

## ARTIGO TÉCNICO

# IMPLICAÇÕES DO ESTRESSE SUBLETAL EM BACTÉRIAS NA QUALIDADE E SEGURANÇA DE ALIMENTOS

**Autores:** Michele Lopes de Azevedo Diogo<sup>1</sup>; Jaqueline Milagres de Almeida<sup>1</sup>; Vanessa Riani Olmi Silva<sup>1</sup>; Maurilio Lopes Martins<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais – Campus Rio Pomba.

Autor para correspondência (e-mail): maurilio.martins@ifsudestemg.edu.br



## DESTAQUE

*Bactérias sob estresse subletal podem permanecer viáveis, desenvolver proteção cruzada e favorecer a disseminação de genes de resistência, dificultando a detecção e aumentando o risco à segurança dos alimentos.*

## 1. INTRODUÇÃO

O controle microbiológico é um dos pilares da indústria de alimentos, sendo essencial para garantir a inocuidade dos produtos ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a obtenção da matéria-prima até o consumo final. Apesar dos avanços nas técnicas de conservação e controle, as Doenças de Transmissão Hídrica e Alimentar (DTHA) ainda representam um problema de saúde pública importante globalmente, especialmente em contextos de crescimento urbano desordenado, produção em larga escala e consumo em vias públicas (Brasil, 2010).

Parte desse cenário está relacionada ao fato de que métodos como os estresses osmótico, ácido, oxidativo, nutricional, pela presença de inibidores, frio, térmico, biológico e pelo uso de sanitizantes, nem sempre promovem a completa inativação das bactérias, podendo causar injúria subletal. Células subletalmente danificadas podem não crescer em meios seletivos, mas permanecem viáveis e capazes de recuperar sua virulência (Forsythe, 2013).

O real impacto das DTHA é frequentemente subestimado, pois a maioria dos casos apresenta sintomas leves e não chega a ser notificada aos sistemas de vigilância (Brasil, 2010). Esse desafio sanitário é intensificado pela capacidade de adaptação bacteriana, onde o estresse subletal pode ser classificado em níveis de severidade leve, moderada ou severa. Enquanto células com injúrias leves podem se recuperar independentemente do meio, populações moderadamente lesionadas dependem das condições ambientais para restaurar sua viabilidade, o que torna sua detecção em exames laboratoriais de rotina extremamente complexa e eleva o risco de lotes de alimentos contaminados (Racioppo *et al.*, 2025).

## 2. DESENVOLVIMENTO E DISCUSSÃO

### 2.1. Mecanismos de resposta e adaptação

Os mecanismos de sobrevivência bacteriana envolvem respostas específicas para cada tipo de estresse. Sob estresse osmótico, ocorre osmorregulação pelo acúmulo de solutos compatíveis. Em condições ácidas, bombas H<sup>+</sup>-ATPase e proteínas ASPs auxiliam na manutenção da homeostase celular. Já no estresse oxidativo, enzimas antioxidantes, como a superóxido dismutase, participam da neutralização de espécies reativas de oxigênio. Sob escassez de nutrientes, a resposta ao estresse é mediada pelo sinalizador ppGpp (guanosina tetrafosfato), enquanto substâncias inibitórias estimulam sistemas de efluxo e produção de bacteriocinas. No choque frio ocorre síntese de CSPs (proteínas de choque frio) e, no estresse térmico, de HSPs (proteínas de choque térmico), responsáveis pelo reparo e estabilidade de proteínas desnaturadas (Forsythe, 2013; He *et al.*, 2025).

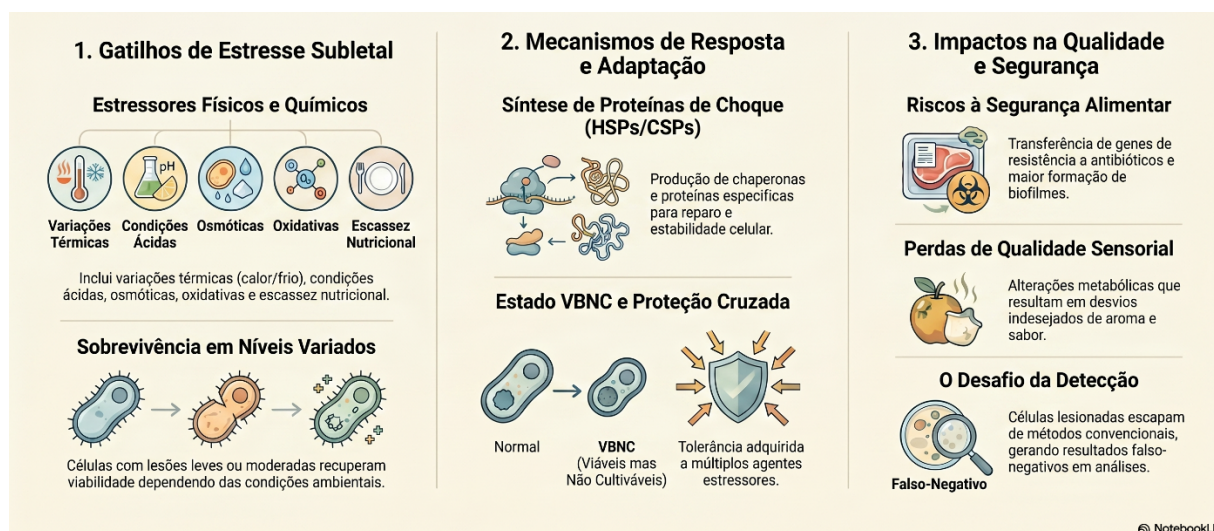
A proteção cruzada também representa um importante mecanismo adaptativo, no qual a exposição prévia a um estresse aumenta a tolerância a outros agentes. Bactérias submetidas à dessecação podem apresentar maior resistência ao calor ou ao etanol, reduzindo a eficácia dos métodos de controle no processamento de alimentos (Racioppo *et al.*, 2025). Além disso, o estado viável, porém não cultivável (VBNC) permite que células mantenham atividade metabólica sem formar colônias em meios convencionais, podendo recuperar a patogenicidade em condições favoráveis (Racioppo *et al.*, 2025).

