

Automação de baixo custo para gestão eficiente de sistemas de bombeamento: desenvolvimento e validação de um controle sequencial

Low-cost automation for efficient pumping system management: development and validation of a sequential control system

Daniel Alvarez Gonçalves

Universidade de Vassouras
alvarezgonca@gmail.com

Ana Clara Moledo Neves

Universidade de Vassouras
anamoledo26@gmail.com

Marcio Alexandre Dias Garrido

Universidade Federal Fluminense
marciogarrido@id.uff.br

Douglas Vieira Barboza

Universidade Iguaçu
douglas.barboza@campus1.unig.br

Tiago Ruiz de Castro

Universidade de Vassouras
tiago.castro@univassouras.edu.br

RESUMO

Sistemas de bombeamento utilizados por pequenos empreendimentos e propriedades rurais podem apresentar riscos operacionais quando múltiplas bombas são acionadas de forma simultânea e sem coordenação. Este estudo desenvolve e valida funcionalmente uma solução automatizada de baixo custo para o controle sequencial de bombas de poço, baseada em microcontrolador, sensores de nível e lógica de fila FIFO (*First In, First Out*). A solução foi concebida por meio de modelagem da arquitetura, implementação do software embarcado, simulação no *Tinkercad Circuits* e ensaio físico em bancada. Em cenários de acionamento quase simultâneo, o sistema impediu a sobreposição dos comandos e processou as solicitações de forma sequencial, com latência média de 0,12 s entre o desligamento de uma bomba e o acionamento da seguinte. Os resultados demonstram a viabilidade funcional de uma arquitetura modular e acessível para a organização do bombeamento. A solução tem potencial para apoiar pequenos sistemas na melhoria do controle operacional e na proteção dos equipamentos, embora sua eficácia hidráulica, energética e econômica ainda dependa de validação em campo.

Palavras-chave: Inovação frugal. Internet das Coisas. Eficiência energética. Gestão de recursos hídricos. Microcontroladores.

ABSTRACT

Pumping systems used by small businesses and rural properties can pose operational risks when multiple pumps are activated simultaneously and without coordination. This study develops and functionally validates a low-cost automated solution for the sequential control of well pumps, based on a microcontroller, level sensors, and FIFO (First In, First Out) queue logic. The solution was developed through architectural modeling, embedded software implementation, simulation in Tinkercad Circuits, and physical bench testing. In near-simultaneous activation scenarios, the system prevented command overlap and processed requests sequentially, with an average latency of 0.12 s between the deactivation of one pump and the activation of the next. The results demonstrate the functional viability of a modular, low-cost architecture for organizing pumping operations. The solution has potential to support small-scale systems in improving operational control and protecting equipment, although its hydraulic, energy, and economic efficiency still depend on field validation.

Keywords: Frugal innovation. Internet of Things. Energy efficiency. Water resource management. Microcontrollers.

1. INTRODUÇÃO

O bombeamento de água subterrânea é essencial ao abastecimento de comunidades e propriedades rurais, sobretudo em regiões sujeitas à escassez hídrica (THEIS, 1935; DASTOURANI; TAHROUDI, 2022). Em períodos prolongados de seca, o rebaixamento do nível freático compromete o funcionamento das bombas de poço, que passam a operar a seco, aspirando ar em vez de água. Esse fenômeno provoca cavitação, superaquecimento e desgaste acelerado dos motores, reduzindo a eficiência e a vida útil do sistema (BRENNEN, 2014; BAGAS; FAIZIN, 2024).

A operação simultânea de múltiplas bombas sem controle coordenado intensifica o esgotamento local dos poços e aumenta a probabilidade de falhas mecânicas e elétricas (WANG et al., 2020). Na ausência de mecanismos automáticos de desligamento ou alternância, o sistema permanece vulnerável a danos e a desperdícios de energia, o que reforça a necessidade de estratégias automatizadas para o controle de bombas em regiões áridas e semiáridas (KEREBIH et al., 2024).

Este trabalho propõe um sistema automatizado de controle alternado de bombas de poço, concebido para prevenir o funcionamento a seco e equilibrar o tempo de uso entre os motores. A solução utiliza sensores de nível (boias) e relés controlados por microcontrolador Arduino, que identificam variações no nível da água e interrompem automaticamente o bombeamento em situações de risco. Uma lógica de fila eletrônica FIFO (First In, First Out) organiza a

alternância entre as bombas, evitando sobrecargas e contribuindo para a durabilidade dos componentes elétricos e hidráulicos.

