



Universidade Federal de Alfenas -
UNIFAL/MG Campus Avançado de Poços
de Caldas - MG Bacharelado
Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia



MATEUS SALA PINTO

ROGÉRIO MAGALHÃES

**PRODUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE CLORAÇÃO
SIMPLIFICADO PARA ÁGUAS ESPECIAIS**

**POÇOS DE CALDAS/MG
2022**



**Universidade Federal de Alfenas -
UNIFAL/MG Campus Avançado de Poços
de Caldas - MG Bacharelado
Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia**



MATEUS SALA PINTO

**ROGÉRIO MAGALHÃES
COELHO**

**PRODUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE CLORAÇÃO
SIMPLIFICADO PARA ÁGUAS ESPECIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de Alfenas
- Campus Poços de Caldas, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadores: Prof. Dr. Rafael Brito de
Moura e Prof. Dr. Laos Hirano.

**POÇOS DE CALDAS/MG
2022**



Universidade Federal de Alfenas -
UNIFAL/MG Campus Avançado de Poços
de Caldas - MG Bacharelado
Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia



PRODUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE CLORAÇÃO SIMPLIFICADO PARA ÁGUAS ESPECIAIS

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas Campus Poços de Caldas/MG.

Aprovado em: _____ de _____ de _____

Prof^o: Rafael Brito de Moura

Assinatura: _____

Universidade Federal de Alfenas

Prof^o:

Assinatura: _____

Universidade Federal de Alfenas

Prof^o:

Assinatura: _____

Universidade Federal de Alfenas



RESUMO

Este trabalho visa apresentar uma proposta de cloração automatizada para águas especiais através da produção de um protótipo em pequena escala. Este equipamento tem como funcionalidade a medição da vazão, através do ajuste de uma curva que relaciona a altura manométrica no interior do protótipo com a vazão escoada, desta maneira ele é capaz de realizar a injeção controlada de hipoclorito de sódio no fluxo de água, visando manter a concentração de cloreto total de acordo com os requisitos legais e sugestões das normas técnicas. O protótipo foi desenvolvido utilizando prototipagem eletrônica através de uma placa Arduino UNO, um sensor ultrassônico HC SR04 e uma bomba d'água Submersível 3-6V, capacidade nominal de 100 l/h. Para avaliar a eficiência no sistema de injeção da solução desinfectante, foi utilizado o método de análise de Mohr, para quantificação do cloreto total na água antes e após o tratamento.

Palavras Chave: Águas especiais, tratamento, cloração, automação, arduino.

ABSTRACT



Universidade Federal de Alenas -
UNIFAL/MG Campus Avançado de Poços
de Caldas - MG Bacharelado
Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia



This work aims to present a proposal for the presentation of special waters through the production of a small-scale vehicle. This equipment is characterized by the peculiarity of the flow, through the adjustment of a curvature, in this way, within the relationship with the manometric height, it is able to carry out controlled infiltration in the water, close to keeping the requirements according to the requirements and recommendations from technical standards. What was developed using electronic prototyping through an Arduino UNO board, an HC SR04 ultrasonic sensor and a 3-6V Submersible water pump, rated capacity of 10 l/h. To evaluate the efficiency of the disinfectant solution injection system, the water analysis method was used for quantification after the total treatment in the water before and after the treatment.

Key words : Special waters, treatment, chlorination, automation, Arduino.



SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
SUMÁRIO	6
1 8	
2 9	
2.1 9	
2.2 9	
3 9	
3.1 9	
3.2 15	
3.3 16	
4 17	
4.1 17	
4.2 22	
4.3 28	
5 29	
5.1 29	
5.2 29	
5.3 31	
5.4 32	
5.6 33	
6 35	



7 36

**Universidade Federal de Alfenas -
UNIFAL/MG Campus Avançado de Poços
de Caldas - MG Bacharelado
Interdisciplinar em Ciências e Tecnologia**



REFERÊNCIAS

37



1 – Introdução

A portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde estabelece a obrigatoriedade de que toda água com finalidade de abastecimento humano deva passar por algum processo de cloração ou desinfecção. Porém muitas pequenas localidades do país possuem algum tipo de abastecimento coletivo sem qualquer tipo de tratamento (Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014).

Muitos fatores podem influenciar na ausência do manejo correto para garantir a potabilidade da água, entre eles: desconhecimento da legislação e das tecnologias existentes, ausência do poder público, precariedade do sistema de abastecimento, falta de profissionais qualificados, custos, entre outros (Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014).

Nesse contexto, é fundamental que os gestores públicos tenham compreensão da importância da desinfecção e os benefícios proporcionados à população e aos cofres públicos, uma vez que garantindo qualidade da água se evitam uma série de patologias, o que gera uma economia nos serviços de saúde.

Dentre as diversas técnicas existentes para desinfecção de mananciais, a mais empregada é a aplicação de cloro como agente bacteriostático, inibindo o crescimento microbiano. A técnica mais utilizada existente para desinfecção em reservatórios de pequeno porte é por meio de pastilhas cloradoras, que realizam a dosagem de hipoclorito de cálcio de forma constante, mesmo quando ocorrem consideráveis oscilações do fluxo de água. Segundo a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), o tratamento da água pode ser realizado para atender diversos aspectos. Os serviços públicos de abastecimento devem fornecer água sempre saudável e de boa qualidade. Portanto, o seu tratamento apenas deverá ser adotado e realizado depois de demonstrada sua necessidade e, sempre que for aplicado, deverá compreender apenas os processos imprescindíveis à obtenção da qualidade da água que se deseja.

A necessidade de tratamento e os processos exigidos deverão então, ser determinados com base em inspeções sanitárias e nos resultados de análises (físico-



químicas e bacteriológicas) representativas do manancial a ser utilizado como fonte de abastecimento.

2 – Objetivos

2.1 – Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um protótipo de cloração automática, que tem a capacidade de manter a concentração de cloro da água a ser tratada constante, mesmo quando se varia a vazão que escoar por este.

2.2 – Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram atingidos os seguintes objetivos específicos:

Calibrar o sensor ultrassônico HC SR04 com para medição da altura da coluna de água acumulada no protótipo;

Determinar a função que relaciona a altura da coluna de água observada e a vazão do efluente;

Caracterizar da bomba de 6V;

Analisar a solução desinfetante padrão para tratar a água;

Desenvolver a rotina para a Injeção automática da solução para tratamento e manutenção do cloro na água;

Testar o protótipo.

3 – Revisão Bibliográfica

3.1 – Cloração

A cloração consiste em utilizar produtos químicos à base de cloro com o intuito de inativar os microorganismos patogênicos presentes na água bruta. A reação do hipoclorito de sódio em meio aquoso encontra-se descrita nas equações 1 e 2 a seguir



(Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014).



Conforme pode ser observado no exemplo, na reação do hipoclorito de sódio com a água há formação de ácido hipocloroso (HOCl), que é o agente desinfetante, esse ácido, dependendo do pH do meio, se dissocia formando o íon hipoclorito (OCl⁻). A magnitude dessa dissociação está diretamente ligada ao pH da água, quando mais ácido, há maior formação de ácido hipocloroso, já quando mais alcalino, acima de 7,5, acarreta maior formação de íon hipoclorito. O cloro presente na água nessas formas é denominado cloro residual livre. A figura 1 a seguir está presente em diversas publicações técnicas, ela apresenta as porcentagens de dissociação do ácido hipocloroso e íon hipoclorito em função do pH, a 20 °C (Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014).

