

Arquitetura IoT Local e Aberta para Monitoramento da Fermentação Ruminal *In Vitro* Avaliada em Simulação

Rodrigo Luiz Chaves de Campos¹, Raphael Rodrigues Gonçalves¹,
Hana Karina Salles Rubinsztein¹

¹Faculdade de Computação (FACOM) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)
Av. Costa e Silva, s/n – Cidade Universitária – 79.070-900 – Campo Grande, MS, Brasil

rodrigo.luiz.campos@ufms.br, raphael.r@ufms.br,
hana.rubinsztein@ufms.br

Abstract. *The in vitro gas production technique is widely used to evaluate feed fermentability in ruminant nutrition. However, commercial automated systems, such as ANKOM RF, present high costs and limited integration flexibility, restricting their adoption in small laboratories. This work proposes a local IoT architecture based on open-source components for monitoring in vitro ruminal fermentation. The architecture integrates data acquisition, MQTT-based communication, persistent storage, and local network visualization, supporting up to 30 flasks simultaneously. Synthetic time-series data for pressure and temperature were generated to represent different fermentation profiles, and Gompertz models were fitted to validate kinetic analyses. The results demonstrated sigmoid behavior consistent with the literature, high coefficients of determination, and sub-second data transmission latency without packet loss during testing. The estimated cost was approximately R\$140 per module, indicating feasibility for implementation in small-scale laboratories.*

Keywords: IoT; ruminal fermentation; in vitro gas production; absolute pressure; MQTT.

Resumo. *A técnica de produção de gases in vitro é amplamente utilizada para avaliar a fermentabilidade de alimentos na nutrição de ruminantes. Entretanto, sistemas automatizados comerciais, como o ANKOM RF, apresentam elevado custo e limitada flexibilidade de integração, restringindo sua adoção em laboratórios de pequeno porte. Este trabalho propõe uma arquitetura IoT local baseada em componentes abertos para monitoramento da fermentação ruminal in vitro. A arquitetura integra aquisição de dados, comunicação via MQTT, armazenamento persistente e visualização em rede local, com suporte para até 30 frascos simultaneamente. Foram geradas séries temporais sintéticas de pressão e temperatura representando diferentes perfis fermentativos, com ajuste de modelos de Gompertz para validação das análises cinéticas. Os resultados demonstraram comportamento sigmoide compatível com a literatura, elevados coeficientes de determinação, e transmissão de dados com latência sub-segundo, sem perdas durante os testes. O custo estimado foi de aproximadamente R\$ 140 por módulo, indicando viabilidade para implementação em laboratórios de pequeno porte.*

Palavras-chave: IoT; fermentação ruminal; produção de gases *in vitro*; pressão absoluta; MQTT.

1. Introdução

A técnica de produção de gases *in vitro* é amplamente utilizada para avaliar a fermentabilidade de alimentos na nutrição de ruminantes, permitindo estimar a cinética de degradação e a produção de gás em condições controladas de incubação [Menke and Steingass 1979, Theodorou et al. 1994]. Sistemas comerciais como o ANKOM RF automatizam a aquisição de pressão e temperatura em múltiplos frascos, reduzindo trabalho manual e aumentando a reprodutibilidade, mas apresentam custo elevado e caráter proprietário, o que limita sua adoção por laboratórios de menor porte ou instituições com orçamento restrito [ANKOM Technology 2016].

A democratização do acesso a esse tipo de instrumentação tem impacto direto sobre laboratórios de pequenas e médias instituições brasileiras, especialmente no agro-negócio. A redução da barreira de custo amplia a capacidade de pesquisa em nutrição animal e contribui indiretamente para a otimização de dietas, com potencial de redução de impactos ambientais associados à pecuária, em particular, emissões de gases de efeito estufa decorrentes da fermentação ruminal.

Paralelamente, avanços em computação embarcada, protocolos leves de comunicação e arquiteturas baseadas em Internet das Coisas (IoT) têm viabilizado soluções de monitoramento local mais acessíveis, com microcontroladores de baixo custo, sensores digitais e integração direta com aplicações web. No contexto da fermentação ruminal *in vitro*, essa combinação abre a possibilidade de construir sistemas modulares por frasco, ligados a uma infraestrutura de coleta e visualização de dados totalmente local, mantendo aderência aos protocolos clássicos de incubação e leitura de pressão.