Ao combinar automação embarcada, eficiência operacional e sustentabilidade hídrica, o sistema constitui uma abordagem acessível e de baixo custo para o gerenciamento de poços artesianos, com potencial para mitigar problemas de cavitação e aspiração de ar e para apoiar o uso racional da água em comunidades e propriedades dependentes de fontes subterrâneas (GRUNDFOS, 2025).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dinâmica de lençol freático e drawdown em poços artesianos

A resposta hidrodinâmica de um poço ao bombeamento é determinante para a formulação de políticas operacionais que evitem esgotamento e falhas nos equipamentos. A solução clássica de Theis (1935) relaciona a redução da superfície piezométrica (drawdown) à vazão de extração e ao tempo de bombeamento, fornecendo uma base analítica para estimar a evolução do nível d'água em condições transitórias. Dastourani e Tahroudi (2022) ampliam essa perspectiva ao investigar o acoplamento entre drawdown e tempo de bombeamento em regimes de descarga constante, demonstrando que a queda de nível depende não apenas da vazão instantânea, mas também da história temporal do bombeamento e das características hidráulicas locais. Esses achados indicam que a operação simultânea de múltiplas bombas pode reduzir rapidamente a coluna de água disponível mesmo quando cada bomba, isoladamente, opera em regime aceitável, situação crítica em poços com baixa taxa de recarga. A análise do drawdown permite, assim, calcular margens de segurança operacionais, definir tempos máximos de operação contínua e dimensionar políticas de alternância que preservem o equilíbrio do aquífero.

2.2 Cavitação: mecanismo, efeitos na performance e correlação com regimes de sucção

A cavitação é um dos mecanismos de falha mais destrutivos em bombas centrífugas: trata-se da formação e implosão de cavidades de vapor quando a pressão local cai abaixo da pressão de vapor do líquido, gerando microjatos que erodem superfícies metálicas e reduzem o desempenho (BRENNEN, 2014). As condições de sucção, expressas pelo NPSHa (Net Positive Suction Head available) e pelo NPSHr (NPSH required), são determinantes para sua ocorrência: quando a operação combinada de bombas reduz a pressão de sucção, por drawdown ou por

turbulência na entrada, a margem $NPSH_a - NPSH_r$ diminui e o risco de cavitação se eleva (WANG et al., 2020).

Bagas e Faizin (2024) demonstram experimentalmente que variações de vazão e a operação em série ou em paralelo alteram o ponto de trabalho efetivo da bomba e as regiões sujeitas à nucleação de cavidades, podendo induzir instabilidades hidrodinâmicas não lineares: uma bomba pode permanecer em regime estável enquanto outra entra em cavitação devido a pequenas diferenças de sucção, perdas de carga ou variações geométricas. Esses resultados justificam a adoção de políticas operacionais que evitem simultaneidade quando o aquífero ou a tubulação de sucção não oferecem margem suficiente de $NPSH_a$, e reforçam a correlação entre drawdown acelerado e maior predisposição à cavitação, com implicações diretas na vida útil e no custo de manutenção dos equipamentos (BRENNEN, 2014; WANG et al., 2020; BAGAS; FAIZIN, 2024).

2.3 Políticas de bombeamento, sequenciamento e proteção operacional

A formulação de políticas de bombeamento tem se mostrado eficaz para mitigar impactos hidrológicos e mecânicos decorrentes de extrações descoordenadas. Kerebih et al. (2024) apresentam modelos de política de bombeamento ótimos para campos de poços conectados a corpos d'água superficiais, concluindo que estratégias de alternância entre unidades e de limitação da taxa de extração por período reduzem o impacto sobre níveis de base e preservam vazões ecológicas. Essas políticas complementam as recomendações de engenharia hidráulica que priorizam a manutenção de $NPSH_a$ acima de $NPSH_r$ e a limitação de operações em picos simultâneos de demanda. Nesse contexto, o sequenciamento por fila (FIFO) representa uma política operacional simples para o gerenciamento de múltiplas solicitações de bombeamento: ao garantir que cada bomba complete seu ciclo antes que outra seja ativada, distribui-se a carga de trabalho e evita-se a soma de vazões que poderia ocasionar drawdown crítico ou perda de margem de sucção.

