

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CENTRO DE COORDENAÇÃO
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

ARTHUR FERREIRA BRANDÃO; MARCOS FELIPE SOARES ROCHA

**SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO PARA DESINFECÇÃO E
CORREÇÃO DE PH APLICADO EM PISCINAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

ARTHUR FERREIRA BRANDÃO; MARCOS FELIPE SOARES ROCHA

**SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO PARA DESINFECÇÃO E
CORREÇÃO DE PH APLICADO EM PISCINAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao centro de coordenação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Graduando em Engenharia de Controle e Automação”.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Ravazzi Pires da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Scannavino Junior

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia de Controle e Automação



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcos Felipe Soares Rocha

Sistema de controle automático de desinfecção e correção de pH aplicado em piscinas

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:30hs do dia 13/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Kleber Romero Felizardo - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - (Membro)



FOLHA DE APROVAÇÃO

Arthur Ferreira Brandão

Sistema de controle automático para desinfecção e correção do pH aplicado em piscinas

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:30hs do dia 13/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Emerson Ravazzi Pires da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Coorientador)

Prof(a). Dr(a). Kleber Romero Felizardo - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - (Membro)

ABSTRACT

BRANDÃO, Arthur F.; ROCHA, Marcos F. S.. **AUTOMATIC CONTROL SYSTEM APPLIED IN SWIMMING POOLS FOR DISINFECTION AND PH CORRECTION.** 2018. 89 f. Final Term - Control and Automation Engineering, Federal University of Technology - Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

This research proposes the creation of an automated system for the treatment of water in as a more effective alternative to manual techniques. In analyzing how to achieve ideal conditions for water use, there is a dependence between the efficiency of the disinfection products and the concentration of the pH in the water, if the pH indicator is of the ideal range, chlorine alone does not guarantee protection, which can lead to health risks. In order to guarantee water quality and reduce human performance, a system is proposed that monitors the water conditions and, with this information, acts when necessary applying the products at the correct dosage, avoiding losses and peaks of overdosage and underutilization that make the use of the pool unfeasible. In addition to reliability and convenience to the owner, it is also expected that the solution will be economically feasible, considering which will avoid possible expenses with labor and waste products

Keywords: Swimming pool. Water treatment. Home automation. pH. Chlorine. ORP.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Registo de Cloro e Níveis de pH com Automação.	22
FIGURA 2 – Diagrama de blocos de um sistema com retroação negativa descrevendo um sistema de controle básico em malha fechada.	22
FIGURA 3 – Diagrama de blocos do sistema de malha fechada	23
FIGURA 4 – Circuito amplificador e condicionador de sinal.	36
FIGURA 5 – Circuito sensor de temperatura.	36
FIGURA 6 – Circuito comparador de tensão.	37
FIGURA 7 – Esquemático do circuito elétrico do LCD.	44
FIGURA 8 – Esquemático microcontrolador.	46
FIGURA 9 – PCB microcontrolador	47
FIGURA 10 – Máquina de estados	63

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Dissociação iônica do ácido hipocloroso em função do pH.	15
QUADRO 2 – Escala de concentração de hidrogênio por litro.	16
QUADRO 3 – Sobrevivência de microrganismos em relação ao indicador ORP. Resumo do resultado de vários estudos de simulação de laboratório e de hidroenergia comercial.	17
QUADRO 4 – Quantidade de cloro necessária para aumentar em 1 ppm o teor de cloro em 1 metro cúbico de água de piscina.	18
QUADRO 5 – Quantidades de ácido clorídrico (HCl) por metro cúbico de água de piscina para redução de pH.	18
QUADRO 6 – Quantidades de bissulfato de sódio (NaHSO ₄) por metro cúbico de água de piscina para redução de pH.	19
QUADRO 7 – Quantidades de carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃) por metro cúbico de água de piscina para elevação de pH.	19
QUADRO 8 – Especificações técnicas mínimas necessárias para eletrodo de pH necessária para o projeto.	26
QUADRO 9 – Parâmetros técnicos do eletrodo de pH.	27
QUADRO 10 – Variação de tensão por unidade de pH de acordo com a variação da temperatura	29
QUADRO 11 – Especificações técnicas mínimas necessárias para o eletrodo de ORP para o projeto.	29
QUADRO 12 – Parâmetros técnicos da eletrodo ORP.	31
QUADRO 13 – Especificação dos pinos do LCD 20x4.	43
QUADRO 14 – Especificações do <i>display</i>	44
QUADRO 15 – Relação de pinos entre o Arduino e o LCD.	45
QUADRO 16 – Especificações técnicas fonte.	47
QUADRO 17 – Especificações técnicas do módulo relé.	49
QUADRO 18 – Comandos utilizados no código de teste (<i>case sensitive</i>).	53
QUADRO 19 – Relação tempo e volume de cada bomba.	53
QUADRO 20 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 1.	55
QUADRO 21 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 2.	55
QUADRO 22 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 3.	55
QUADRO 23 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 1 após o ajuste fino.	56
QUADRO 24 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 2 após o ajuste fino.	56
QUADRO 25 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 3 após o ajuste fino.	56
QUADRO 26 – Resultados obtidos na leitura das soluções tampão.	59
QUADRO 27 – Resultados obtidos na utilização da equação linear.	60
QUADRO 28 – Resultados de leitura do eletrodo ORP nas amostras.	61

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Efeito dente-de-serra da variação da concentração do sanitizante cloro de acordo com o método de introdução manual e automático em função do tempo.	20
GRÁFICO 2 – Curva do sinal $h(t)$ ao longo do tempo (t) para um sistema genérico. . . .	24
GRÁFICO 3 – Gráfico da variação do Passo (step) em função da temperatura.	30
GRÁFICO 4 – Variação ORP em função das concentrações de cloro livre e dos níveis pH, 2D.	34
GRÁFICO 5 – Variação ORP em função das concentrações de cloro livre e dos níveis pH, 3D.	35
GRÁFICO 6 – Curva termistor.	37
GRÁFICO 7 – Dados amostrais e equações representando o comportamento das bombas. . . .	57
GRÁFICO 8 – Variação das condições da Piscina ao longo do tratamento.	66
GRÁFICO 9 – Variação do pH da piscina ao longo do tratamento.	67
GRÁFICO 10 – Variação do ORP da piscina ao longo do tratamento.	67
GRÁFICO 11 – Relação de produtos gastos ao longo do tratamento da piscina.	68
GRÁFICO 12 – Variação da temperatura ao longo do tratamento.	68

LISTA DE FOTOGRAFIAS

FOTOGRAFIA 1	– Eletrodo de pH, eletrodo cominado do tipo sonda.	27
FOTOGRAFIA 2	– Eletrodo de ORP, eletrodo cominado	30
FOTOGRAFIA 3	– Circuito Amplificador de Sinal	34
FOTOGRAFIA 4	– Bomba de recalque.	43
FOTOGRAFIA 5	– Display LCD 20x4 modelo 2004 com Luz de fundo Azul	43
FOTOGRAFIA 6	– Circuito e código exemplo em funcionamento.	45
FOTOGRAFIA 7	– Microcontrolador Arduino Uno	46
FOTOGRAFIA 8	– PCB microcontrolador - Face superior.	47
FOTOGRAFIA 9	– PCB microcontrolador - Face posterior.	48
FOTOGRAFIA 10	– PCB em conjunto com o microcontrolador.	48
FOTOGRAFIA 11	– Fonte eletrônica estabilizada.	49
FOTOGRAFIA 12	– Modulo de acionamento com quatro relés de 5V de acionamento.	49
FOTOGRAFIA 13	– Beckers de 50 a 600 ml.	50
FOTOGRAFIA 14	– Proveta de 500 ml.	50
FOTOGRAFIA 15	– Válvula de poço roscável.	51
FOTOGRAFIA 16	– Circuito utilizado no teste experimental.	52
FOTOGRAFIA 17	– Dosador químico.	57
FOTOGRAFIA 18	– Sistema de calibração em bancada.	58
FOTOGRAFIA 19	– Eletrodo em curto.	59
FOTOGRAFIA 20	– Processo de calibração.	59
FOTOGRAFIA 21	– Hardware em CAD e protótipo final.	61
FOTOGRAFIA 22	– Piscina no estado inicial.	64
FOTOGRAFIA 23	– Piscina durante o processo de tratamento.	65
FOTOGRAFIA 24	– Piscina antes e após o tratamento.	65
FOTOGRAFIA 25	– Válvula de retenção com mola.	69
FOTOGRAFIA 26	– Antes e depois de aplicação de técnicas ao código.	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3	JUSTIFICATIVA	12
2	FUNDAMENTAÇÃO E CONCEITOS	13
2.1	CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE PISCINAS	13
2.2	TRATAMENTO QUÍMICO	13
2.2.1	Cloração	13
2.2.2	Balanceamento Químico da Água - pH	15
2.2.3	Potencial De Oxido-Redução (ORP)	17
2.3	BASE DE CÁLCULO PARA AS CORREÇÕES DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	18
2.4	TÉCNICAS DE DESINFECÇÃO EXISTENTES	19
2.4.1	Desinfecção Manual	19
2.4.2	Desinfecção Semi-Manual	20
2.4.3	Desinfecção Semi-Automática	20
2.4.4	Desinfecção Automática	21
2.5	CONCEITOS DE CONTROLE	22
2.5.1	Sistema de Controle em Malha Fechada	22
2.5.2	Controlador do tipo <i>ON-OFF</i>	23
2.6	ESCOPO DO PRODUTO	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	MATERIAIS	26
3.1.1	Sensores	26
3.1.1.1	Eletrodo de pH	26
3.1.1.2	Cálculos Teóricos - pH	28
3.1.1.3	Eletrodo De Potencial De Oxido-Redução (ORP)	29
3.1.1.4	Cálculos Teóricos - ORP	31
3.1.2	Circuito amplificador de sinal	33
3.1.2.1	Sinal de pH Condicionado	37
3.1.2.2	Sinal De ORP Condicionado	38
3.1.2.3	Calibração do Circuito	38
3.1.2.4	Calibração Offset para a eletrodo de pH	38
3.1.2.5	Calibração λ para o eletrodo de pH	39
3.1.2.6	Calibração Offset para o eletrodo ORP	41
3.1.2.7	Calibração λ para o eletrodo de ORP	41
3.1.3	Bomba Hidráulica	42
3.1.4	<i>Display</i>	42
3.1.5	Microcontrolador	45
3.1.6	Fonte Eletrônica Estabilizada	45
3.1.7	Módulo Relé	48
3.1.8	Instrumentos de Medição de Volume de Líquidos	48
3.1.9	Componentes Hidráulicos	51
3.2	MÉTODOS	51
3.2.1	Dimensionamento da vazão das bombas	51
3.2.2	Dosadores químicos	57
3.2.3	Processo de calibração eletrodo de pH	58

3.2.4	Processo de calibração eletrodo de ORP	60
3.2.5	Hardware	61
3.2.6	<i>Firmware</i>	62
3.2.6.1	Máquina de estados	62
3.2.7	Preparação da Piscina	63
3.2.8	Tratamento de teste do protótipo	66
3.2.9	Desafios e soluções apresentadas	68
3.2.9.1	Desafio 1 - Bomba de circulação	68
3.2.9.2	Desafio 2 - Retorno de água para os reservatórios de produtos	69
3.2.9.3	Desafio 3 - Memória	69
3.2.9.4	Desafio 4 - Homogeneização dos produtos	70
3.2.9.5	Desafio 5 - Conciliação das leituras dos eletrodos	70
3.3	MUDANÇAS PREVISTAS	71
4	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	73
	GLOSSÁRIO	75
	ANEXO A – MEDIDAS DE POTENCIAL DE OXIDOREDUÇÃO EM FUNÇÃO DO PH E CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO HIPOCLOROSO (PPM) .	76
	ANEXO B – CÓDIGO ARDUÍNO (C) DO TESTE EXPERIMENTAL DAS BOMBAS	77
	ANEXO C – CÓDIGO ARDUÍNO (C) FINAL	80

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o levantamento feito em 2013 pela Associação Nacional dos Fabricantes e Construtores de Piscinas e Produtos Afins (ANAPP, 2017), o Brasil é o segundo maior mercado de piscinas do mundo, atrás, apenas, dos Estados Unidos, com mais de 1,8 milhão de unidades instaladas. Segundo a mesma, esse é um mercado que continua em crescimento e, atado a elas vêm a premência de manutenções.

Por razões de segurança, a água das piscinas públicas e privadas deve passar por processo de desinfecção (BARWICK, 1998). Surtos de doenças que banhistas adquirem após a recreação em uma piscina não são raros (XIAO et al., 2017). Por isso, deve-se seguir a manutenção correta com os procedimentos adequados de desinfecção e monitorização da qualidade da água, esses são determinantes na prevenção de doenças infecciosas associadas ao uso da mesma. (NEMERY et al., 2002).

Na literatura, outros trabalhos compartilham à preocupação relativa aos cuidados com as piscinas. Por exemplo, segundo ZWIENER et al. (2007), ocorre reações químicas entre os produtos utilizados para desinfecção com materiais orgânicos (excreções corporais, pele e pelos) e inorgânicos (loções e filtros solares), formando subprodutos de desinfecção (DBPs, "desinfection by-products"). Para BOTTONI et al. (2014), os DBPs são prejudiciais à saúde e têm um potencial cancerígeno maior que os produtos químicos inalterados. CHEN et al. (2015) utilizaram espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier de caminho aberto para monitorar as concentrações de coliformes no interior de uma piscina. Outros estudos sobre monitoramento de piscinas também podem ser encontrados na literatura especializada, por exemplo, DONG et al. (2011) propôs um sistema de controle de temperatura da água da piscina baseado em controlador *fuzzy* e *Smith Predictor* (tipo de controlador preditivo para sistemas com atraso no tempo).

A cloração é o procedimento mais comum para a desinfecção da água, contudo, negligenciar seu manuseio pode trazer riscos aos banhistas. Um exemplo é no estudo de BOWEN et al. (2006) onde o excesso de cloro na água da piscina de um hotel foi o responsável por problemas oculares e crise respiratória aguda nos hóspedes que a utilizaram. Outro fator relevante da pesquisa foi que quem realizou a desinfecção das piscinas foram os funcionários do hotel. Caso existisse um sistema de automação confiável, erros poderiam ser evitados.

Em seu uso moderno, a automação pode ser definida como uma tecnologia que utiliza comandos programados para operar um dado processo e, combinados com retroação de informação, executam ações de forma correta. Tais comandos são frequentemente utilizados em processos antes operados por seres humanos (DORF; BISHOP, 2001). Muitos sistemas de automação só se tornaram possíveis por causa dos recentes e grandes avanços na eletrônica. Os

sensores que medem o valor ou estado de variáveis importantes em um sistema de controle são as entradas do sistema, mas o coração do sistema é o controlador eletrônico microprocessado. (RIBEIRO, 2003).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como finalidade propor o desenvolvimento de um sistema que realize o tratamento químico da água de piscinas através de correções automáticas nas concentrações de cloro e pH, de modo a garantir a qualidade da água e reduzir a atuação humana nesse processo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um produto compacto que realize o tratamento da água de uma piscina através de correções automáticas nas concentrações de cloro e pH da água, sem a necessidade de instalações ou adaptações na piscina.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conceituar as características ideais da água e os tratamentos mais comuns em piscinas.
- Projetar um produto para realizar o tratamento químico de modo automatizado.
- Garantir o funcionamento dos componentes do sistema atuando separadamente.
- Montar o protótipo e realizar testes em situação real.
- Validar o projeto comparando os resultados obtidos aos esperados.

1.3 JUSTIFICATIVA

A dificuldade para realizar manualmente o tratamento químico da água em uma piscina torna esse procedimento negligenciado. Visando a garantia de segurança dos banhistas, automatizar esse tratamento é uma ação prudente, que oferece maior proteção aos usuários e comodidade ao proprietário.

Como diferencial, o produto é compacto e de fácil instalação, sem a necessidade de adaptações significativas na piscina. Espera-se que esse tenha um valor menor ao consumidor que os sistemas com funções similares.

2 FUNDAMENTAÇÃO E CONCEITOS

Esta seção contém o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento desse projeto. Inicialmente, aborda-se o estudo realizado referente às características ideais da água utilizada em piscinas, em seguida são apresentadas as técnicas e tratamentos químicos existentes e, por fim, é exposto o conceito de controle que mais se adequa à situação e uma síntese do sistema desenvolvido.

2.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA DE PISCINAS

A água da piscina deve ser potável, pois existe a possibilidade de ela ser consumida, mesmo que em pequenas quantidades. Deve ser limpa, isenta de sujeira e detritos, como folhas e insetos. A sua superfície e o meio líquido aquoso devem ser transparentes e incolor e, quando houver sol, apresentar-se brilhante e cintilante. Deve estar quimicamente balanceada para que suas características químicas e físico-químicas estejam dentro de intervalos que não prejudiquem os banhistas e os equipamentos (MAIERÁ, 2009).

A água potável é aquela que pode ser usada para cozinhar, beber e lavar com segurança. Deve possuir parâmetros físicos, químicos, físico-químicos, bacteriológicos e radio-nucleares dentro de rígidos intervalos. A água potável não deve ter sabor, odor e conter temperatura agradável, ser incolor e transparente (BRASIL, 2011).

As leis e normas exigem uma água de piscina com absoluta pureza e isenta de microrganismos nocivos à saúde, mantendo os usuários longe de infecções. Deve se levar em conta materiais dissolvidos constituídos de matéria orgânica, como proteínas e óleos não solúveis em água, pois essas substâncias, além de sujar a água, diminuem a capacidade germicida dos desinfetantes (ABNT, 1989).

2.2 TRATAMENTO QUÍMICO

Para uma piscina limpa e saudável, é importante estar atento à duas partes da limpeza da piscina: o tratamento físico e o tratamento químico da água. O presente tópico trata do tratamento químico, sendo esse o objetivo do trabalho, que envolve basicamente o controle dos parâmetros químicos da piscina (cloro, pH, alcalinidade, entre outros).

2.2.1 Cloração

Os microrganismos vivos precisam ser eliminados para não crescerem e se multiplicarem. Desinfecção é nome do processo que elimina 99,99% dos microrganismos vivos. O cloro,

por suas diversas características, é o produto mais utilizado em todo o mundo para a desinfecção de águas para fins potáveis, industriais e recreacionais (LISBOA, 2010).

Quimicamente, o cloro, em condições normais de temperatura e pressão, é um gás de cor verde, altamente tóxico, cuja molécula é constituída por dois átomos de cloro. Sua fórmula molecular é Cl_2 (MAIERÁ, 2009). No tratamento de água de piscina o termo cloro refere-se sempre ao ácido hipocloroso, cuja fórmula molecular é HClO (ABNT, 1987).

Logo que é colocado na água, o cloro reage para formar o ácido hipocloroso, também chamado cloro livre. Existem diversos tipos de produtos que, adicionados à água, dão formação ao ácido hipocloroso (LISBOA, 2010). O ácido hipocloroso é o mais efetivo de todos os produtos clorados. A eficiência germicida do HClO se deve à relativa facilidade com que ele penetra nas paredes das células dos microrganismos e pode também ser atribuída ao seu baixo peso molecular e à ausência de cargas elétricas, ou seja, ele é eletricamente neutro quando da sua forma não dissociada (MAIERÁ, 2009).

Outras substâncias eventualmente presentes na água também reagem com o cloro livre, consumindo-o. Todas as substâncias presentes na água que consomem cloro livre (inclusive microrganismos) constituem o que se chama demanda de cloro. A quantidade de cloro livre que sobra na água após essas reações, ou seja, após atendida a demanda de cloro, é chamada de residual de cloro livre (LISBOA, 2010). Para água limpa, o residual de cloro livre estando entre 3 a 5 ppm (partes por milhão) proporcionam controle microbiano mais do que adequado para bactérias flutuantes em um tempo de contato muito curto (SUSLOW, 2004). Para água de piscina, a concentração do residual de cloro livre deve permanecer entre 1 e 3 ppm (MAIERÁ, 2009).

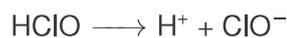
O consumo de cloro aumenta com o aumento da temperatura da água, pela ação dos raios ultravioleta do sol, pelo aumento da carga de banhistas, pela ocorrência de chuvas e vento, entre outras variáveis. O cloro possui várias vantagens que lhe garantem a condição de sanitizante mais usado para a desinfecção de piscinas. Contudo, o cloro também possui desvantagens, que podem ser evitadas se houver uma constante monitoração da água da piscina, auxiliada por testes periódicos (MAIERÁ, 2009). Algumas das mais pertinentes ao escopo deste trabalho são citadas a seguir:

O ser humano leva consigo para a piscina produtos nitrogenados, como urina, suor, células mortas da pele, óleos bronzadores etc., que, reagindo com o cloro numa reação de oxidação incompleta, produzem cloraminas. Exemplos de cloramina são a monocloramina (NH_2Cl) e a dicloramina (NHCl_2). Esta última é responsável por irritações nos olhos e nas mucosas. Seu efeito bactericida é mínimo, ou seja, tem eficiência sanitizante 80 a 100 vezes menor que a do cloro. A supercloração ou a oxidação periódica elimina ou atenua esse problema (MAIERÁ, 2009).

A descloração consiste em eliminar o excesso de cloro que ocorre na piscina, geralmente após processos de supercloração, ou por defeito no sistema automático de cloração ou por adição em excesso de cloro, por descuido. O ajuste do teor de cloro para menos de 3 ppm pode ser feito de duas maneiras. A primeira, para piscinas ao ar livre, quando não houver urgência e se a água não for estabilizada (contendo ácido cianúrico), o próprio sol se encarregará de eliminar o excesso de cloro. A segunda, para os demais casos, utiliza-se o sulfito de sódio (Na_2SO_3) ou tiosulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (MAIERÁ, 2009).

A maioria dos produtos clorados, por meio dos subprodutos gerados nas reações químicas com a água, alteram consideravelmente o pH. Essa desvantagem pode ser minimizada por um constante monitoramento do pH e mantendo-se a alcalinidade dentro dos padrões (MAIERÁ, 2009).