Este trabalho propõe uma arquitetura IoT local, baseada em componentes abertos, para monitoramento da fermentação ruminal *in vitro*. A solução é avaliada integralmente em ambiente de simulação, reproduzindo condições típicas de ensaios de produção de gases (headspace fixo, operação em bar absoluto, correção térmica e limiar de alívio de pressão). Em vez de partir diretamente para a construção de hardware, adota-se uma abordagem incremental: primeiro, verifica-se o fluxo de dados e os contratos entre simulador, middleware de comunicação, backend e dashboard; em etapas futuras, esses mesmos contratos podem ser reutilizados em protótipos físicos.

As principais contribuições deste trabalho são: a definição de uma arquitetura IoT local/self-hosted para monitoramento de até 30 frascos em paralelo, integrando os protocolos clássicos da técnica de produção de gases *in vitro* com componentes abertos; a implementação de um simulador cinético parametrizável, capaz de gerar séries temporais de pressão e temperatura com base em modelos de Gompertz em cenários inspirados em documentos técnicos [Marino et al. 2018, Lima et al. 2019]; a validação, em simulação, do pipeline completo de dados (simulador → MQTT → backend → dashboard), incluindo ajuste de modelos cinéticos e avaliação de desempenho; e a estimativa de um Bill of Materials (BOM) teórico de baixo custo por frasco, que orienta a futura construção de protótipos físicos. A contribuição é, portanto, predominantemente integrativa e metodológica: situa-se na interface entre técnica laboratorial consolidada e arquitetura de software aberta, validando a viabilidade da transição antes do investimento em hardware.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 discute trabalhos relacionados e o contexto do domínio. A Seção 3 apresenta a metodologia e

a arquitetura proposta, incluindo considerações para a implantação física. A Seção 4 descreve os experimentos e resultados em simulação. A Seção 5 discute os resultados e suas limitações. A Seção 6 conclui o trabalho e aponta direções futuras.

2. Trabalhos Relacionados e Contexto do Domínio

A técnica de produção de gases *in vitro* foi consolidada a partir de protocolos clássicos [Menke and Steingass 1979, Theodorou et al. 1994]. Nessas condições, a curva de produção de gases ao longo do tempo é usada como proxy da degradação da matéria orgânica, com *headspace* em torno de 0,16 L por frasco, ensaios de até 48 h a aproximadamente 39 °C e rotinas padronizadas de preparo, como descrito em documentos técnicos [Marino et al. 2018, Marino 2016].

Do ponto de vista de modelagem, funções não lineares como exponenciais, logísticas, Gompertz e modelos bicompartimentais são amplamente empregadas para descrever as curvas de produção de gases. Em estudos comparativos associados à técnica automática, o modelo de Gompertz e variações bicompartimentais costumam apresentar bom ajuste quando a frequência de amostragem captura adequadamente a fase de crescimento acelerado [Lima et al. 2019].

A automação da leitura de pressão e temperatura levou ao desenvolvimento de equipamentos como o ANKOM RF, que integra tampas com transdutores, unidade de leitura e software proprietário para aquisição e exportação de dados [ANKOM Technology 2016]. Embora reduza esforço manual e aumente a reprodutibilidade, o sistema apresenta limitações relevantes para laboratórios de menor porte: o custo de aquisição é elevado, há dependência de computador dedicado executando software do fabricante, a exportação dos dados ocorre em formatos proprietários, e não há API (Application Programming Interface) aberta que permita integração direta com plataformas institucionais ou *workflows* externos. Esses fatores motivam a busca por arquiteturas abertas que mantenham a aderência aos protocolos clássicos da técnica e, ao mesmo tempo, ofereçam controle local dos dados e flexibilidade de integração. Esforços recentes têm explorado sistemas alternativos com componentes de menor custo: [Liu et al. 2025] descrevem um sistema modular construído a partir de componentes comerciais com sensores de pressão, validado contra o ANKOM RF, com custo aproximado de metade do sistema comercial.