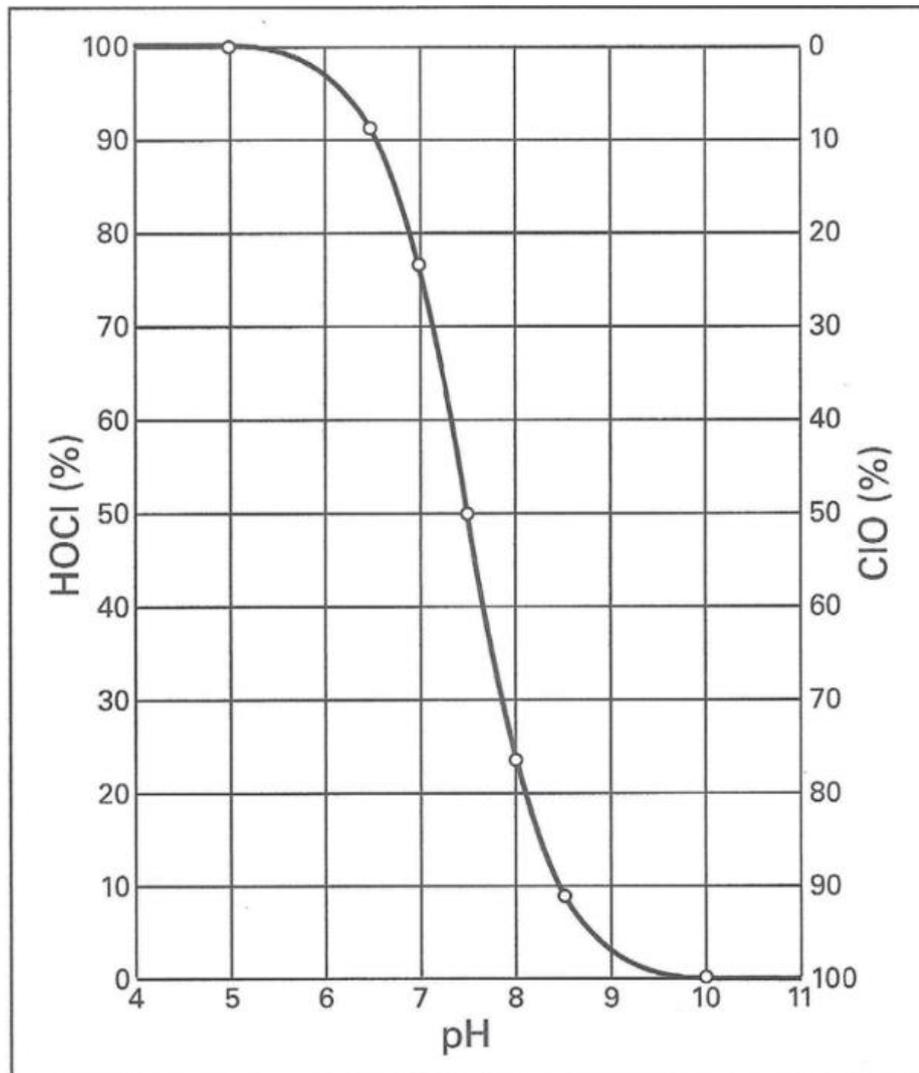
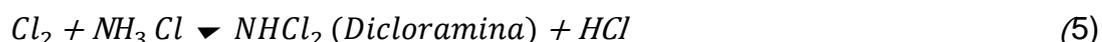
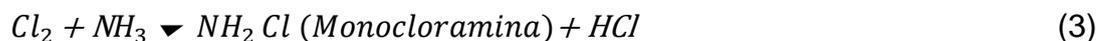


Figura 1 - Dissociação do ácido hipocloroso em função do pH. (Fonte: Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014)

O ácido hipocloroso é um desinfetante mais potente que o íon hipoclorito, perante as mesmas condições de tempo e dosagem. Com isso, o ideal é que a desinfecção com cloro livre seja realizada em valores de pH mais baixos, de preferência menores do que 7 (Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014).

Algumas águas brutas apresentam em sua composição compostos amoniacais, que reagem com cloro, formando as cloraminas (monocloraminas, dicloraminas e tricloreto de nitrogênio) segundo as reações representadas na figura 2.



O cloro na forma de cloramina é denominado cloro residual combinado, apresentando poder desinfetante menor que o ácido hipocloroso.

A desinfecção consiste na etapa do tratamento de água onde ocorre a inativação dos microorganismos patogênicos, podendo ser realizada por agentes físicos ou químicos. Outras etapas do tratamento proporcionam uma redução no número de microorganismos, porém somente a desinfecção inativa qualquer tipo microbiano existente e previne seu crescimento.

Os microorganismos que podem causar danos à saúde de humanos e animais são conhecidos como patogênicos, muitos deles são transportados através da água. Nas tabelas 1 e 2 estão listados os agentes de algumas das principais doenças veiculadas pela água. Entre todas, diarreias são as mais comuns, podendo causar mortes em localidades onde não há acesso ao sistema de saúde. De acordo com a Organização Mundial da Saúde - OMS, as diarreias são a sétima causa de mortes no mundo, havendo cerca de quatro bilhões de casos por ano.



DOENÇAS CAUSADAS POR BACTÉRIAS	AGENTES PATOGÊNICOS
Febre tifoide e paratifoide	<i>Salmonella typhi</i> <i>Salmonella paratyphi A e B</i>
Disenteria bacilar	<i>Shigella sp</i>
Cólera	<i>Vibrio Cholerae</i>
Gastroenterites agudas e diarreias	<i>Escherichia coli enterotóxica</i> <i>Campilobacter</i> <i>Yersinia enterocolítica</i> <i>Salmonella sp</i> <i>Shigella sp</i>

Tabela 1: Doenças veiculadas pela água por meio de bactérias.

(Fonte: OPAS, 1999)

DOENÇAS CAUSADAS POR VÍRUS	AGENTES PATOGÊNICOS
Hepatite A e E	Vírus da hepatite A e E
Poliomielite	Vírus da poliomielite
Gastroenterites agudas e crônicas	Rotavirus Enterovirus Adenovirus
DOENÇAS CAUSADAS POR PARASITAS	AGENTES PATOGÊNICOS
Disenteria amebiana	<i>Entamoeba histolytica</i>
Gastroenterites	<i>Giardia lamblia</i> <i>Cryptosporidium</i>

Tabela 2: Doenças veiculadas pela água por meio de vírus e parasitas.

(Fonte: OPAS, 1999)

A OMS estima que aproximadamente metade da população que vive em países em desenvolvimento, em algum momento, enfrentará uma patologia oriunda de má qualidade da água. Por esses dados que a desinfecção merece ser priorizada pelas autoridades responsáveis pela saúde pública.

Dentre os tipos de desinfetantes existentes para uso em tratamento de água estão:



- Cloro;
- Ozônio;
- Dióxido de cloro;
- Radiação ultravioleta;
- Iodo;
- Sais de prata;
- Outros.

Em todo mundo, o processo de desinfecção mais utilizado é o que faz uso de produtos à base de cloro como agentes bacteriostáticos. Foi massivamente inserido nos processos de tratamento de água ao longo do século XX, complementando os processos já existentes até então, ocasionando uma revolução tecnológica no tratamento de água (Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014).

O sucesso da técnica se deu devido à fácil acessibilidade ao reagente em quase todos os países do mundo, sua alta capacidade oxidante de matéria orgânica e inorgânica, custo razoável, bom efeito residual, fácil medição e monitoramento da concentração. Segundo a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde: "Art. 32 É obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre ou 2 mg/L de cloro residual combinado ou de 0,2 mg/L de dióxido de cloro em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) e nos pontos de consumo.

Conforme Libânio (2010), o objetivo primordial do uso do cloro em sistemas de abastecimento de água é a desinfecção. Contudo, devido ao seu alto poder oxidante, sua aplicação nos processos de tratamento tem servido a propósitos diversos como controle do sabor e odor, prevenção de crescimento de algas, remoção de ferro e manganês, remoção de cor e controle do desenvolvimento de biofilmes em tubulações.



Isso assegura, de forma bastante simplificada, a inocuidade da água até o momento do consumo final, tanto para pequenos sistemas quanto para grandes redes de abastecimento.

Existem diversos equipamentos para dosagem de cloro, variando em complexidade e preço, porém para pequenos reservatórios que apresentam inconstância no nível e na vazão, faz-se necessário um controle preciso da dosagem do reagente.

Os compostos a base de cloro não são desinfetantes perfeitos, mas devido ao custo e acessibilidade, são os mais utilizados e apresentam resultados satisfatórios. Os principais produtos da família do cloro que se encontram no mercado são:

- Cloro gasoso;
- Cal clorada;
- Hipoclorito de sódio;
- Hipoclorito de cálcio;

É responsabilidade do gestor de abastecimento decidir qual tipo utilizar no processo de desinfecção, visando que seja econômico, eficaz, confiável e permanente. Neste trabalho optou-se por utilizar uma solução de hipoclorito de sódio, devido ao baixo custo, fácil acesso e boa eficiência para as escalas envolvidas.