A dissociação do ácido hipocloroso é bastante afetada pelo pH da água e relativamente pouco afetada pela temperatura. A reação da dissociação é expressa por (MAIERÁ, 2009):



Quadro 1 – Dissociação iônica do ácido hipocloroso em função do pH.

pH	Porcentagem HClO	Porcentagem ClO ⁻
6,0	97%	3%
7,0	73%	27%
7,2	63%	37%
7,5	50%	50%
7,9	24%	76%
8,5	8%	92%

Fonte: (MAIERÁ, 2009)

No Quadro 1, tem-se do ponto de vista da sanitização que quanto menor for o pH, mais eficiente será o cloro. Mas, para evitar ou diminuir a corrosão nos equipamentos e a nocividade ao ser humano, o pH não deve ser inferior a 7,2 (ABNT, 1989).

Para maior eficiência na sanitização, deve-se observar o conjunto formado pelo pH e o teor de cloro livre. Uma grandeza que substitui este conjunto (pH e teor de cloro livre) é o ORP (potencial de óxido-redução), que é medido em mV (milivolt) (MAIERÁ, 2009).

2.2.2 Balanceamento Químico da Água - pH

O pH tem como definição formal o logaritmo do inverso da concentração de íons de hidrogênio de uma solução expressa em moles/litro. É uma medida do grau de acidez ou alcalinidade da água, representada numericamente por uma escala de 0 (zero) a 14 (ABNT, 1987). Segundo a ABNT (1989), o pH deve estar entre 7,2 e 7,8.

Como as concentrações de íons de hidrogênio são extremamente baixas, utiliza-se o cologaritmo para se chegar a uma escala maior e positiva (MAIERÁ, 2009).

No Quadro 2 é representado a mesma concentração de íons de hidrogênio de quatro formas diferentes para ilustrar a facilidade da escala adotada.

Quadro 2 – Escala de concentração de hidrogênio por litro.

Concentração adotada	0,00001 g/l
log 0,00001 g/l	-5,0
colog 0,00001 g/l	5,0
pH	5,0

Fonte: (MAIERÁ, 2009)

Escala de pH: É uma escala numérica apresentando valores entre 0 a 14. Solução ácida ($\text{pH} < 7$); básica ($\text{pH} > 7$); neutra ($\text{pH} = 7$) (FELTRE, 2004).

O pH é a característica físico-química mais importante para a água de piscina. A explicação para seus limites para água de piscina é devido ao fato de a pele, as mucosas, as conjuntivas entre outras partes do corpo humano, serem muito sensíveis aos níveis de pH. A sua importância é fundamental no processo de desinfecção quando o cloro é o desinfetante usado. O pH tem uma grande influência no balanceamento químico da água (MAIERÁ, 2009).

Quando se usa cloro como sanitizante, o pH deve estar entre 7,2 e 7,8. O pH igual a 7,0 é neutro, mas deve ser evitado, porque favorece a corrosão dos equipamentos da piscina. Componentes do corpo humano, como a lágrima e o sangue, tem o pH em torno de 7,4 e 7,5, ou seja, maiores que 7,0 (MAIERÁ, 2009).

A água com pH baixo, inferior a 7,2, se caracteriza por causar irritação aos olhos e às mucosas, por ocasionar maior perda do sanitizante devido a sua evaporação mais acelerada e por tornar-se corrosiva a metais, cimento e outros materiais. Essa corrosividade entretanto não depende só do pH, mas principalmente do índice de Langelier (MAIERÁ, 2009).

A água com pH alto, superior a 7,8, se caracteriza por também causar irritação aos olhos e às mucosas, ocasionar baixa eficiência no sanitizante (no caso, a eficiência do cloro), obrigando a um aumento no teor de cloro, com todas as implicações decorrentes e por formar carbonato de cálcio, que precipita, turvando a água, ou encrusta-se ou empedra a areia de filtros. A precipitação do carbonato de cálcio, além do pH, depende do índice de Langelier (MAIERÁ, 2009).

Existem formas passivas e/ou involuntárias das quais o pH da água é reduzido ou elevado, inclusive, a sanitização por cloro líquido causa elevação no pH. Para reduzir voluntariamente o pH da água, existem dois produtos principais: O ácido clorídrico, conhecido como ácido muriático, na concentração de 31,45% (20 Be) é corrosivo e agressivo o que requer cuidados

no manuseio e pelo fato de ser utilizado na produção de tóxicos sua venda é controlada. O bissulfato de sódio, na concentração de 93,20%, é mais caro e mais difícil de ser encontrado, porém seu manuseio é mais seguro. E, para elevar o pH da água de modo voluntário, o produto mais comum utilizado é o carbonato de sódio, conhecido como barrilha, e o bicarbonato de sódio para ajuste fino eleva ligeiramente o pH e, concomitantemente, a alcalinidade. O cálculo da correção do pH depende de fatores como o volume da piscina e a amplitude da correção do pH (diferença entre o nível atual e o nível ideal) (MAIERÁ, 2009).

2.2.3 Potencial De Oxido-Redução (ORP)

O potencial de oxido-redução, também conhecido como REDOX, é a medida do nível de oxidação em milivolts (mV), feita por um medidor ORP (*Oxidation Reduction Potential*). O potencial de óxido-redução é uma indicação de desinfecção da água da piscina. Algumas normas internacionais, entre elas a alemã (não as brasileiras), especificam o potencial de óxido-redução como indicador de qualidade de desinfecção e deve ser superior a 650 mV. O potencial de óxido-redução depende do tipo de desinfetante e de sua concentração, mas também dependem de outros fatores como do pH e da temperatura da água (MAIERÁ, 2009).

Uma vantagem primária da utilização de ORP para a monitorização do sistema de água é que proporciona ao operador uma avaliação rápida e de valor único do potencial de desinfecção da água num sistema pós-tratamento. O operador pode avaliar a atividade do desinfetante aplicado em vez da dose aplicada. Segundo a pesquisa, a quadro 3 mostra que a um valor de ORP de 650 a 700 mV, que algumas bactérias em especial as bactérias patogênicas tais como *E. coli O157: H7* ou espécies de *Salmonella* são mortas dentro de 30 segundos. A levedura de deterioração e os tipos mais sensíveis de fungos formadores de esporos também são mortos a este nível após um tempo de contato de poucos minutos (SUSLOW, 2004).

Quadro 3 – Sobrevivência de microrganismos em relação ao indicador ORP. Resumo do resultado de vários estudos de simulação de laboratório e de hidroenergia comercial.

Patógeno Indicador	<485 mV	550< x < 620 mV	> 665 mV
E. coli O157:H7	>300 s	<60 s	<10 s
Salmonella spp.	>300 s	>300 s	<20 s
Listeria monocytogenes	>300 s	>300 s	<30 s
Thermotolerant coliform	>48 h	>48 h	<30 s

Fonte: (SUSLOW, 2004)

A manutenção de um indicador seguro de ORP acomodará as demandas de desinfecção em piscinas, melhorando a qualidade da água e beneficiando a saúde dos nadadores. Níveis acima de 650 mV são considerados eficazes para o indicador ORP (BRONDUM, 2009).

2.3 BASE DE CÁLCULO PARA AS CORREÇÕES DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Cloro: A escala de teor de cloro dos comparadores padrão nacionais, a base de cálculo é para 1 ppm (parte por milhão), é composta dos seguintes valores:

$$0,5 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 3,0 - 5,0 \text{ ppm}$$

O cálculo da quantidade de cloro necessária para aumentar em 1 ppm o teor de cloro livre de um volume de $1m^3$ é mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Quantidade de cloro necessária para aumentar em 1 ppm o teor de cloro em 1 metro cubico de água de piscina.

Tipo	Cloro Ativo	Quantidade
Gás Cloro	100%	$1,0g/m^3$
Cloro Líquido	10%	$10,0g/m^3$
Cloro Granulado	65%	$1,5g/m^3$
Dicloro	62%	$1,6g/m^3$
Tricloro	90%	$1,1g/m^3$

Fonte: (MAIERÁ, 2009)

pH: A base de cálculo é para 0,2 na unidade de escala numérica do pH. A escala de pH dos comparadores-padrão nacionais é composta dos seguintes valores:

$$6,8 - 7,2 - 7,4 - 7,6 - 7,8 - 8,2$$

O ácido clorídrico (HCl), chamado comercialmente de ácido muriático, é utilizado como redutor de pH. O cálculo, com concentração de 31,45%, da quantidade é feito para reduzir o pH em 0,2 (dois décimos de unidade) é mostrado no Quadro 5.

Quadro 5 – Quantidades de ácido clorídrico (HCl) por metro cúbico de água de piscina para redução de pH.

pH	Acrescentar
De 7,8 para 7,6	$6,0ml/m^3$
De 8,0 para 7,6	$7,0ml/m^3$
De 8,2 para 7,6	$13,0ml/m^3$
De 8,4 para 7,6	$20,0ml/m^3$

Fonte: (MAIERÁ, 2009)

O bissulfato de sódio ($NaHSO_4$), também chamado de ácido seco, também é utilizado como redutor de pH. O cálculo, com pureza de 93,2%, da quantidade é feito para baixar o pH em 0,2 (dois décimos de unidade) é mostrado no Quadro 6 na próxima página.

O carbonato de sódio (Na_2CO_3), também conhecido como barrilha, é usado para elevar o pH. O cálculo da quantidade de barrilha é feito para aumentar o pH em 0,2 (dois décimos de unidade) numa piscina para cada $1m^3$ é mostrado no Quadro 7 na página seguinte.

Quadro 6 – Quantidades de bissulfato de sódio (NaHSO_4) por metro cúbico de água de piscina para redução de pH.

pH	Acrescentar
De 7,8 para 7,6	$7,8\text{g}/\text{m}^3$
De 8,0 para 7,6	$15,6\text{g}/\text{m}^3$
De 8,2 para 7,6	$23,4\text{g}/\text{m}^3$
De 8,4 para 7,6	$31,2\text{g}/\text{m}^3$

Fonte: (MAIERÁ, 2009)

Quadro 7 – Quantidades de carbonato de sódio (Na_2CO_3) por metro cúbico de água de piscina para elevação de pH.

pH	Acrescentar
De 7,4 para 7,6	$5,0\text{g}/\text{m}^3$
De 7,2 para 7,6	$7,0\text{g}/\text{m}^3$
De 7,0 para 7,6	$13,0\text{g}/\text{m}^3$
De 6,8 para 7,6	$20,0\text{g}/\text{m}^3$

Fonte: (MAIERÁ, 2009)

2.4 TÉCNICAS DE DESINFECÇÃO EXISTENTES

Nesta seção são apresentadas as principais técnicas encontradas na literatura para o tratamento químico da água de uma piscina, didaticamente são mostradas suas vantagens e desvantagens.

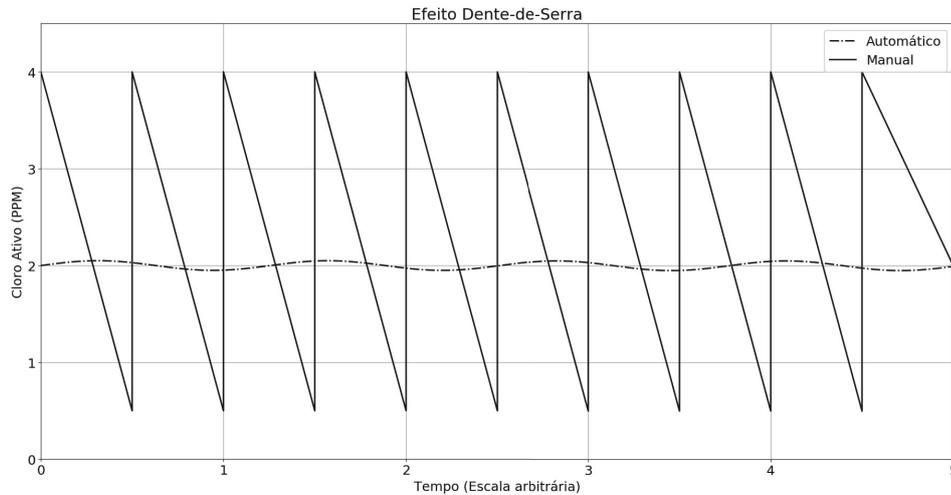
Na água da piscina ocorrem grandes oscilações nas concentrações de produtos químicos, principalmente com os sanitizantes. Essas oscilações são maiores exatamente entre o momento imediatamente anterior e imediatamente posterior à adição do sanitizante. Quanto maior for o intervalo entre as adições de produtos químicos, maior será a oscilação na concentração dos sanitizantes. Essa variação de concentração de produtos químicos, chamada efeito dente-de-serra, é apresentada graficamente no Gráfico 1 na próxima página.

2.4.1 Desinfecção Manual

Consiste basicamente em adicionar produtos químicos e realizar testes físico-químicos manualmente. Os produtos químicos são adicionados na forma líquida ou em solução aquosa e raramente utilizados na forma sólida. É necessário pelo menos um operador para introduzi-los na piscina. A introdução é realizada a partir da borda da piscina e pela superfície (MAIERÁ, 2009).

A única vantagem é não possuir nenhum investimento inicial. Já as desvantagens são o elevado custo de mão-de-obra, a exposição do operador a fumos e vapores de produtos químicos quase sempre tóxicos, o fato de a introdução de produtos químicos só pode ser realizado na ausência de banhistas, maior consumo de produtos químicos em relação aos processos semi

Gráfico 1 – Efeito dente-de-serra da variação da concentração do sanitizante cloro de acordo com o método de introdução manual e automático em função do tempo.



Fonte: (MAIERÁ, 2009), Adaptado.

ou totalmente automatizados, oscilações bruscas nas concentrações de produtos químicos, principalmente sanitizantes, no momento da manutenção (MAIERÁ, 2009).

2.4.2 Desinfecção Semi-Manual

Esta é uma classificação puramente didática. Embora esta fase represente algum avanço em relação a fase totalmente manual, ele ainda é muito pequeno. Este avanço é representado por flutuadores que contem em seu interior pastilhas de tricloro e flutuam na superfície da piscina, liberando cloro gradativamente (MAIERÁ, 2009).

As principais vantagens são o fato da quantidade de cloro introduzida na piscina poder ser regulada, mantendo assim piscinas desativadas dentro dos padrões por mais tempo e quando utilizado pastilhas de Tricloro, que é um cloro estabilizado, tem-se economia para piscinas ao ar livre em dias ensolarados (MAIERÁ, 2009).

As principais desvantagens são o fato de ter que ser utilizado na ausência de banhistas e de que os testes de propriedades físico-químicas da água permanecem manuais (MAIERÁ, 2009).

2.4.3 Desinfecção Semi-Automática

A introdução semiautomática pode ser feita das seguintes maneiras:

Pode ser introduzido na forma granulada ou através de pastilhas que, geralmente, ficam no interior de um recipiente colocado na tubulação de retorno, e água, ao passar pelo interior do equipamento, pelo processo de erosão, introduz o produto químico na piscina (MAIERÁ, 2009).

Ou, na forma de líquidos, produtos químicos líquidos ou sólidos dissolvidos em água são introduzidos na piscina na tubulação de retorno por bombas que possuem pressão suficiente para vencer a pressão da tubulação de retorno. Essas bombas possuem a regulação para introduzir a quantidade necessária de produto químico. As bombas bombeiam a solução de recipientes que contem essas soluções. Na forma de gás, o gás é introduzido na tubulação de retorno por meio de injetores de Venturi e sua quantidade pode ser regulada (MAIERÁ, 2009).

As principais vantagens são o fato de os produtos químicos poderem ser adicionados a piscina na presença de banhistas, pois é feita em menores concentrações e a facilidade em se regular a introdução de produtos químicos (MAIERÁ, 2009).

As principais desvantagens são o preço elevado em relação a introdução manual, a necessidade de controle e regulação manual e teste físico-químicos ainda necessários e manuais (MAIERÁ, 2009).

2.4.4 Desinfecção Automática

É a fase mais avançada. Nela, podem-se ter vários graus de sofisticação. Caracteriza-se pela introdução dos produtos químicos e pelas medições das propriedades físico-químicas da água automaticamente; qualquer correção é feita também automaticamente. Entretanto ainda é necessário um operador para calibração de medidores e dosadores e reabastecimento dos tanques de produtos químicos (MAIERÁ, 2009).

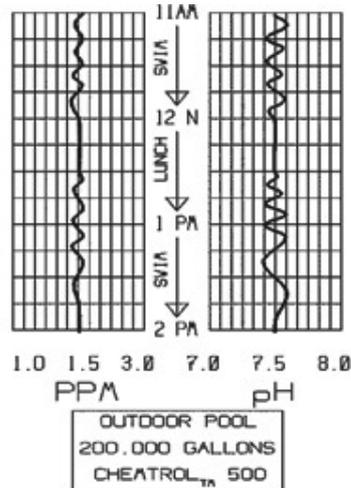
Embora estes aparelhos possam ser usados para a adição de vários produtos, na prática, são usados somente para o controle do teor de sanitizante e do pH, sempre em forma líquida ou em soluções aquosas. Para sinalizar alguma irregularidade, os aparelhos devem conter alarmes, que podem ser sonoros e/ou visuais. Aparelhos mais sofisticados podem registrar em gráfico as variações das propriedades físico-químicas da água em função do tempo, bem como medir a alcalinidade, a dureza e o teor de ácido cianúrico na água (MAIERÁ, 2009).

As principais vantagens estão na redução de mão-de-obra e produtos químicos, têm-se também que os parâmetros físico-químicos da água permanecem ajustados e praticamente não sofrem variação. E a desvantagem consiste no maior custo de implantação (MAIERÁ, 2009).

A figura 1 na página seguinte, expõe o comportamento de uma piscina ao ar livre (*outdoor pool*) de aproximadamente 757 mil litros de água das onze da manhã até as duas da tarde. Pode-se observar que a escala representa 0,1 (1 décimo de unidade) para ambas as escalas e que a automação manteve durante todo este período tanto a concentração de cloro quanto o nível de pH dentro de aproximadamente $\pm 0,1$ unidade do valor desejado.

Na prática, a introdução automática de produtos químicos torna possível utilizar menos produtos químicos de uma forma mais eficiente. Portanto, não é mais um luxo, mas uma obrigação para todas as piscinas comerciais e spas, bem como uma característica popular para

Figura 1 – Registro de Cloro e Níveis de pH com Automação.



Fonte: (STEININGER, 1990), Adaptado.

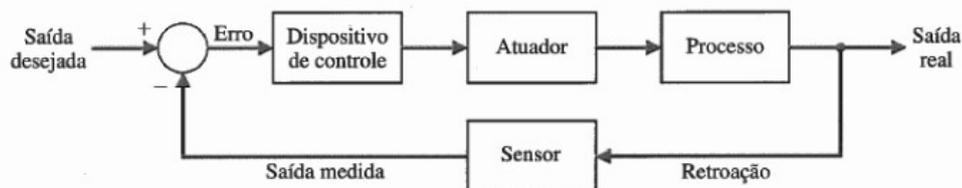
instalações residenciais (STEININGER, 1990). É na introdução de produtos químicos na piscina onde a automação tem seu grande campo de aplicação, conforme evidenciado nos Gráficos 1 na página 20 e 1 (MAIERÁ, 2009).

2.5 CONCEITOS DE CONTROLE

2.5.1 Sistema de Controle em Malha Fechada

O termo controle em malha fechada sempre implica o uso de ação de controle de realimentação para reduzir o erro do sistema. Em um sistema de controle de malha fechada, o sinal erro de atuação, é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e seus derivados e/ou integrais), é alimentado para o controlador de modo a reduzir o erro e trazer a saída do sistema para um valor desejado (OGATA, 2010).

Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema com retroação negativa descrevendo um sistema de controle básico em malha fechada.

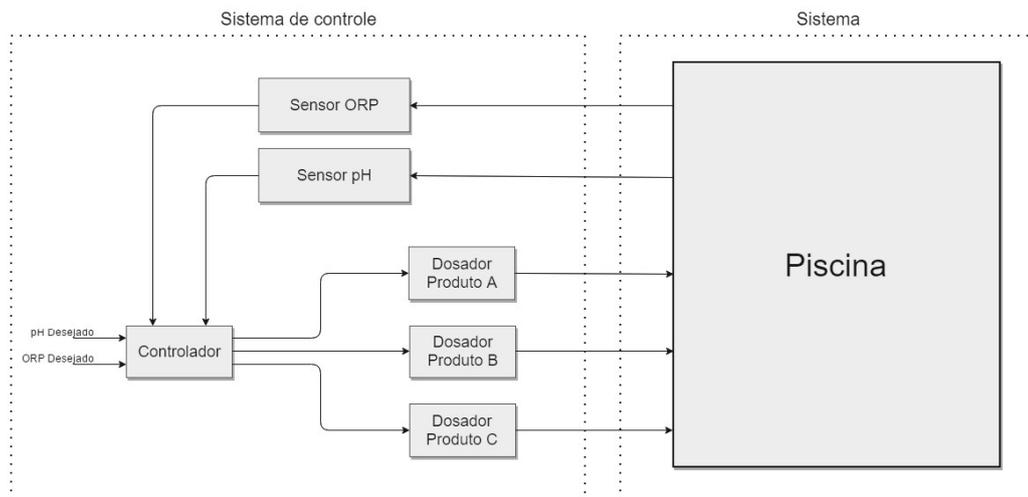


Fonte: (DORF; BISHOP, 2001).

O processo de tratamento da água da piscina é um sistema em malha fechada de

saída lenta, após realizada a manutenção o sistema necessita de um tempo de estabilização para homogeneizar os produtos químicos, de forma que medir a saída imediata do sistema não corresponde ao seu estado atual. O diagrama de blocos do sistema em malha fechada desse projeto é apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de blocos do sistema de malha fechada



Fonte: Autoria própria.

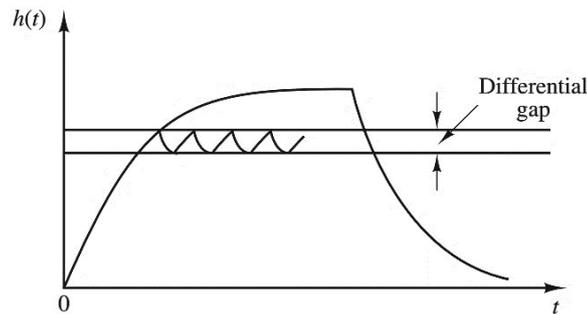
Uma vantagem dos sistemas de controle a malha fechada é o fato de que o uso da retroação torna a resposta do sistema relativamente insensível a perturbações externas e as variações internas de parâmetros do sistema. É, portanto, possível a utilização de componentes baratos e sem muita exatidão para obter o controle preciso de um determinado processo, o que é impossível com o controle a malha aberta (DORF; BISHOP, 2001).

