

WHITE PAPER TÉCNICO

Eletrificação Portuária e o Novo Paradigma de Segurança contra Incêndio

O Papel do Líquido Bonpet na Mitigação de Riscos de Fuga Térmica em Baterias de Íons de Lítio no Ambiente Portuário

Preparado para o Port Performance Summit Brasil 2026

São Paulo, outubro de 2026

Mandala Ciência e Tecnologia

Representante Oficial Bonpet Systems no Brasil
Péricles Sant'Anna B. Mattos — CEO e Fundador
Mestre em Defesa e Segurança Civil/UFF



@mandalahub



(19) 99829-1088



mandalahub.com.br



@mandalainovacoes

Sumário Executivo

O setor portuário brasileiro está no centro de duas transições simultâneas: a modernização operacional voltada a ganhos de performance e sustentabilidade, e a eletrificação progressiva de equipamentos, frotas e sistemas de energia. Guindastes RTG elétricos, empilhadeiras e reach stackers movidos a bateria, veículos autônomos guiados (AGVs), sistemas estacionários de armazenamento de energia (BESS) para gerenciamento de carga e, cada vez mais, embarcações híbridas e elétricas compõem um novo perfil de ativo operacional nos terminais.

Essa transição, embora estratégica e desejável, introduz uma categoria de risco de incêndio estruturalmente diferente da que os planos de segurança portuária foram historicamente desenhados para enfrentar: a fuga térmica (thermal runaway) em baterias de íons de lítio. Trata-se de um evento que se autoalimenta internamente, libera gases de alta toxicidade e é conhecido por reacender horas após um combate aparentemente bem-sucedido — características para as quais o pó químico seco e a água aplicada de forma convencional não foram projetados.

Este white paper apresenta, com base em artigo científico submetido e aprovado no XI Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS, Niterói/RJ, outubro de 2026), a fenomenologia técnica desse risco e as evidências reportadas sobre o líquido Bonpet como tecnologia de supressão e resfriamento voltada especificamente para esse tipo de evento. O documento também descreve como a Mandala Ciência e Tecnologia, representante oficial da Bonpet Systems no Brasil, pode apoiar terminais, operadores portuários e autoridades marítimas na adaptação de seus protocolos de segurança contra incêndio à era da eletrificação.

A eletrificação dos portos é inevitável e correta — mas ela desloca o risco de incêndio para dentro da própria célula da bateria, onde a água e o pó químico convencionais não são suficientemente adequados para o combate. Preparar o setor portuário para esse novo tipo de evento é o desafio de segurança contra incêndio da década.

— Péricles Sant'Anna B. Mattos, CEO da Mandala Ciência e Tecnologia

1. A Eletrificação do Setor Portuário: Um Novo Perfil de Risco

A busca por eficiência energética e por metas de descarbonização vem acelerando a adoção de tecnologia de baterias de íons de lítio em praticamente todas as camadas da operação portuária:

- Equipamentos de movimentação de carga: RTGs, RTOs, empilhadeiras, reach stackers e terminal tractors com motorização elétrica a bateria.
- Automação de pátio: veículos guiados automaticamente (AGVs) e sistemas robotizados de movimentação de contêineres.
- Armazenamento estacionário de energia (BESS): utilizado para peak shaving, recuperação de energia de frenagem regenerativa de guindastes e como buffer para carregamento rápido de frotas.
- Embarcações híbridas e elétricas: rebocadores, lanchas de apoio e, em horizonte mais próximo, navios de curta distância (short sea shipping) com propulsão elétrica ou híbrida.
- Infraestrutura de recarga: estações de carregamento rápido concentradas em áreas de pátio, frequentemente próximas a zonas de armazenamento e tráfego intenso.

Cada um desses ativos concentra, em espaço reduzido e muitas vezes em ambiente confinado ou semiconfinado (porões de embarcação, galpões, subsolos de garagem de equipamentos), uma quantidade significativa de energia eletroquímica armazenada. Esse é precisamente o cenário em que a fuga térmica se torna mais perigosa e mais difícil de controlar com os métodos tradicionais.

2. Anatomia do Risco: A Fuga Térmica (Thermal Runaway)

Diferentemente da combustão convencional, a falha de uma bateria de íons de lítio não depende de oxigênio atmosférico: ela se origina no colapso interno da própria célula — ânodo, cátodo, eletrólito líquido inflamável e separador polimérico. Quando a taxa de geração interna de calor supera a capacidade de dissipação do sistema, instala-se uma reação em cadeia autossustentada.

O ponto crítico de instabilidade, associado à decomposição da camada de interfase de eletrólito sólido (SEI), costuma ocorrer entre 117°C e 125°C. Uma vez ultrapassado esse limiar, a temperatura interna da célula pode saltar para picos superiores a 1.100°C em menos de 200 segundos — uma velocidade de escalada que reduz drasticamente a janela de resposta útil das equipes de emergência.

