

BIO-TERRA

LIVING ENERGY NETWORK

Plataforma bioeletroquímica autónoma para sensores distribuídos e IoT ambiental

WHITE PAPER TÉCNICO

Versão Conceptual 1.0

Setembro de 2026

Conceito: integração de células microbianas do solo, energy harvesting, armazenamento local, sensorização e comunicações LPWAN.

Resumo executivo

O BIO-TERRA propõe uma arquitetura de sensores ambientais autônomos alimentados por células de combustível microbianas do solo (SMFC), concebida não para gerar potência elevada, mas para maximizar autonomia, reduzir manutenção e explorar fluxos bioeletroquímicos já presentes no ambiente.

PRINCÍPIO CENTRAL

Não procurar potência elevada. Procurar autonomia elevada. A variável de engenharia relevante é a energia acumulada ao longo do tempo e a capacidade de manter Energy Neutral Operation.

O sistema explora a atividade metabólica de comunidades microbianas eletroativas presentes no solo ou em ambientes controlados para converter parte da energia química da matéria orgânica em corrente elétrica.

A energia produzida é recolhida lentamente, condicionada por eletrônica de ultra-baixa tensão, armazenada localmente e usada de forma intermitente por sensores e comunicações de baixo consumo.

A proposta destina-se prioritariamente a agricultura de precisão, florestas, zonas húmidas, rios e sedimentos, monitorização ambiental e, numa variante própria, águas residuais.

Arquitetura funcional: biofilme eletroativo → ânodo de elevada área → SMFC → power management → armazenamento → microcontrolador → sensores → comunicação sem fios.

Índice

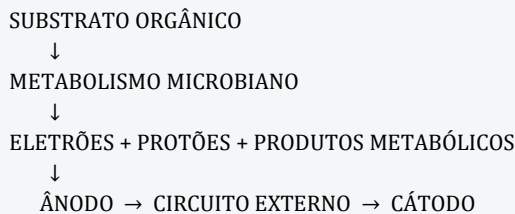
1. Fundamento científico
2. Transferência extracelular de eletrões
3. Princípio BIO-TERRA
4. Arquitetura proposta
5. Ânodo
6. Comunidade microbiana
7. Cátodo
8. Eletrónica de energy harvesting
9. Armazenamento
10. Estratégia energética
11. Comunicação
12. Aplicações
13. Estado atual da tecnologia
14. Principais desafios
15. Arquitetura modular
16. Primeiro protótipo experimental
17. Protocolo experimental
18. Indicadores de sucesso
19. Desenvolvimento em fases

- 20.** Inteligência energética adaptativa
- 21.** Machine Learning
- 22.** Segurança biológica
- 23.** Oportunidade tecnológica
- 24.** Diferenciação
- 25.** Perspetiva de evolução
- 26.** Conclusão
- 27.** Referências selecionadas

1. Fundamento científico

1.1 Microbial Fuel Cells

Uma Microbial Fuel Cell (MFC) utiliza microrganismos capazes de oxidar compostos orgânicos e transferir elétrons resultantes desse metabolismo para um eletrodo. Em Soil Microbial Fuel Cells (SMFC), o próprio solo funciona como matriz bioeletroquímica e meio de transporte iônico.



No compartimento anódico, os elétrons são entregues ao ânodo. Percorrem depois o circuito externo, produzindo corrente elétrica, enquanto os prótons e outras espécies iônicas participam nas reações catódicas.

2. Transferência extracelular de elétrons

O mecanismo essencial é a Extracellular Electron Transfer (EET): a capacidade de determinados microrganismos transportarem elétrons para aceptadores externos à célula. *Geobacter sulfurreducens* constitui um dos organismos modelo mais estudados neste contexto.

O transporte envolve sistemas de citocromos do tipo c distribuídos através da membrana interna, periplasma, membrana externa e estruturas extracelulares. Investigações estruturais modernas descrevem ainda nanofios formados por citocromos, associados ao transporte eletrônico em biofilmes.

INTERFACE BIOLÓGICA

O objetivo de engenharia não é fazer as bactérias “produzirem elétrons”. Elas já o fazem durante o metabolismo. O desafio é captar eficientemente parte desse fluxo eletrônico sem degradar a estabilidade do ecossistema microbiano.