3.2 – Solução simplificada de tratamento de água

Um tratamento convencional é composto das seguintes etapas, de acordo com o informativo disponibilizado no site da CAESB: coagulação e floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação.

Segundo a portaria GM/MS Nº 888, e a CONAMA 357, que classificam a



qualidade das águas segundo indicadores físico-químicos e biológicos, diferentes tipos de tratamento podem ser empregados, dependendo da qualidade inicial da água. Sendo assim, para o tratamento de águas de qualidade superior (águas especiais), pode ser adotado o tratamento simplificado, que consiste apenas na etapa de desinfecção.

A desinfecção em Águas Especiais é usualmente feita utilizando pastilhas solúveis concentradas de hipoclorito de cálcio. A quantidade de pastilhas a serem inseridas dependerá da vazão de água a ser desinfetada, sendo feito um cálculo baseado nessa vazão e no tempo até a próxima dosagem (Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014).

Um problema da técnica de pastilhas ocorre quando há casos em que a vazão varia consideravelmente em função do tempo, podendo causar super ou subdosagem de cloro.

3.3 – Sistemas automatizados de baixo custo

Sistemas automatizados de baixo custo para cloração e tratamento de águas especiais visam de forma geral diminuir o consumo de insumos e reagentes para manutenção de uma concentração de cloro livre satisfatória, que cumpra as exigências mínimas da legislação pertinente e que seja suficientemente para garantir uma boa desinfecção.

O clorador simplificado desenvolvido pela Funasa foi uma adaptação do clorador de pastilha, para utilizar solução de hipoclorito de cálcio $[Ca(OH)_2]$ ou hipoclorito de sódio (NaOCl) como desinfetante. É mais um instrumento que serve para adicionar o cloro na água de modo seguro, sem que haja necessidade de instalação elétrica, preocupação constante com o controle da dosagem, nem operação complexa. É construído de material hidráulico (tubos e conexões), disponíveis no mercado (Manual de Cloração de Águas em Pequenas Comunidades-FUNASA-2014).

Para produzir um sistema automatizado são utilizados sensores que medem de alguma forma as grandezas envolvidas no processo. Utilizando os dados medidos pelos sensores, e utilizando controladores lógicos programáveis, é possível realizar o controle



destas variáveis de forma que se mantenham de acordo com os objetivos estipulados.

4 – Materiais e métodos

4.1 – Aparato experimental

4.1.1. Tanque de acúmulo e medição da coluna de água, tubulação saída e estabilização do sistema.

O tanque de cloração concebido na prototipagem consiste em um tubo de PVC de 150mm, com um tampão em sua parte inferior. Em sua extremidade superior foi realizada a alimentação de água no sistema através de uma mangueira convencional, e onde também foi instalado o sensor ultrassônico HC SR04 , fixado em uma haste plástica, que mede a altura de água acumulada no tanque. No interior do tubo, foi fixada uma fita métrica que tem como finalidade servir como referência para o usuário conferir medidas obtidas pelo sistema, com o zero em sua base, conforme Figura 2.



Figura 2- Esquema geral do tanque de acúmulo e medição da coluna de água
(Fonte: Os autores)

Na extremidade inferior, no tampão, é instalado outro tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ polegada, juntamente com um tubo do tipo “cotovelo”, para direcionamento do escoamento para a saída do protótipo. Na tubulação de saída do protótipo foi instalado dois registros do tipo de esfera, que foram utilizados para garantir o controle da entrada e saída de água no sistema, o primeiro deles é mantido em uma posição fixa, e o outro é utilizado para o manuseio do protótipo, parada do fluxo para realização dos ajustes necessários. Na saída do sistema, para direcionar o fluxo de água evitando perdas, foi instalada uma "câmara de ar" utilizada em pneus de bicicletas. O sistema como um todo necessita de um aparato estabilizador (mesa de plástico com o furo central pelo qual passa a tubulação de saída, contrapeso amarrado por fios e arames) que visam diminuir movimentações e oscilações, que dificultam e atrapalham o funcionamento e medição dos sensores na tubulação de saída foi utilizado uma cadeira que funcionou como



suporte da tubulação, que garante uma inclinação constante e retilínea (Figura 3).



Figura 3- Esquema geral da tubulação de saída e estabilização do aparato.
(Fonte: Os autores)

A figura 4 representa um croqui do protótipo construído, com os diâmetros interno e externo do tanque e as medidas dos tubos. Consta no croqui um sensor de fluxo que fez parte da montagem do equipamento, porém não participou das coletas de dados.

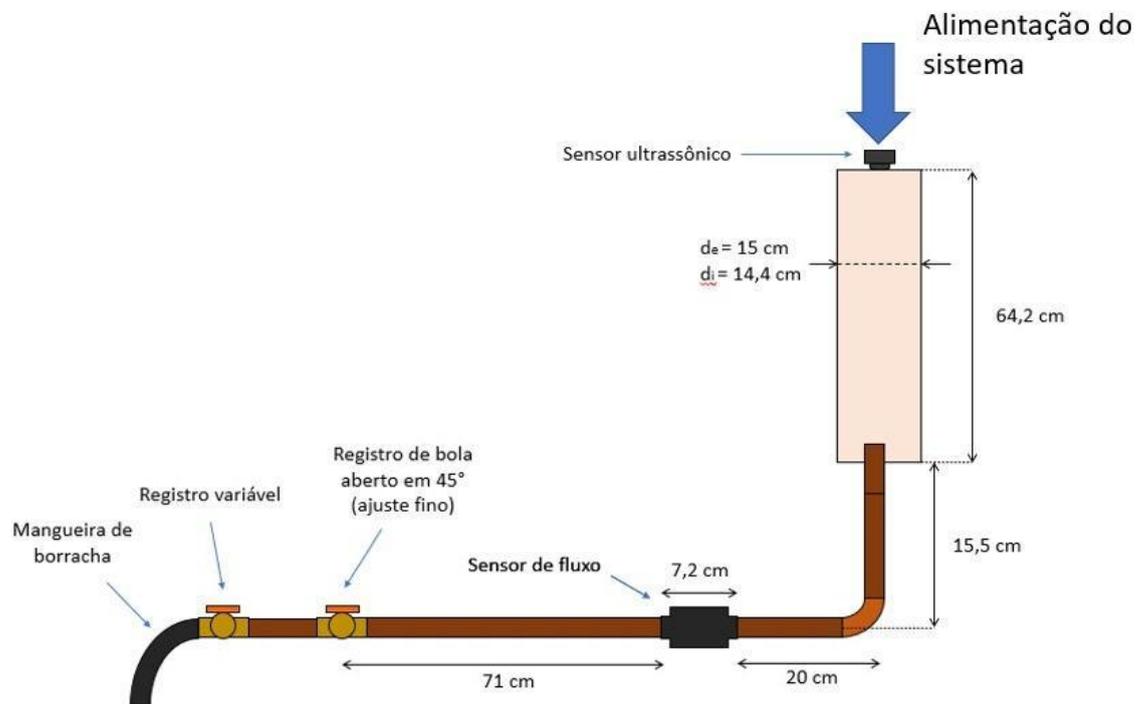


Figura 4– Representação da montagem do protótipo. (Fonte: Os autores)

4.1.2. Sistema de injeção da solução desinfetante

O sistema de injeção utilizado no protótipo consiste em uma bomba d'água Submersível 3-6V, capacidade nominal de 100 l/h, para arduino, submersa na solução desinfetante contida em um pote de plástico de 2 litros. A condução da solução até o balde que foi utilizado como tanque de mistura, foi realizada por uma mangueira de silicone com diâmetro apropriado para a saída da bomba (Figura 5).