A adoção de mecanismos estruturados de controle também é relevante para que recursos tecnológicos sejam efetivamente incorporados às operações das organizações. Jimenez Franco, Santos e Costa (2024) identificam, em micro e pequenas empresas do sul do Brasil, relação entre capacidade de gestão e controles de planejamento e cibernéticos, indicando a importância de mecanismos de controle para transformar resultados de inovação em operações coerentes com a estrutura organizacional, perspectiva aplicável à arquitetura aqui proposta, na medida em que a lógica FIFO funciona como mecanismo formal de controle e organização dos

acionamentos das bombas. Políticas com temporizações mínimas entre trocas e regras de bloqueio em níveis críticos também podem proteger o poço e os equipamentos (KEREBIH *et al.*, 2024; DASTOURANI; TAHROUDI, 2022), sobretudo quando combinadas a monitoramento em tempo real que permita decisões automáticas baseadas em variáveis físicas (nível, pressão de sucção e sinais de cavitação) em vez de regras puramente temporais.

2.4 Automação sustentável, monitoramento e soluções de baixo custo

A convergência entre automação embarcada e gestão hídrica oferece soluções escaláveis para os problemas descritos. Sensores de nível, transdutores de pressão e medidores de vazão integrados a controladores embarcados permitem implementar políticas de proteção automática (CHEN *et al.*, 2022; ZULKIFLI *et al.*, 2022), e microcontroladores como o Arduino, quando adequadamente dimensionados, possibilitam prototipagem rápida de lógicas de sequenciamento, aquisição de dados e conectividade para histórico e análise (FLAMINI *et al.*, 2023; CHEN *et al.*, 2022).

A definição da lógica de controle e do processamento de eventos também se relaciona à eficiência energética de arquiteturas de software, especialmente quando as decisões computacionais estão diretamente associadas ao acionamento de dispositivos físicos (NEVES *et al.*, 2025). No presente trabalho, essa perspectiva é aplicada ao controle sequencial das bombas, em que a arquitetura de software baseada em máquina de estados e fila FIFO organiza os acionamentos e evita comandos simultâneos. A utilização de microcontroladores e componentes de baixo custo aproxima-se, ainda, dos princípios de inovação frugal, nos quais soluções tecnológicas atendem necessidades específicas com recursos técnicos e financeiros limitados (ALVES; NODARI, 2023).

Santana *et al.* (2025) demonstram a aplicação de microcontroladores e sistemas inteligentes no monitoramento e controle automatizado de reservatórios de água, com validação em ambiente simulado, o que reforça a viabilidade de sistemas embarcados de baixo custo para aquisição de dados e tomada automatizada de decisões em sistemas hidráulicos. Ressalvas permanecem relevantes: sistemas de baixo custo devem ser projetados com critérios de robustez (isolamento, proteção contra surtos, detecção de falhas) e validados em ambiente real, pois simulações podem não reproduzir integralmente as condições hidrodinâmicas que levam à cavitação. Algoritmos de análise de sinais, como a detecção de cavitação por assinatura acústica ou vibração, podem ampliar a capacidade preventiva desses sistemas (WANG *et al.*, 2020; BAGAS; FAIZIN, 2024).

2.5 Lacunas e oportunidades para automação e controle

A literatura analisada oferece um arcabouço consistente sobre drawdown, cavitação, políticas de bombeamento e automação, integrando fundamentos hidrológicos, entendimento físico da cavitação e estratégias operacionais ótimas. Persistem, porém, lacunas quando se busca uma solução integrada para poços artesianos de pequena e média escala: faltam estudos experimentais que validem políticas de alternância FIFO em poços reais com monitoramento simultâneo de nível, NPSHa e sinais de cavitação, além de análises de custo-benefício que considerem manutenção, perda de eficiência e risco hidrológico. Outra lacuna é a validação de soluções embarcadas de baixo custo em cenários de variabilidade hidrogeológica acentuada: embora existam trabalhos de prototipagem, poucos apresentam validação em campo com bombas comerciais em condição real de operação (BAGAS; FAIZIN, 2024; CHEN *et al.*, 2022), padrão também observado em trabalhos recentes de sensoriamento e monitoramento via IoT, cuja validação permanece restrita a ambientes simulados (PEREIRA *et al.*, 2025). O presente trabalho busca preencher parte desse hiato ao propor e validar funcionalmente um sistema de controle alternado que combina lógica FIFO com monitoramento de nível e regras de proteção, testado em simulação e em bancada física, e projetado para posterior validação experimental em campo.

3. METODOLOGIA

A metodologia seguiu abordagem experimental e incremental, fundamentada em prototipagem rápida e engenharia de sistemas embarcados. O objetivo foi desenvolver, implementar e validar funcionalmente um sistema de controle alternado de bombas de poço com lógica de fila FIFO, voltado à segurança operacional, à eficiência energética e à modularidade da automação hidráulica. As etapas compreenderam: (i) modelagem conceitual e definição da arquitetura; (ii) desenvolvimento do software embarcado; (iii) simulação funcional; (iv) montagem e ensaio físico do protótipo.