3. Princípio BIO-TERRA

Etapa A — Produção: Microrganismos oxidam matéria orgânica presente no solo.

Etapa B — Recolha: Elétrons são transferidos para um ânodo condutor através de EET direta ou mediada.

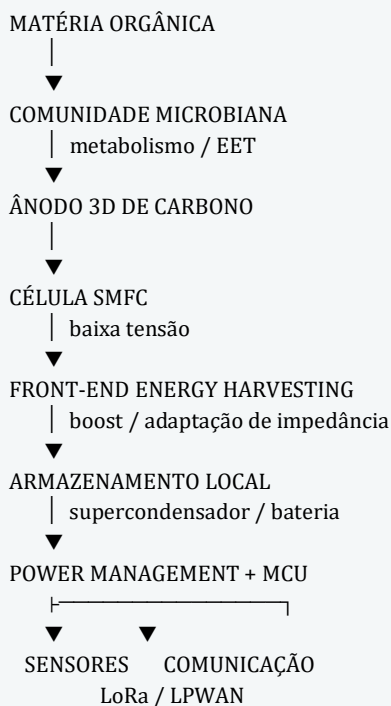
Etapa C — Acumulação: A corrente, embora pequena, é capturada por eletrônica especializada e armazenada.

Etapa D — Utilização: Quando a energia acumulada ultrapassa um limite definido, o sistema executa um ciclo curto de medição, processamento e transmissão.

WAKE → MEASURE → PROCESS → TRANSMIT → SLEEP

A pergunta relevante deixa de ser “qual a potência máxima instantânea da célula?” e passa a ser “quantos joules podem ser recolhidos de forma previsível durante determinado intervalo e com que disponibilidade?”.

4. Arquitetura proposta



A arquitetura deve ser modular para permitir a substituição independente da célula bioeletroquímica, eletrônica de harvesting, armazenamento, sensores e comunicações durante a fase experimental.

5. Ânodo

O ânodo é um dos componentes críticos. Deve oferecer simultaneamente elevada condutividade, grande área superficial, biocompatibilidade, estabilidade química, resistência à corrosão, capacidade de formação de biofilme e custo compatível com implantação distribuída.

5.1 Materiais candidatos

- Feltro de carbono
- Tecido de carbono
- Escovas de fibras de carbono

- Grafite porosa
- Carbono ativado
- Estruturas de carbono tridimensionais

Materiais nanoestruturados podem aumentar a área eletroquimicamente ativa e melhorar a transferência eletrônica, mas a primeira geração deve privilegiar carbono convencional de elevada área. Um sensor ambiental barato não deve transformar-se numa peça de joalheria nanotecnológica.

6. Comunidade microbiana

6.1 Comunidade natural

A utilização dos microrganismos eletroativos naturalmente existentes no solo oferece robustez ecológica, adaptação ao ambiente, menor complexidade regulatória e maior facilidade de implantação exterior.

6.2 Cultura selecionada

Uma segunda estratégia utiliza organismos ou consórcios selecionados, incluindo *Geobacter sulfurreducens*, outras espécies de *Geobacter* e *Shewanella* spp. Esta opção permite maior controlo laboratorial, mas aumenta os requisitos operacionais.

RECOMENDAÇÃO P1

Para a primeira geração de campo: microbioma nativo e enriquecimento natural do biofilme pelo próprio elétrodo. Engenharia genética deve ficar fora do protótipo inicial.

7. Cátodo

Num sistema de solo, o cátodo deve ocupar uma região com maior disponibilidade de oxigénio do que o ânodo. Uma geometria vertical pode explorar naturalmente o gradiente de oxigénio, reduzindo a necessidade de uma célula convencional de duas câmaras.

SUPERFÍCIE

OXIGÉNIO ELEVADO
CÁTODO

ZONA INTERMÉDIA

BAIXO OXIGÉNIO
ÂNODO
BIOFILME
MATÉRIA ORGÂNICA

SOLO

8. Eletrônica de energy harvesting

Este módulo poderá ser um dos principais elementos diferenciadores. Uma SMFC produz tensões pequenas e apresenta impedância interna elevada; ligar diretamente um nó IoT à célula tende a desperdiçar energia ou a colapsar a tensão disponível.