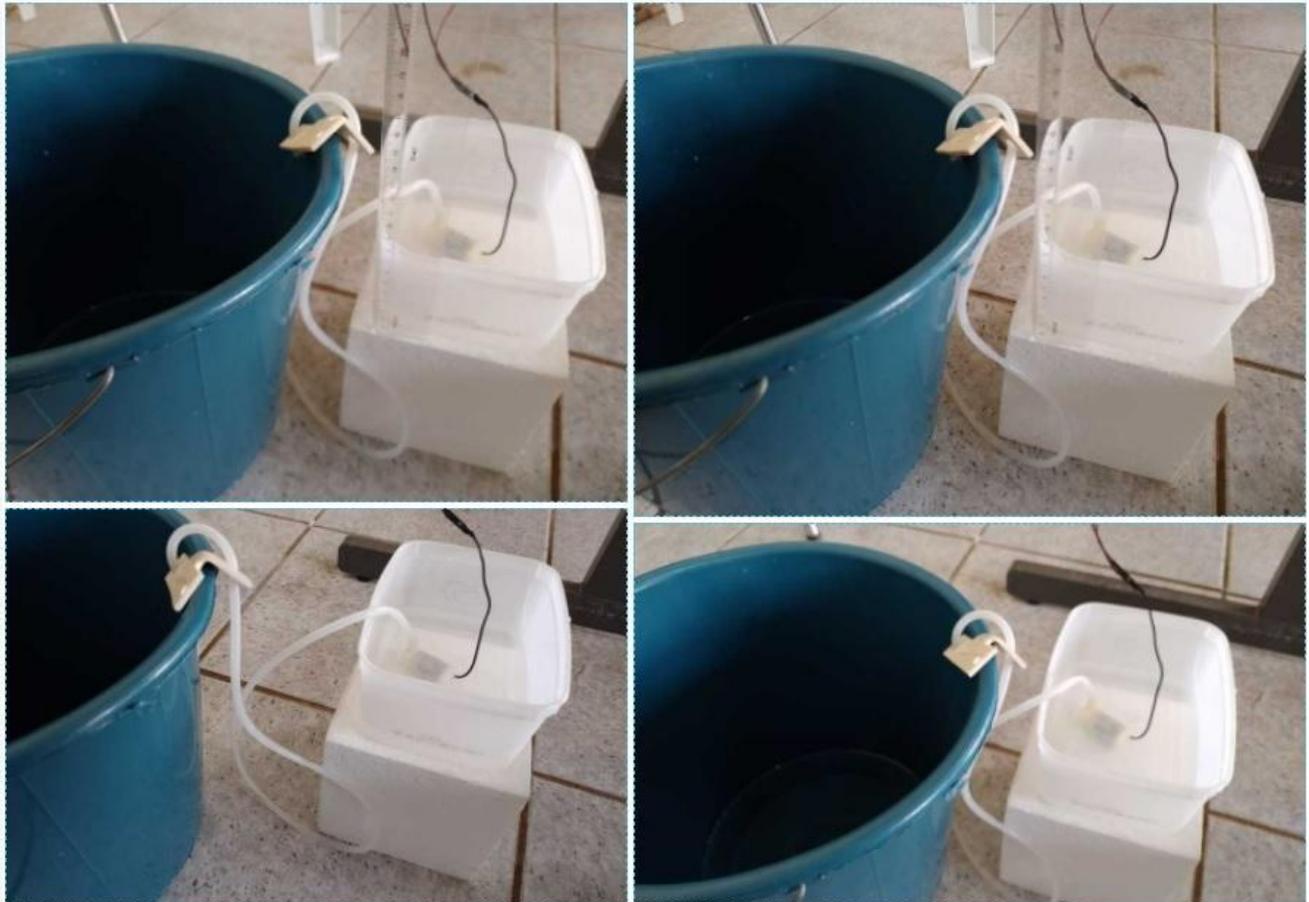


Figura 5 - Esquema geral do sistema de injeção da solução desinfetante no “tanque de mistura”. (Fonte: Os autores)

4.1.3. Prototipagem eletrônica e montagem dos circuitos

Na concepção da prototipagem eletrônica no sistema, foi utilizado uma placa Arduino de hardware livre e de placa única, projetada com um microcontrolador Atmel AVR, da marca UNO. Com auxílio de fios convencionais e tipo "jumpers", concentrados a uma protoboard, foi realizada a conexão dos componentes e sensores. Para vedação e isolamentos dos fios foram utilizados diversos materiais como fitas e isolantes termorretráteis, e também solda de estanho quando necessária a confecção dos fios (Figura 6).



Figura 6- Esquema geral do sistema de injeção da solução desinfetante no “tanque de mistura”. (Fonte: Os autores)

4.2 – Procedimento experimental

4.2.1. Calibração do sensor ultrassônico como medidor de altura manométrica

Para as aferições da precisão e exatidão das medidas das alturas da coluna d’água feitas pelo sensor no interior do reservatório, foram feitas observações na fita métrica inserida verticalmente ao longo do interior do mesmo, comparando os dados com os obtidos por meio do equipamento eletrônico.

4.2.2. Análises de vazão em função da altura manométrica e regressão linear.



Em sistemas hidráulicos, diversos parâmetros determinarão as condições de funcionamento do mesmo. De acordo com Porto, 2006, quanto maior for a altura da coluna de água em um reservatório, maior será a vazão do sistema, isso se dá devido à pressão exercida pela massa de água acumulada ao longo do eixo longitudinal do reservatório, essa pressão interna maior que a pressão atmosférica externa gera um aumento do fluxo de água. Essa pressão é denominada pressão hidrostática, também conhecida como pressão manométrica.

Por meio da abertura superior do tubo de acumulação, realiza-se alimentação de água no sistema. Mantendo um registro sempre na mesma posição, e utilizando apenas o segundo (mais a jusante da tubulação), realizamos o controle das vazões de saída, de modo a estabilizarmos uma altura da coluna d'água constante e conhecida, na tubulação de 150mm. Foram realizados testes controlados, mantendo as mesmas condições do sistema e variando a altura manométrica e obtendo dados de vazão, por meio do método direto, utilizando uma proveta de 1000 ml, para cada respectivo nível d'água (20, 30, 40, 50 e 60 cm). Para cada medição de altura teórica, obtivemos 8 medidas de vazão. Com esses dados, foi possível elaborar um diagrama de dispersão, no qual os pontos foram ajustados linearmente, obtendo-se uma correlação entre a altura e a vazão escoada.

4.2.3. Testes de vazão da bomba

Os testes de vazão da bomba foram realizados com o objetivo de identificar qual o regime de funcionamento mais estável da mesma. Foram realizados testes utilizando diferentes intervalos de tempo em que a bomba permanece ligada: (5, 10, 15, 20, 25 e 30 segundos). Para cada intervalo de tempo foram coletados em média 23 dados de volume injetado para cada tempo, fazendo uso de uma proveta de 1000 ml.

O procedimento acima foi realizado visando diminuir as influências para a observação do volume na proveta, não tendo contato manual com a mesma para que não ocorresse turbulência e movimentação na superfície da água, dificultando sua medição. Como forma de padronização das condições experimentais, foi mantida sempre a mesma diferença de altura entre a bomba e a saída da mangueira (11,3 cm).



4.2.4. Definição da concentração da solução desinfetante

Dados os testes realizados para as vazões do tanque (máxima e mínima) e do volume injetado pela bomba, no intervalo de tempo identificado como mais estável, foi possível identificar as ordens de grandeza envolvidas.

Considerando um ciclo de cloração de 30 segundos, no qual a bomba fica ligada por metade desse tempo, e posteriormente 15 segundos parada, foi observado que existe um intervalo de concentração da solução injetora ótimo para manter a concentração da água tratada, objetivando a concentração final de 1 mg/l, que satisfaz as condições para uma boa desinfecção. Isso possibilitou estimar a concentração de desinfetante adequada.

Para o preparo da solução desinfetante na concentração desejada foi utilizado hipoclorito de sódio em pó 10%.

4.2.5. Automação do sistema

O sensor ultrassônico foi montado conforme Figura 7 abaixo, e carregou-se o código encontrado no Anexo II para o acionamento do HC SR04.