O subproduto dessa reação é um coquetel de gases de alta toxicidade: monóxido de carbono, metano, cianeto de hidrogênio e, criticamente, fluoreto de hidrogênio (HF). A concentração desses compostos pode exceder em centenas de vezes os limites de exposição ocupacional (PEL) estabelecidos pela OSHA — um dado especialmente relevante para operações portuárias, onde brigadistas e equipes de resgate atuam próximos a áreas de grande circulação de pessoas e cargas.

3. Por Que os Métodos Tradicionais Ficam Aquém no Ambiente Portuário

O pó químico ABC e os gases inertes conseguem, no melhor cenário, abafar a chama visível — mas não removem o calor acumulado no núcleo da célula, o que resulta em reignições praticamente imediatas. A água pura, por sua vez, possui capacidade térmica relevante, mas exige volumes massivos para penetrar a blindagem metálica dos módulos e alcançar as células individualmente.

No contexto portuário, essa limitação se agrava por três fatores específicos do setor:

- **Confinamento:** porões de embarcação, subsolos de garagens de equipamentos e galpões de armazenamento de BESS dificultam ventilação e acesso direto ao foco do incêndio.
- **Sensibilidade ambiental:** o escoamento (run-off) de grandes volumes de água de combate carrega metais pesados lixiviados e subprodutos ácidos do eletrólito — um passivo ambiental crítico em terminais situados junto a corpos d'água e ecossistemas costeiros.
- **Criticidade operacional:** cada hora de interdição de um berço, pátio ou via de acesso tem custo direto de performance portuária, o que torna o tempo até controle e resfriamento seguro (não apenas a extinção da chama visível) uma métrica de negócio, e não apenas de segurança.

4. Bonpet: Tecnologia de Supressão Desenvolvida para a Era da Eletrificação

O líquido Bonpet é uma solução aquosa de compostos inorgânicos e orgânicos, empregada isoladamente ou como aditivo em água, desenvolvida especificamente para atuar nos quatro vértices do tetraedro do fogo em eventos de fuga térmica. Seu mecanismo de ação combina quatro efeitos simultâneos:

- **Resfriamento por decomposição endotérmica:** sais inorgânicos da formulação (como sulfato de amônio) absorvem energia térmica significativamente superior à entalpia de vaporização da água pura, drenando a energia da reação em cadeia.

- Formação de barreira cerâmica (vitrificação): o silicato de sódio presente na formulação forma, sob alta temperatura, uma camada vítrea que isola termicamente células adjacentes e sela a célula danificada, contendo a liberação de vapores inflamáveis.
- Inibição química de radicais livres: compostos fosfatados interferem na cinética da combustão em fase gasosa, reduzindo a intensidade da chama.
- Penetração por redução de tensão superficial: surfactantes aniônicos permitem que o líquido flua por capilaridade através de fendas, conectores e ventilações do módulo, algo que a água convencional não consegue fazer de forma eficiente.

Relatórios técnicos consolidados no artigo científico de referência (Mattos, Gomes e Valle, XI CBENS, 2026) reportam desempenho consistente em diferentes escalas de bateria, de células individuais a packs veiculares completos:

Configuração	Tipo de Célula	Capacidade	Resultado Reportado
Células Li-Ion NMC	Cilíndrica/Pouch	1,0 – 1,5 kWh	Supressão total em < 30 s; sem propagação
Blocos de Bateria	Módulo Industrial	4,0 – 5,5 kWh	Estabilização térmica bem-sucedida; sem reignição
Segmentos de Alta Tensão	Estacionário/ESS	20,0 kWh	Controle de propagação entre módulos adjacentes
Veículo Elétrico Completo	Pack veicular	49,0 kWh	Extinção em cenários de túnel e garagem

Testes independentes, incluindo os conduzidos pela Universidade de Žilina (Eslováquia) em túneis rodoviários e ferroviários, e a validação técnica da Stellantis em parceria com a Riskconsult, reforçam a aplicabilidade do agente em cenários de alta complexidade e confinamento — condições estruturalmente análogas às encontradas em porões de embarcação, subsolos de pátio e galpões portuários.

4.1 Certificações e Reconhecimento Regulatório Relevantes ao Setor Portuário e Marítimo

Certificação / Norma	Emissor	Relevância Portuária
EN2 e EN3-7:2004+A1:2007 (Classes A, B, F)	MPA Dresden (Alemanha)	Cobertura para incêndios industriais e de líquidos inflamáveis em pátios e armazéns
UL EX16371 — NFPA 18 (Agente Umectante)	UL Solutions (EUA)	Validação para uso em misturas com água em operações de grande escala
Circular nº 2322.3/79893/2023	Autoridade Marítima Grega	Recomendação específica para embarcações que transportam veículos de combustível alternativo (AFVs)

O reconhecimento pela autoridade marítima grega, especificamente voltado para embarcações que transportam veículos de combustível alternativo, é particularmente relevante para operadores portuários e armadores que já

operam ou planejam operar frotas híbridas/elétricas — um sinal de que o enquadramento regulatório para esse tipo de risco já está em movimento em nível internacional.

4.2 Perfil Ambiental

Diferente de agentes tradicionais à base de compostos fluorados (PFAS), o Bonpet é reportado pelo fabricante como não persistente, não bioacumulável e de fácil remoção pós-incêndio apenas com água — um diferencial direto para terminais operando sob licenciamento ambiental rigoroso e proximidade com corpos d'água, já que reduz de forma expressiva o volume de água necessário e, consequentemente, o volume de efluente contaminado gerado.