- arrancar com tensão extremamente baixa
- extrair energia sem colapsar a célula
- elevar a tensão para níveis úteis
- armazenar carga com elevada eficiência
- desligar completamente a carga durante a acumulação
- ativar o sistema apenas quando existir energia suficiente

A investigação recente em sistemas SMFC para sensorização agrícola reforça a viabilidade desta arquitetura, incluindo gestão dedicada de potência e armazenamento local.

9. Armazenamento

9.1 Supercondensador

- Grande número de ciclos
- Carregamento simples
- Boa tolerância a picos de corrente
- Vida útil potencialmente longa

Desvantagens: autodescarga relativamente elevada e menor densidade energética.

9.2 Bateria recarregável

- Maior densidade energética
- Melhor retenção de energia em períodos longos

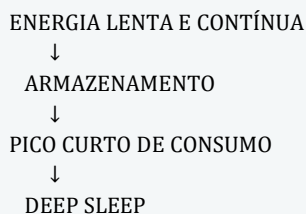
Desvantagens: envelhecimento, número de ciclos limitado e maior complexidade química.

OPÇÃO INICIAL

Supercondensador como armazenamento principal, eventualmente complementado por pequena reserva secundária. O objetivo é maximizar a longevidade e tolerar ciclos frequentes.

10. Estratégia energética

O nó deve passar a maior parte do tempo em estado de consumo mínimo. A produção média pode ser reduzida desde que a energia acumulada entre eventos seja suficiente para suportar os picos de processamento e comunicação.



O armazenamento desacopla produção lenta de consumo rápido. Esta é a base que torna uma fonte de microwatts ou milliwatts útil para uma carga cujo pico instantâneo pode ser muito superior.

11. Comunicação

Para longas distâncias e pequenos volumes de dados, LoRa/LoRaWAN constitui uma escolha natural em agricultura, floresta e redes ambientais. BLE, IEEE 802.15.4 e outras LPWAN podem ser utilizadas em cenários específicos.

CRITÉRIO ENERGÉTICO

Wi-Fi convencional deve ser evitado na primeira geração sempre que possível. Num sistema que vive de energia microbiana, desperdiçar energia em associações Wi-Fi seria uma forma particularmente humana de sabotar a própria ideia.

12. Aplicações

12.1 Agricultura de precisão

Humidade, temperatura, condutividade, pH, nutrientes e condições do solo. O benefício principal é reduzir ou eliminar operações periódicas de substituição de baterias.

12.2 Florestas

Humidade do solo, temperatura, indicadores meteorológicos e condições relacionadas com risco de incêndio, sobretudo em locais onde manutenção é dispendiosa.

12.3 Monitorização ambiental

Zonas húmidas, margens fluviais, sedimentos, terrenos contaminados, aterros e minas abandonadas.

12.4 Águas residuais

Neste cenário existe um benefício duplo: matéria orgânica é simultaneamente carga poluente e substrato energético. A recuperação elétrica não precisa de justificar isoladamente a infraestrutura se houver tratamento ambiental associado.

13. Estado atual da tecnologia

A literatura apresenta densidades de potência muito variáveis, dependentes de elétrodos, microrganismos, geometria, substrato, temperatura, humidade e condições operacionais. Revisões recentes reportam valores experimentais na ordem de décimos a alguns watts por metro quadrado em determinadas configurações, enquanto sistemas maiores continuam limitados por resistência interna, custo e escalabilidade.

INTERPRETAÇÃO CORRETA

Estes números não sustentam uma alternativa a solar, eólica ou rede elétrica. Sustentam, porém, uma classe diferente de aplicações em que energia baixa mas persistente pode ter elevado valor operacional.

14. Principais desafios

14.1 Variabilidade biológica: A população microbiana e a produção elétrica variam com temperatura, pH, humidade, nutrientes, composição do solo e estação do ano.