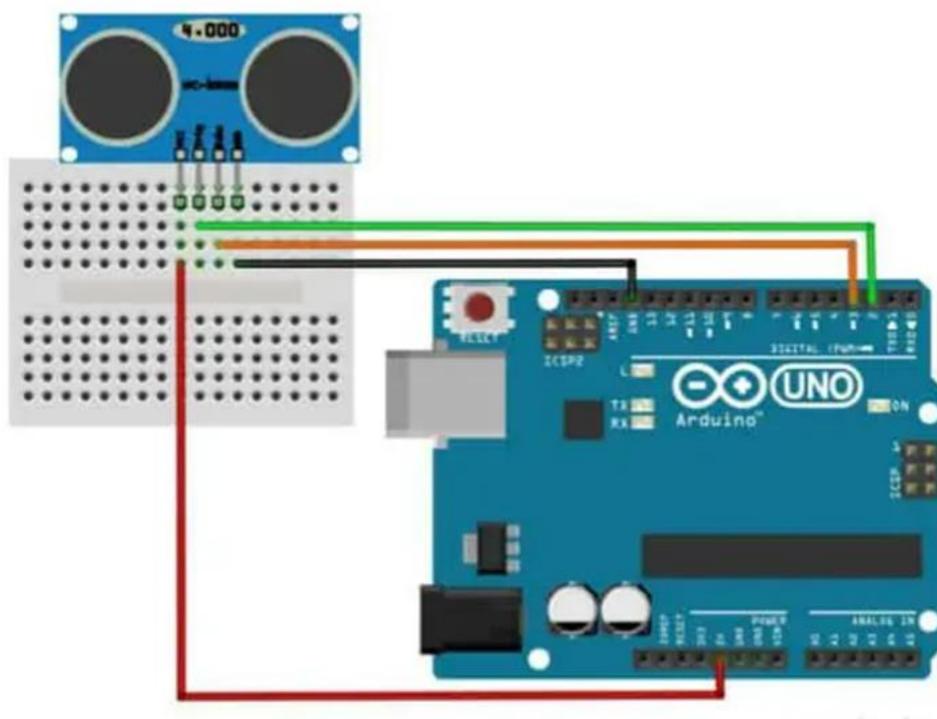


Figura 7 - Esquema geral de ligação do sensor ultrassônico

(Fonte: Tinkercad Arduino)

O sensor possui um componente, chamado de Echo, (este está ligado na porta 12 do arduino) que faz a emissão de um pequeno pulso sonoro de alta frequência que se propaga na velocidade do som no meio em questão. Quando este pulso atingir um objeto, um sinal de eco será refletido para o sensor. O componente do sensor capaz de captar o sinal sonoro da volta se chama Trig (por sua vez, está ligado na porta do 13 arduino). Para o sistema funcionar é necessário obviamente fornecer uma diferença de potencial elétrico, isso é feito utilizando a ligação 5V do arduino, e a ligação da porta ground (comumente chamada de ligação terra). A distância entre o sensor e o objeto pode então ser calculada caso saibamos o tempo entre a emissão e a recepção do sinal. A Figura 8 exemplifica o processo.

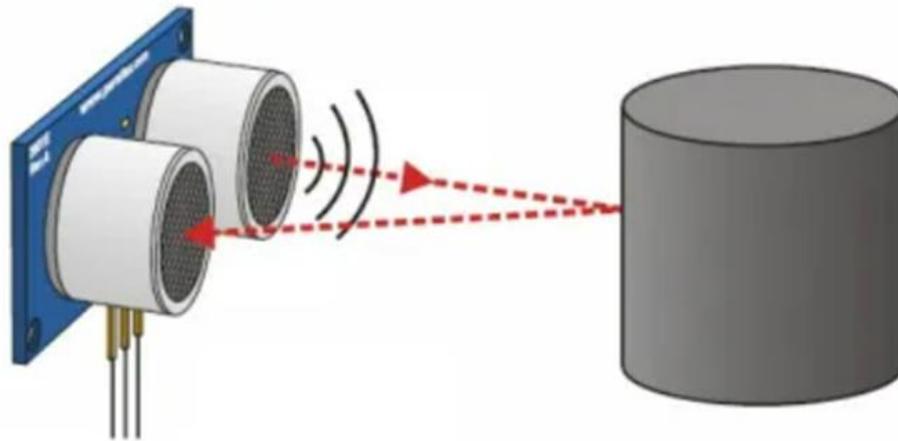


Figura 8 - funcionamento do sensor ultrassônico (Fonte:
<https://portal.vidadesilicio.com.br/hc-sr04-sensor-ultrassonico/>)

Para o controle do dispositivo, a lógica de programação que será inserida no controlador lógico, já possui uma função que realiza a transformação matemática do tempo de retorno do sinal emitido, para a distância do objeto que foi causada pela reflexão do sinal, uma vez que a velocidade de propagação do sinal é conhecida.

Numa segunda etapa do desenvolvimento do sistema automatizado, foi realizada a montagem do sistema de funcionamento da bomba, conforme figura 9.

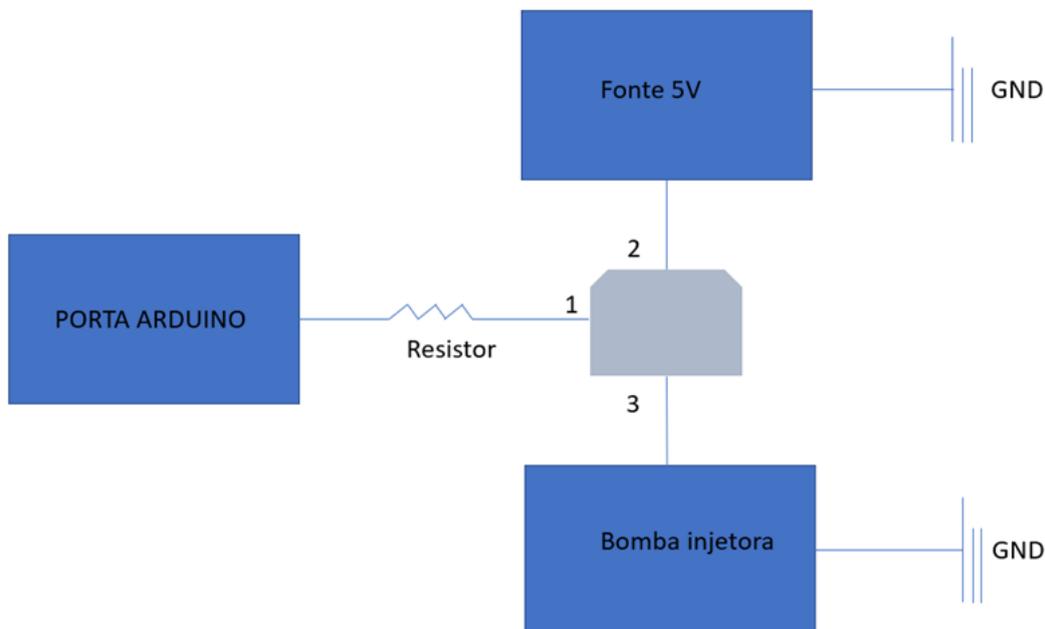


Figura 9 - esquema de montagem do circuito para a bomba 6v
(Fonte:<https://www.instructables.com/Ultrasonic-Distance-Sensor-Arduino-Tinkercad/>)

O sistema para acionar o motor da bomba de água está apresentado esquematicamente na figura 9. Ele possui 3 portas programáveis e que tem a capacidade de alterar sua configuração, ligando ou desligando componentes de acordo com a necessidade. O dispositivo chamado transistor (em cinza) foi ligado na controladora do Arduino pela porta 1, juntamente com um resistor de 1000 ohms, para proteção do circuito e diminuição das correntes. Na porta 2 ligou-se a fonte de alimentação 5V (para confeccioná-la foi necessário utilizar uma “caixinha de carregador” de celulares convencional, e um fio com as pontas soldadas), e na porta 3 a bomba injetora. Os chamados “ligação terra” de ambos os dispositivos foram ligados em um nó na protoboard, que é conectada à porta GND, do Arduino. Desta maneira, o transistor consegue alternar as ligações da figura 9, de modo que a bomba seja ligada, e posteriormente desligada, de acordo com a programação lógica executada.

A fase final do projeto de automação proposto, consiste em realizar a ligação dos circuitos conforme descritos nas figuras 8 e 10, simultaneamente.



A programação lógica utilizada para realizar o controle dos dispositivos foi montada a partir do código disponibilizado para cada um dos componentes pela IDE Arduíno, e depois adaptadas para funcionarem de forma conjunta. O código utilizado com alguns comentários está no anexo III deste trabalho.