3.1 Arquitetura do sistema

O sistema foi projetado para operar duas bombas de poço alternadamente, sob controle central de um microcontrolador Arduino UNO (ATmega328P), segundo o paradigma de dupla camada elétrica:

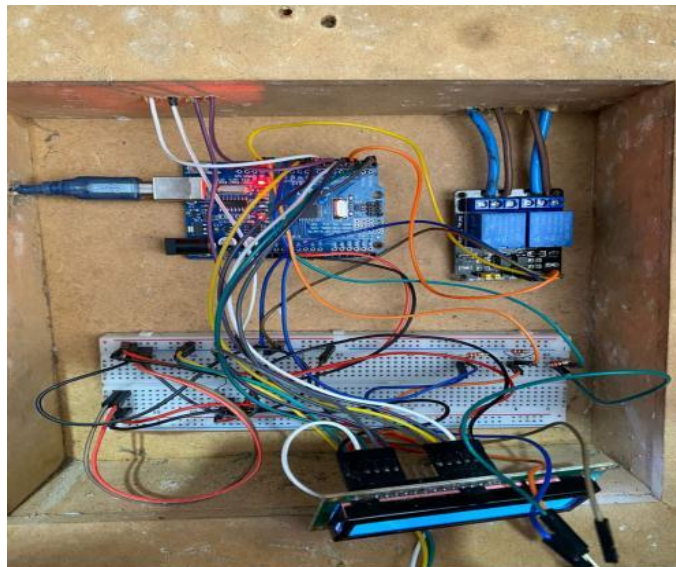
- Camada de controle (5 V DC) — responsável pela leitura dos sensores (boias de nível) e pela execução da lógica de decisão, processando o algoritmo FIFO.

- Camada de potência (127 V AC) — encarregada do acionamento físico das bombas, isolada eletricamente por módulos de relé optoacoplados, que protegem o circuito contra interferências e surtos elétricos.

Essa separação garante isolamento galvânico, redução de ruído eletromagnético e proteção contra curto-circuitos, aspectos essenciais em sistemas que combinam eletrônica embarcada e potência elétrica.

A Figura 1 ilustra o circuito real desenvolvido e testado em bancada, montado com relés de 10 A, boias de nível (float switches), LEDs indicadores de status e cabos isolados para representar o acionamento de bombas em 127 V. O circuito foi inicialmente simulado no Tinkercad Circuits para validação lógica e, em seguida, implementado fisicamente com componentes reais.

Figura 1: Protótipo físico do sistema de controle alternado de bombas de poço com Arduino UNO



Fonte: Os autores

A figura exhibe o circuito montado com o Arduino UNO, dois relés optoacoplados, boias simuladas por botões táteis, LEDs para indicação de estado (ligada, desligada e em fila) e fonte de 5 V. Essa configuração permitiu observar em tempo real a alternância de acionamentos e a resposta do algoritmo FIFO sob simulação de nível e demanda hídrica.

Cabe esclarecer que, na Figura 1, as boias foram representadas por botões táteis apenas para simular os estados de nível mínimo e máximo. Os relés de 10 A são equivalentes aos utilizados no acionamento de bombas reais de 127 V, mas, por segurança, foram conectados apenas a cargas simuladas (LEDs), e não diretamente a uma bomba comercial — o objetivo,

nesta fase, foi validar o isolamento elétrico e o comportamento da comutação sem expor o circuito a tensões de rede.

Até o presente estágio, o sistema não foi validado em campo com bombas comerciais operando em 127 V sob condições reais de drawdown, cavitação, vibração e flutuação de tensão. Os testes realizados restringem-se à simulação digital no Tinkercad e a um ensaio físico controlado em bancada, com LEDs e botões representando bombas e sensores; embora validem a lógica de controle e o isolamento elétrico básico, não reproduzem integralmente o comportamento hidrodinâmico real. A validação em campo permanece etapa necessária e integra o plano de continuidade da pesquisa.

3.2 Estrutura lógica e software embarcado

O algoritmo de controle foi implementado na Arduino IDE, em linguagem C++, com estrutura modular baseada em máquinas de estado para cada bomba, integradas a uma fila circular FIFO responsável pelo agendamento dos acionamentos. Cada bomba pode assumir um dos três estados lógicos:

- DESLIGADA: em repouso, aguardando solicitação de acionamento.
- EM FILA: com solicitação registrada, aguardando liberação do controlador.
- LIGADA: com relé energizado e operação ativa.