14.2 Resistência interna: Distância entre elétrodos, condutividade do solo e interfaces elétricas condicionam fortemente a potência disponível.

14.3 Biofouling: O crescimento biológico pode alterar progressivamente superfícies catódicas e interfaces.

14.4 Escalabilidade: A soma de células não produz necessariamente crescimento linear de potência; podem surgir desequilíbrios e inversão de células em associações série.

14.5 Sazonalidade: Solo demasiado seco reduz atividade microbiana e transporte iónico. Este ponto é particularmente importante em climas mediterrânicos.

15. Arquitetura modular

Módulo	Função
BT-BIO	Célula bioeletroquímica
BT-HARVEST	Conversão e gestão energética
BT-STORE	Armazenamento
BT-SENSE	Sensores
BT-COM	Comunicações
BT-CORE	Microcontrolador e firmware

16. Primeiro protótipo experimental

16.1 BIO-TERRA P1

Objetivo: demonstrar alimentação autónoma de um sensor de temperatura e humidade do solo com transmissão periódica, sem fonte elétrica externa durante o ensaio.

16.2 Configuração proposta

- 4–10 células SMFC
- ânodos de feltro ou escova de carbono
- cátodos de carbono
- solo organicamente ativo
- PMS de ultra-baixa tensão
- supercondensador
- microcontrolador de ultrabaixo consumo
- sensor ambiental
- transmissor LoRa

17. Protocolo experimental

O P1 deverá instrumentar simultaneamente a bioeletroquímica e o consumo eletrónico. Os parâmetros mínimos a registar são:

- tensão em circuito aberto
- tensão sob carga
- corrente e potência
- energia acumulada
- resistência interna estimada
- temperatura e humidade
- pH
- tempo por ciclo de carga
- energia consumida por transmissão
- estabilidade diária e semanal

META EXPERIMENTAL

Estabelecer Energy Neutral Operation: energia média produzida $\geq$ energia média consumida durante uma janela temporal definida.

18. Indicadores de sucesso

KPI	Objetivo	Critério inicial
-----	----------	------------------

KPI-1	Operação sem alimentação externa	Nó alimentado exclusivamente pela SMFC durante o ensaio
KPI-2	Balanço energético positivo	Energia produzida $\geq$ consumida em 24 h
KPI-3	Telemetria autónoma	≥ 1 transmissão válida por dia
KPI-4	Longevidade	≥ 90 dias de operação
KPI-5	Estabilidade do ânodo	Sem degradação funcional significativa
KPI-6	Recuperação automática	Reinício após períodos de energia insuficiente
KPI-7	Resiliência ambiental	Retoma após secura ou baixa atividade biológica

19. Desenvolvimento em fases

Fase 1 — Bancada

Caracterizar células isoladas e comparar materiais, profundidade, área, distância entre elétrodos, humidade e substratos.

Fase 2 — Energy harvesting

Determinar tensão mínima de arranque, eficiência, cold start e estratégia de adaptação de impedância/MPPT.

Fase 3 — Sensor autónomo

Integrar SMFC + armazenamento + MCU + sensor e demonstrar energy-neutral sensing.

Fase 4 — Comunicação

Integrar LoRa. Meta inicial: uma transmissão por dia; depois aumentar a frequência conforme orçamento energético.

Fase 5 — Campo

Instalar vários nós em solos diferentes e observar efeito de estação, humidade, temperatura e composição do solo.

20. Inteligência energética adaptativa

Uma evolução relevante consiste em adaptar dinamicamente a frequência de medição e transmissão à energia disponível.

ENERGIA ALTA → medir e transmitir frequentemente
 ENERGIA MÉDIA → reduzir frequência
 ENERGIA BAIXA → apenas medições críticas
 ENERGIA CRÍTICA → deep sleep e recuperação

O próprio ambiente passa assim a determinar parte da resolução temporal da rede, aproximando o sistema de um comportamento energeticamente auto-regulado.

21. Machine Learning

Depois de recolhida telemetria suficiente, modelos estatísticos ou de aprendizagem automática podem prever disponibilidade energética a partir de humidade, temperatura, pH, precipitação, estação, composição do solo e histórico local.