O conceito de sistema de malha fechada com o controlador do tipo *ON-OFF* se adequa bem à situação, pois trata-se de sistema de controle com correção lenta, sendo desnecessário a implementação de outros controladores de grande uso na indústria, tais como PI, PD, PID, entre outros.

2.5.2 Controlador do tipo *ON-OFF*

Um sistema de controle de duas posições é adequado para sistemas onde as mudanças na carga ocorrem lentamente e o processo é de ação muito lenta. Num sistema de controle do tipo "*ON-OFF*" (Gráfico 2 na página seguinte), o elemento de acionamento tem apenas duas posições fixas, que são, em muitos casos, simplesmente ligadas e desligadas. O controle deste tipo é relativamente simples e barato e, por essa razão, é muito utilizado tanto em sistemas de controle industriais como domésticos (OGATA, 2010).

Gráfico 2 – Curva do sinal $h(t)$ ao longo do tempo (t) para um sistema genérico.



Fonte: (OGATA, 2010), Adaptado.

O gráfico 2 é uma resposta genérica, $h(t)$ que pode representar tanto o indicador de pH quanto o de cloro. Nota-se que a amplitude da oscilação de saída pode ser reduzida diminuindo o intervalo diferencial. A diminuição no intervalo diferencial, no entanto, aumenta o número de comutações *ON-OFF* por unidade de tempo e reduz a vida útil do componente. A magnitude do espaço diferencial deve ser determinada a partir de considerações como a precisão necessária e a vida do componente (OGATA, 2010). Para esse trabalho, serão definidos dois intervalos de diferenciais, um para o pH e outro para ORP, e uma ordem de prioridade de forma que o pH seja ajustado primeiro e depois o ORP, devido a eficiência da desinfecção pelo cloro depender do indicador de pH.

2.6 ESCOPO DO PRODUTO

Em gerenciamento de projetos, o escopo do produto são os recursos e as funções que caracterizam um produto, serviço ou resultado. É o que o produto deve atender para ser aceito (PMBOK, 2017). Baseado nos capítulos anteriores, serão definidos as características, funcionalidades e especificações do produto desse projeto. De modo a atender as necessidades do usuário, que busca confiabilidade a um baixo custo.

Características: Em vez de instalações no sistema hidráulico, presente na automação tradicional, o produto a ser desenvolvido será portátil e de fácil instalação, capaz de realizar o tratamento da água sem abrir mão da segurança e da eficiência.

Funcionalidades: Monitorar os indicadores de pH e cloro e realizar correções - aplicações de produtos - quando necessário são as funcionalidades básicas desse sistema. No momento da instalação, haverá uma forma simples para o usuário inserir os dados relativos à sua piscina, dimensões e/ou quantidade de litros, na fase de testes (protótipo) esse recurso não estará

disponível, sendo fixado um valor de 27 mil litros de água para a base de cálculo.

Quando instalado, deverá ficar a aproximadamente 1.0 m da borda da piscina, preferencialmente nas proximidades do ralo. O sistema consiste de uma caixa principal, responsável pela aquisição de dados, processamento e atuação, e dois canos saindo paralelamente da caixa com sentido a piscina para realizar a circulação da água. O produto será composto por elementos hidráulicos, elétricos e eletrônicos que serão melhor detalhados no Capítulo 3 na página seguinte. E, irá realizar o controle do processo conforme exposto na Seção 2.5 na página 22.

Especificações: Garantir que os indicadores de cloro e pH permaneçam dentro de intervalos considerados ideais, os quais foram abordados nas Seções 2.2.1 na página 13 e 2.2.2 na página 15.

Tais intervalos são:

Cloro - 1 a 3 ppm.

pH - 7.2 a 7.8, levemente básico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta e explica os materiais utilizados na confecção desse projeto, uma vez que a criação do produto foi avançando de etapa, alguns materiais citados anteriormente foram substituídos. Os motivos para essas trocas, assim como a metodologia de montagem do protótipo e seus testes também serão abordados.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Sensores

Um sensor é um dispositivo capaz de detectar/captar ações ou estímulos externos e responder em consequência. Estes aparelhos podem transformar as grandezas físicas ou químicas em grandezas elétricas.

3.1.1.1 Eletrodo de pH

O eletrodo de pH é um instrumento utilizado para medir o pH da água. O pH é a unidade de medida que descreve o grau de acidez ou alcalinidade e é medido em uma escala que vai de 0 a 14 (Seção 2.2.2 na página 15). No Quadro 8 são apresentadas as especificações técnicas mínimas necessárias de eletrodo de pH.

Quadro 8 – Especificações técnicas mínimas necessárias para eletrodo de pH necessária para o projeto.

Faixa de medição	0 – 14	pH
Ponto zero	7	pH
Erro	$\leq 0,2$	pH
Temperatura de operação	15 – 40	$^{\circ}C$

Fonte: Fonte: Autoria própria

O eletrodo de pH, na Fotografia 1 na página seguinte, também chamado de eletrodo combinado de pH, no sentido mais básico, é uma bateria de célula única muito simples com uma resistência muito alta, onde a diferença de potencial produzida é proporcional à concentração de íons de hidrogênio em torno dos eletrodos. O que significa que quando a concentração é maior em um eletrodo e menor no outro, o fluxo de íons induzirá uma ligeira diferença de potencial entre os eletrodos internos, esta diferença de potencial pode variar tanto para positiva quanto para negativa o que indicará um ácido ou uma base.

A construção do eletrodo composto de pH consiste em 2 eletrodos, o eletrodo utilizado neste projeto é caracterizado na 9 na próxima página, um em solução de KCL e outro em baixa concentração de HCL. O eletrodo interno de "detecção"(ânodo) é cercado por um bulbo de vidro

Fotografia 1 – Eletrodo de pH, eletrodo combinado do tipo sonda.



Fonte: Autoria própria

especial que permite que os íons se movimentem livremente e o outro eletrodo (cátodo) é selado do eletrodo de "detecção" e é considerado de referência. Ambos são conectados por um plugue cerâmico poroso (ou fibra de quartzo) que forma uma ponte de sal com a solução de teste. Esta ponte é o que forma uma célula galvânica e cria a bateria simples de célula única fechando um circuito. A diferença de potencial entre os eletrodos nos diz a concentração da solução de teste e em qual eletrodo a concentração está ativada. Para cada passo de pH, vemos uma mudança de concentração de dez vezes, por exemplo, um pH de 8 tem um décimo da atividade iônica de um pH de 7.

Quadro 9 – Parâmetros técnicos do eletrodo de pH.

Composição dos eletrodos	Ag/AgCl(s)
Tensão de aquecimento	$5,00 \pm 0,20V$
Corrente de trabalho	$5 - 10mA$
Erro Alcalino	$\leq 15mV$
Resistência interna	$\leq 250M\Omega$
Gama de concentrações detectáveis	$pH\ 0 - 14$
Ponto zero	$pH\ 7$
Repetibilidade	$\leq 0,017$
Faixa de Temperatura de detecção	$0 - 80^{\circ}C$
Tempo de resposta	$\leq 5s$
Tempo de estabilização	$\leq 60s$
Componente De Energia	$\leq 0,50W$
Temperatura de trabalho	$-10 \sim 50^{\circ}C$ (Nominal : $20^{\circ}C$)
Umidade	$95\%HR$ ($65\%HR_{nominal}$)
Tipo de sinal de saída	Sinal analógico de tensão

Fonte: Fonte: Manual do produto, adaptado

A seguir são enumeradas algumas das características do eletrodo de pH ideal necessárias para projeto. Um ponto importante a ter em mente são os intervalos de saturação do

eletrodo, de pH 1 e inferior, são considerados saturados de forma ácida, o que significa que as concentrações são tão elevadas que não podemos realmente afirmar medidas com precisão. O mesmo se aplica para as gamas alcalinas, porém em cerca de pH 12 ocorrendo saturação rapidamente bloqueando medidas de pH 13 e acima.

1. Para pH 7 a saída do eletrodo é $0mV$, para pH menor que 7 as diferenças de potencial são positivas, para pH maior que 7 as diferenças de potencial são negativas;
2. A extensão total de pH é de 0(ácido forte) até 14(base forte);
3. Dependendo da temperatura a diferença de potencial gerada por unidade de pH varia de aproximadamente $-54mV \equiv 0^{\circ}C$ até aproximadamente $-74mV \equiv 100^{\circ}C$, vide Quadro 10 na página seguinte e Gráfico 3 na página 30.
4. Se o eletrodo gera $-59 mV/pH$ então a extensão efetiva é de aproximadamente $\pm 7 * 59 mV$ ou $[-414mV \equiv pH14, 0mV \equiv pH7, 414mV \equiv pH0]$.

3.1.1.2 Cálculos Teóricos - pH

Na eletroquímica, a equação de Nernst é uma equação que relaciona o potencial de redução de uma reação eletroquímica (reação de meia-célula ou célula completa) ao potencial elétrico, temperatura e atividades padrão do eletrodo (muitas vezes aproximado por concentrações) das espécies químicas em redução e oxidação (ORNA, 1989) e é utilizada como base para a formulação da Equação 1.

$$E(T, pH) = \frac{R * T}{n * F} * 2,302 * pH \quad (1)$$

Onde, E é a diferença de potencial entre os dois eletrodos em volts, R é a constante universal dos gases ($8,314 J K^{-1} mol^{-1}$), T a temperatura em *Kelvin*, F a constante de Faraday ($96487 C mol^{-1}$) e n a carga elétrica transferida na reação (no caso da reação do pH, $n = +1$). Aplicando os valores obtemos a Equação 2:

$$E(T(K), pH) = 198,357 * 10^{-6} * T * pH$$

$$pH(T(K), E) = \frac{E}{198,357 * 10^{-6} * T} \quad (2)$$

$$pH(T(^{\circ}C), E) = \frac{E}{198,357 * 10^{-6} * (T + 273,15)}$$

A partir da equação 2 na página anterior podemos extrair a equação do Passo (step), Equação 3, para isso utilizamos o valor da variável pH igual a 1 e obtemos o valor de tensão por unidade de pH.

$$\begin{aligned} \text{Passo}(T(K)) &= E(T(K), 1) = 198,357 * 10^{-6} * T \\ \text{Passo}(T(^{\circ}C)) &= 198,357 * 10^{-6} * (T + 273,15) \end{aligned} \quad (3)$$

Quadro 10 – Variação de tensão por unidade de pH de acordo com a variação da temperatura

Kelvin (K)	Celsius ($^{\circ}C$)	Passo (mV)
273,15	0,00	0.05418121455
278,15	5,00	0.05517299955
283,15	10,00	0.05616478455
288,15	15,00	0.05715656955
293,15	20,00	0.05814835455
298,15	25,00	0.05914013955
303,15	30,00	0.06013192455
308,15	35,00	0.06112370955
313,15	40,00	0.06211549455
318,15	45,00	0.06310727955
323,15	50,00	0.06409906455

Fonte: Fonte: Autoria própria

Tem-se pela a equação de reta de pH com coeficiente linear definido pela equação 3, ilustrados pelo Quadro 10 e Gráfico 3 na página seguinte.

3.1.1.3 Eletrodo De Potencial De Oxido-Redução (ORP)

O eletrodo de potencial de oxido-redução é um instrumento utilizado para medir o potencial de oxirredução. No Quadro 11 são apresentadas as especificações técnicas mínimas necessárias para o eletrodo de ORP.

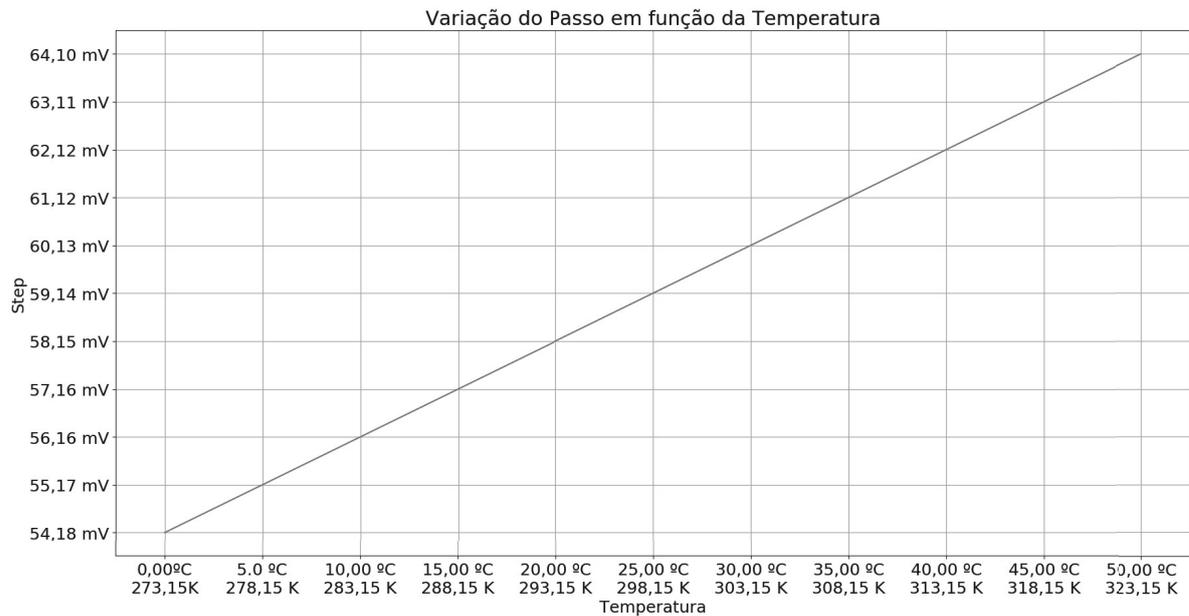
Quadro 11 – Especificações técnicas mínimas necessárias para o eletrodo de ORP para o projeto.

Faixa de medição	$\geq 650 \text{ mV}$
Ponto zero	0 mV
Erro	$\leq 30 \text{ mV}$
Temperatura de operação	$15 - 40 \text{ }^{\circ}C$

Fonte: Fonte: Autoria própria

O eletrodo de ORP, Fotografia 2 na página seguinte, também chamado de eletrodo combinado de ORP, no sentido mais básico, é uma bateria de célula única muito simples com uma

Gráfico 3 – Gráfico da variação do Passo (step) em função da temperatura.



Fonte: Autoria própria

Fotografia 2 – Eletrodo de ORP, eletrodo cominado



Fonte: Autoria própria

resistência muito alta, onde a diferença de potencial produzida é proporcional à concentração de íons em torno dos eletrodos. O que significa que quando a concentração é maior em um eletrodo e menor no outro, o fluxo de íons induzirá uma ligeira diferença de potencial entre os eletrodos internos, esta diferença de potencial pode variar tanto para positiva quanto para negativa.

Este eletrodo se diferencia do eletrodo de pH por conta da seletividade na questão em que o eletrodo de pH é seletivo a íons de hidrogênio enquanto o eletrodo ORP é seletivo a reação de oxido redução mais dinâmica presente no sistema.

Quadro 12 – Parâmetros técnicos da eletrodo ORP.

Composição dos eletrodos	Platina(s) – Ag/AgCl(s)
Faixa de Temperatura de detecção	0 – 80 °C
Tempo de resposta	5 s
Nível de deriva	$\leq \frac{2}{24} \frac{mV}{hours}$
Precisão de medição	$\leq 1 mV$
Tipo de sinal de saída	<i>Sinal analógico de tenso</i>
Faixa de medição	-1999 mV – +1999 mV

Fonte: Manual do produto, adaptado

O eletrodo composto ORP é feito de platina de alta pureza, com forte resistência à capacidade ácida e alcalina e antioxidante, tem alta precisão, resposta rápida e boa estabilidade. A ponte de sal de eletrólito Ag/AgCl e o gel é composto por um sistema de referência com um potencial de meia-célula estável e excelentes propriedades antipoluição, o anel diafragma de politetrafluoroetileno não é fácil de bloquear e possui detecção ativa de longo prazo.

3.1.1.4 Cálculos Teóricos - ORP

O cloro sofre reações de oxidação semelhantes à do pH, mas, infelizmente, a química do cloro é mais complicada porque o cloro pode entrar em muitas reações diferentes, tais como:



e,



A diferença de potencial desenvolvida em um eletrodo de platina é expressa pela equação 4, chamada de Equação de Nernst.

$$E = \frac{R * T}{n * F} * \log_{10} \left(\frac{Oxidante}{Redutor} \right) \quad (4)$$

onde, E é a diferença de potencial entre os dois eletrodos em volts, R é a constante universal dos gases ($8,314 J K^{-1} mol^{-1}$), T a temperatura em Kelvin, F a constante de Faraday (96487

$C \text{ mol}^{-1}$) e n a carga elétrica transferida na reação (no caso das reações mencionadas, $n = +2$) (PAREJA, 1996).

Os cálculos teóricos de ORP são bastante complexos, especialmente para produtos químicos como o cloro que possuem uma química complicada. Os cálculos teóricos podem, portanto, ser usados apenas para modelagem e não para derivações reais de valores ORP. Da equação 4 na página anterior e assumindo que existem dois elétrons envolvidos na equação de redução de oxidação. Para HOCl, pode-se derivar uma expressão teórica para o ORP de Cloro Livre:

$$E = E_0 + 30 * \log_{10} \left(\frac{[\text{HOCl}][\text{H}^+]}{[\text{Cl}^-]} \right) \quad (5)$$

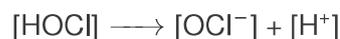
Esta equação mostra concordância geral com a tendência das medidas experimentais de ORP para cloro livre descritas em (PAREJA, 1996).

O último termo mostra os efeitos dos íons cloreto que permanecem bastante constantes em água clorada e, portanto, não afetam muito as medidas ORP.

O segundo termo mostra que as leituras de ORP a pH constante variam em aproximadamente 30 mV para cada década de variação de HOCl. Isto é muito inferior às medidas reais que mostram uma variação de cerca de 100 mV por década de HOCl a um pH de 7,5. Isso indica que existem reações de oxidação de HOCl com diferentes estequiometrias, resultando em menos de um elétron por reação.

O próximo termo confirma a diminuição da ORP para aumentar os valores de pH.

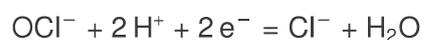
O efeito real do pH é realmente mais forte do que o indicado acima porque também afeta a proporção de HOCl e OCl^- através do equilíbrio de ionização, conforme mostrado no Quadro 1 na página 15.



A reação tem a constante de equilíbrio K_{HOCl} , a pH 7,5 e 25 °C, explicitada na Equação 6.

$$K_{\text{HOCl}} = \frac{[\text{OCl}^-][\text{H}^+]}{[\text{HOCl}]} * 5,6 * 10^{-8} * 10^{-7,5} \quad (6)$$

Mostrando a distribuição de 50% das duas espécies a um pH de 7,5 (Quadro 1 na página 15). O HOCl sofre sua própria reação de oxidação:



A expressão para Cloro Livre Total é, portanto:

$$[PPM]=[HOCl]+[OCI^-]$$

Levando a Equação 7:

$$\log_{10}[HOCl] = \log_{10}[PPM] - \log_{10} \left[1 + \frac{K}{10^{-pH}} \right] \quad (7)$$

E, finalmente, em termos de cloro livre total temos a Equação 8:

$$ORP = E = E_0 + 30 * \log_{10}[PPM] - 30 * pH - 30 * \log_{10} \left[1 + \frac{10^{-7,5}}{10^{-pH}} \right] - 30 * \log_{10}[Cl^-] \quad (8)$$

Isolando PPM, temos:

$$\log_{10}[PPM] = \frac{E - E_0}{30} + pH + \log_{10} \left[1 + \frac{10^{-7,5}}{10^{-pH}} \right] + \log_{10}[Cl^-] \quad (9)$$

No Anexo A na página 76 está disposto uma tabela dos valores destas equações.

O último termo na equação representa a concentração de íons de cloro e permanece praticamente constante. O resto da equação mostra a variação geral de ORP com o registro da concentração livre de cloro e com o pH. Em geral, está de acordo com os dados experimentais, como mostrado nos Gráficos 4 na próxima página e 5 na página 35.

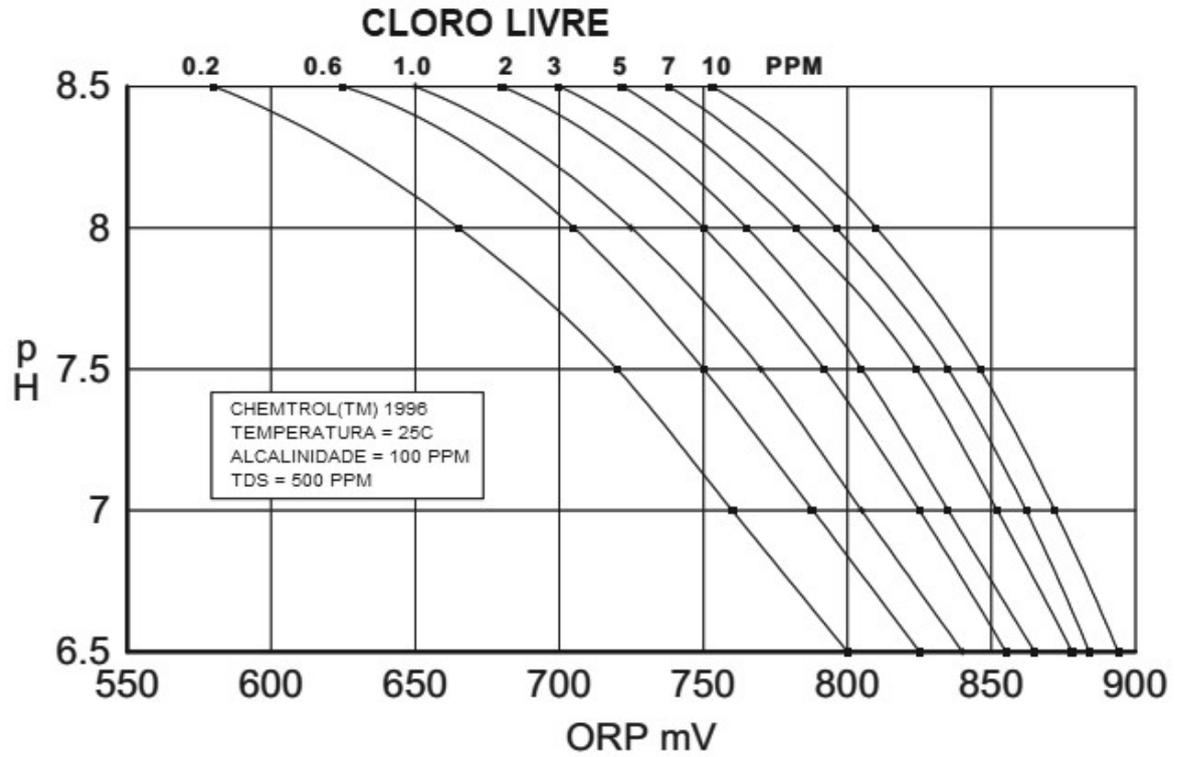
3.1.2 Circuito amplificador de sinal

Essa aplicação necessita de medições realizadas a partir de eletrodos. Esses eletrodos, por sua vez, necessitam de condicionamento de sinal para que o dispositivo de aquisição de dados efetue a medição digital. As tecnologias de condicionamento de sinal fornecem melhorias no que diz respeito ao desempenho e à exatidão de sistemas de aquisição de dados. São utilizados amplificadores, pois estes aumentam o nível de tensão para ampliar a faixa que o conversor analógico para digital (ADC) atua, aumentando assim a resolução e sensibilidade da medição. Além disso, a utilização de condicionadores de sinal externos localizados perto da fonte do sinal, ou transdutor, melhora a relação sinal-ruído, pois amplia o nível de tensão antes de ser afetado pelo ruído ambiental. Portanto o objetivo do circuito é amplificar e condicionar o sinal do eletrodo de forma que a resolução se enquadre na resolução ADC do microcontrolador.