4.2.6. Obtenção das amostras

Como forma de validação se o objetivo foi cumprido ou não, foram coletadas amostras de água para serem analisadas em laboratório a fim de averiguar a concentração de cloreto total, antes e depois da cloração automatizada. Primeiramente foram coletadas três amostras antes da etapa da cloração, para se aferir a concentração inicial e possibilitar o cálculo da concentração injetada. Também foi coletada uma amostra da solução desinfetante preparada na concentração desejada.

Foi determinado que as alturas manométricas que seriam usadas de referência seriam as mesmas utilizadas nos testes de vazão do tanque. Foi determinada vazão de entrada no protótipo, a qual foi objetivado manter o equilíbrio na saída para que a altura da coluna d'água em seu interior se mantivesse constante, após sua estabilização foram coletadas três amostras em frascos plásticos de 100 ml. Quando uma amostra era coletada, a altura instantânea mostrada pelo sensor era anotada. As amostras foram coletadas considerando um ciclo de cloração. O procedimento foi repetido para cada uma das alturas da coluna d'água testadas.

4.3 – Análise de Cloro

Posteriormente as amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno, tampadas e levadas ao laboratório de análises do Unifal-MG campus Poços de Caldas.

Para determinação do cloreto total foi utilizado o método de Mohr (Friedrich Mohr, 2015).



5 – Discussões e resultados

5.1 – Calibração do sensor ultrassônico

A fim de avaliar e comparar as medidas da coluna de água dadas pela fita métrica e pelo sensor ultrassônico, foi realizado um teste simples utilizando os dois medidores. O sensor ultrassônico tem nominalmente um erro de 2 centímetros e a fita métrica de um milímetro.

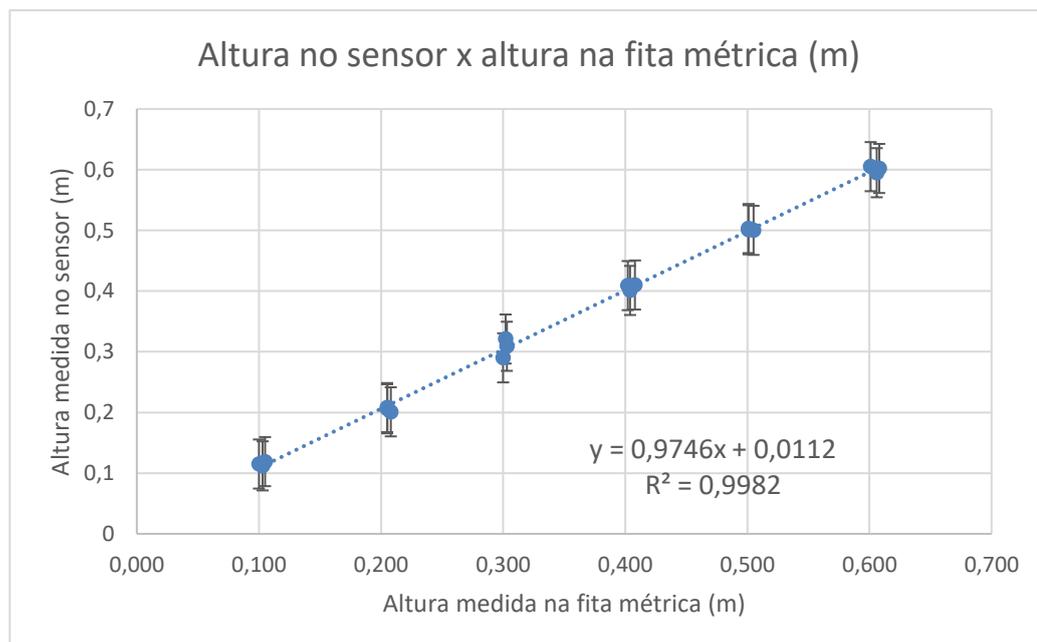


Figura 11- gráfico de correlação linear entre as medidas dadas pela fita métrica e o sensor ultrassônico. (Fonte: Os autores)

Os pontos obtidos experimentalmente, foram ajustados em uma reta com coeficiente de determinação de 0,99.

5.2 – Teste de medição da vazão escoada no protótipo



Os pontos obtidos experimentalmente, de vazão (litros/minuto) em função da altura da coluna de água (metros) para as alturas manométricas testadas (0,2; 0,3, 0,4; 0,5 e 0,6 metros), foram ajustados em uma reta com coeficiente de determinação de 0,930, como mostra a Figura 12.

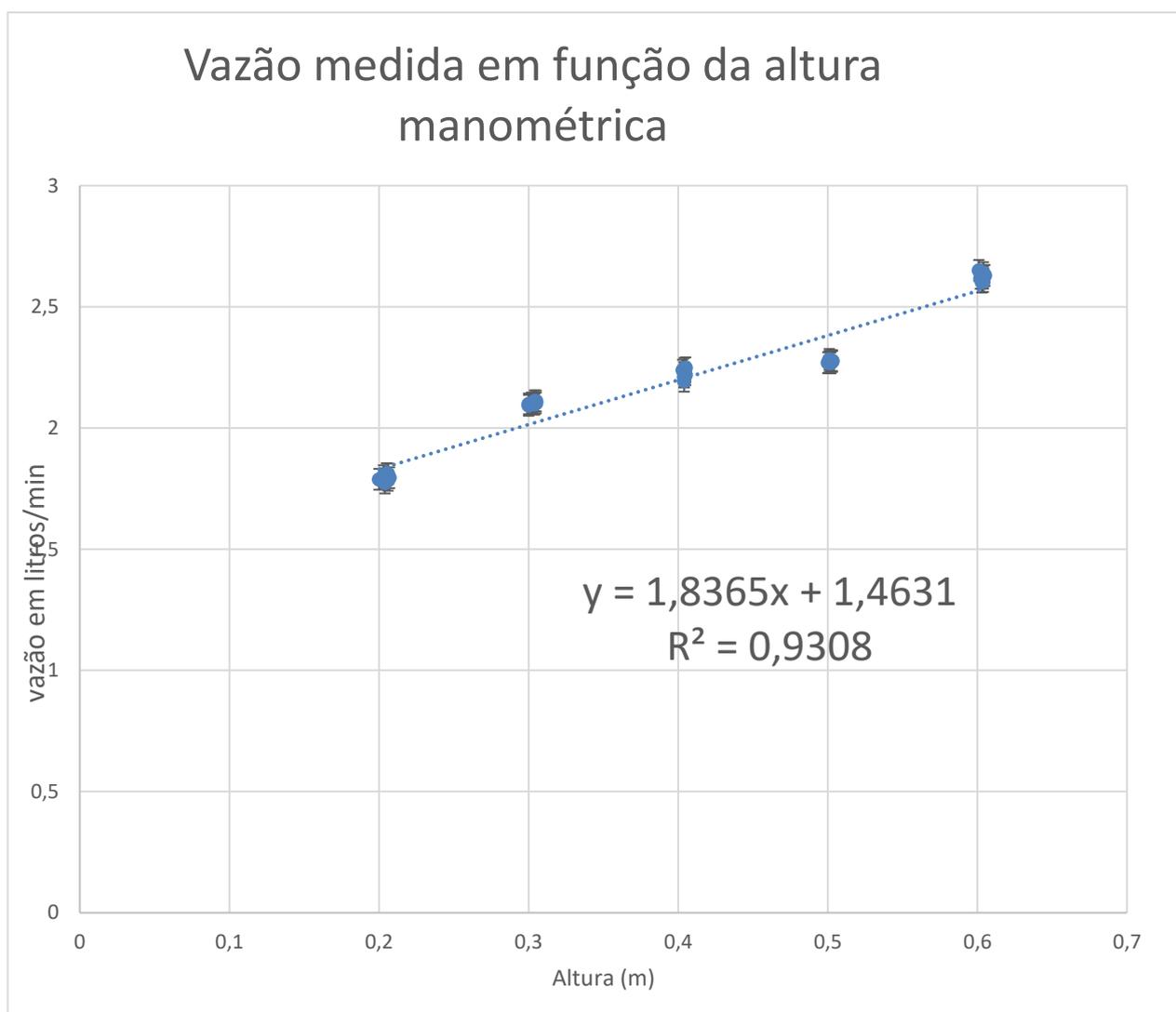


Figura 12 - gráfico de correlação linear entre as medidas experimentais de vazão (l/min) pela altura da coluna de água no reservatório (m). (Fonte: Os autores)

O modelo matemático ajustado que relaciona as variáveis envolvidas, altura(h)



por vazão (Q), é dado por:

$$Q(h) = 1,8365 h + 1,4631 \quad , \quad (8)$$

5.3 – Teste de vazão da bomba

Dada a inconstância observada da vazão da bomba em um intervalo de tempo, foi decidido não variar o tempo de funcionamento. Os dados obtidos nos testes da bomba estão no ANEXO II deste trabalho, e determinaram a faixa de operação de 15 segundos que seria utilizada nos demais testes, já que este intervalo de funcionamento foi o que apresentou o menor desvio padrão para o volume injetado (1,59) dentre os intervalos testados. A figura 14 mostra um gráfico da vazão da bomba (ml/s) em função do tempo de ligação (s), sendo possível visualizar a não linearidade de funcionamento.