Neste cenário, a proposta deste trabalho se posiciona na interface entre a técnica consolidada de produção de gases e arquiteturas IoT abertas. A solução respeita protocolos clássicos (*headspace* controlado, operação em bar absoluto, correção térmica e ensaios de 48 h) e, ao mesmo tempo, define uma arquitetura modular baseada em componentes abertos e comunicação MQTT, com foco em operação local e escalabilidade. A avaliação em ambiente de simulação precede a implementação física do sistema e permite concentrar a análise em contratos de dados, no desempenho do pipeline de comunicação e processamento, e na viabilidade de uso em laboratório. Essa abordagem possibilita identificar limitações e verificar a consistência do fluxo de telemetria antes da integração com hardware embarcado, reduzindo custos e riscos associados ao desenvolvimento de protótipos físicos comparáveis a soluções comerciais.

3. Metodologia e Arquitetura do Sistema

A abordagem é inteiramente baseada em software, com o objetivo de verificar o fluxo de dados e os contratos entre componentes antes de qualquer implementação física. Foram adotadas premissas coerentes com a técnica de produção de gases: uso de pressão em bar absoluto, *headspace* fixo de 0,16 L por frasco, alívio virtual em 1,5 bar abs e correção térmica pela expressão:

$$P_{\text{std}} = P_{\text{meas}} \times \frac{273,15}{T_C + 273,15}. \quad (1)$$

Os ensaios simulados consideram até 48 h de incubação, com intervalo de amostragem configurável entre 1 e 120 minutos. A geração de dados é realizada em ambiente local, em estação de trabalho de uso comum, sem requisitos especiais de hardware.

3.1. Requisitos do sistema

A Tabela 1 resume os requisitos funcionais (RF) e não funcionais (RNF) do sistema IoT proposto. O limite de 30 frascos foi adotado como meta de projeto, dimensionado a partir de configurações típicas de bancada para a técnica de produção de gases.

Tabela 1. Requisitos principais do sistema IoT proposto.

Prioridade	Tipo	Descrição
Must	RF	Medir pressão e temperatura por frasco
Must	RF	Aplicar correção térmica padronizada
Should	RF	Suportar até 30 frascos via MQTT
Should	RNF	Manter baixa latência em rede local
Could	RNF	Custo estimado < R\$ 200 por módulo

3.2. Visão geral da arquitetura

A arquitetura proposta é organizada em quatro camadas principais: aquisição de dados, comunicação, processamento (*backend*) e apresentação. Essa organização em camadas favorece a modularidade, o desacoplamento entre componentes e a escalabilidade do sistema, permitindo futuras expansões e adaptações para diferentes cenários experimentais.

A camada de aquisição (*edge*) compreende o simulador responsável pela geração de séries temporais sintéticas em Python, produzindo dados individualizados para cada frasco experimental. A arquitetura foi projetada para que, em uma implementação física futura, o simulador possa ser substituído por nós ESP32 integrados a sensores de pressão e temperatura.

A camada de comunicação realiza a publicação da telemetria em um *broker* MQTT local, promovendo o desacoplamento entre produtores e consumidores de dados e favorecendo a comunicação assíncrona entre os módulos do sistema.

A camada de processamento consome as mensagens publicadas, realiza a validação dos *payloads* e persiste os dados em banco SQLite, além de disponibilizar APIs REST (Representational State Transfer) e WebSocket para integração e atualização em tempo real.

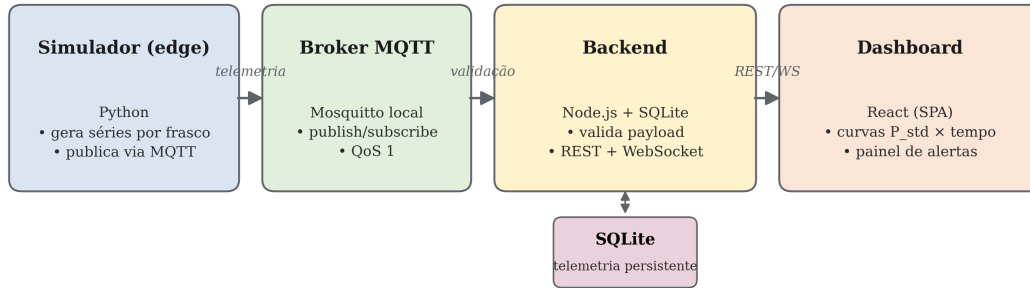


Figura 1. Arquitetura em blocos do sistema IoT proposto.