Na Fotografia 3 na próxima página é mostrado o circuito integrado (IC, *integrated circuit*) utilizado para amplificar e condicionar o sinal dos eletrodos para a resolução do ADC do microcontrolador, Figura 4 na página 36. Ele também possui um circuito sensor de temperatura, Figura 5 na página 36, e um circuito comparador de tensão, Figura 6 na página 37.

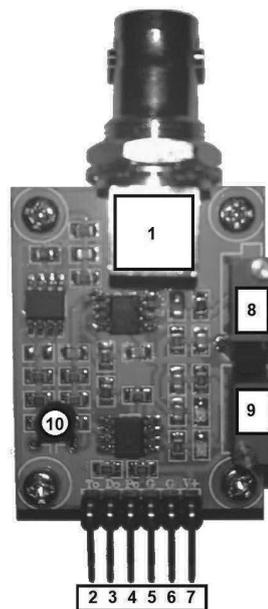
1. *BNC*: Conector onde se coloca eletrodo;

Gráfico 4 – Variação ORP em função das concentrações de cloro livre e dos níveis pH, 2D.



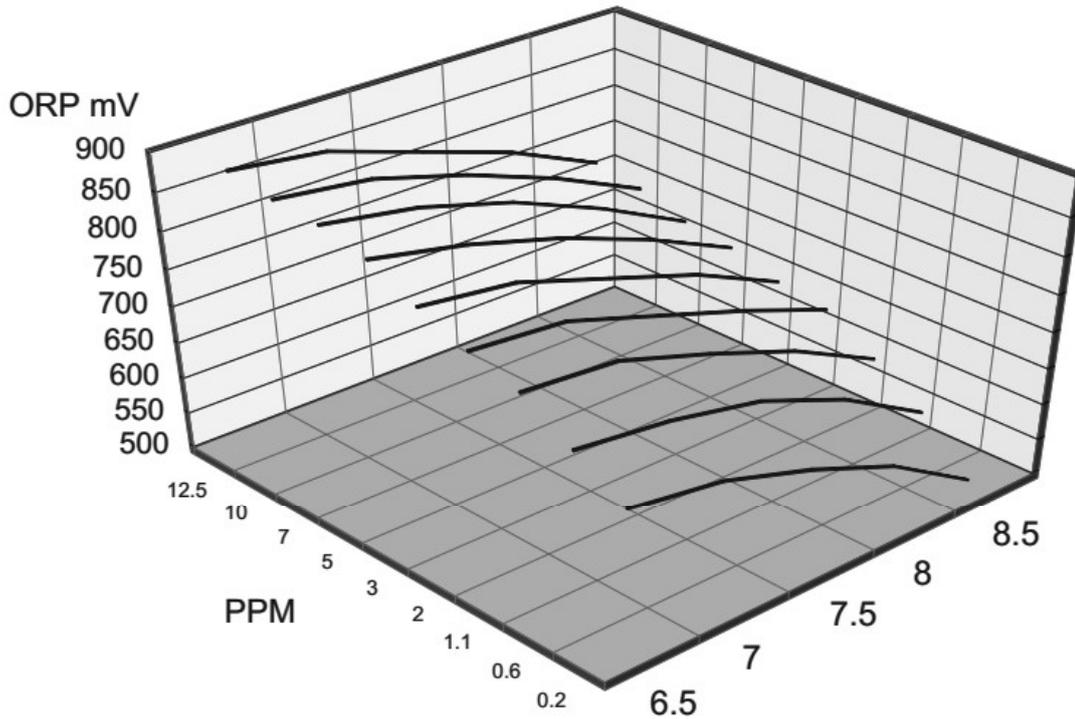
Fonte: (PAREJA, 1996)

Fotografia 3 – Circuito Amplificador de Sinal



Fonte: Autoria própria

Gráfico 5 – Variação ORP em função das concentrações de cloro livre e dos níveis pH, 3D.

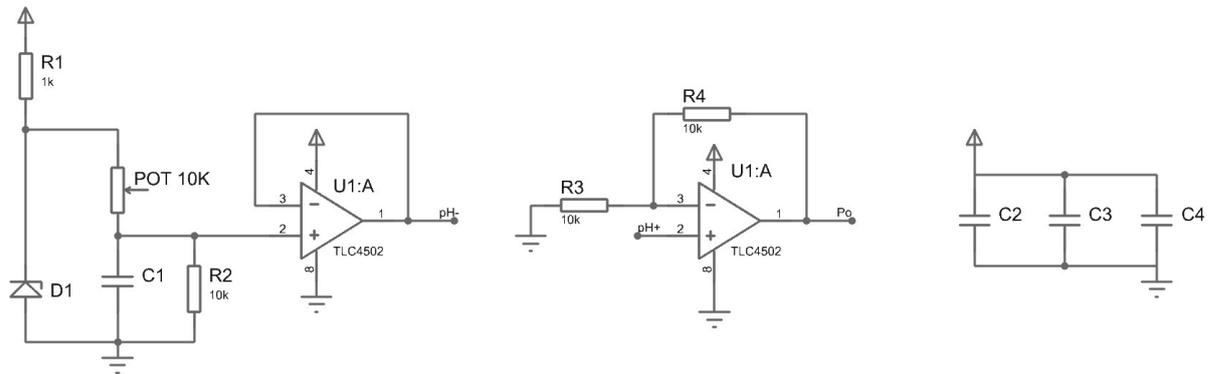


Fonte: (PAREJA, 1996)

2. T_o : Pino de saída da leitura de temperatura;
3. D_o : Pino de saída, *High/Low* de 3,3V, do comparador de tensão;
4. P_o : Pino de medição do eletrodo;
5. G : Terra da eletrodo. É útil quando o GND do eletrodo não é o mesmo do microcontrolador;
6. G/GND : Terra;
7. $V + /V_{cc}$: 5V;
8. *Potenciometro*: (azul, próximo ao BNC) Para compensação de medida (*offset*);
9. *Potenciometro*: (azul, próximo aos pinos) Para ajuste do limiar do comparador de tensão;
10. *Termistor*: Para medição de temperatura.

O primeiro circuito possui duas funções. A primeira é aplicar a *offset*, que nada mais é que elevar a tensão de forma que todos os valores medidos sejam maiores que zero, e segunda é a sua calibragem no potenciômetro. O segundo circuito recebe a tensão do terminal pH^+ (Catodo

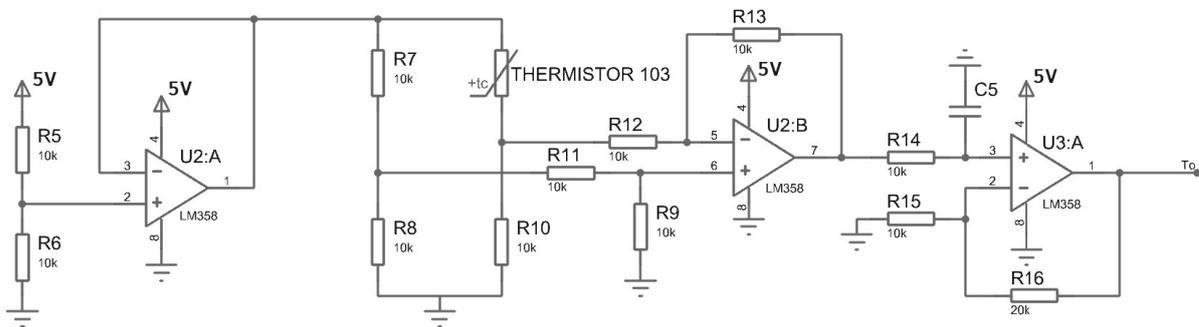
Figura 4 – Circuito amplificador e condicionador de sinal.



Fonte: Autoria própria

do eletrodo, no caso do eletrodo ORP) e aplica um ganho e apresenta o sinal na saída P_o que será enviada ao conversor A/D do microcontrolador. O terceiro circuito é composto de 3 capacitores em paralelo cuja função é filtrar oscilações de tensão.

Figura 5 – Circuito sensor de temperatura.

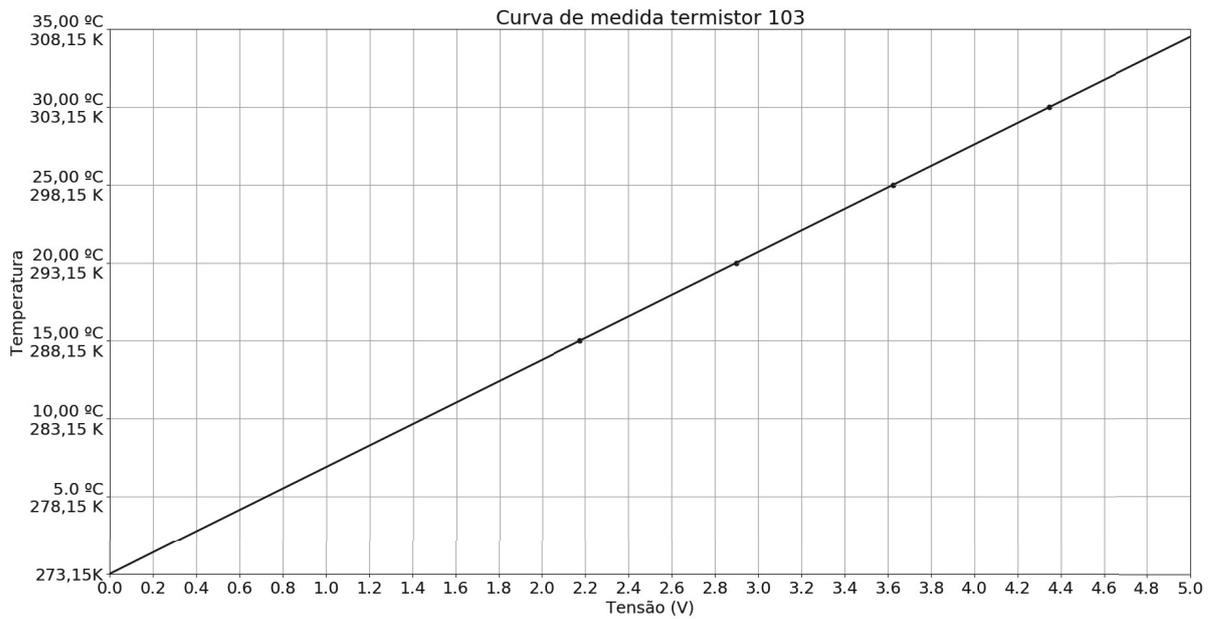


Fonte: Autoria própria

Na Figura 5 temos o circuito responsável por medir a temperatura necessária para o cálculo da equação 3 na página 29, a temperatura é medida no termistor 103, representado pelo número 10 na Fotografia 3 na página 34, em variação de resistência e condicionado para variação de diferença de potencial em T_o conforme mostrado no Gráfico 6 na página seguinte.

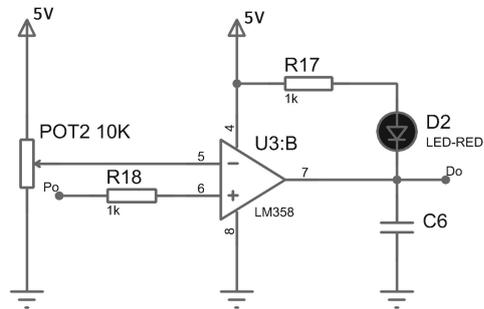
Na Figura 6 na próxima página temos o circuito comparador de tensão, nele se define uma tensão limiar no potenciômetro, na Figura nomeado como $POT2$, e na Fotografia 3 na página 34 numerado em 9. Quando a tensão medida em P_o é maior que a tensão limiar a saída D_o é ajustada para 3,3V e o LED vermelho é aceso.

Gráfico 6 – Curva termistor.



Fonte: Autoria própria

Figura 6 – Circuito comparador de tensão.



Fonte: Autoria própria

3.1.2.1 Sinal de pH Condicionado

O objetivo do condicionamento do sinal é:

$$\text{Sinal Original} \implies \text{Sinal Condicionado pelo circuito} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & [(-414mV \equiv pH14), (0mV \equiv pH7), (+414mV \equiv pH0)] \\ & \rightarrow [(0mV \equiv pH14), (2,5V \equiv pH7), (5V \equiv pH0)] \end{aligned} \quad (11)$$

E assim as equações 2 na página 28 também devem ser recondicionada para a nova

resolução, recebendo uma variável λ de calibração e um *offset* para que todos os valores de tensão medidos sejam positivos.

$$\begin{aligned} pH(T(K)) &= \frac{E}{198,357 * 10^{-6} * T * \lambda} + \textit{offset} \\ pH(T(^{\circ}C)) &= \frac{E}{198,357 * 10^{-6} * (T + 273,15) * \lambda} + \textit{offset} \end{aligned} \quad (12)$$

3.1.2.2 Sinal De ORP Condicionado

Ao final deste processo temos:

$$\textit{Sinal Original} \implies \textit{Sinal Condicionado pelo circuito} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} &[0mV - 900mV] \\ \rightarrow &[0,000V - 5,000V] \end{aligned} \quad (14)$$

E assim a Equação 8 na página 33 também deve ser recondicionada para a nova resolução, recebendo uma variável λ de calibração e um *offset* para que todos os valores de tensão medidos sejam positivos.

$$ORP + \textit{offset} = (E_0 + 30 * \log_{10}[PPM] - 30 * pH - 30 * \log_{10} \left[1 + \frac{10^{-7,5}}{10^{-pH}} \right] - 30 * \log_{10}[Cl^-]) * \lambda \quad (15)$$

3.1.2.3 Calibração do Circuito

A determinação dos valores de λ e de *offset* é denominado calibração e seus valores são característicos de cada eletrodo e não são definitivos, portanto sendo necessário recalibração. A calibração é dividida nos dois parâmetros e conseqüentemente em calibração *offset* e calibração λ .

3.1.2.4 Calibração Offset para a eletrodo de pH

O *offset* é o deslocamento de todos os valores de pH para uma faixa de tensão específica, geralmente o valor de *offset* é ajustado para 2,5V pois coincide o meio da escala pH, pH 7, com o meio da escala do conversor AD, 2,5V, garantindo o maior número de medidas coincidentes nas duas escalas. O *offset* deverá mover a diferença de potencial do pH 7 para

2,5V tendo assim sempre para o valor de $7 * Passo$. Portanto se pH 7 gerar uma diferença de potencial 2,2V e pH 8 uma diferença de potencial de 2,1V, então um *offset* de +0,3V moverá o pH 7 para 2,5V e o pH 8 para 2,4V, este exemplo utiliza valores apenas para demonstrar a linearidade do sistema e portanto podendo divergir em escala do comportamento real. Isso pode ser feito no circuito, através no potenciômetro de *offset*.

Para realização do *offset* no circuito, deve-se:

1. Conectar ambos terminais *GND* e *V_{cc}* ao *GND* e a uma fonte de 5V.
2. Remover o eletrodo e curto circuitar os terminais *pH⁺* e *pH⁻* no circuito (terminais da eletrodo no circuito, conector BNC).
3. Então deve-se utilizar um voltímetro para medir a tensão entre *GND* e *Po*.
4. Deve-se ajustar o potenciômetro (circuito fechado) até que a saída seja 2,5V.

Assim garantindo que o pH 7 tenha o valor exato de 2,5V (511 na função de leitura analógica na resolução do ADC de 10 bits) porque a leitura do eletrodo produzirá 0V.

3.1.2.5 Calibração λ para o eletrodo de pH

Nesta etapa é necessária uma ou mais soluções tampão. Idealmente, deve-se conhecer o alcance da medida que se deseja fazer com o seu sistema. Se for água entre pH 5 e pH 7, então recomendasse o tampão de 4.01. Se serão medidos valores de pH entre 8 e 10 também será necessário o tampão de 9.18. Em todos os casos utiliza-se o tampão de pH 6.86 para verificação. A seguir são enumerados os passos para o processo de calibração.

1. Conecta-se o eletrodo (limpo) ao circuito.
2. Coloca-se o eletrodo na solução tampão e espera estabilização, aproximadamente um minuto.
3. É considerado estável quando a variação é constante, podendo essa variação variar de acordo com a qualidade do sistema (qualidade do eletrodo, ruído, etc.).
4. Conecta-se um multímetro aos pinos *Po* e *GND* (Leitura de pH).
5. Anota-se a leitura.
6. Conecta-se um multímetro aos pinos *To* e *GND* (Leitura de temperatura).
7. Anota-se a leitura.

Tem-se então a relação entre a tensão lida pelo conversor A/D e o pH tampão. Utilizando de dois tampões é possível projetar uma equação de reta a partir de dois pontos que descreve o comportamento da variação de pH medida pelo eletrodo.

$$\begin{aligned} F(x) &= Ax + B \\ pH(E) &= A * E + B \end{aligned} \quad (16)$$

Onde $F(x)$ é o valor de pH, para a temperatura de calibração, e x é a tensão lida no eletrodo. Sendo a Equação 16 o valor do real do eletrodo porém somente na temperatura de calibração, fazendo assim necessário uma relação que considere a temperatura no instante de uso. O cálculo λ é bastante simples, adicionando os valores de λ e *offset* a Equação 2 na página 28 e substituindo a temperatura (T) pela temperatura de calibração (T_c) e realizando comparação polinomial com a Equação 16. Este cálculo é apresentado nas Equações 17, 18 e 19.

$$pH(T(^{\circ}C), E) = \frac{E}{198,357 * 10^{-6} * (T_c + 273,15) * \lambda} + \text{offset} = A * E + B \quad (17)$$

Onde λ e *offset* são as variáveis características de diferença entre o eletrodo ideal e o eletrodo real, sendo esta original de cada eletrodo. Temos então:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{198,357 * 10^{-6} * (T_c + 273,15) * \lambda} \\ B &= \text{offset} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{1}{198,357 * 10^{-6} * (T_c + 273,15) * A} \\ \text{offset} &= B \end{aligned} \quad (19)$$

Faltando apenas substituir os valores de λ e *offset* na Equação 20. Assim obtendo a medida final em unidade de pH na escala de acordo com a precisão da calibração e levando em consideração a temperatura. A curva do eletrodo real é quase linear, mas longe de perfeita e pode conter um lado mais linear do que o outro, portanto é recomendado usar duas ou mais

soluções tampão no processo de calibração.

$$pH(T(^{\circ}C), E) = \frac{E}{198,357 * 10^{-6} * (T + 273,15) * \lambda} + offset \quad (20)$$

3.1.2.6 Calibração Offset para o eletrodo ORP

Como os valores de ORP já são positivos, não é necessário um valor de *offset*, portando sendo sua calibração opcional a critério da precisão desejada.

3.1.2.7 Calibração λ para o eletrodo de ORP

Como já explicado para a calibração λ da sonda de pH, são necessárias soluções tampão, porém no caso da calibração λ da sonda ORP essas soluções são na verdade amostras certificadas da solução alvo. Sendo assim, deve-se preparar soluções de calibração com as seguintes características.

1. O pH deve ser constante.
2. A concentração de cloro livre deve ser conhecida, portanto medida por outro meio confiável.
3. É recomendando o mínimo de uma solução de teste para cada duas soluções de calibração.
1. Após preparadas as soluções de calibração, a calibração segue como a calibração λ da sonda de pH.
2. Conecta-se o eletrodo (limpa) ao circuito.
3. Coloca-se o eletrodo na solução de calibração e aguardar a estabilização.
4. Conecta-se um multímetro a *Po* e *GND* (Leitura de ORP), aqui referenciado como multímetro A.
5. Anota-se a leitura.
6. Conecta-se outro multímetro as pontas do eletrodo (antes do circuito amplificador de sinal), aqui referenciado como multímetro B.
7. Anota-se a leitura.

Tem-se então como parâmetros conhecidos o indicador ORP, o pH e a concentração de cloro livre e como parâmetro lido o indicador ORP fornecido pela sonda. A calibração é considerada satisfatória quando a discrepância é de até $30mV$, sendo quanto menor melhor e razoavelmente constante entre as diferentes soluções de calibração. Deve-se encontrar o valor

de λ que mantém o valor do multímetro A igual ao multímetro B, ou seja, eliminando o ganho do circuito amplificador através de software. Portando o fator de λ para o eletrodo de ORP é a proporção entre a tensão de entrada e a tensão de saída do circuito amplificador de sinal.

3.1.3 Bomba Hidráulica

As bombas hidráulicas, também conhecidas como bombas de deslocamento positivo ou bombas de recalque, são dispositivos que fazem o fluido se mover isolando um volume determinado deste e aplicando força (deslocando) este volume isolado para o bocal de descarga (MATTOS, 1998). Possuem como princípio de funcionamento a força centrífuga criada através de palhetas e impulsores que giram no interior de uma carcaça fixa, jogando fluido do centro para a periferia do conjunto girante.

A bomba hidráulica é o equipamento mais utilizado para bombear fluidos nos edifícios residenciais, na indústria em geral, na irrigação, no saneamento básico e em piscinas, transferindo fluidos de um local para outro.

A entrada do fluido na bomba é chamada de sucção, onde a pressão pode ser inferior ou superior à atmosférica e a saída do fluido da bomba é chamada de recalque.

