotos.
4. **Ciclo de vida completo**: considerar não apenas uso, mas produção, transporte, descarte; planejar logística de descarte/reciclagem.
5. **Segurança e manutenção**: garantir atualizações de firmware, proteção contra vulnerabilidades, monitoramento contínuo da integridade dos dispositivos.
6. **Escalabilidade e interoperabilidade**: adotar protocolos padrões, APIs abertas, arquitetura que permita expansão, integração entre sistemas diferentes.
7. **Governança de dados**: assegurar privacidade, qualidade dos dados, políticas claras de uso e compartilhamento.
8. **Políticas públicas e incentivos**: subsídios, regulamentações, incentivos fiscais para projetos verdes de IoT, para incentivar adoção mais ampla e sustentável.

**7. Limitações e questões em aberto**

* Diferenças regionais: em locais com acesso limitado a infraestruturas elétricas ou de conectividade, implantações podem ser mais caras ou inviáveis.
* Custo social: quem paga o custo inicial? Pequenas comunidades talvez não consigam.
* Riscos de dependência tecnológica: se o sistema falhar, risco de interrupções críticas.
* Avaliação de impacto ambiental muitas vezes superficial: estudos tendem a focar no uso, menos na fabricação e no descarte.