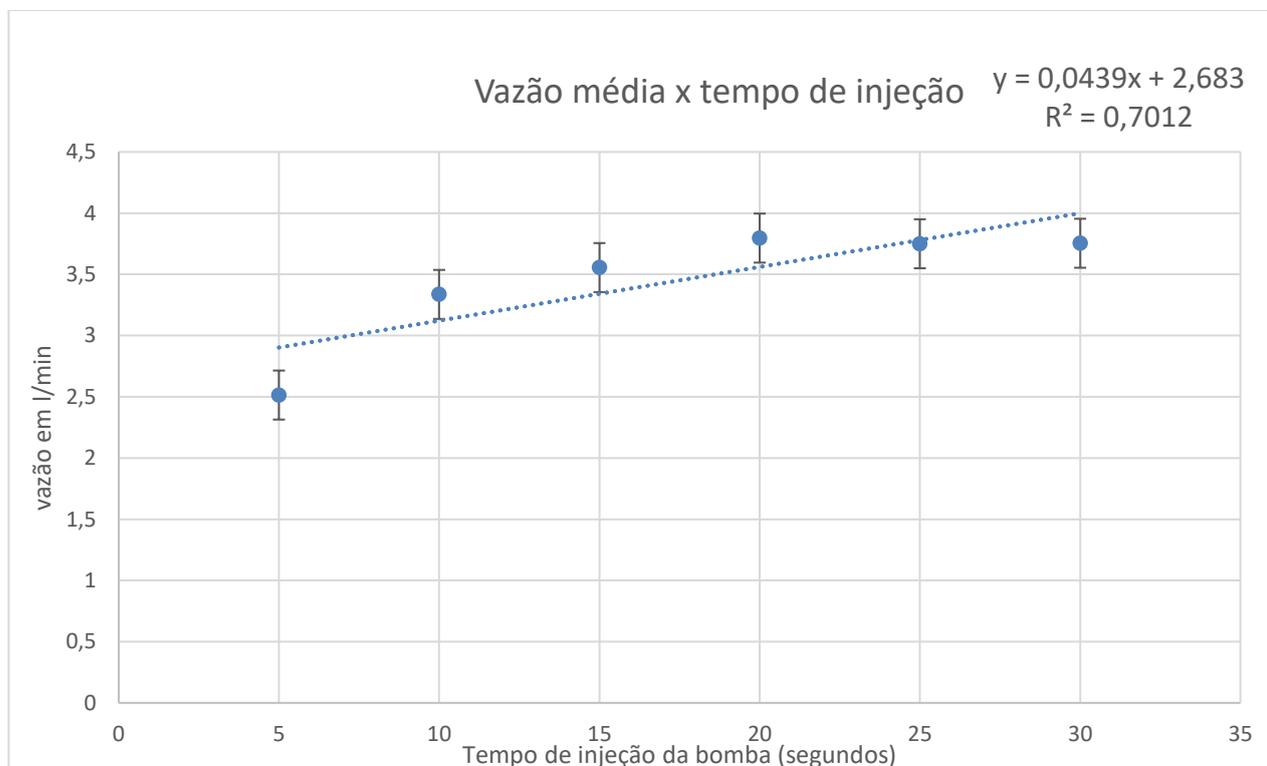


Figura 13 : gráfico da vazão média da bomba em função do tempo de permanência em ativação. (Fonte: Os autores)



5.4 - Cálculo da concentração da solução desinfetante

Dado o exposto anteriormente, foi proposto um modelo onde o ciclo de cloração dura 30 segundos, em que metade desse intervalo é abastecido pela vazão da bomba cloradora, e 15 segundos com o propulsor inoperante. Tomando como referência a maior vazão de água testada a ser clorada (de acordo com limites de operação do protótipo), no intervalo do ciclo estabelecido, foi possível identificar o volume escoado. Utilizando esse dado e conhecendo a concentração de cloro livre final desejada, foi possível calcular a concentração da solução desinfetante a ser inserida no sistema, para essas condições. (0,025 g/l).

Segundo os cálculos, dado modelo se mostrou satisfatório para as condições operacionais do protótipo, o que proporcionou a preparação do código de automação definitivo e dos testes finais.

5.5 - Automação do sistema

Como o tempo de operação da bomba é constante, exposto os motivos anteriormente, a massa de hipoclorito injetada é constante (1,33 mg) injetados a cada ciclo de funcionamento da bomba).

O próximo passo do modelo proposto, é o cálculo do tempo que leva para escoar o volume de água o qual a massa injetada de hipoclorito é capaz de tratar, visando obter uma concentração final de 1mg/l.

$$C = M / V \quad (9)$$

C - concentração final desejada: 1 mg/l.

M - massa de hipoclorito injetado a cada ciclo de funcionamento da bomba: 1,3312 mg.

V - volume de água escoado através do protótipo em um certo intervalo de tempo

Da equação 3 temos que: $Q(h) = 1,8365h + 1,4631$, onde Q (h) é vazão do sistema em função da altura da coluna d'água medida no sensor ultrassônico;



Portanto, o volume escoado em um certo intervalo de tempo é:

$$V = t * Q(h) \quad (10)$$

Substituindo a equação (5) em(4), temos:

$$C = M/ (Q(h) * t) \quad (11)$$

Isolando t:

$$t = C * M/Q(h) \quad (12)$$

A equação acima relaciona quanto tempo necessário de escoamento, na vazão medida, é necessário para atingir o volume em que um ciclo de funcionamento da bomba é capaz de tratar. Sendo assim, o tempo que a bomba fica desligada é igual ao tempo mostrado na equação (12), menos 15 segundos:

$$t^* = t - 15 \quad (13)$$

Inserindo a variável da equação (8) como tempo em que a bomba fica desligada, foi colocado no código do programa como instrução.

5.6 - Análise de Cloro

O método de análise utilizado (método de Mohr) faz a medição da concentração de cloreto total nas amostras.

Contudo o mais apropriado para análise é um método que faz a medição do cloro livre. As considerações iniciais, conforme a legislação pertinente, que estabelecem os limites mínimos e máximos da substância nas águas, é em termos de cloro livre ou combinado.

Embora a grandeza medida pelo método utilizado não seja a mais apropriada, existe uma relação direta entre elas, sendo possível realizar uma análise de proporcionalidade.



As amostras analisadas correspondem a: solução injetora utilizada na cloração automática, três amostras de uma solução que representa a concentração de cloreto total na água antes da cloração (b1, b2 e b3), que foram obtidas do sistema de abastecimento de água da cidade de Poços de Caldas, as amostras da água após a cloração, enquanto o sistema operava em diferentes vazões.

As amostras de água após a cloração foram nomeadas de acordo com a altura da coluna d'água, conforme descrito na metodologia. Os resultados são expostos na Tabela 3 e 4.