## 2.2. Impactos na segurança e qualidade dos alimentos

Células bacterianas submetidas a estresse subletal representam risco à saúde pública, pois podem realizar a transferência horizontal de genes de resistência a antibióticos e o surgimento de estirpes multirresistentes (Zhang *et al.*, 2025). Além disso, espécies patogênicas do gênero *Salmonella* spp. podem aumentar a formação de biofilmes após exposição a concentrações subletais de sanitizantes, favorecendo sua persistência em superfícies industriais (Zhang *et al.*, 2025).

Em relação à qualidade dos alimentos, bactérias ácido-láticas podem alterar vias metabólicas em resposta ao estresse ambiental, reduzindo a produção de compostos voláteis importantes e impactando aroma e sabor, especialmente em alimentos fermentados (He *et al.*, 2025). Os principais mecanismos de resposta bacteriana frente a estresses subletais e seus impactos na qualidade e segurança dos alimentos estão apresentados na Figura 1.

**Figura 1 – Principais mecanismos de resposta bacteriana frente a estresses subletais e seus impactos na qualidade e segurança de alimentos.**



Fonte: Infográfico elaborado pelos autores com o auxílio de IA generativa (NotebookLM), mediante prompt autoral. Ano: 2026. Google, 2026.

## 2.3 Implicações industriais e desafios na detecção microbiológica

O sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) permanece fundamental para a identificação e o monitoramento de riscos ao longo da cadeia produtiva. Sua efetividade depende da integração com programas de Boas Práticas de Fabricação (BPF), inspeções sanitárias consistentes e medidas que reduzam a ocorrência de estresse subletal bacteriano (Brasil, 2010). Nesse contexto, células lesionadas ou em estado VBNC representam um desafio adicional, pois podem não ser detectadas por métodos convencionais, comprometendo a segurança dos alimentos. As principais implicações fisiológicas e exemplos industriais estão apresentados no Quadro 1.

**Quadro 1 - Diferenciação fisiológica e implicações industriais de células bacterianas em estresse subletal.**

Microrganismo	Estresse Subletal Sofrido	Resposta Apresentada
<i>Lactococcus lactis</i>	Ácido (baixo pH)	Via de desaminação da arginina gerando NH <sub>3</sub> para neutralização
<i>Salmonella enteritidis</i>	Dessecação (baixa Aw)	Formação de filamentos celulares para maior resistência
<i>Escherichia coli</i>	Térmico (calor subletal)	Síntese de chaperonas (HSPs) e termotolerância adquirida
<i>Listeria monocytogenes</i>	Choque Frio	Síntese de CSPs e helicases para crescimento sob refrigeração
<i>Campylobacter jejuni</i>	Estresse oxidativo, térmico e nutricional	Indução do estado viável, porém não cultivável (VBNC)
<i>Pseudomonas spp.</i>	Dessecação	Aumento na síntese de alginato, favorecendo biofilmes.

Fonte: Forsythe (2013) e He *et al.* (2025).

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As injúrias subletais representam um importante desafio para a segurança de alimentos, uma vez que permitem a sobrevivência bacteriana mesmo após processos de conservação e sanitização. Microrganismos em estado VBNC, ou submetidos à proteção cruzada, podem permanecer metabolicamente ativos, dificultando sua detecção por métodos microbiológicos convencionais e aumentando os riscos de contaminação. Dessa forma, torna-se essencial aprimorar estratégias de monitoramento e controle microbiológico, incorporando métodos mais sensíveis, além da revisão contínua dos protocolos adotados pela indústria. Compreender os mecanismos de adaptação bacteriana e transferência horizontal de genes é fundamental para o desenvolvimento de processos de conservação mais seguros e eficazes.

### REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente. Departamento de Ações Estratégicas de Epidemiologia e Vigilância em Saúde e Ambiente. **Manual integrado de vigilância,**

**prevenção e controle de doenças transmitidas por alimentos.** Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2010. p. 11 - 100. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/svsa/vigilancia/guia-de-vigilancia-em-saude-volume-1-6a-edicao>. Acessado em: 28 de abril de 2026.

FORSYTHE, S. J. **Microbiologia da segurança dos alimentos.** 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. p. 109 - 384. ISBN 9781405140058/1405140054

HE, X.; CUI, Y.; JIA, Q.; ZHUANG, Y.; GU, Y.; FAN, X.; DING, Y. Response mechanisms of lactic acid bacteria under environmental stress and their application in the food industry. **Food Bioscience**, v. 64, 105938, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.105938>. Acessado em: 27 abril 2026.

RACIOPPO, A.; GUERRIERI, A.; CORBO, M. R.; SINIGAGLIA, M.; BEVILACQUA, A.; SPERANZA, B. Sub-lethal injury in foodborne microorganisms: An experimental comparison between ultrasound and traditional inactivation techniques. **Applied Food Research**, v. 5, 101119, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101119>. Acessado em: 27 abril 2026.

ZHANG, Y.; DONG, K.; LIU, T.; SHI, L.; REN, M.; LI, C. Abundance changes and transfer mechanism of antibiotic resistance genes in water under sub-lethal disinfection. **Water-Energy Nexus**, v. 8, p. 18-30, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2025.02.001>. Acessado em: 27 abril 2026.