A lógica FIFO processa cada solicitação conforme sua ordem de chegada, eliminando o risco de acionamento simultâneo — de forma análoga a mecanismos de escalonamento (scheduling) de sistemas operacionais, que promovem previsibilidade, balanceamento de carga e redução de picos de corrente.

O Quadro 1 apresenta as etapas metodológicas que estruturaram o desenvolvimento e a validação do sistema.

Quadro 1: Avaliação de qualidade dos estudos

Etapa	Descrição	Ferramentas / recursos
Modelagem conceitual	Definição da lógica FIFO e da estrutura de controle sequencial	Diagrama de estados e pseudocódigo em C++
Implementação	Desenvolvimento do código embarcado	Arduino UNO, dois relés de 5 V, LEDs simulando bombas
Simulação	Testes funcionais e de latência	Tinkercad Circuits
Validação	Análise de resposta, integridade lógica e isolamento elétrico	Registros de tempo e de eventos de fila
Discussão	Interpretação de resultados e comparação com a literatura	Referenciais técnicos e estudos correlatos

O software embarcado foi estruturado com máquinas de estado independentes para cada bomba (DESLIGADA, EM_FILA, LIGADA). A lógica FIFO foi implementada por meio de um vetor circular, garantindo que uma nova solicitação seja adicionada ao fim da fila e processada apenas quando a bomba anterior completar seu ciclo. Cada bomba entra na fila apenas quando sua boia correspondente indica necessidade de acionamento, segundo o critério:

- Boia inferior aberta (nível baixo) → bomba solicita entrada na fila (estado EM FILA).
- Boia superior fechada (nível alto) → bomba desliga e libera a próxima da fila.

Esse mecanismo garante que a alternância entre bombas só ocorra quando há demanda hídrica real, evitando acionamentos indevidos e impedindo funcionamento a seco: a lógica de nível atua como gatilho físico, enquanto a lógica FIFO organiza a ordem de atendimento das solicitações.

3.3 Procedimentos de teste e validação

A validação foi conduzida em dois estágios: simulação lógica e ensaio físico controlado. Na simulação, no Tinkercad, foram aplicados cenários de acionamento quase simultâneo ($\Delta t \leq 1$ s), com observação direta dos LEDs representando as bombas; os resultados indicaram latência média de 0,12 s entre desligamento e nova ativação, dentro dos limites aceitáveis para controle em tempo quase real. Na etapa física, as boias de nível foram conectadas ao circuito para representar os níveis mínimo e máximo de água: o sistema reagiu automaticamente aos sinais de nível, interrompendo o acionamento quando o reservatório atingia o limite inferior,

prevenindo o bombeamento a seco. Em todos os testes, confirmou-se que apenas uma bomba operava por vez, permanecendo a outra em espera, registrada na fila FIFO.

3.4 Ferramentas e recursos utilizados

A metodologia adotada assegurou coerência entre o modelo teórico e o comportamento observado. O uso da lógica FIFO proporcionou alternância previsível entre as bombas, e o emprego de relés optoacoplados garantiu isolamento elétrico completo, enquanto a arquitetura modular do software permite, em princípio, expansão para um número maior de bombas.

Os recursos para o desenvolvimento da pesquisa foram:

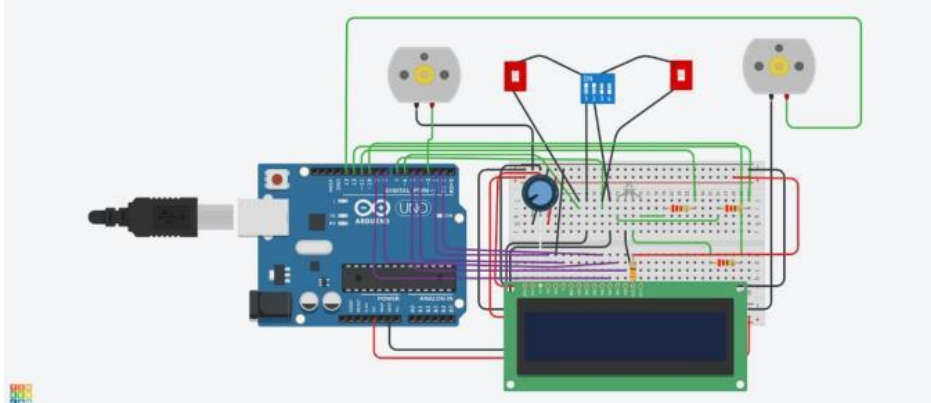
- Hardware: Arduino UNO R3, relés optoacoplados de 10 A, boias de nível, LEDs, resistores, cabos e fonte de alimentação de 5 V.
- Software: Arduino IDE (compilação e depuração), Tinkercad Circuits (simulação digital) e monitor serial para análise temporal.
- Métodos de validação: registro de tempo, observação direta, análise comparativa da ordem FIFO e replicação experimental dos estados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes confirmaram que o sistema proposto impede o acionamento simultâneo das bombas, mantendo operação ordenada e estável. Em cenários com solicitações quase simultâneas ($\Delta t \leq 1$ s), a latência média observada foi de 0,12 segundos, valor compatível com aplicações de controle em tempo quase real (GITONGA; MWEMA; NYETE, 2022).