Amostra	Volume de solução consumido (ml)	Concentração (mg/l)
Solução injetora	12,2	59,6
b1	2,4	10,5
b2	2,4	10,5
b3	2,3	10,1
20(1)_20	3,1	15,5
20(2)_20	3,3	16,5
20(3)_24	3,1	15,5
30(1)_34	3,2	16,0
30(2)_32	3,3	16,5
30(3)_36	3,3	16,5
40(1)_42	3,2	16,0
40(2)_42	3,3	16,5
40(3)_46	3,4	17,0
50(1)_51	3,2	16,0
50(2)_51	3,1	15,5
50(3)_50	3	15,0
60(1)_60	3,1	15,5
60(2)_58	3,2	16,0
60(3)_59	3	15,0

Tabela 3: Concentrações de cloreto total medidas



Amostras após o tratamento	
Média	15,9
Desvio padrão	0,6
Variância	0,4

Amostras antes o tratamento	
Média	10,4
Desvio padrão	0,3
Variância	0,1

Quantidade de cloro injetada pelo sistema	
Média	5,5
Desvio padrão	0,6
Variância	0,4

Tabela 4, 5 e 6: Concentrações de cloreto total medidas nas amostras – estatística básica

A legislação pertinente para determinação dos parâmetros mínimos de águas tratadas é em termos de cloro residual livre ou combinado. O método disponível para análise e utilizado neste trabalho não nos dá essa grandeza, podendo ser aferido somente a concentração de íon cloreto. Visto esse fato, o objetivo de manutenção da concentração de cloro livre na concentração desejada (1 mg/l) não foi possível de ser verificado.

6 – Conclusão

Visto o discutido acima, o objetivo de manutenção da concentração de cloro livre na concentração desejada (1 mg/l) não foi possível de ser verificado. O que temos é uma relação de íon cloreto total que foi adicionada ao sistema de forma uniforme, mesmo quando se variam as vazões.

Logo o sistema prototipado apresenta uma regularidade satisfatória de funcionamento, dependendo de uma análise de cloro livre ou residual para avaliar de forma completa, se é possível atingir o objetivo estipulado.



7 – Sugestões para o trabalho

Para melhor aferição dos resultados, as análises das amostras devem ser realizadas pelo método espectrofotométrico DPD (“N, N-dietil-p-fEnileno-diamina”) que mede o cloro residual livre.

Outra limitação observada no projeto é a bomba injetora utilizada. Trata-se de um equipamento muito frágil e que altera suas condições de funcionamento por diversos fatores, sendo um instrumento de alta variabilidade de funcionamento. Para os projetos futuros deverão ser utilizadas bombas peristálticas que tem maior regularidade de operação.

A realização de mais testes para obtenção da curva que mede a vazão no sistema com certeza resultará em uma melhor aferição desta grandeza. O protótipo funciona bem calibrado para um intervalo de vazões as quais a aplicação dele exige. Isso requer que para cada aplicação sejam feitos testes de vazão a fim de chegar em uma reta que representa o modelo de escoamento com um coeficiente de determinação melhor.



REFERÊNCIAS

Friedrich Mohr: Textbook of the chemical-analytical titration method. Based on our own tests and shown systematically. For chemists, doctors and pharmacists, mining and Ironworkers, Manufacturers, Agrônomos, Metalúrgicos, Mint Officials, etc. Second revised edition. Friedrich Vieweg and son, Braunschweig novembro de 1862, VII precipitation analyzes § 138 Chlorine, pp. 317-320 (online on the website of the Bavarian State Library [accessed on January 9, 2015]).

Ministério da Saúde. **Manual de Cloração de Água em Pequenas Comunidades Utilizando o Clorador Simplificado desenvolvido pela Funasa** – 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Guia Nacional De Coleta E Preservação De Amostras Água, Sedimento, Comunidades Aquáticas E Efluentes Líquidos**. Disponível em: < cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/Guia-nacional-de-coleta-e-preservacao-de-amostras-2012.pdf > Acesso em 20 de jan de 2022.

Chavier, Luis Fernando. **Programação para Arduino - Primeiros Passos**. Disponível em: < <https://www.circuitar.com.br/tutoriais/programacao-para-arduino-primeiros-passos/> > .Acesso em 28 de janeiro de 2022.

Noletto, Cairo. **Linguagem de alto nível vs linguagem de baixo nível: definições e diferenças!**. Disponível em: < <https://blog.betrybe.com/linguagem-de-programacao/linguagem-alto-e-baixo-nivel/> > Acesso em 10 de março de 2022.

Arduino CC. **Language Reference**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/reference/en/>, acesso em 05 de novembro de 2021.

Casavella, Eduardo. **Tipos de dados em C**. Disponível em: <http://linguagemc.com.br/tipos-de-dados-em-c/> , acesso em 03 de abril de 2022.

Thinkercad. **Ultrasonic Distance Sensor in Arduino With Tinkercad**, disponível em: <https://www.instructables.com/Ultrasonic-Distance-Sensor-Arduino-Tinkercad/>, acesso em 15 de janeiro de 2022.

Guimarães, Flávio. **Brincando com Ideias**, disponível em: https://www.youtube.com/channel/UCcGk83PAQ5aGR7IVID_cBaw, acesso em 05 de novembro de 2021.

Thinkercad. **Arduino simulator AND**, disponível em: <https://www.tinkercad.com/things/flHpOFbJ1CN-arduino-simulator-and>, acesso em 17 de outubro de 2021.

Porto, Rodrigo. **Livro - Hidráulica Básica** - Rodrigo Porto - 4ª Edição.pdf, 2006.



ANEXO I– Código final Arduino UNO

```
//Biblioteca
#include <HCSR04.h>

//Variaveis do ultrason
const unsigned int TRIG_PIN=13;
const unsigned int ECHO_PIN=12;
const unsigned int BAUD_RATE=9600;

//Variaveis da Bomba
byte pump1 = 6;
//byte pump2 = 10;

void setup(){

  Serial.begin(BAUD_RATE);

  //Entradas
  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);

  while (!Serial); // n entendi

  pinMode(pump1, OUTPUT); // variant low/high
  digitalWrite(pump1, LOW); // variant input/output
}

void loop(){
  //Escrita do sensor
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

  //Pega a duração
  const unsigned long duration = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
  //Escrita da Bomba

  //Escreve High em pump 1

  digitalWrite(pump1, HIGH); // pump1 deactivated
  //pinMode(pump2, INPUT); // pump2 deactivated

  //mantem sempre 15 segundos, pq e uma dose de CAO medida
```



```
delay(15000);
```

```
//Escreve low em pump1  
digitalWrite(pump1, LOW); // pump1 activated  
//pinMode(pump2, OUTPUT); // pump2 activated
```

```
delay ( calculo_tempo( duration ) );
```

```
}
```

```
//Função que retorna o tempo de delay de acordo com os calculos matematicos:  
float calculo_tempo( long duration){
```

```
long distance = duration/29/2;
```

```
long distr = 62 - distance;
```

```
float vazao = ( ( ( 1.8365 * distr ) + 1.4631) * 16.67 ); // ml/s
```

```
float tempo = ( (1.4158 / vazao ) * 60 ) - 15 ; // delay ou tempo que a bomba fica desligada
```

```
//retorna o valor do tempo
```

```
tempo = tempo * 1000;
```

```
return tempo;
```

```
}
```



ANEXO II– Código sensor ultrassônico

```
#include <HCSR04.h>

const unsigned int TRIG_PIN=13;
const unsigned int ECHO_PIN=12;
const unsigned int BAUD_RATE=9600;

void setup() {
  pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
  pinMode(ECHO_PIN, INPUT);
  Serial.begin(BAUD_RATE);
}

void loop() {
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

  const unsigned long duration= pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
  int distance= duration/29/2;
  int distr= 62 - distance;

  if(duration==0){
    Serial.println("Warning: no pulse from sensor");
  }
  else{
    //Serial.print("distance to nearest
    //Serial.println(" cm");
  }
  delay(2000);
}
```



ANEXO III- Código bomba 6V

```
byte pump1 = 6;  
//byte pump2 = 10;  
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  while (!Serial);  
  pinMode(pump1, OUTPUT); // variant low/high  
  digitalWrite(pump1, LOW); // variant input/output  
}  
void loop() {  
  digitalWrite(pump1, HIGH); // pump1 deactivated  
  //pinMode(pump2, INPUT); // pump2 deactivated  
  delay(15000);  
  digitalWrite(pump1, LOW); // pump1 activated  
  //pinMode(pump2, OUTPUT); // pump2 activated  
  delay(15000);  
}
```