Por fim, a camada de apresentação consiste em um *dashboard* web responsável pela visualização das curvas de fermentação, métricas operacionais e alertas do sistema. Toda a arquitetura foi concebida para operação local/*self-hosted*, sem dependência de serviços em nuvem. A Figura 1 representa esquematicamente as quatro camadas propostas. Os componentes e funcionalidades de cada camada são detalhados nas seções subsequentes.

3.3. Simulador da fermentação ruminal

O simulador foi implementado em Python e gera séries temporais de pressão absoluta e temperatura para cada frasco, a partir de um modelo cinético do tipo Gompertz [Lima et al. 2019]:

$$V(t) = A \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{\mu e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}, \quad (2)$$

em que $V(t)$ é o volume de gás acumulado em t horas, A é o potencial assintótico de produção (mL), μ é a taxa máxima e λ é o tempo de latência. O volume acumulado é convertido em pressão pela lei dos gases ideais, assumindo headspace fixo de 0,16 L por frasco:

$$P(t) = \frac{n(t) RT(t)}{V_{\text{headspace}}}, \quad T(t) = T_C(t) + 273,15, \quad (3)$$

com $R = 0,08314 \text{ bar}\cdot\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. A pressão resultante é corrigida para condição padrão via P_{std} .

Foram definidos dois cenários inspirados em parâmetros reportados em documentos técnicos: um cenário de maior produção (por exemplo, $A = 200 \text{ mL}$, $\mu = 0,06 \text{ h}^{-1}$, $\lambda = 10 \text{ h}$) e outro de menor produção (por exemplo, $A = 120 \text{ mL}$, $\mu = 0,03 \text{ h}^{-1}$, $\lambda = 12 \text{ h}$) [Marino et al. 2018, Lima et al. 2019]. Cada frasco recebe ruído gaussiano de baixa amplitude (cerca de 5% em torno da curva teórica), representando variabilidade experimental esperada.

3.4. Comunicação MQTT e contratos de mensagens

A camada de comunicação utiliza MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) com QoS (Quality of Service) 1 e mensagens não retidas, sobre broker local [OASIS 2014].

Listing 1. Exemplo de payload JSON publicado por um frasco.

```
{
  "msg_id": "UUID",
  "timestamp_iso": "2025-01-01T12:00:00Z",
  "flask_id": 3,
  "P_bar_abs": 1.23,
  "T_C": 39.0,
  "P_std": 1.15,
  "event": "none"
}
```

Os tópicos seguem o padrão `iot/rumen/<flask_id>/telemetry`, em que `<flask_id>` identifica unicamente cada frasco monitorado. A Tabela 2 detalha os campos do payload JSON (JavaScript Object Notation) publicado.

Tabela 2. Campos principais do payload MQTT de telemetria.

Campo	Tipo	Unidade	Descrição
<code>msg_id</code>	string	–	Identificador único da mensagem
<code>timestamp_iso</code>	string	–	Data/hora em formato ISO 8601
<code>flask_id</code>	int	–	Identificador do frasco
<code>P_bar_abs</code>	float	bar	Pressão absoluta no instante
<code>T_C</code>	float	°C	Temperatura do frasco
<code>P_std</code>	float	bar	Pressão corrigida para condição padrão
<code>event</code>	string	–	Marcador de eventos (ex.: relief)

A Listagem 1 apresenta um exemplo de payload JSON idempotente e autocontido, em que o campo `msg_id` (UUID, Universally Unique Identifier) garante que retransmissões não gerem registros duplicados na persistência:

3.5. Backend e persistência de dados

O backend foi implementado em Node.js, subscrevendo os tópicos MQTT de telemetria, validando o payload recebido e persistindo os dados em SQLite. O esquema lógico inclui: `assays` — identificação do ensaio; `flasks` — associação frasco–ensaio, incluindo `headspace`; e `telemetry` — série temporal com pressão, temperatura e eventos. São expostos endpoints REST para consulta e exportação, e um canal WebSocket notifica o dashboard a cada nova amostra recebida.