As bombas utilizadas são classificadas em centrífugas. São compostas de um disco dotado de palhetas acoplado ao eixo rotativo do motor, o qual recebe fluido pelo seu centro e o expulsa pela periferia, com a ação da força centrífuga. Este tipo de bomba é o mais utilizado, principalmente para o transporte de água.

A Fotografia 4 na página seguinte mostra a bomba escolhida, a bomba hidráulica SI 5000 presente no trabalho anterior foi substituída devido a sua característica não portátil, ou seja, grandes dimensões e peso elevado, além do seu acionamento ser a 110V. As bombas utilizadas possuem acionamento de 12V.

3.1.4 Display

Em todos os projetos em que se é necessário a interação entre homem e máquina se faz necessário um meio de comunicação entre os mesmos, e os displays em geral são formas da máquina enviar informações de forma visual ao homem. A definição de um display de cristal líquido, acrônimo de LCD (do inglês *liquid crystal display*), é um painel fino usado para exibir informações por via eletrônica.

O display LCD alfanumérico 20x4 é um modelo vastamente utilizado em projetos onde se necessita uma interface homem-máquina (IHM) de fácil implementação. Nos Quadros 13 e 14 são detalhadas as informações necessárias para sua implementação.

Na Figura 7 na página 44 está ilustrado o circuito para uso do LCD apresentado, também

Fotografia 4 – Bomba de recalque.



Fonte: Autoria própria

Fotografia 5 – Display LCD 20x4 modelo 2004 com Luz de fundo Azul



Fonte: Autoria própria

Quadro 13 – Especificação dos pinos do LCD 20x4.

Pino	Função
V_{SS}	<i>GND</i> : Pino de referência negativa ou terra do LCD
V_{dd}	5V: Pino de referência positiva do LCD (4.7V – 5.3V)
V_0	<i>Contraste</i> : Controle do contraste do LCD, geralmente ligado ao um potenciômetro.
<i>RS</i>	<i>Register Select</i> : Alterna entre "Instruction mode" e "Character mode"
<i>RW</i>	<i>Read/Write</i> : Alterna entre modo Leitura (1) e modo escrita (0)
<i>E</i>	<i>Enable</i> : Envia dados para os pinos quando uma borda de descida ocorre.
$D0 - D7$	<i>Data</i> : Pinos de dados, podendo funcionar em 8-bits ou em 4-bits ($D4 - D7$)
<i>A</i>	<i>Anode</i> : Pino de alimentação da luz de fundo (5V)
<i>K</i>	<i>Catode</i> : Pino de alimentação da luz de fundo (<i>GND</i>)

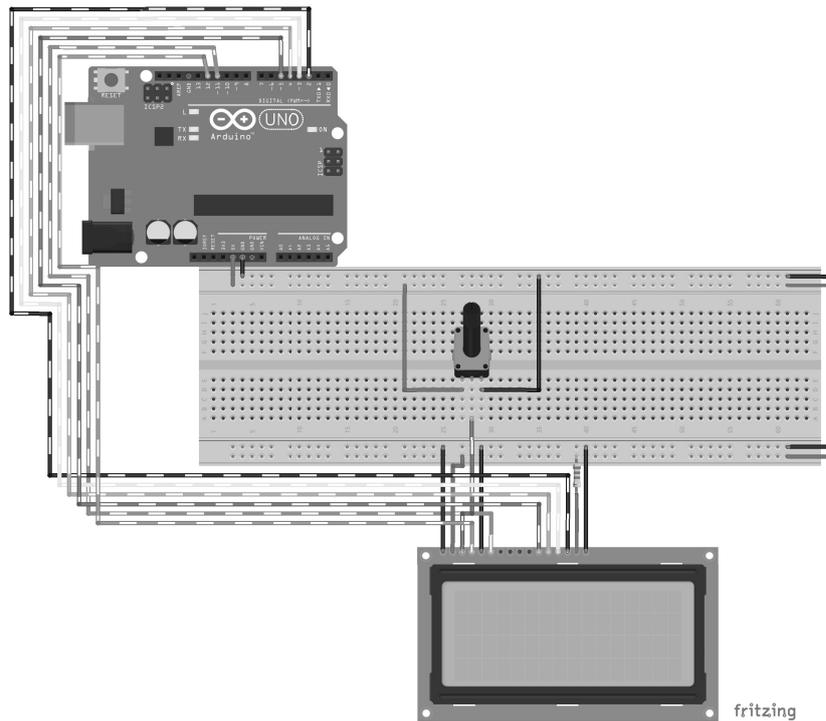
Fonte: Autoria própria

Quadro 14 – Especificações do *display*.

Controlador	HD44780
Dimensão de exibição	4 linhas x 20 Caracteres
Tensão de operação	4,5 – 5,5V _{CC}
Aparência	Fundo Azul e Caracteres Brancos
Dimensões físicas	98mm x 60mm x 14mm

Fonte: Autoria própria

Figura 7 – Esquemático do circuito elétrico do LCD.



Fonte: Autoria própria

deve funcionar para outros LCDs que possuem o controlador HD44780. Os fios hachurados representam fios de transmissão de dados, os fios lisos na cor vermelha representam fios de alimentação (5V) e os fios lisos na cor preta representam fios terra (GND). O potenciômetro utilizado é de 10K Ω e o resistor no pino anodo é de 220 Ω . As linhas energizadas no *protoboard* estão destacadas em verde, as demais não estão sendo utilizadas. Ainda na figura, os pinos utilizados no Arduino e suas ligações em relação aos do LCD são explicitados no Quadro 15 a seguir:

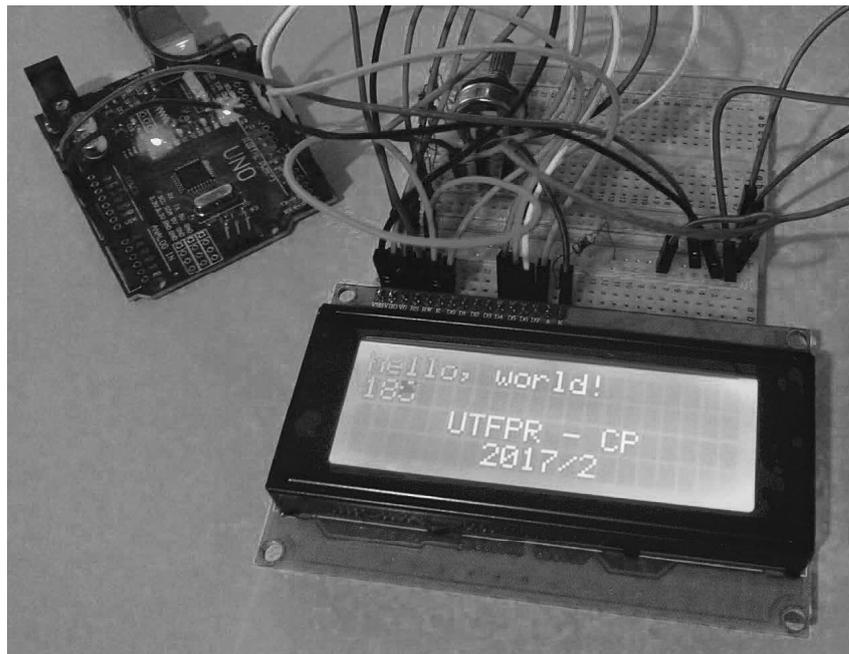
Após montado o circuito é necessário programar o Arduino para mostrar uma mensagem no LCD. Dentro da IDE do Arduino existem vários exemplos prontos, porém para fins de teste será utilizado o "HelloWorld". Na Fotografia 6 na página seguinte é mostrado o circuito em conjunto com código exemplo funcionando.

Quadro 15 – Relação de pinos entre o Arduino e o LCD.

Pino no microcontrolador	Pino no LCD
12	<i>RS</i>
11	<i>E</i>
5 – 2	<i>D4 – D7</i>

Fonte: Autoria própria

Fotografia 6 – Circuito e código exemplo em funcionamento.



Fonte: Autoria própria

3.1.5 Microcontrolador

Um microcontrolador é um computador em um único chip. Ele possui um processador, memória e periféricos de entrada e saída (Pinos I/O) (ARDUINO, 2017). É responsável por tratar os dados recebidos pelas sondas e controlar os dosadores.

Na Figura 8 é mostrado o esquemático eletrônico entre o microcontrolador, a sonda de pH, a sonda ORP, o LCD e os atuadores. Deste esquemático foi produzido o PCB da Figura 9, de dimensões 68 milímetros de comprimento por 50 milímetros de altura. O produto final pode ser visto nas Fotografias 8 e 9, na Fotografia 10 é mostrado como o PCB é montado sobre o microcontrolador Arduino.

3.1.6 Fonte Eletrônica Estabilizada

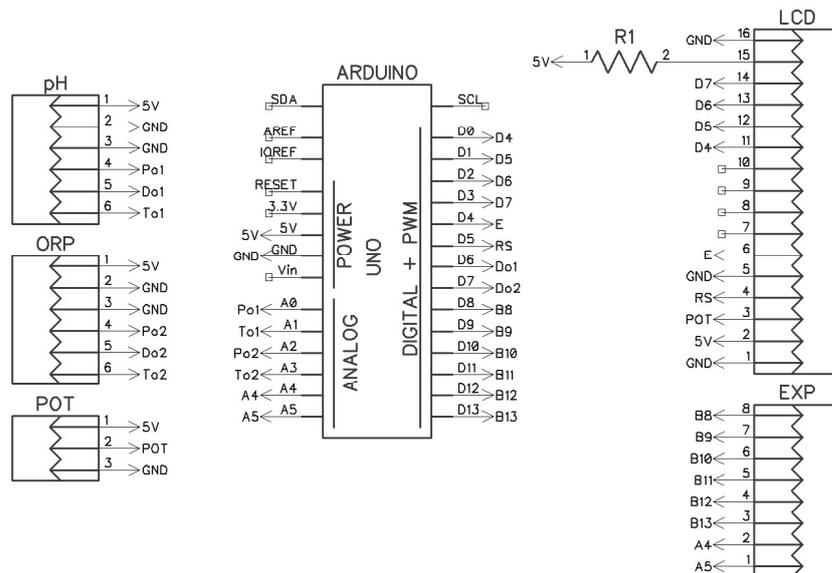
A Fonte eletrônica estabilizada tipo colmeia é um produto para uso diverso e foi escolhida devido a seu formato e tamanho lhe permite instalação discreta e eficiente, por ser capaz de

Fotografia 7 – Microcontrolador Arduino Uno



Fonte: (ARDUINO, 2017)

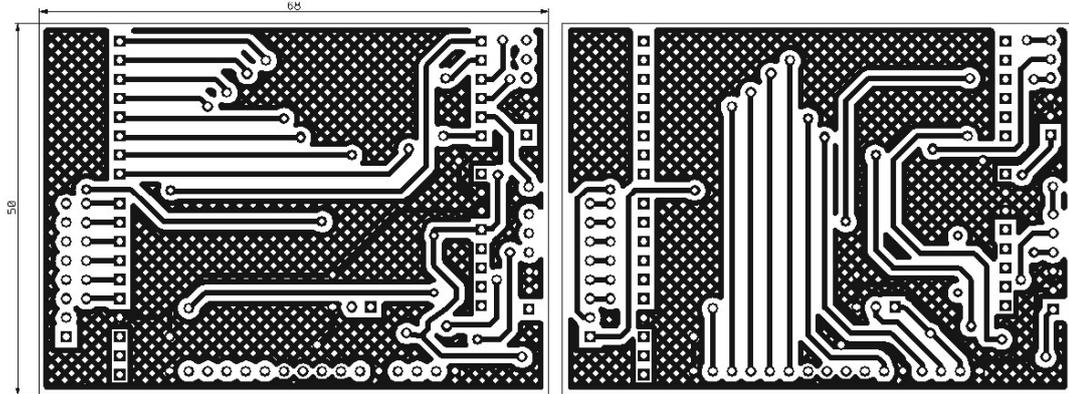
Figura 8 – Esquemático microcontrolador.



Fonte: Autoria própria

enviar energia para grandes distâncias além de proteger o sistema contra interferências e quedas de tensão, além de possuir instalação simples e não necessitar de conectores especiais. No Quadro 16 na próxima página são enunciadas as Especificações técnicas da fonte e ela é

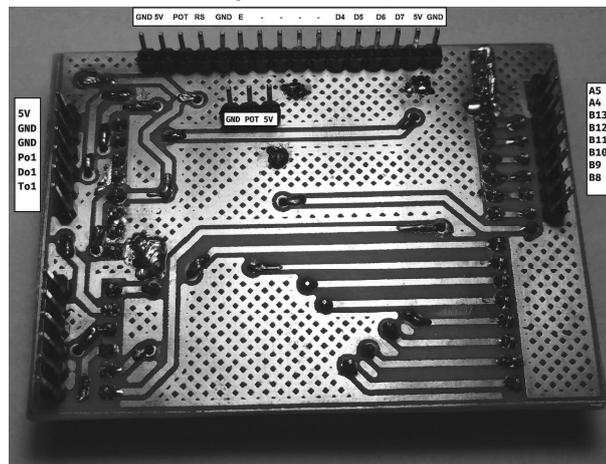
Figura 9 – PCB microcontrolador



Escala em milímetros.

Fonte: Autoria própria

Fotografia 8 – PCB microcontrolador - Face superior.



Fonte: Autoria própria

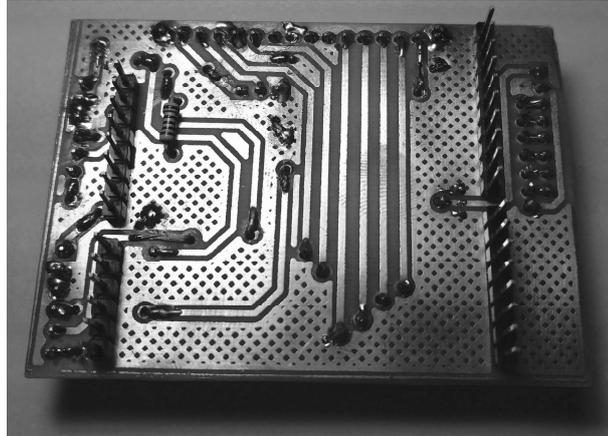
mostrada na Fotografia 11 na página 49.

Quadro 16 – Especificações técnicas fonte.

Tensão de alimentação (AC)	100V ou 240V - 50/60Hz (Seletor manual)
Tensão máxima de saída (CC)	12V
Corrente máxima de saída	10A
Fusível de proteção independente contra sobrecargas.	
Proteção contra curto circuito nas saídas.	
Saída de tensão totalmente estabilizada.	
Conexão por borne.	

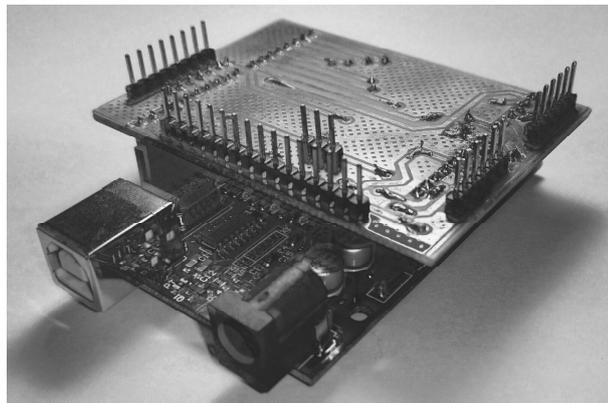
Fonte: Datasheet, adaptado

Fotografia 9 – PCB microcontrolador - Face posterior.



Fonte: Autoria própria

Fotografia 10 – PCB em conjunto com o microcontrolador.



Fonte: Autoria própria

3.1.7 Módulo Relé

O módulo é equipado com transistores, conectores, leds, diodos e 2 relés. Cada canal possui um LED para indicar o estado de acionamento do relé. As especificações técnicas são mostradas no Quadro 17 na próxima página e o módulo pode ser visto na Fotografia 12 na página seguinte.

3.1.8 Instrumentos de Medição de Volume de Líquidos

Os instrumentos de medição de volume de líquidos são necessários para a validação de dosagens e deslocamento de volumes de água e produtos utilizados na dosagem. Conforme mostrando na Fotografia 13 na página 50, são utilizados beakers de 50 ml, 100 ml, 250 ml, 400 ml e 600 ml. Para se obter ainda mais precisão também é utilizada uma proveta de 500 ml com graduação de 5 ml e erro associado de 2, 5 ml, Fotografia 14 na página 50. Os instrumentos de

Fotografia 11 – Fonte eletrônica estabilizada.



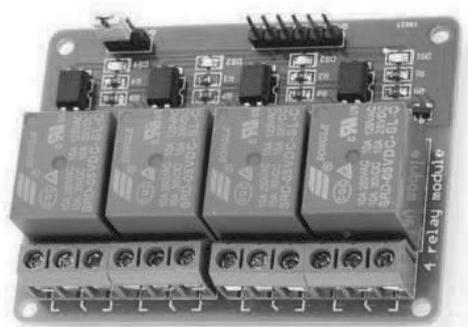
Fonte: Autoria própria

Quadro 17 – Especificações técnicas do módulo relé.

Modelo	SRD-05VDC-SL-C
Tensão de operação	$5V_{DC}$
Corrente típica de operação	$15 - 20mA$
Pinagem	Normal Aberto, Normal Fechado e Comum
Tensão de saída	$(30V_{DC} \text{ a } 10A)$ ou $(250V_{AC} \text{ a } 10A)$
Tempo de resposta	$5 - 10ms$
Dimensões	$51 \times 38 \times 20 \text{ mm}$
Peso	$30g$
Furos de $3mm$ para fixação nas extremidades da placa	
Permite controlar cargas de $220V_{AC}$	
LED indicador de status	

Fonte: Datasheet, adaptado

Fotografia 12 – Modulo de acionamento com quatro relés de $5V$ de acionamento.



Fonte: Autoria própria

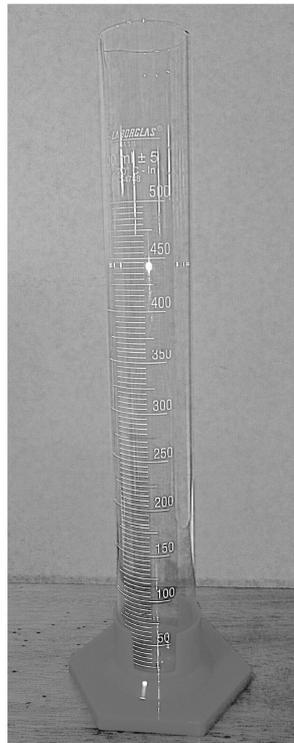
medição de volume garantem um alto grau de precisão para os valores validados.

Fotografia 13 – Beckers de 50 a 600 ml.



Fonte: Autoria própria

Fotografia 14 – Proveta de 500 ml.



Fonte: Autoria própria

3.1.9 Componentes Hidráulicos

Conceitos e componentes hidráulicos tem importância medular nesse sistema. Foram utilizados canos de PVC, curvas, cotovelos e registros de 1/2 polegada. Além de uma válvula de poço roscável, mostrada na Fotografia 15, que suporta pressão de 7,5 Kgf/cm, e três reservatórios de água automotivos, com capacidade aproximada de 1,5 litro, exibido na Fotografia 17 na página 57.

Fotografia 15 – Válvula de poço roscável.



Fonte: Autoria própria

3.2 MÉTODOS

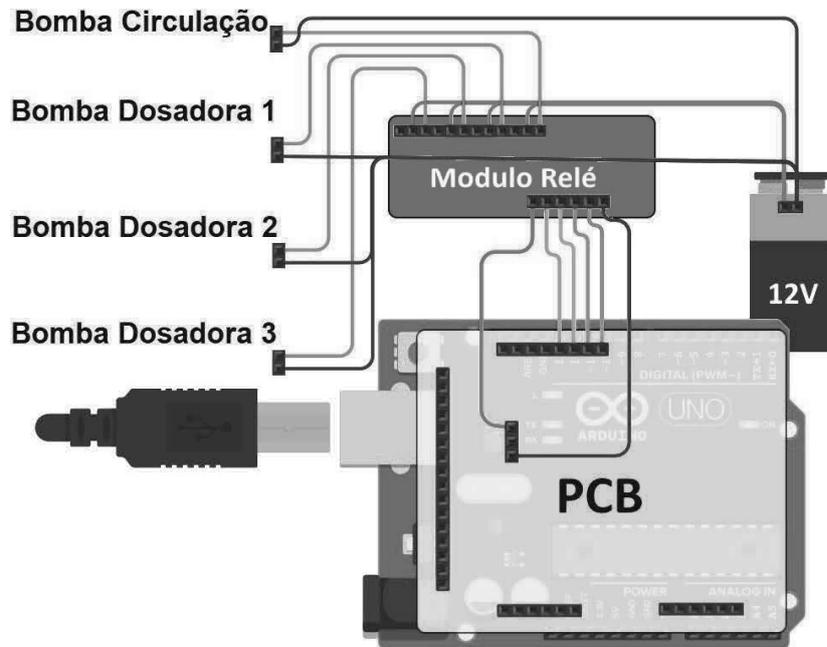
3.2.1 Dimensionamento da vazão das bombas

Para utilização das bombas se faz necessário a informação de quanto volume por unidade de tempo a bomba desloca. O objetivo é controlar o volume deslocado através do acionamento. Como o deslocamento divulgado da bomba é em litros por hora e a aplicação necessita em mililitros por segundo se fez necessário o teste experimental para obter precisão na medida. Nesta seção é detalhado este teste experimental da bomba de forma a quantificar o volume deslocado e com os dados coletados chegar a equação que melhor descreva o comportamento do volume deslocado em função ao tempo.

O teste experimental foi realizado de forma a testar o deslocamento do volume de água por tempo acionado da bomba. O código utilizado está disponível no Anexo B na página 77. Para o teste experimental foi projetado o circuito da Fotografia 16 na página seguinte, ele é composto do microcontrolador Arduino UNO, Fotografia 7 na página 46, do módulo de acionamento com

relé, Fotografia 12 na página 49, da fonte eletrônica estabilizada, Fotografia 11 na página 49 e de quatro bombas, Fotografia 4 na página 43. Foram utilizados os instrumentos de medição, Fotografia 13 na página 50 e 14 na página 50, e água como fluido de teste.

Fotografia 16 – Circuito utilizado no teste experimental.