5. Aplicações Diretas no Ambiente Portuário

- Pátios de contêineres com equipamentos elétricos: sistemas portáteis e fixos posicionados em áreas de estacionamento e carregamento de RTGs, empilhadeiras e AGVs elétricos.
- Instalações de BESS: sistemas fixos automáticos integrados a linhas de detecção térmica, alinhados aos requisitos da NFPA 855 e aos protocolos de teste UL 9540A.
- Estações de recarga rápida: resposta a eventos de fuga térmica durante o carregamento, momento de maior estresse térmico da célula.
- Porões e conveses de embarcações híbridas/elétricas: aplicação compatível com o enquadramento já reconhecido pela autoridade marítima grega para AFVs.
- Armazéns e áreas de manutenção de frota elétrica: prevenção de propagação entre unidades armazenadas ou em manutenção.

6. O Papel da Mandala: Representante Oficial Bonpet no Brasil

A Mandala Ciência e Tecnologia atua como representante oficial da Bonpet Systems no Brasil, integrando essa tecnologia a um portfólio mais amplo de segurança contra incêndio e capacitação técnica, que inclui também simuladores de realidade virtual para treinamento de brigadas (FLAIM Systems) e soluções de segurança civil.

Para o setor portuário, a Mandala está posicionada para apoiar operadores de terminal, autoridades portuárias e armadores em quatro frentes:

- Diagnóstico técnico: avaliação de risco específica para ativos eletrificados existentes e planejados (frotas, BESS, infraestrutura de recarga).
- Especificação e fornecimento: dimensionamento de sistemas fixos e portáteis Bonpet adequados a cada ponto crítico do terminal, incluindo integração com sistemas de detecção térmica já instalados.
- Capacitação de brigadas: treinamento teórico e prático — inclusive por meio de simulação em realidade virtual — para resposta segura a eventos de fuga térmica, com foco em gestão de gases tóxicos e critérios de resfriamento e não reignição.
- Suporte à conformidade regulatória: apoio técnico na adequação a normas como NFPA 855 e nos protocolos de teste UL 9540A, antecipando um cenário regulatório que tende a se tornar mais rigoroso para ativos eletrificados em infraestrutura crítica.

Estamos vendo as empresas migrarem sua frota e sua infraestrutura energética para o lítio muito mais rápido do que seus planos de emergência conseguem acompanhar. Isso exige repensar desde o projeto de treinamento

do brigadista até a especificação técnica dos sistemas de combate de supressão — e é exatamente onde a Mandala, como representante do Bonpet no Brasil, tem atuado junto às empresas.

— Péricles Sant'Anna B. Mattos, CEO da Mandala Ciência e Tecnologia

7. Recomendações para o Setor Portuário

- Tratar o risco de fuga térmica em baterias como categoria própria nos planos de emergência e nas análises de risco de terminal, distinta do incêndio industrial convencional.
- Mapear todos os pontos de concentração de energia eletroquímica (frota, BESS, áreas de recarga, embarcações) como zonas de risco prioritário para dimensionamento de sistemas de supressão específicos.
- Priorizar critérios de resfriamento profundo e não reignição — não apenas extinção da chama visível — na definição de protocolos de resposta e nos contratos de fornecimento de sistemas de supressão.
- Integrar o planejamento de segurança contra incêndio ao licenciamento ambiental, considerando o impacto do run-off de água de combate em áreas costeiras e portuárias.
- Investir em capacitação continuada das brigadas, incorporando tecnologias de simulação que reproduzam com segurança a dinâmica real de um evento de fuga térmica.

Conclusão

A eletrificação do setor portuário é uma tendência estrutural e desejável do ponto de vista de eficiência e sustentabilidade — mas ela introduz um novo vetor de risco que os planos tradicionais de segurança contra incêndio não foram desenhados para enfrentar. As evidências técnicas reunidas no artigo científico de referência, somadas ao reconhecimento regulatório internacional já obtido pelo Bonpet — incluindo sua aplicação específica reconhecida para embarcações com veículos de combustível alternativo — posicionam essa tecnologia como uma ferramenta relevante para o arsenal de segurança dos terminais brasileiros.

A Mandala Ciência e Tecnologia, como representante oficial da Bonpet Systems no Brasil, está à disposição do setor portuário para apoiar essa transição com diagnóstico técnico, fornecimento de sistemas, capacitação de brigadas e suporte à conformidade regulatória.

Referência Técnica

MATTOS, P. S. B.; GOMES, L. O. P.; VALLE, M. Análise técnica da eficácia do líquido Bonpet na mitigação de incêndios em baterias de íons de lítio. In: XI Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS), Niterói/RJ, 26 a 30 de outubro de 2026. As referências completas do artigo, incluindo normas técnicas (NFPA 855, UL 9540A), estudos de fuga térmica e relatórios de teste independentes, estão disponíveis mediante solicitação junto à Mandala Ciência e Tecnologia.