A Figura 2 apresenta o circuito desenvolvido no Tinkercad Circuits, utilizado para validar a lógica de controle e simular o comportamento dinâmico das bombas e da fila FIFO. A plataforma foi escolhida por permitir prototipagem virtual com Arduino Uno e componentes digitais, possibilitando testes rápidos e reproduzíveis do algoritmo antes da montagem física.

Figura 2: Circuito de controle alternado de bombas simulado no Tinkercad Circuits



O circuito digital implementado no Tinkercad é composto pelos seguintes elementos:

- Arduino Uno R3: executa a lógica FIFO, recebe os sinais dos botões (simulando sensores de nível) e controla as saídas digitais que acionam os relés.
- Botões de entrada (B1 e B2): simulam as boias de nível ou sensores de demanda que disparam o acionamento das bombas.
- LEDs indicadores: representam o estado de cada bomba (ligada/desligada), facilitando a visualização dos testes na simulação.

Módulos de relé (na aplicação real): comutam os circuitos de 127 V das bombas de forma isolada; na simulação, os LEDs substituem os relés em razão da limitação do Tinkercad em reproduzir componentes de potência.

Essa abordagem híbrida com simulação seguida de protótipo físico, permite que a lógica de software seja validada em ambiente seguro antes de sua aplicação ao circuito de alta tensão.

O Quadro 2 detalha o comportamento do sistema em um teste de acionamento crítico, evidenciando a alternância entre as bombas e a atuação da lógica FIFO.

Quadro 2: Sequência detalhada do teste de acionamento crítico (lógica FIFO)

Tempo (t)	Evento de entrada	Estado da Bomba 1 (B1)	Estado da Bomba 2 (B2)	Ação da fila FIFO	Benefício primário validado
0 s	Botão B1 acionado	LIGADA (relé ON)	DESLIGADA	Fila: []	Otimização energética
1 s	Botão B2 acionado	LIGADA	EM FILA (relé OFF)	Fila: [B2]	Mitigação de inrush
10 s	Sinal de desligamento de B1	DESLIGADA	EM FILA	Fila: [B2] (acionamento imediato)	Resposta rápida (scheduler)
10,1 s	Algoritmo FIFO executa dequeue	DESLIGADA	LIGADA (relé ON)	Fila: []	Segurança operacional
20 s	Sinal de desligamento de B2	DESLIGADA	DESLIGADA	Fila: []	Fim do ciclo

Os tempos apresentados na Tabela 2 (10 s para B1 e 20 s para B2) correspondem ao cenário simulado no Tinkercad e servem como referência de comportamento lógico, não como

valores reais de operação hidráulica: em bombas reais, o ciclo depende de vazão, pressão, drawdown e capacidade do reservatório. A simulação teve por objetivo validar a sequência FIFO e o desligamento correto conforme os eventos de nível.

Os resultados indicam a eficiência do controle sequencial distribuído em sistemas residenciais e prediais de pequena escala. O uso da lógica FIFO eliminou, nos cenários testados, o risco de sobreposição de acionamentos, garantindo alternância previsível entre bombas e reduzindo o desgaste elétrico e mecânico associado a partidas simultâneas. A integração entre software embarcado e princípios de engenharia hidráulica resultou em modularidade e previsibilidade operacional, permitindo, em princípio, a expansão do sistema para um número maior de bombas (CHEN *et al.*, 2022). Em todos os cenários críticos simulados, o sistema manteve coerência lógica e estabilidade temporal, sem falhas de execução ou atraso perceptível entre desligamentos e novos acionamentos, comportamento consistente com o emprego de algoritmos inspirados em técnicas de escalonamento para obtenção de controle previsível e reconfigurável.