Fonte: Autoria própria

O procedimento segue o roteiro para cada coleta de dado. O tempo de teste é o tempo que o microcontrolador manterá o acionamento do relé e conseqüentemente sua respectiva bomba. Os acionamentos das bombas são individuais e são realizados por relés próprios para cada uma delas, sendo somente a bomba de circulação independente do tempo de teste. Todos os comandos realizados são feitos pela interface serial do microcontrolador, nela são definidas o valor do tempo de teste, informado qual seu respectivo valor no momento de acionamento e qual bomba a ser acionada. No Quadro 18 são mostrados todos os comandos e suas respectivas funções.

1. Definição do tempo de teste, em milissegundos;
2. Definição da bomba (1, 2 ou 3 - bombas de dosagem) a ser testada;
3. Verificação de quantidade de água no reservatório da respectiva bomba, realizando o abastecimento caso necessário;
4. Ligar bomba 0 (Circulação) e desliga-lá após um minuto;

Quadro 18 – Comandos utilizados no código de teste (case sensitive).

Comandos de ajuste			
Comando	Função	Comando	Função
a	+1 ms	b	-1 ms
s	+100 ms	n	-100 ms
d	+1000 ms	m	-1000 ms
Comandos de acionamento			
Comando	Função	Comando	Função
0	Desliga todos os acionamentos	1	Aciona bomba de circulação
2	Aciona Bomba de dosagem 1*	3	Aciona Bomba de dosagem 2*
4	Aciona Bomba de dosagem 3*		*Pelo tempo de teste

5. Esperar o sistema entrar em repouso;
6. Inserir um becker na saída do sistema;
7. Ligar bomba a ser testada;
8. Esperar o sistema entrar em repouso;
9. Retirar o becker e transferir seu volume para a proveta;
10. Anotar leitura da proveta;
11. Repetir no mínimo três vezes por tempo de teste;

Foram testados vários tempos de acionamento e anotados os respectivos volumes deslocados, no Quadro 19 são mostrados os valores encontrados.

Quadro 19 – Relação tempo e volume de cada bomba.

Tempo (ms)	Bomba 1 (mL)	Bomba 2 (mL)	Bomba 3 (mL)
1000	13,00	11,75	13,00
2000	25,00	22,78	24,44
3000	36,67	33,50	33,33
4000	47,50	43,00	46,17
5000	58,33	52,78	61,11
10000	111,67	101,67	114,17
15000	165,00	157,22	161,67
20000	225,00	209,17	216,67
30000	323,75	310,00	313,33
40000	425,00	418,33	425,00
50000	530,00	522,50	540,00

Partindo dos dados do Quadro 19 na página anterior é possível descrever a relação entre o volume e o tempo através de regressão linear com precisão suficiente para a aplicação. As equações linearizadas são mostradas a seguir:

$$Tempo_{Bomba1}(Volume) = 92,461766365337 * volume \quad (21)$$

$$Tempo_{Bomba2}(Volume) = 95,825442544747 * volume \quad (22)$$

$$Tempo_{Bomba3}(Volume) = 93,264721914881 * volume \quad (23)$$

Utilizando as Equações 21, 22 e 23 foram realizados testes de precisão, no qual foi informado o volume desejado, medido o volume recebido e comparado os dois. O resultado destes teste são mostrados nos Quadros 20, 21 e 22. Onde o tempo, em milissegundos, é o resultado calculado pelas equações, o volume é o ponto de referência, real é o volume obtido, o erro é associado ao erro do instrumento de medição e o desvio é a porcentagem de desvio entre o volume de referência e o volume real. No Gráfico 7 é mostrado graficamente os pontos de referência e as respectivas equações. Comprovando a precisão do controle das bombas a serem utilizadas.

Quadro 20 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 1.

Tempo(ms)	Volume (ml)	Real (ml)	Erro (ml)	Desvio
4623,09	50	53,33	±2,5	6,67%
9246,18	100	103,33		3,33%
13869,27	150	153,33		2,22%
18492,35	200	205,00		2,50%
23115,44	250	251,25		0,50%
Média do erro				3,04%

Quadro 21 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 2.

Tempo(ms)	Volume (ml)	Real (ml)	Erro (ml)	Desvio
4791,27	50	48,89	±2,5	2,22%
9582,54	100	98,33		1,67%
14373,82	150	145,83		2,78%
19165,09	200	197,50		1,25%
23956,36	250	255,00		2,00%
Média do erro				1,98%

Quadro 22 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 3.

Tempo(ms)	Volume (ml)	Real (ml)	Erro (ml)	Desvio
4663,24	50	52,22	±2,5	4,44%
9326,47	100	102,50		2,50%
13989,71	150	155,83		3,89%
18652,95	200	210,00		5,00%
23316,18	250	262,50		5,00%
Média do erro				4,17%

Existem diversas formas de se reduzir o erro apresentado nos Quadros 20, 21 e 22, a escolhida foi a utilização de regressão linear entre o resultado real e o esperado. Essa forma é então apresentada como ajuste fino e é exposta a seguir.

$$Tempo_{Bomba1}(0,983314712723677 * Volume) = 90,9190152314552 * Volume \quad (24)$$

$$Tempo_{Bomba2}(1,01824333982621 * Volume) = 97,5736186570878 * Volume \quad (25)$$

$$Tempo_{Bomba3}(0,955737351130595 * Volume) = 89,13657828 * Volume \quad (26)$$

Quadro 23 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 1 após o ajuste fino.

Tempo(ms)	Volume (ml)	Real (ml)	Erro (ml)	Desvio
4545,95	50	50,00	$\pm 2,5$	0,00%
9091,90	100	100,00		0,00%
13637,85	150	150,00		0,00%
18183,80	200	200,00		0,00%
22729,75	250	250,00		0,00%
Média do erro				0,00%

Quadro 24 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 2 após o ajuste fino.

Tempo(ms)	Volume (ml)	Real (ml)	Erro (ml)	Desvio
4792,83	50	50,00	$\pm 2,5$	0,00%
9757,36	100	100,00		0,00%
14636,04	150	150,00		0,00%
19514,72	200	200,00		0,00%
24393,41	250	250,00		0,00%
Média do erro				0,00%

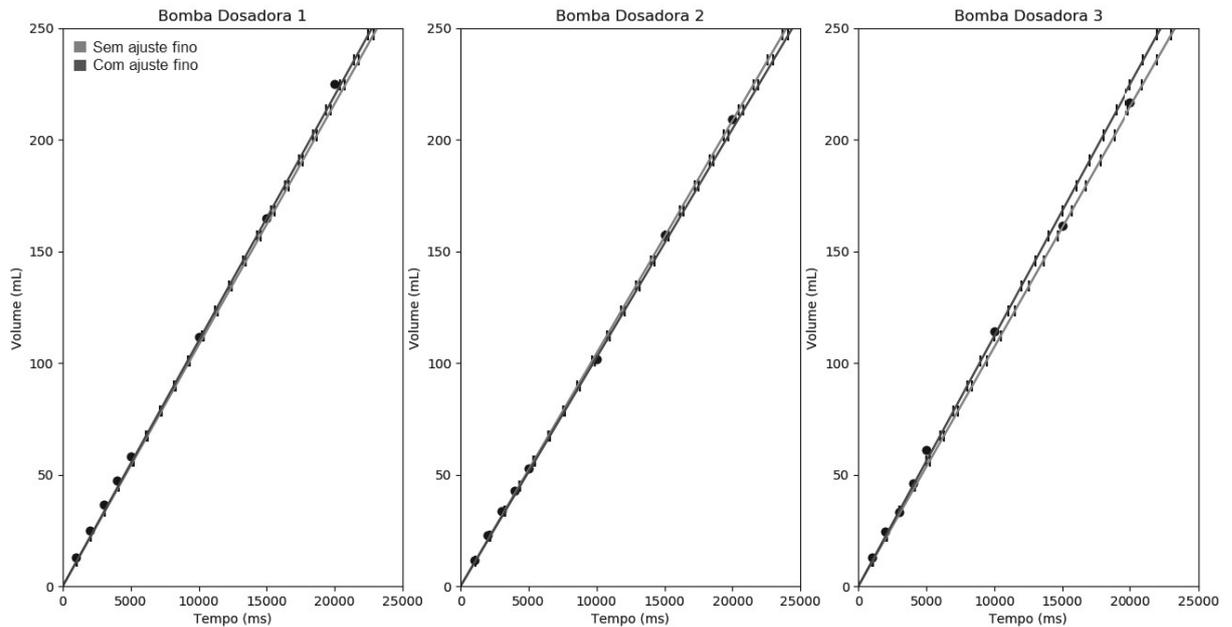
Quadro 25 – Relação tempo e volume Bomba Dosadora 3 após o ajuste fino.

Tempo(ms)	Volume (ml)	Real (ml)	Erro (ml)	Desvio
4456,83	50	50,00	$\pm 2,5$	0,00%
8913,66	100	100,00		0,00%
13370,49	150	150,00		0,00%
17827,32	200	200,00		0,00%
22284,15	250	250,00		0,00%
Média do erro				0,00%

Conforme as Equações 24, 25 e 26 e os Quadros 23, 24 e 25 a acurácia, para as medidas específicas, foi melhorada de forma significativa. No Gráfico 7 são apresentados ambas as equações, sem e com ajuste fino e as amostras utilizadas.

No Gráfico 7, tem-se as amostras como pontos em preto, equações sem ajuste fino em vermelho e com ajuste fino em azul e barras de erro em preto.

Gráfico 7 – Dados amostrais e equações representando o comportamento das bombas.



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 Dosadores químicos

Dosadores são aparelhos destinados a dosar produtos químicos (ABNT, 1987). O dosador de produtos líquidos utilizado é constituído de um reservatório de aproximadamente 1500 *ml* e uma bomba 4 na página 43. O comportamento de aplicação dos produtos e sua precisão estão presentes na seção 3.2.1. Tanto o reservatório quanto a bomba são de aplicação na indústria automobilística, fabricados para um encaixar no outro, o que certamente foi um fator decisivo para escolher essa combinação como o dosador do projeto. O sistema possui um dosador para cada produto líquido, totalizando três dosadores. O dosador utilizado é exibido na Fotografia 17.

Fotografia 17 – Dosador químico.



Fonte: Autoria própria.

O dosador químico mencionado no trabalho anterior seguia o princípio de *Venturi*, muito utilizado na agricultura, por suas elevadas dimensões e pela facilidade em ser desregulado essa ideia para dosador foi descartada.

3.2.3 Processo de calibração eletrodo de pH

O processo de calibração do eletrodo de pH, como descrito na seção 3.1.2.5, foi realizada na bancada conforme ilustrado na Fotografia 18, nesta fotografia podemos notar o circuito impresso, o LCD, o microprocessador arduino e o circuito condicionador de sinal. No LCD, temos na primeira linha a informação de leitura do eletrodo de pH, que por estar desconectado informa uma tensão irrelevante, a segunda linha em branco e na terceira e quarta linha são informados a temperatura ambiente em graus celsius e em tensão lida no conversor A/D referente a temperatura.

Fotografia 18 – Sistema de calibração em bancada.



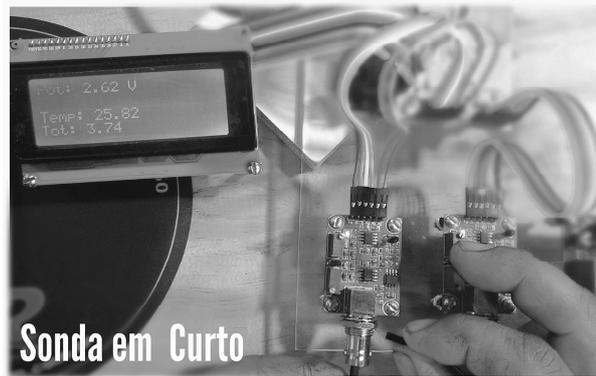
Fonte: Autoria própria.

No passo seguinte, Fotografia 19, é realizado o curto circuito no contato do BNC (contato do eletrodo de pH), de forma a encontrar o ponto em que o eletrodo terá a diferença de potencial igual a zero volts, meio da escala em um eletrodo ideal e significando pH 7, portanto devendo ser ajustado para 2,50V, conforme mostrado na Fotografia 20, ajustando o potenciômetro do circuito condicionador de sinal.

Foram então preparadas três soluções tampão com pH de 4,00, 6,86 e 10,00 respectivamente.

Em seguida o eletrodo de pH é conectado ao circuito condicionador de sinal e é inserido na solução tampão de pH 4,00. O sistema fica em repouso de 2 a 5 minutos e então são anotados o maior e o menor valor de tensão. O mesmo processo é repetido para as soluções de pH 6,86 e 10,00. Os resultados obtidos estão expostos no Quadro 26. Com esses resultados e conhecendo o comportamento da variação de pH é possível projetar equações linearizadas a que representem as leituras do sistema com precisão suficiente para a aplicação.

Fotografia 19 – Eletrodo em curto.



Fonte: Autoria própria.

Fotografia 20 – Processo de calibração.



Fonte: Autoria própria.

Quadro 26 – Resultados obtidos na leitura das soluções tampão.

pH	Tensão média (V)	Temperatura (°C)
4,00	2,79	25
6,86	2,31	25
10,00	1,77	25

Fonte: Autoria própria.

A Equação 27 foi obtida utilizando a equação de reta para dois pontos para todas os pontos e selecionando as que tiveram maior precisão.

$$pH(E, T = 25) = \begin{cases} -5,13 * E + 18,31 & pH \leq 6,00 \\ -8,34 * E + 27,17 & 6,00 > pH < 7,00 \\ -6,15 * E + 20,90 & pH \geq 7,00 \end{cases} \quad (27)$$

Seguindo as Equações 17, 18 e 19 e substituindo as informações da Equação 27 temos:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -3,29, \text{ offset} = 18,31 \\ \lambda_2 &= -2,02, \text{ offset} = 27,17 \\ \lambda_3 &= -2,74, \text{ offset} = 20,90\end{aligned}\quad (28)$$

E finalmente, a Equação:

$$pH(T(^{\circ}C), E) = \begin{cases} \frac{E}{(-651,66 * 10^{-06}) * (T + 273,15)} + 18,31 & , \text{ Se } pH \leq 6,00 \\ \frac{E}{(-400,88 * 10^{-06}) * (T + 273,15)} + 27,17 & , \text{ Se } 6,00 > pH < 7,00 \\ \frac{E}{(-543,40 * 10^{-06}) * (T + 273,15)} + 20,90 & , \text{ Se } pH \geq 7,00 \end{cases}\quad (29)$$

No Quadro 27 são mostrados o pH lido pelo pHmetro (sensor de pH portátil), a temperatura, a tensão média, o esperado pela Equação 29 e os valores médio lidos pelo eletrodo calibrado.

Quadro 27 – Resultados obtidos na utilização da equação linear.

Tempertaura (°C)	Tensão (V)	pH Real	Fórmula 1	Fórmula 2	Fórmula 3
25	2,77	4,00	4,09	2,96	3,84
25	2,31	6,86	6,48	6,85	6,71
25	1,77	10,00	9,24	11,33	10,02

Fonte: Autoria própria.

Para validação foi utilizada água com diferentes valores de pH, medidos por um kit medição padrão de piscina e comparados com o valor do eletrodo.

3.2.4 Processo de calibração eletrodo de ORP

Para o processo de calibração foram preparadas soluções de calibração com concentrações de 0 a 5 partes por milhão de cloro diluídas em água e medido a diferença de potencial dessas amostras com o eletrodo ORP.

Quadro 28 – Resultados de leitura do eletrodo ORP nas amostras.

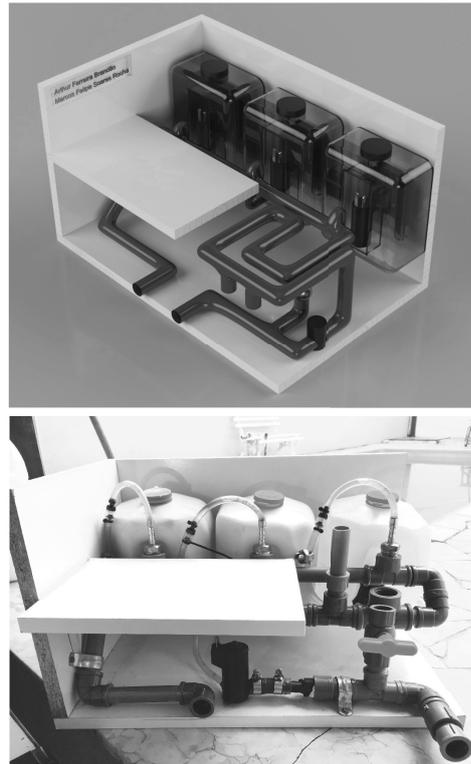
Amostra	Cloro (ppm)	Tensão (mV)	Varição (mV)
1	0	0	±30
2	1	100	±30
3	2	200	±30
4	3	300	±30
5	4	400	±30
6	5	500	±30

Fonte: Autoria própria.

3.2.5 Hardware

O hardware foi primeiramente projetado em CAD e posteriormente montado o protótipo com algumas adaptações. Ambos são mostrados na Fotografia 21. Na fotografia é possível ver os três reservatórios com as respectivas bombas, o encanamento, a bomba de circulação e os encaixes dos eletrodos.

Fotografia 21 – Hardware em CAD e protótipo final.



Fonte: Autoria própria.

3.2.6 *Firmware*

O *firmware* foi desenvolvido na forma de maquina de estados, utilizando as leituras dos sensores, contadores e temporizadores para desencadear eventos que resultam nas trocas dos estados. Toda a codificação do firmware foi realizada em *C++* e de acordo com a lógica apresentada na maquina de estados.

3.2.6.1 Máquina de estados

A máquina de estados consiste de cinco estados, a seguir uma breve explicação de cada estado e na Figura 10 é mostrado visualmente como os estados se relacionam.

1. Estado 1:

Estado de inicio, neste estado o sistema fica em espera até o inicio do próximo ciclo. Este tempo é programável.

2. Estado 2:

Estado de leitura do eletrodo de pH, neste estado o pH é lido e de acordo com o valor é enviado para o estado 3 (Ajuste de pH) caso seja necessário ajustar o pH ou para o estado 4 (Leitura de ORP) caso o pH já esteja ajustado.

3. Estado 3:

Estado de ajuste de pH, dependendo do ajuste necessário é enviado para o sub-estado de elevação ou redução de pH.

a) Elevação de pH;

b) Redução de pH;

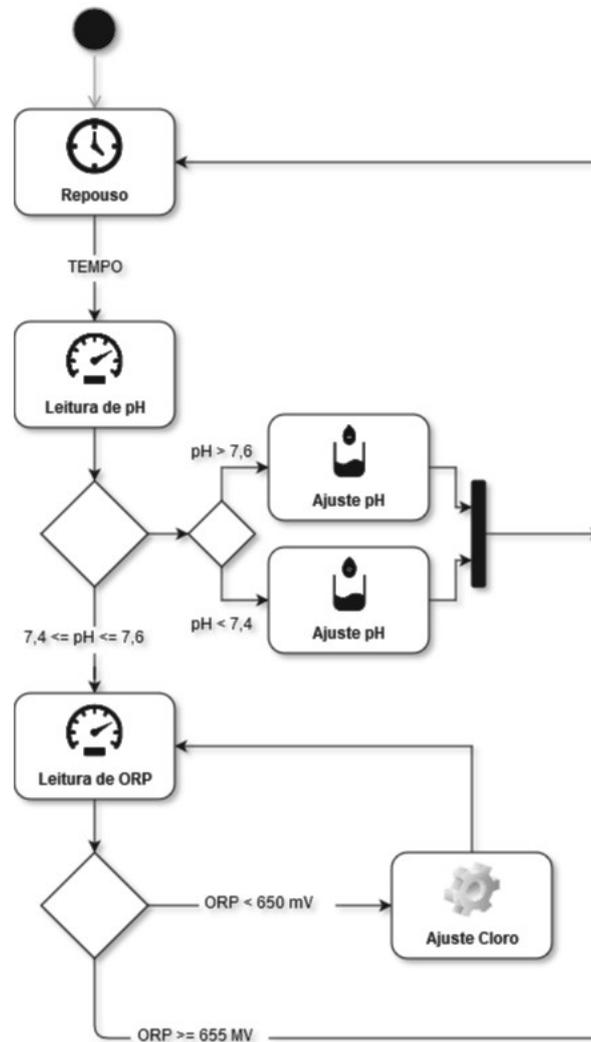
4. Estado 4:

Estado de leitura do eletrodo de ORP, neste estado o ORP é lido e, caso necessário, é enviado para o estado 5 (Elevação de cloro). Caso não seja necessário é enviado de volta ao estado 1.

5. Estado 5:

Estado de Elevação de cloro, neste estado o cloro é elevado para o valor ajustado e após enviado de volta ao estado 1.

Figura 10 – Máquina de estados



Fonte: Autoria própria.

3.2.7 Preparação da Piscina

Nesta seção é apresentada a piscina utilizada para validação, e para tal, o processo de tratamento manual até a piscina chegar ao ponto de somente necessitar de manutenção. O tratamento da piscina foi iniciado com as seguintes condições:

- Dimensões: 7,00 m x 3,00 m x 1,30 m
- Volume: 27300 Litros
- Cloro: 0 ppm
- pH: $\leq 6,8$

Fotografia 22 – Piscina no estado inicial.



Fonte: Autoria própria.

Na Fotografia 22 é mostrada a piscina em seu estado inicial. Claramente a água está esverdeada, evidência de algas, e com muita sujeira superficial. Esta piscina está sem tratamento a muito tempo, sem cloro, com pH irregular e com algas. Portanto sendo necessário tratamento de choque. Na Fotografia 23 é mostrado a piscina durante este tratamento e na Fotografia 24 a piscina tratada e em condições para a validação do projeto. Para efeitos de demonstração no Gráfico 8 são mostrados visualmente a variação dos níveis de cloro e pH e as quantidades de produtos utilizados, cada unidade impar no eixo das abcissas significa a medida no inicio do dia e cada unidade par a medida de fim de dia. Os gráficos foram divididos por conta da diferença de escalas, porém todos são imagens referentes ao mesmo domínio e tem por objetivo mostrar quando o produto foi aplicado e quanto de cada produto foi utilizado em que momento e como essas aplicações influenciaram is níveis de pH e cloro. Destaque para o intervalo de dados dos nives de pH, como o medido de pH trabalha em medidas acima de 6,8, todos os pontos mostrados como 6,8 devem ser entendidos como menor ou igual a 6,8.

Fotografia 23 – Piscina durante o processo de tratamento.



Fonte: Autoria própria.

Fotografia 24 – Piscina antes e após o tratamento.