3.6. Dashboard e visualização

O `dashboard` foi desenvolvido como SPA (Single-Page Application) em React, consumindo APIs REST e WebSocket do backend. As principais telas incluem visão geral de ensaios, visão por frasco com gráficos de P_{std} vs. tempo e T_C vs. tempo, e painel de alertas registrando eventos relevantes (ex.: “frasco 3 em alívio virtual às 18 h”). A Figura 2 representa a topologia geral.

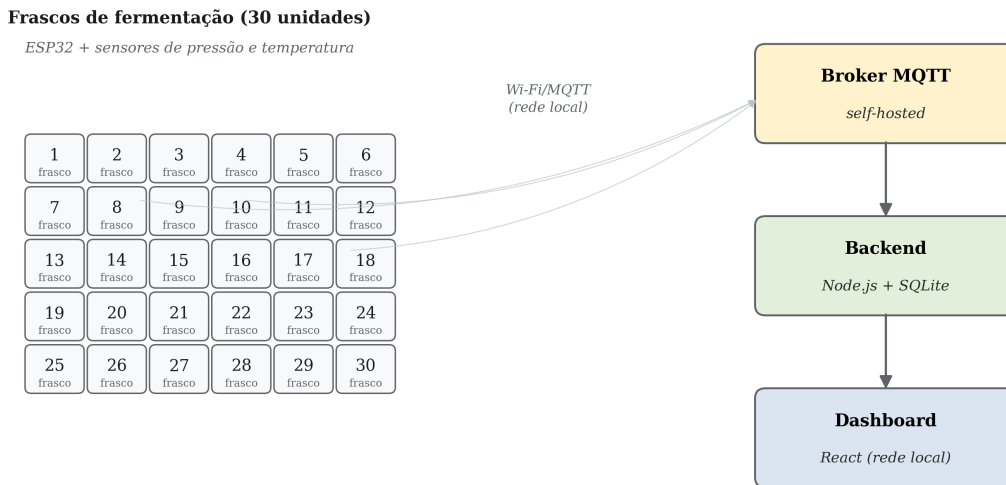


Figura 2. Topologia de comunicação envolvendo 30 frascos de fermentação, broker MQTT self-hosted, backend Node.js + SQLite e dashboard React em rede local.

3.7. Considerações para implantação física

A substituição do simulador da camada de aquisição (*edge*) por uma infraestrutura física baseada em microcontroladores ESP32 e sensores de pressão e temperatura, prevista como etapa de transição da implementação atual para um protótipo físico, exige o tratamento de três classes de desafios típicos de instrumentação em ambiente laboratorial.

A primeira refere-se a calibração dos sensores, incluindo transdutores de pressão e sensores de temperatura, que deve ser realizada antes de cada conjunto de ensaios, utilizando referências aferidas.

A segunda classe de desafios está associada à vedação dos frascos experimentais. Nesse contexto, testes prévios de hermeticidade são necessários para identificar possíveis vazamentos, os quais podem introduzir vieses sistemáticos em experimentos de longa duração e comprometer a precisão das análises fermentativas.

Por fim, a mitigação de interferências em ambiente laboratorial envolve proteção dos sensores contra umidade do banho-maria, bem como a blindagem do cabeamento contra ruídos eletromagnéticos de equipamentos adjacentes. Esses aspectos serão detalhados e validados experimentalmente durante a etapa de construção do protótipo, prevista como atividade inicial dos trabalhos futuros.

4. Resultados

Os testes foram conduzidos em ambiente local, simulando ensaios de até 48 h com até 30 frascos em paralelo, com repetições independentes por cenário. As análises consideram R^2 e erros residuais dos ajustes.