O objetivo não deve ser introduzir IA por ornamentação. O modelo só é útil se permitir reduzir perdas, antecipar períodos de baixa produção ou melhorar a política de duty cycle.

22. Segurança biológica

A primeira geração BIO-TERRA não deve utilizar organismos geneticamente modificados no exterior. A abordagem preferida é microbioma nativo + seleção natural do biofilme eletrogénico pelo eletrodo.

- reduz riscos ambientais
- reduz complexidade regulatória
- simplifica contenção e logística
- facilita testes de campo

Organismos geneticamente modificados poderão ser estudados posteriormente apenas em ambiente laboratorial ou sistemas confinados, caso exista ganho técnico mensurável que justifique essa complexidade.

23. Oportunidade tecnológica

A avaliação económica não deve usar apenas €/kWh. Para esta classe de sistema, o benefício relevante inclui custo de instalação, manutenção, substituição de baterias, deslocações, impacto ambiental, indisponibilidade e duração da rede.

PROPOSTA DE VALOR

Numa rede de milhares de sensores remotos, eliminar uma visita de manutenção pode valer muito mais do que toda a eletricidade produzida pelo nó durante anos.

24. Diferenciação

BIO-TERRA não é apenas uma Microbial Fuel Cell. A diferenciação potencial encontra-se na integração sistémica entre:

- bioeletroquímica
- energy harvesting ultrabaixo
- armazenamento
- gestão adaptativa de energia
- sensorização
- comunicações LPWAN
- algoritmos preditivos

A inovação relevante poderá residir mais na arquitetura e controlo energético do sistema completo do que numa única peça isolada.

25. Perspetiva de evolução

Etapa	Objetivo
BIO-TERRA 1	Sensor autónomo de solo
BIO-TERRA 2	Rede LoRa distribuída
BIO-TERRA 3	Energy management adaptativo
BIO-TERRA 4	Biofilmes e elétrodos otimizados
BIO-TERRA 5	Plataforma para agricultura e ambiente
BIO-TERRA X	Infraestrutura sensorial bioenergética distribuída

26. Conclusão

As Microbial Fuel Cells não constituem atualmente uma alternativa competitiva para geração elétrica convencional. Essa comparação, porém, faz provavelmente a pergunta errada.

O verdadeiro potencial da bioeletroquímica está em sistemas nos quais pequenas quantidades contínuas de energia possuem elevado valor operacional. Sensores ambientais são precisamente esse tipo de aplicação.

O BIO-TERRA propõe transformar avanços em EET, materiais de elétrodo, gestão de potência e eletrónica ultrabaixo consumo numa arquitetura integrada, mensurável e experimentalmente falsificável.

VISÃO

O objetivo não é extrair grandes quantidades de eletricidade da Terra. É permitir que máquinas extremamente eficientes sobrevivam com a pequena quantidade de energia que a vida produz continuamente à sua volta.

27. Referências selecionadas

1. Nature Communications — investigação sobre estruturas de transporte eletrónico e nanofios em *Geobacter*. [Ligação](#)
2. Nature Microbiology — propriedades condutoras associadas a OmcZ e biofilmes eletroativos. [Ligação](#)
3. Renewable and Sustainable Energy Reviews — revisão de desempenho e limitações de MFC/SMFC. [Ligação](#)
4. ScienceDirect — sistema IoT alimentado por Soil Microbial Fuel Cells. [Ligação](#)
5. ScienceDirect — gestão de potência e sensorização agrícola com SMFC. [Ligação](#)
6. Chemosphere — Soil Microbial Fuel Cells como plataforma para monitorização ambiental. [Ligação](#)
7. International Journal of Hydrogen Energy — revisão sobre MFC e águas residuais. [Ligação](#)
8. Bioprocess and Biosystems Engineering — revisão de materiais e elétrodos nanoestruturados para MFC. [Ligação](#)

Nota técnica: este documento descreve uma arquitetura conceptual de I&D. Valores de desempenho citados na literatura variam fortemente com geometria, substrato, microbioma e condições experimentais. O BIO-TERRA P1 deve ser validado por medição independente antes de qualquer extrapolação de desempenho ou viabilidade económica.