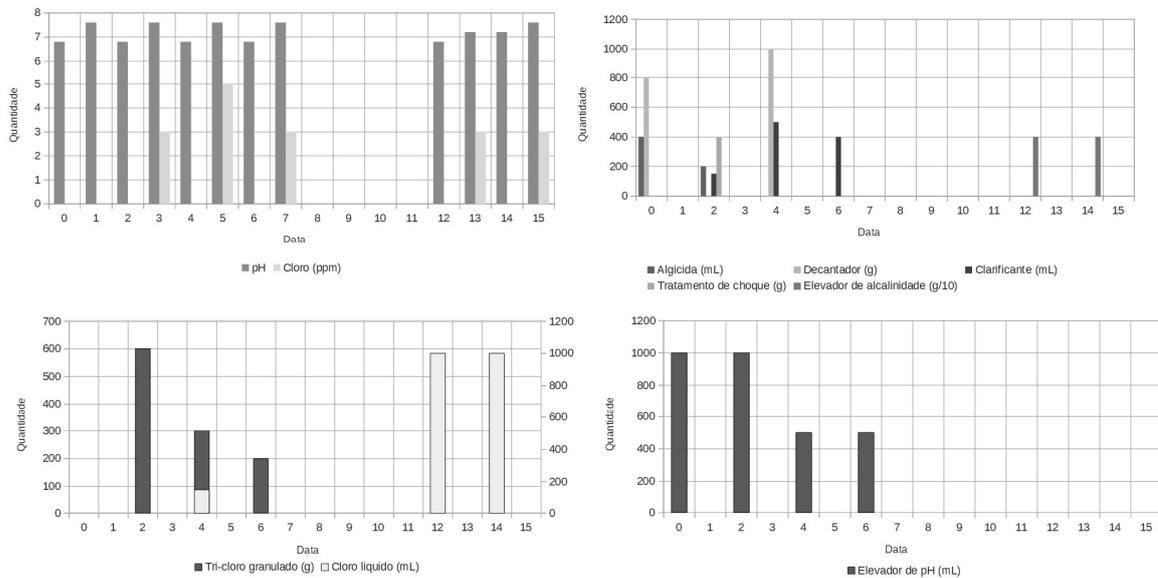


Fonte: Autoria própria.

O tratamento da piscina foi concluído com as seguintes condições:

- Dimensões: 7,00 m x 3,00 m x 1,30 m
- Volume: 27300 Litros
- Cloro: 3 ppm
- pH: 7,6
- Alcalinidade Total: 80 – 120 ppm

Gráfico 8 – Variação das condições da Piscina ao longo do tratamento.



Fonte: Autoria própria.

3.2.8 Tratamento de teste do protótipo

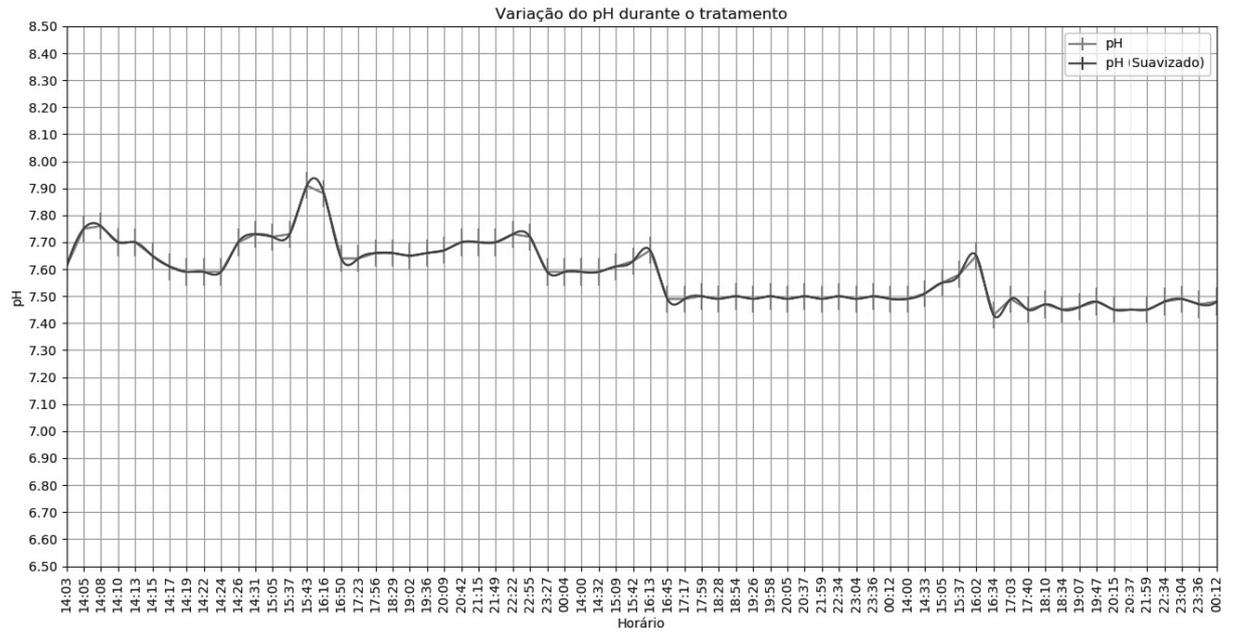
Com o protótipo ligado à piscina um dia após o tratamento manual. Inicialmente o pH de referência é ajustado como 7,7 e a partir das 16 horas da tarde do segundo dia é alterado para 7,5. Os dados são mostrados no Gráfico 9, conforme a legenda, o pH é descrito em vermelho com as respectivas barras de erro e em azul a curva suavizada dos dados coletados. Evidenciando o sucesso do protótipo em seguir duas referências de pH diferentes.

Ao mesmo tempo são realizadas as leituras de ORP e leituras manuais de cloro pelo kit comum de piscina. No Gráfico 10, conforme a legenda, tem-se em azul os níveis de ORP e em barras amarelas as medidas em ppm do cloro, neste gráfico os valores zerados significam ausência de leituras, pois com o pH desregulado o protótipo não lê os níveis de ORP. O cloro é medido varias vezes no primeiro dia, tendo seu valor inicial zerado, e no inicio e no final dos demais dias, sendo os valores zerados ausência de leituras.

Também foi monitorado a quantidade de produto, qual produto e quando o produto foi aplicado. No Gráfico 11 são expostas essas informações, conforme a legenda, em vermelho o elevador de pH, não utilizado, em azul o redutor de pH e em verde o cloro líquido. Por conta de a piscina já se encontrar em condições ideais a pouco tempo só foram necessárias as doses minimas do redutor de pH, a dosagem do cloro, por outro lado, foi feita de forma que quanto mais próxima do valor ideal, menor seria a dose aplicada.

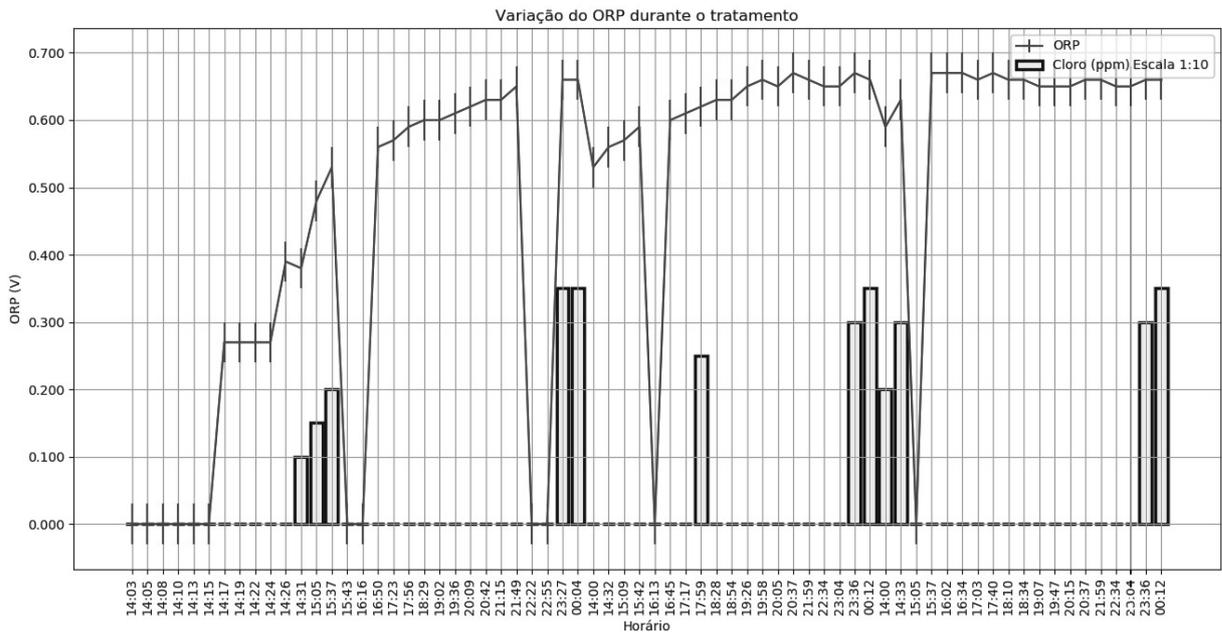
Também foi monitorada a temperatura durante todo o processo. No Gráfico 12 é

Gráfico 9 – Variação do pH da piscina ao longo do tratamento.



Fonte: Autoria própria.

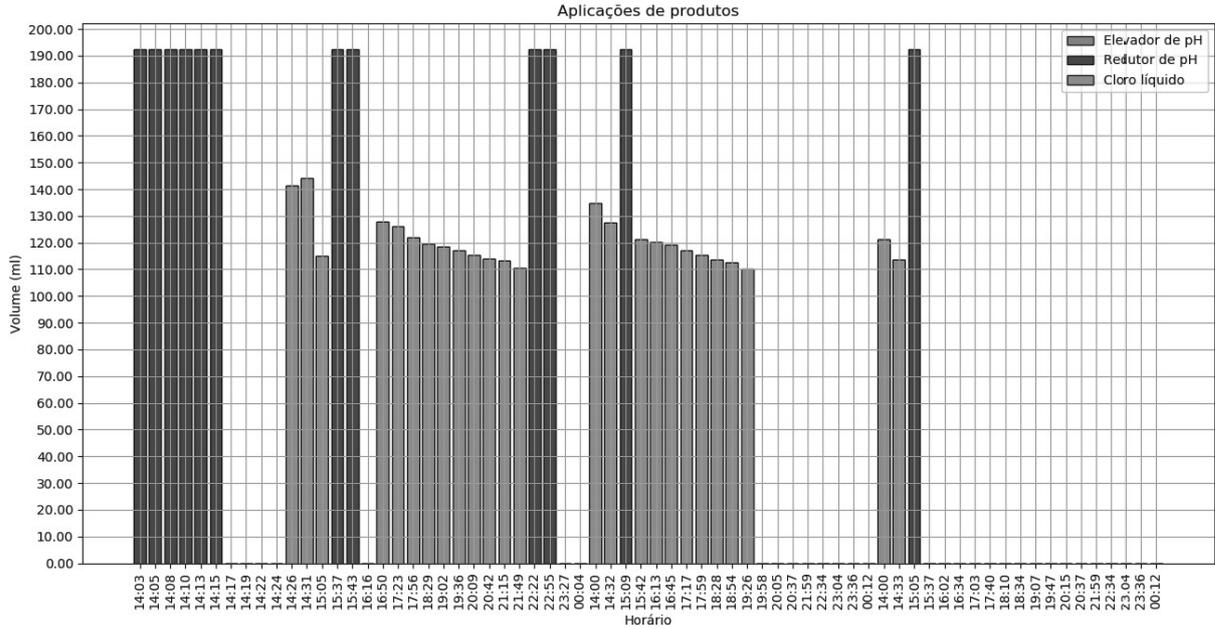
Gráfico 10 – Variação do ORP da piscina ao longo do tratamento.



Fonte: Autoria própria.

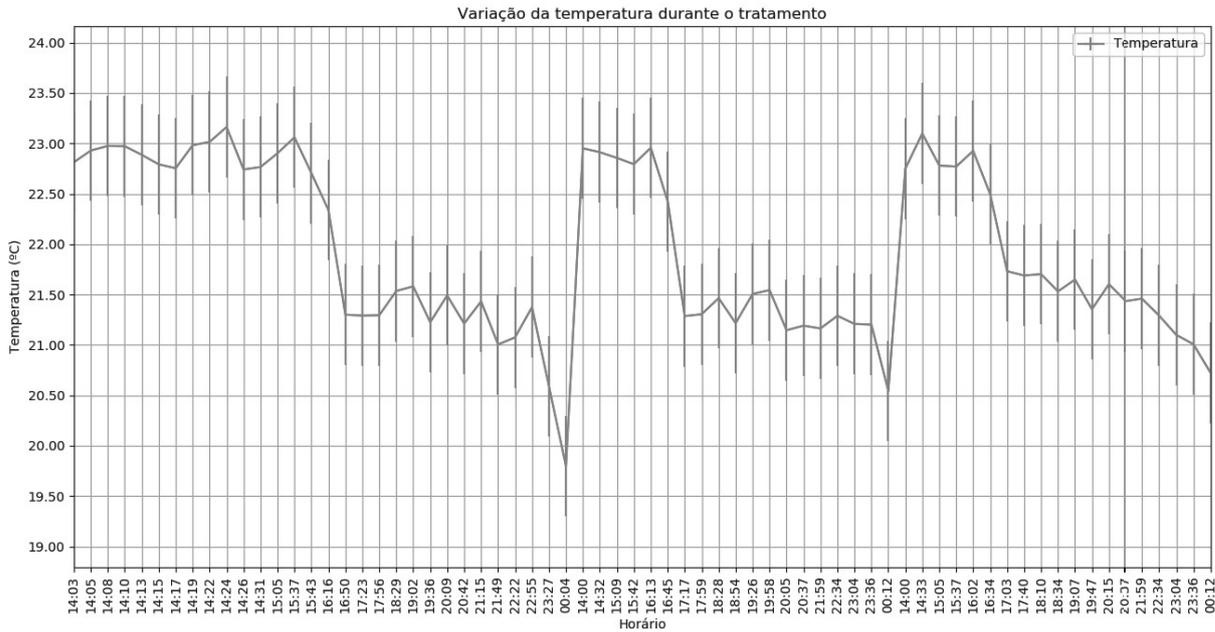
mostrado a temperatura em vermelho com as respectivas barras de erro. Por se tratar de dias seguidos, fica evidente um padrão de comportamento.

Gráfico 11 – Relação de produtos gastos ao longo do tratamento da piscina.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 12 – Variação da temperatura ao longo do tratamento.



Fonte: Autoria própria.

3.2.9 Desafios e soluções apresentadas

3.2.9.1 Desafio 1 - Bomba de circulação

Antes da conexão da tubulação à bomba de recalque, é necessário o procedimento de escorva, que é o preenchimento com água de todo o corpo da bomba e da tubulação de sucção,

com finalidade de eliminar o ar existente em seu interior, pois a bomba não opera a seco.

A solução encontrada foi a utilização da válvula de retenção de fundo de poço e um registro em bifurcação para inserção de água, conforme as Fotografias 21. Esta válvula é utilizada em fundo de poços ou de reservatórios, acoplada verticalmente ao tubo de sucção do sistema de recalque, que quando em funcionamento, mantém o obturador suspenso, permitindo a passagem do fluido aspirado. Quando cessa a sucção do fluido, o obturador da Válvula de retenção de fundo de poço retorna para a posição normalmente fechado, impedindo o retorno do fluido, mantendo desta forma, a tubulação e a bomba sempre cheias, para posteriormente, permitir um novo ciclo de funcionamento do sistema de recalque.

3.2.9.2 Desafio 2 - Retorno de água para os reservatórios de produtos

No momento em que a bomba de circulação está ativa, a circulação da água era direcionada para dentro dos reservatórios de produtos, comportamento esse indesejado pois causa a diluição do produto e possível transbordo do reservatório.

A solução encontrada foi a utilização de válvulas de retenção, Fotografia 25, responsáveis por permitir somente a saída de produtos de cada reservatório e bloquear o retorno. Por conta do posicionamento destas válvulas, na vertical e de ponta cabeça, se fez necessário válvulas de retenção com mola. Por conta de dimensionamento também foi necessário o estrangulamento da mangueira para redução do volume escoado, pois a válvula se abria de um lado mas devido a grande força da bomba se fechava na outra extremidade.

Fotografia 25 – Válvula de retenção com mola.



Fonte: Autoria própria.

3.2.9.3 Desafio 3 - Memória

O *firmware* desenvolvido apresentou-se muito grande para a memória total do microcontrolador antes de atender todas as funções necessárias, evitando a adição de outro microcontrolador e priorizando o baixo orçamento, se fez necessário buscar soluções de otimiza-

ção do uso da memória. Na Fotografia 26 são mostrados os usos de memória antes e depois do processo.

A solução encontrada parte do funcionamento implícito de como o microcontrolador trabalha com *strings*, basicamente por padrão o microcontrolador transfere a *string* da memória de programa para a memória dinâmica e por fim para a saída serial, display ou outra função desejada. Este procedimento resulta no grande uso da memória dinâmica. Por conta disso existem macros de programação que permitem *strings* literais, ou seja, imutáveis, diretamente para as saídas sem passar pela memória dinâmica. As macros e funções usadas para recuperar dados da memória de programa precisam gerar algum código extra para realmente carregar os dados da memória de programa. Isto resulta em alguma sobrecarga extra em termos de espaço de código e tempo de execução. Mas normalmente, a sobrecarga de espaço e tempo é mínima em comparação com a economia de espaço de colocar dados na memória de programa.

Fotografia 26 – Antes e depois de aplicação de técnicas ao código.

Antes

```
O sketch usa 8038 bytes (24%) de espaço de armazenamento para programas. O máximo são 32256 bytes.
Variáveis globais usam 1602 bytes (78%) de memória dinâmica, deixando 446 bytes para variáveis locais. O máximo são 2048 bytes.
Pouca memória disponível, problemas de estabilidade podem ocorrer.
```

Depois

```
O sketch usa 7686 bytes (23%) de espaço de armazenamento para programas. O máximo são 32256 bytes.
Variáveis globais usam 939 bytes (45%) de memória dinâmica, deixando 1109 bytes para variáveis locais. O máximo são 2048 bytes.
```

Fonte: Autoria própria.

3.2.9.4 Desafio 4 - Homoginização dos produtos

Nos testes iniciais ficou evidente a impossibilidade de se homogenizar a piscina escolhida, 27300 litros, somente com a bomba de circulação do protótipo.

A solução utilizada foi manter a bomba principal da piscina na função de recirculação. Uma solução definitiva é adicionar um rele e/ou contator que acione a bomba da piscina a partir do comando do microcontrolador. Existem diversos modelos que são capazes de realizar esta função. Ou, sincronizar o funcionamento do sistema a um timer digital, que tem a função de ligar e desligar equipamentos eletroeletrônicos em horários pré-definidos.

3.2.9.5 Desafio 5 - Conciliação das leituras dos eletrodos

Os eletrodos de pH e ORP possuem o mesmo principio de funcionamento e consequentemente quando efetuadas leituras simultâneas ou em pequenos intervalos de tempo geram ruídos um na leitura do outro.

A solução utilizada foi a separação das leituras em diferentes estados da máquina de estados e o descarte das cem primeiras amostras. Desta forma o primeiro eletrodo, de pH, efetua 200 leituras, descartando as 100 primeiras e computando sua leitura final e após um tempo o segundo eletrodo, de ORP, também efetua suas 200 leituras, descartando as 100 primeiras e computando sua leitura final.

3.3 MUDANÇAS PREVISTAS

Embora para efeito de teste o protótipo tenha cumprido suas funções, para deixá-lo mais robusto algumas alterações são necessárias, as quais não foram antes realizadas por razões de viabilidade de tempo ou financeira.

Para uma comercialização ou reprodução do produto desse projeto, deve-se trocar os espigões de aço zincado por espigões de plástico com as mesmas dimensões, devido ao alto poder de corrosão do cloro, assim como melhor proteger os demais componentes eletrônicos, tais como as bombas, fonte, microcontrolador, entre outros.

Outra mudança necessária foi abordada na Seção 3.2.9.4, onde levantou-se o problema da homogeneização dos produtos químicos aplicados com a água, as soluções apresentadas foram utilizar um relê e um contator para o acionamento da circulação da água ser realizado através de comando do microcontrolador, ou, utilizar um timer digital para não ter fios expostos do sistema de circulação da piscina ao sistema de desinfecção.

Outra melhoria prevista, é aumentar o ângulo do eixo (PVC) dos espigões metálicos, que recebe as aplicações dos produtos, para $\geq 30^\circ$, de modo a facilitar o escoamento e evitar que resquícios de produtos se dirijam para o lado oposto, onde estão localizados os eletrodos de pH e ORP.

Deve-se também trocar as estruturas de madeira por estruturas plásticas, além de redimensionar os três reservatórios para uma capacidade de armazenar 5 litros, visando aumentar a autonomia do sistema.

4 CONCLUSÃO

O protótipo desenvolvido nessa proposta de conclusão de curso possui característica portátil, e alcançou seu objetivo principal de manter os parâmetros de desinfecção e pH dentro dos padrões ideais (pH: 7,2 - 7,8; ORP: 1 - 3 ppm). Em relação as características físicas, o resultado foi um produto que pode ser transportado, instalado e utilizado com facilidade. É praticamente desacoplado do restante dos sistemas da piscina, dependendo apenas do acionamento da bomba de recirculação de água da piscina para a correta homogeneização dos produtos.

Os testes práticos foram realizados durante um período de três dias, nos quais foi analisado o comportamento do sistema e verificou que embora sejam necessárias algumas alterações, o protótipo cumpriu com a sua obrigação de manter as condições ideais da água da piscina, garantindo segurança aos banhistas.

Por o protótipo se tratar de uma primeira versão e ter sido projetado com embasamento teórico, mudanças nas equações e na programação podem ser realizadas para adequar o sistema desenvolvido a situações reais e melhorar sua performance, além das outras alterações já mencionadas no corpo do trabalho, por exemplo, trocar os componentes metálicos que tem contato com os produtos químicos por componentes plásticos, elaborar uma comunicação com o sistema de recirculação de água da piscina, aumentar a capacidade dos reservatórios, entre outros.

Em relação aos custos, levando em consideração que os produtos com funções similares custam em torno de 10 mil reais, o custo de produção desse protótipo foi cerca de 15% desse valor, por isso, acredita-se que esse possa ter uma grande vantagem comercial.