4.1. Cenários de simulação e conjunto de experimentos

Foram considerados dois cenários: Cenário 1 para maior fermentabilidade, análogo ao SAQ0505; e Cenário 2 para menor fermentabilidade, análogo ao SAQ1. Os parâmetros

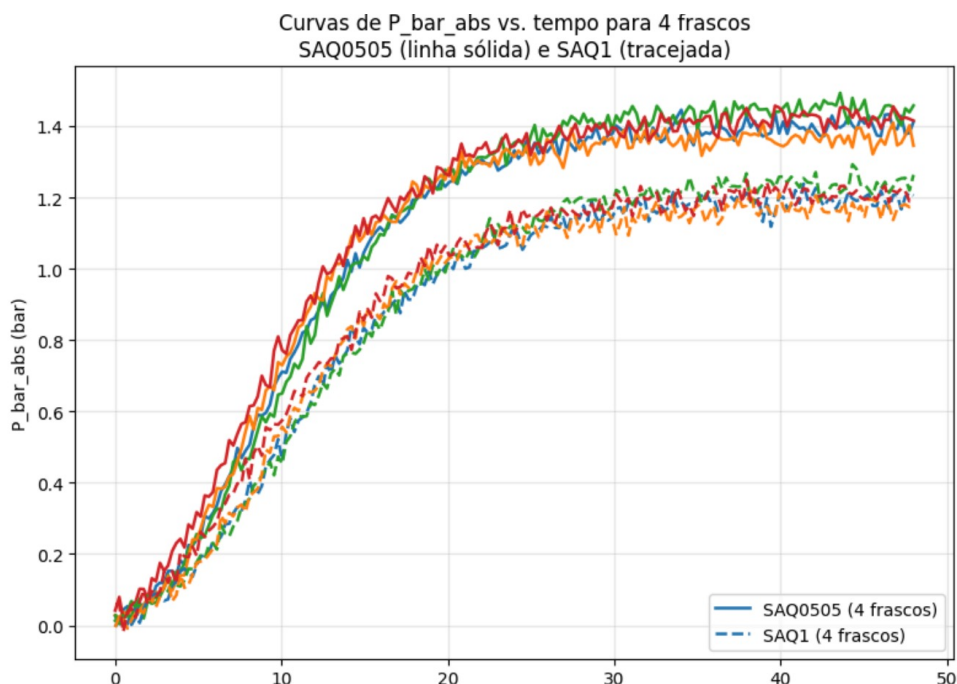


Figura 3. Curvas simuladas de pressão absoluta para quatro frascos em cada cenário: SAQ0505 (linhas contínuas) e SAQ1 (linhas tracejadas).

A , μ e λ (conforme equação 2) de cada cenário experimental estão descritos na Tabela 3.

Em ambos os casos, a temperatura simulada foi mantida em torno de 39 °C (com pequena variação controlada), e adotou-se alívio virtual quando a pressão absoluta ultrapassava 1,5 bar, registrando o evento em `event`. Cada frasco recebeu ruído gaussiano de baixa amplitude (aprox. 5% em torno da curva teórica). Para cada ensaio, foram gerados 192 pontos por frasco (intervalos de 15 min ao longo de 48 h). Na configuração de 30 frascos, isso corresponde a 5.760 registros por ensaio.

Tabela 3. Parâmetros e métricas resumidas dos cenários simulados.

Cenário	A (mL)	μ (h^{-1})	λ (h)
Maior fermentabilidade (SAQ0505)	200	0,06	10
Menor fermentabilidade (SAQ1)	120	0,03	12

4.2. Análise das curvas e ajustes de modelos

As séries de P_{std} exibiram o perfil sigmoidal esperado: crescimento lento na fase inicial, seguido de aumento mais acentuado e posterior estabilização (Figura 3). No cenário de maior fermentabilidade, observou-se tipicamente estabilização em torno de 1,7–1,8 bar ao final de 48 h, enquanto no cenário de menor fermentabilidade em torno de 1,0–1,1 bar. Modelos de Gompertz foram ajustados aos dados simulados usando rotinas de otimização do SciPy (a partir de CSV exportado). Como esperado em um cenário em que o mesmo modelo gera e ajusta os dados, os ajustes apresentaram R^2 elevados e erros residuais baixos (Figura 4).