4.1 Validação do cenário crítico (sobrecarga)

O cenário mais exigente testado envolveu solicitações quase simultâneas de acionamento, simulando sobrecarga de demanda. O sistema respondeu de forma estável, processando a fila corretamente, sem perda de estado ou colisão de comandos. A latência média entre o desligamento de uma bomba e o acionamento da próxima foi de aproximadamente 0,12 segundos, com variação mínima ao longo da simulação — resultado que indica a confiabilidade da lógica FIFO implementada, ao menos nas condições simuladas, e a continuidade operacional mesmo sob alta frequência de solicitações.

4.2 Discussão

O controle sequencial proposto tem relação direta com a eficiência energética e a durabilidade do equipamento: ao impedir o acionamento simultâneo, o sistema mantém as bombas dentro da corrente nominal, evitando picos de partida (GRUNDFOS, 2025). A lógica implementada no Arduino, baseada em máquinas de estado e fila circular, indicou desempenho superior a controles eletromecânicos tradicionais no que se refere à facilidade de reconfiguração e à capacidade de expansão, enquanto o uso de relés optoacoplados garantiu isolamento elétrico e segurança durante a comutação (SIMÕES *et al.*, 2025). Para pequenos empreendimentos, a redução de custos associados ao consumo de energia constitui fator relevante, no qual

estratégias de eficiência e gerenciamento energético podem produzir impactos econômicos consideráveis (HERSEN; SANTOS, 2024).

A validação realizada não reproduz integralmente as condições hidrodinâmicas reais de operação, mas comprova a integridade lógica do sistema, a eficácia da alternância FIFO e o funcionamento adequado do isolamento elétrico em baixa tensão. Esse conjunto de testes controlados constitui a base necessária para que a validação em campo ocorra com segurança em etapas futuras. Considerados em conjunto, os resultados indicam que o sistema atinge, no âmbito da simulação e do ensaio em bancada, os objetivos de automação segura, modular e de baixo custo estabelecidos para esta fase da pesquisa, permanecendo sua eficácia hidráulica, energética e econômica em condições reais como questão em aberto.

A continuidade deste trabalho propõe a evolução do sistema para um modelo conectado, com maior autonomia decisória. Em primeiro plano, a integração com Internet das Coisas (IoT) poderia viabilizar o monitoramento remoto e a operação em tempo real por meio de plataforma web ou aplicativo móvel, permitindo o acompanhamento contínuo de parâmetros como nível do poço, tempo de operação, frequência de acionamentos, corrente elétrica consumida e status das bombas, transmitidos por módulos de comunicação Wi-Fi ou LoRa.

O sistema também poderia incorporar algoritmos de aprendizado de máquina para reconhecer padrões de uso e estimar demandas hídricas a partir de séries temporais de operação, de modo que o controle FIFO fosse ajustado conforme o histórico de consumo e as condições ambientais (KEREBIH *et al.*, 2024; CHEN *et al.*, 2022). A integração com fontes de energia renovável, em especial sistemas fotovoltaicos, é outra direção possível: sincronizar o acionamento das bombas com períodos de maior geração solar poderia reduzir o uso de energia da rede, sem comprometer a segurança hidráulica (GRUNDFOS, 2025).

Por fim, a validação experimental em campo (com sensores físicos de nível e pressão e bombas comerciais em operação real) permanece como etapa necessária para comparar os resultados obtidos em simulação com o comportamento hidrodinâmico efetivo e para confirmar a robustez do sistema sob condições variáveis de bombeamento e qualidade de energia.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de controle alternado de bombas de poço por fila eletrônica desenvolvido neste trabalho demonstrou, em simulação e em ensaio físico controlado, viabilidade funcional como solução de baixo custo para o gerenciamento de bombas em regiões sujeitas à escassez

hídrica. A integração de sensores de nível com o controle eletrônico realizado pelo Arduino e por módulos de relé permitiu monitorar o nível da água e interromper automaticamente o bombeamento em situações de risco de funcionamento a seco, enquanto a lógica FIFO garantiu alternância equilibrada entre as bombas, distribuindo o esforço mecânico entre os motores.

Os resultados respondem ao objetivo proposto: o sistema impediu o acionamento simultâneo das bombas nos cenários testados, com latência média de 0,12 segundos entre o desligamento de uma unidade e o acionamento da seguinte, e manteve coerência lógica sob condições de solicitação quase simultânea. Essa contribuição é de natureza aplicada e incremental — a integração de sensoriamento de nível, controle por microcontrolador e lógica de fila em uma arquitetura de baixo custo, alinhada a práticas de automação sustentável e a políticas de bombeamento eficiente discutidas na literatura (BAGAS; FAIZIN, 2024; DASTOURANI; TAHROUDI, 2022; KEREBIH et al., 2024).