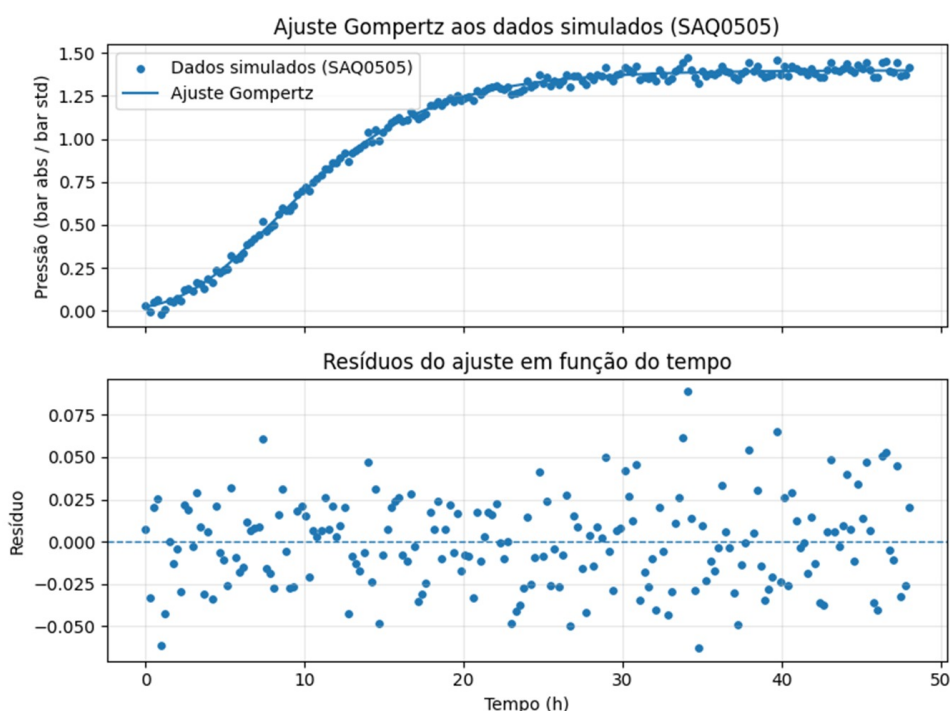


Figura 4. Exemplo de ajuste do modelo de Gompertz para um frasco no cenário de maior fermentabilidade (SAQ0505): dados simulados e curva ajustada (acima); resíduos em função do tempo (abaixo).

4.3. Desempenho do pipeline IoT

Foram executados ensaios completos com 30 frascos e 4 repetições por cenário, resultando em aproximadamente 23 mil mensagens processadas (192 pontos \times 30 frascos \times 4 repetições). A taxa de perda observada foi nula: o número de mensagens recebidas e persistidas correspondeu ao número de publicações do simulador. A latência entre publicação e atualização no dashboard manteve-se em escala de sub-segundos, compatível com monitoramento em quase tempo real. Em cenários adicionais com perdas de rede simuladas (descartando parte das publicações MQTT), o uso de `msg_id` e a lógica idempotente evitaram a geração de registros duplicados quando mensagens foram reenviadas.

5. Discussão

A simulação executada representa uma validação inicial de viabilidade da arquitetura, etapa anterior à construção do protótipo físico, para a qual é apresentado um plano de desenvolvimento. Os ajustes cinéticos apresentaram métricas favoráveis, com R^2 elevados e resíduos de baixa magnitude, o que era esperado em um cenário em que os dados são gerados e ajustados pelo mesmo modelo de Gompertz. Ainda assim, o estudo é limitado por sua natureza puramente sintética: não são consideradas fontes importantes de variabilidade presentes em ensaios reais (diferenças de inóculo, deriva de sensores, erros sistemáticos de preparo), nem condições de rede adversas. Assim, os resultados devem ser interpretados como um limite superior de desempenho a ser confirmado em bancada.

Apesar dessas limitações, a simulação indica que a arquitetura é tecnicamente viável para transição a hardware real, com custo estimado por frasco em torno de R\$ 140 (Tabela 4) e folga em relação à meta de permanecer abaixo de R\$ 200 por módulo.

Tabela 4. Bill of Materials (BOM) teórico por módulo de frasco.

Componente	Descrição	Custo aprox. (R\$)
ESP32	Microcontrolador Wi-Fi/MQTT	30
Sensor de pressão 0–2 bar	Transdutor de pressão absoluta	50
Sensor de temperatura	DS18B20 ou equivalente	10
Válvula solenoide	Mecanismo de alívio de pressão	20
Fonte e acessórios	Alimentação e integração	20

Em contrapartida, será necessário investir em calibração e verificação periódica em banho-maria a 39 °C. Mesmo na forma apenas simulada, o sistema é útil para ensino e planejamento de experimentos, permitindo explorar cenários cinéticos antes de empregar substratos, inóculo e equipamentos reais.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma arquitetura IoT local, baseada em componentes abertos, para monitoramento da fermentação ruminal *in vitro*, avaliada integralmente em simulação. A solução integra simulador cinético, comunicação via MQTT, persistência local e dashboard web, operando em rede local e projetada para até 30 frascos em paralelo.

Os resultados indicam que a arquitetura proposta é tecnicamente capaz de sustentar o fluxo de dados típico de ensaios de produção de gases: as séries temporais simuladas apresentaram comportamento coerente com curvas sigmóides esperadas, os ajustes do modelo de Gompertz resultaram em coeficientes de determinação elevados e erros residuais baixos, e o pipeline IoT manteve baixa latência perceptível e ausência de perdas nas condições de teste.

Como trabalhos futuros, destacam-se: a construção de protótipo físico por frasco, empregando ESP32, sensores e válvula real, seguindo os contratos definidos; a calibração em bancada (por exemplo, a 39 °C e headspace conhecido), avaliando acurácia e estabilidade; ensaios *in vitro* com substrato e inóculo reais, com comparação contra sistemas comerciais; a investigação de modelos leves de aprendizado de máquina acoplados aos modelos cinéticos; e extensões para cenários distribuídos (por exemplo, LoRaWAN) e integração com plataformas institucionais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e à Faculdade de Computação (FACOM) pelo apoio institucional, à Profa. Hana Karina Salles Rubinsztejn pela disciplina de IoT que originou este trabalho, e ao Prof. Edson Takashi Matsubara pela orientação e mentoria no programa de pós-graduação.

Referências

- ANKOM Technology (2016). *RF Gas Production System – Operator’s Manual*. Mace-
don, NY, USA. Rev. F (10/11/2016).
- Lima, M. L. O., Marino, C. T., Medeiros, S. R. d., Gomes, R. d. C., Carollo, C. A.,
Rodrigues, P. H. M., Cabral, L. d. S., and Campos, R. L. C. d. (2019). Avaliação de

- modelos para estimativa de variáveis de cinética ruminal com a técnica de produção de gases automática ankomp[®] rf. Technical Report Technical Report 264, Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS, Brasil.
- Liu, Z.-S., Chen, B.-Y., Chan, J. P.-W., and Chen, P.-W. (2025). Development and validation of a custom-built system for real-time monitoring of *In Vitro* rumen gas fermentation. *Animals*, 15(15):2308.
- Marino, C. T. (2016). Determinação de digestibilidade por produção de gás (pm.057.001) – procedimento operacional padrão. Technical report, Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS, Brasil.
- Marino, C. T., Medeiros, S. R. d., Gomes, R. d. C., Carollo, C. A., Rodrigues, P. H. M., Cabral, L. d. S., and Campos, R. L. C. d. (2018). Padronização da técnica de produção de gases automática ankomp rf. Technical Report Technical Report 258, Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS, Brasil.
- Menke, K. H. and Steingass, H. (1979). Estimation of the energetic feed value obtained from chemical analysis and gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28:7–55.
- OASIS (2014). Mqtt version 3.1.1. Technical report, OASIS Standard. Technical specification.
- Theodorou, M. K., Williams, B. A., Dhanoa, M. S., McAllan, A. B., and France, J. (1994). A simple gas production method using a pressure transducer to determine the fermentation kinetics of ruminant feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 48:185–197.