Essa validação, contudo, é parcial: o sistema ainda não foi testado em campo com bombas comerciais, e os resultados obtidos restringem-se ao comportamento lógico do algoritmo e ao funcionamento elétrico em baixa tensão. A etapa de validação em condições reais, envolvendo drawdown, cavitação e variações de tensão na rede, é necessária para confirmar a robustez do sistema e constitui a continuidade natural desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- ALVES, Karen Thais; NODARI, Cristine Hermann. Evidências da inovação frugal em pequenas e médias empresas: uma revisão sistemática da literatura. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 17, n. 2, p. 75-90, 2023. DOI: 10.48099/1982-2537/2023v17n2p7590.
- BAGAS, Putra; FAIZIN, Ahmad Khairul. Experimental study on evaluation of cavitation and working performance of Moswell Aqua 175 centrifugal pump on series with debit variations. **Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin**, v. 9, n. 2, p. 130-139, 2024. DOI: 10.21831/dinamika.v9i2.77339.
- BRENNEN, Christopher E. **Cavitation and bubble dynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. DOI: 10.1017/CBO9781107338760.
- CHEN, Lei et al. Monitoring and predictive maintenance of centrifugal pumps based on smart sensors. **Sensors**, v. 22, n. 6, p. 2106, 2022.
- DASTOURANI, Mehdi; TAHROUDI, Mohammad Nazeri. Toward coupling of groundwater drawdown and pumping time in a constant discharge. **Applied Water Science**, v. 12, art. 74, 2022. DOI: 10.1007/s13201-022-01606-6.
- FLAMINI, Alessandro et al. A prototype of low-cost home automation system for energy savings and living comfort. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 4, p. 4931-4941, 2023.

GITONGA, James Mbutu; MWEMA, Wilfred; NYETE, Abraham M. Design and modelling of a microcontroller based automatic transfer switch with a sequential loading system. In: 2022 **IEEE PES/IAS PowerAfrica**. IEEE, 2022. p. 1-5.

GRUNDFOS. **Transform your pump systems with intelligent control for an energy-efficient future**. Bjerringbro: Grundfos, 2025. Documento técnico.

HERSEN, Amarildo; SANTOS, Clayton Lima dos. Uma investigação para redução de custo da energia elétrica: um estudo de caso para uma indústria madeireira de pequeno porte. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 2, p. 21-38, 2024. DOI: 10.6034/rmpe.v18i2.1905.

JIMENEZ FRANCO, Maryely Andrea; SANTOS, Edicreia Andrade dos; COSTA, Flaviano. Capacidades de innovación y controles de gestión en las micro y pequeñas empresas del sur de Brasil. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 2, p. 99-117, 2024.

KEREBIH, Mulu Sewinet; AYNALLEM, Solomon Bogale; KESHARI, Ashok K. Optimal pumping policy from well field connected with a stream. **Discover Water**, v. 4, art. 17, 2024. DOI: 10.1007/s43832-024-00070-4.

NEVES, Ana Clara Moledo et al. Arquitetura de software para eficiência energética: uma revisão bibliométrica. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 19, n. 1, p. 21-40, 2025. DOI: 10.6034/rmpe.v19i1.2163.

PEREIRA, Sara Gonçalves et al. Modelo de monitoramento para prevenção de vazamentos em sistemas de esgotamento sanitário com IoT e computação em nuvem. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 19, n. 1, p. 82-100, 2025. DOI: 10.6034/rmpe.v19i1.2166.

SANTANA, Gabriel Silva et al. Desenvolvimento e avaliação funcional em ambiente simulado de sistema inteligente de monitoramento e controle de reservatórios de água com ESP32. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 19, n. 1, p. 119-138, 2025. DOI: 10.6034/rmpe.v19i1.2169.

SIMÕES, W. C. S. S.; PACHECO, G. de A.; FRANÇA, L. de O.; RAMOS, A. S.; SALEHI, S. P. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle de nível de tanques industriais utilizando Arduino. **Studies in Engineering and Exact Sciences**, v. 5, n. 3, p. e13087, 2025. DOI: 10.54021/seesv5n3-142.

THEIS, Charles V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 16, n. 2, p. 519-524, 1935. DOI: 10.1029/TR016i002p00519.

WANG, Wenjie et al. Multi-condition optimization of cavitation performance on a double-suction centrifugal pump based on ANN and NSGA-II. **Processes**, v. 8, n. 9, art. 1124, 2020. DOI: 10.3390/pr8091124.

ZULKIFLI, Che Zalina et al. IoT-based water monitoring systems: a systematic review. **Water**, v. 14, n. 22, art. 3621, 2022. DOI: 10.3390/w14223621.