REFERÊNCIAS

- ANAPP. **Revista Anapp**. [S.l.], 2017. v. 131. Disponível em: <<http://www.anapp.org.br/revistas/edicao-131/>>. Acessado em: 11/05/2017>. Citado na página 11.
- ARDUINO. **Arduino UNO E Genuino UNO**. [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acessado em: 20/05/2017>. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9816**: Piscina - terminologia. Rio de Janeiro, 1987. 3 p. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 57.
- _____. **NBR 10818**: Qualidade de água de piscina. Rio de Janeiro, 1989. 3 p. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- BARWICK, R. S.; D. A. Levy; G. F. Craun; M. J. Beach; R. L. Calderon. **Surveillance for waterborne-disease outbreaks**. United States: MMWR CDC Surveill Summ, 1998. 1-21 p. Citado na página 11.
- BOTTONI, P. et al. **Emerging issues on degradation byproducts deriving from personal care products and pharmaceuticals during disinfection processes of water used in swimming pool**. Elsevier BV, 2014. v. 112. 13-16 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.microc.2013.09.001>>. Citado na página 11.
- BOWEN, ANNA B. et al. **Outbreaks of Short-Incubation Ocular and Respiratory Illness Following Exposure to Indoor Swimming Pools**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 115. 267-271 p. Citado na página 11.
- BRASIL, MINISTÉRIO DE ESTADO DA SAÚDE. **PORTARIA N° 2914: Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 13.
- BRONDUM, T. BASTIAN; J. **Do Traditional Measures of Water Quality in Swimming Pools and Spas Correspond with Beneficial Oxidation Reduction Potential?** [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 17.
- CHEN, M. J. et al. **Dynamic real-time monitoring of chloroform in an indoor swimming pool air using open-path Fourier transform infrared spectroscopy**. Wiley-Blackwell, 2015. v. 26. 457-467 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/ina.12215>>. Citado na página 11.
- DONG, YANG et al. **Design of indoor swimming pool water temperature control system based on fuzzy controller and Smith predictor**. IEEE, 2011. 4678-4681 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/emeit.2011.6024079>>. Citado na página 11.
- DORF, RICHARD C; BISHOP, ROBERT H. **Sistemas de controle modernos**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2001. Citado 3 vezes nas páginas 11, 22 e 23.
- FELTRE, R. **Físico-Química**. 6. ed. [S.l.: s.n.], 2004. v. 2. Citado na página 16.
- LISBOA, A. S. **Guia prático para tratamento de águas de piscinas residenciais**. 5. ed. [s.n.], 2010. Disponível em: <<http://www.genco.com.br/downloads/guia-completo.pdf>>. Citado na página 14.

MAIERÁ, N. **Piscinas litro a litro**. 2.ed. revisada e ampliada. ed. [S.l.: s.n.], 2009. Citado 10 vezes nas páginas 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22.

MATTOS, E. E. FALCO R. **Bombas Industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1998. Citado na página 42.

NEMERY, B. et al. **Indoor swimming pools, water chlorination and respiratory health**. [S.l.]: European Respiratory Society (ERS), 2002. v. 19. 790-793 p. Citado na página 11.

OGATA, KAFSUTUKO. **Modern Control Engineering**. 5. ed.. ed. New York: [s.n.], 2010. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.

ORNA, JOHN T STOCK; MARY VIRGINIA. **Electrochemistry, past and present**. Washington, DC: Division of the History of Chemistry, 1989. Citado na página 28.

PAREJA, J. M. STEININGER; CATHERINE. **ORP SENSOR RESPONSE IN CHLORINATED WATER**. Phoenix, AZ: NSPI Water Chemistry Symposium, 1996. (NSPI Symposium Series). Citado 3 vezes nas páginas 32, 34 e 35.

PMBOK. **Guia do CONHECIMENTO EM GERENCIAMENTO DE PROJETOS**. 6. ed. Newtown Square, Pensilvânia, 2017. Citado na página 24.

RIBEIRO, MARCO A. **Fundamentos da Automação**. 1. ed. Salvador: [s.n.], 2003. Citado na página 12.

STEININGER, J. M. **ORP TESTING AND CHEMICAL AUTOMATION FOR SWIMMING POOLS AND SPAS**. [S.l.]: SBCS, 1990. Citado na página 22.

SUSLOW, T. V. **Oxidation-Reduction Potential(ORP) for Water Disinfection Monitoring, Control, and Documentation**. [S.l.]: ANR Publication 8149, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.

XIAO, SHUMIN et al. **Occurrence of Cryptosporidium and Giardia and the Relationship between Protozoa and Water Quality Indicators in Swimming Pools**. [S.l.]: Korean Society for Parasitology, 2017. v. 55. 129-135 p. Citado na página 11.

ZWIENER, CHRISTIAN et al. **Drowning in Disinfection Byproducts: Assessing Swimming Pool Water**. American Chemical Society (ACS), 2007. v. 41. 363-372 p. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/es062367v>>. Citado na página 11.

Anexos

**ANEXO A – MEDIDAS DE POTENCIAL DE OXIDOREDUÇÃO EM FUNÇÃO DO PH E
CONCENTRAÇÃO DE ÁCIDO HIPOCLOROSO (PPM)**

pH:	7	pH:	7,1	pH:	7,2	pH:	7,3	pH:	7,4	pH:	7,5	pH:	7,6	pH:	7,7	pH:	7,8
PPM	ORP	PPM	ORP	PPM	ORP	PPM	ORP	PPM	ORP	PPM	ORP	PPM	ORP	PPM	ORP	PPM	ORP
0.1	756,66	0.1	750,66	0.1	744,66	0.1	738,66	0.1	732,66	0.1	726,66	0.1	720,66	0.1	714,66	0.1	708,66
0.2	765,69	0.2	759,69	0.2	753,69	0.2	747,69	0.2	741,69	0.2	735,69	0.2	729,69	0.2	723,69	0.2	717,69
0.3	770,97	0.3	764,97	0.3	758,97	0.3	752,97	0.3	746,97	0.3	740,97	0.3	734,97	0.3	728,97	0.3	722,97
0.4	774,72	0.4	768,72	0.4	762,72	0.4	756,72	0.4	750,72	0.4	744,72	0.4	738,72	0.4	732,72	0.4	726,72
0.5	777,62	0.5	771,62	0.5	765,62	0.5	759,62	0.5	753,62	0.5	747,62	0.5	741,62	0.5	735,62	0.5	729,62
0.6	780,00	0.6	774,00	0.6	768,00	0.6	762,00	0.6	756,00	0.6	750,00	0.6	744,00	0.6	738,00	0.6	732,00
0.7	782,01	0.7	776,01	0.7	770,01	0.7	764,01	0.7	758,01	0.7	752,01	0.7	746,01	0.7	740,01	0.7	734,01
0.8	783,75	0.8	777,75	0.8	771,75	0.8	765,75	0.8	759,75	0.8	753,75	0.8	747,75	0.8	741,75	0.8	735,75
0.9	785,28	0.9	779,28	0.9	773,28	0.9	767,28	0.9	761,28	0.9	755,28	0.9	749,28	0.9	743,28	0.9	737,28
1.0	786,66	1.0	780,66	1.0	774,66	1.0	768,66	1.0	762,66	1.0	756,66	1.0	750,66	1.0	744,66	1.0	738,66
1.1	787,90	1.1	781,90	1.1	775,90	1.1	769,90	1.1	763,90	1.1	757,90	1.1	751,90	1.1	745,90	1.1	739,90
1.2	789,03	1.2	783,03	1.2	777,03	1.2	771,03	1.2	765,03	1.2	759,03	1.2	753,03	1.2	747,03	1.2	741,03
1.3	790,07	1.3	784,07	1.3	778,07	1.3	772,07	1.3	766,07	1.3	760,07	1.3	754,07	1.3	748,07	1.3	742,07
1.4	791,04	1.4	785,04	1.4	779,04	1.4	773,04	1.4	767,04	1.4	761,04	1.4	755,04	1.4	749,04	1.4	743,04
1.5	791,94	1.5	785,94	1.5	779,94	1.5	773,94	1.5	767,94	1.5	761,94	1.5	755,94	1.5	749,94	1.5	743,94
1.6	792,78	1.6	786,78	1.6	780,78	1.6	774,78	1.6	768,78	1.6	762,78	1.6	756,78	1.6	750,78	1.6	744,78
1.7	793,57	1.7	787,57	1.7	781,57	1.7	775,57	1.7	769,57	1.7	763,57	1.7	757,57	1.7	751,57	1.7	745,57
1.8	794,31	1.8	788,31	1.8	782,31	1.8	776,31	1.8	770,31	1.8	764,31	1.8	758,31	1.8	752,31	1.8	746,31
1.9	795,02	1.9	789,02	1.9	783,02	1.9	777,02	1.9	771,02	1.9	765,02	1.9	759,02	1.9	753,02	1.9	747,02
2.0	795,69	2.0	789,69	2.0	783,69	2.0	777,69	2.0	771,69	2.0	765,69	2.0	759,69	2.0	753,69	2.0	747,69
2.1	796,32	2.1	790,32	2.1	784,32	2.1	778,32	2.1	772,32	2.1	766,32	2.1	760,32	2.1	754,32	2.1	748,32
2.2	796,93	2.2	790,93	2.2	784,93	2.2	778,93	2.2	772,93	2.2	766,93	2.2	760,93	2.2	754,93	2.2	748,93
2.3	797,51	2.3	791,51	2.3	785,51	2.3	779,51	2.3	773,51	2.3	767,51	2.3	761,51	2.3	755,51	2.3	749,51
2.4	798,06	2.4	792,06	2.4	786,06	2.4	780,06	2.4	774,06	2.4	768,06	2.4	762,06	2.4	756,06	2.4	750,06
2.5	798,59	2.5	792,59	2.5	786,59	2.5	780,59	2.5	774,59	2.5	768,59	2.5	762,59	2.5	756,59	2.5	750,59
2.6	799,10	2.6	793,10	2.6	787,10	2.6	781,10	2.6	775,10	2.6	769,10	2.6	763,10	2.6	757,10	2.6	751,10
2.7	799,60	2.7	793,60	2.7	787,60	2.7	781,60	2.7	775,60	2.7	769,60	2.7	763,60	2.7	757,60	2.7	751,60
2.8	800,07	2.8	794,07	2.8	788,07	2.8	782,07	2.8	776,07	2.8	770,07	2.8	764,07	2.8	758,07	2.8	752,07
2.9	800,53	2.9	794,53	2.9	788,53	2.9	782,53	2.9	776,53	2.9	770,53	2.9	764,53	2.9	758,53	2.9	752,53
3.0	800,97	3.0	794,97	3.0	788,97	3.0	782,97	3.0	776,97	3.0	770,97	3.0	764,97	3.0	758,97	3.0	752,97

Fonte: Autoria própria

ANEXO B – CÓDIGO ARDUÍNO (C) DO TESTE EXPERIMENTAL DAS BOMBAS

```

// Código na linguagem C utilizado para o teste experimental.
// Definição dos acionamentos
// Código – RELE - PORT - Função
#define B8 8 // IN1 - B8 - Bomba do circuito
#define B9 9 // IN2 - B9 - Bomba de reservatório 1
#define B10 10 // IN3 - B10 - Bomba de reservatório 2
#define B11 11 // IN4 - B11 - Bomba de reservatório 3
int incomingByte = 0; // Byte recebido na interface Serial
float timer = 1000; // Valor padrão do tempo de acionamento, 1000 ms = 1 s
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {} // Tempo de inicialização da interface Serial}
  // Configuração dos pinos como saída digital
  pinMode(B8, OUTPUT);
  pinMode(B9, OUTPUT);
  pinMode(B10, OUTPUT);
  pinMode(B11, OUTPUT);
  // Configuração dos pinos para inicialização desligado
  // No modelo utilizado, HIGH = Desligado, LOW = Ligado
  digitalWrite(B8, HIGH);
  digitalWrite(B9, HIGH);
  digitalWrite(B10, HIGH);
  digitalWrite(B11, HIGH);
}
void loop() {
  if (Serial.available() > 0) { // Se receber algum byte na serial
    incomingByte = Serial.read(); // Salva o byte na variavel
    Serial.print("Eu recebi: "); // Anuncia qual o byte recebido
    Serial.println(incomingByte, DEC); // Exemplo: "Eu recebi: 48"
    if(incomingByte == 48) { // Se o byte recebido for "0"
      Serial.println(0);
    }
    // Desliga todos os pinos
    digitalWrite(B8, HIGH);
    digitalWrite(B9, HIGH);
  }
}

```

```
digitalWrite(B10, HIGH);
digitalWrite(B11, HIGH);}
if(incomingByte == 49) { // Se o byte recebido for "1"
Serial.println(1);
// Liga a bomba do circuito
digitalWrite(B8, LOW);}
if(incomingByte == 50) { // Se o byte recebido for "2"
Serial.println(2);
// Liga a bomba de Dosadora 1 pelo tempo timer
digitalWrite(B9, LOW);
delay(timer);
digitalWrite(B9, HIGH);}
if(incomingByte == 51) { // Se o byte recebido for "3"
Serial.println(3);
// Liga a bomba de Dosadora 2 pelo tempo timer
digitalWrite(B10, LOW);
delay(timer);
digitalWrite(B10, HIGH);}
if(incomingByte == 52) { // Se o byte recebido for "4"
Serial.println(4);
// Liga a bomba de Dosadora 3 pelo tempo timer
digitalWrite(B11, LOW);
delay(timer);
digitalWrite(B11, HIGH);}
if(incomingByte == 97) { // Se o byte recebido for "a"
// Adiciona 1 ms para a variavel timer
Serial.println("+ 1 ms");
Serial.println(timer);
Serial.println("foi para ");
timer = timer + 1;
Serial.println(timer);}
if(incomingByte == 115) { // Se o byte recebido for "s"
// Adiciona 100 ms para a variavel timer
Serial.println("+ 100 ms");
Serial.println(timer);
Serial.println("foi para ");
```

```
timer = timer + 100;
Serial.println(timer);}
if(incomingByte == 100) { // Se o byte recebido for "d"
// Adiciona 1000 ms para a variavel timer
Serial.println("+ 1000 ms");
Serial.println(timer);
Serial.println("foi para ");
timer = timer + 1000;
Serial.println(timer);}
if(incomingByte == 98) { // Se o byte recebido for "b"
// Retira 1 ms da variavel timer
Serial.println(- 1 ms");
Serial.println(timer);
Serial.println("foi para ");
timer = timer - 1;
Serial.println(timer);}
if(incomingByte == 110) { // Se o byte recebido for "n"
// Retira 100 ms da variavel timer
Serial.println(- 100 ms");
Serial.println(timer);
Serial.println("foi para ");
timer = timer - 100;
Serial.println(timer);}
if(incomingByte == 109) { // Se o byte recebido for "m"
// Retira 1000 ms da variavel timer
Serial.println(- 1000 ms");
Serial.println(timer);
Serial.println("foi para ");
timer = timer - 1000;
Serial.println(timer);}
}
}
```

ANEXO C – CÓDIGO ARDUÍNO (C) FINAL

```

/* Bibliotecas */
#include <LiquidCrystal.h>
#include <math.h>
/* Bombas */
#define B8 8
#define B9 9
#define B10 10
#define B11 11
/* * * * * * */
/* Configurações do Display LCD */
const uint8_t d4 = 0, d5 = 1, d6 = 2, d7 = 3, en = 4, rs = 5;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
/*****/
/* Variaves de configuração */
const uint16_t volume_piscina = 27500; // Volume total do tanque/piscina [0 65,535]
//const unsigned long volume_piscina = 20000; // Volume piscina [0 4,294,967,295]
/* Tabela de dosagens
* 0.0 -> 6.8 <-> 17 mL ==> 0.017 Litros
* 6.8 -> 7.0 <-> 13 mL ==> 0.013 Litros
* 7.0 -> 7.2 <-> 9 mL ==> 0.009 Litros
* 7.2 <=> 7.6 <-> < Faixa ideal de pH >
* 7.6 <- 8.0 <-> 7 mL ==> 0.007 Litros
* 8.0 <- 14.0 <-> 18 mL ==> 0.018 Litros
*/
const float dose_unitaria[6] = {0.017, 0.013, 0.009, 0.004, 0.007, 0.018};
const float dosecloro = 0.004;
/* Tabela de produtos
* Produto -1 <-> Redutor de pH
* Produto 0 <-> Nenhum
* Produto +1 <-> Elevador de pH
* Produto +2 <-> Cloro
*/
uint8_t produto = 0;
/* Declaração de variaveis */

```

```

uint8_t estado = 0; // Estado inicial
const uint8_t samp = 100; // Número de amostras
uint8_t contador_estados = 0;
uint8_t cont = 0; // Contador de loops
double Po_t = 0; // Leitura Tensao - pH
double To_t = 0; // Leitura Tensao - Temperatura
double pH = 0; // Leitura pH
double T = 0; // Leitura Temperatura
double ORP = 0; // Leitura ORP
double ORP2 = 0;
/*****/
/* Variveis de leitura */
/* pH */
double leitrapH[samp];
double pH_medio = 0;
/* ORP */
double leituraORP[samp];
double ORP_medio = 0;
/* Temperatura */
double leituraT[samp];
double temperatura_medio = 0;
/*****/
/* Variaves de atuação */
double dose = 0;
double volume = 0;
double tempo_acionamento = 0;
/*****/
/* Contadores de tempo */
unsigned long previousMillis = 0;
unsigned long interval = 1000;
/*****/
/* Funções */
/** portas
 * Inicializa as portas Input / Output
 */
void portas() {

```

```

// Bombas
pinMode(B8, OUTPUT);
pinMode(B9, OUTPUT);
pinMode(B10, OUTPUT);
pinMode(B11, OUTPUT);
digitalWrite(B8, HIGH);
digitalWrite(B9, HIGH);
digitalWrite(B10, HIGH);
digitalWrite(B11, HIGH); }

/** ADCparaTensao
 * Converte carga de 10 bits em tensão
 *
 * @param [in] leitorAD - Carga de 10 bits
 *
 * @return - Tensão
 */
double ADCparaTensao(int leitorAD) {
return 5 / 1024.0 * leitorAD;
}

/** TENSAOparaPH
 * Converte a Tensão para unidades de pH de acordo com o
 * valor médio das ultimas leituras
 *
 * @param [in] phtensao - Tensão de entrada (0 5V)
 * @param [in] media - Média das ultimas leituras
 *
 * @return - pH
 */
double TENSAOparaPH(double phtensao, double media) {
if(media <= 6) {
return -5.1321016868202 * phtensao + 18.3073370528768; }
else if ((media > 6) && (media < 7)) {
return -8.34254143646405 * phtensao + 27.1752486187844;
}
else if(media >= 7) {
return -7.16062487176833 * phtensao + 22.739197878886;
}
}

```

```

}
}
/** media
 * Calcula a média das ultimas n leituras.
 *
 * @param [in] nAmostras - Número de amostras
 * @param [in] leituras[] - Array de leituras
 *
 * @return - Média das n leituras
 */
double media(int nAmostras, double leituras[]) {
double total = 0;
for (int i = 0; i <= nAmostras-1; i++) {total = total + leituras[i];}
return total / nAmostras;
}
/** update_LCD
 * Atualiza as informações disponiveis no LCD
 *
 * @param [in] pH_medio - valor médio de pH
 * @param [in] temperatura_medio - valor médio da Temperatura
 *
 */
void update_LCD() {
lcd.clear();
/* Linha 1 */
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Temperatura: "); lcd.print(temperatura_medio, 1);
lcd.print(); lcd.print((char)223); lcd.print("C");
/* Linha 2 */
lcd.setCursor(0, 1);
/* Linha 3 */
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("pH: "); lcd.print(pH_medio, 1);
/* Linha 4 */
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("-/-");

```

```

}
/** get_produto
 * Realiza os calculos necessarios para saber qual produto deve ser aplicado.
 *
 * @param [in] pH_medio - valor médio de pH
 * @param [out] produto - produto recomendado para a correção
 * > 0 = Nenhum
 * > 1 = Redutor de pH
 * > 2 = Elevador de pH
 * > 3 = Cloro
 *
 */
void get_produto() {
    produto = 0;
    if (pH_medio < 7.40) {
        produto = 1; // Elevador
    } else if ( pH_medio >= 7.40 && pH_medio <= 7.64) {
        produto = 0; // pH ideal -> checar cloro
    } else if ( pH_medio > 7.64) {
        produto = 2; // Redutor
    }
}

/** get_dose
 * Calcula a dose necessaria para cada mil litros de água.
 *
 * @param [in] produto - produto recomendado para a correção
 * @param [in] pH_medio - valor médio de pH
 * @param [out] dose - Dose em mililitros
 */
void get_dose() {
    if (produto == 1) { // Elevador de pH
        if(pH_medio <= 6.8) {
            dose = dose_unitaria[0];
        }
        else if (pH_medio > 6.8 && pH_medio < 7.0) {
            dose = dose_unitaria[1];
        }
    }
}

```

```

}
else if (pH_medio >= 7.0 && pH_medio <= 7.2) {
dose = dose_unitaria[2];
}
else if (pH_medio > 7.2 && pH_medio <= 7.4) {
dose = dose_unitaria[3];
}
}
else if (produto == 2) { // Redutor
if (pH_medio > 7.6 && pH_medio <= 8.0) {dose = dose_unitaria[4];}
else if (pH_medio > 8.0) {dose = dose_unitaria[5];}
}
else if (produto == 3) { // Redutor
dose = dosecloro * (0.650/ORP_medio) ;
}
else if (produto == 0) { // Redutor
dose = 0;
}
}
}
/** get_volume
* Calcula o volume necessario do produto de acordo com o volume total da piscina
*
* @param [in] dose - Dose em litros
* @param [in] volume_piscina - Volume total do tanque/piscina
* @param [out] volume - Volume recomendado de produto para a correção
*/
void get_volume(){volume = dose * volume_piscina;}
/** get_tempo_acionamento
* Calcula o tempo necessario de acionamento da bomba para dosar o volume.
*
* @param [in] produto - produto recomendado para a correção
* @param [in] volume - Volume recomendado de produto para a correção
* @param [in] tempo_acionamento - Tempo de acionamento
*/
void get_tempo_acionamento() {
switch(produto) {

```

```

case 1: // Elevador
tempo_acionamento = 90.9190152314552 * volume; // Bomba 1
break;
case 2: // Redutor
tempo_acionamento = 97.5736186570878 * volume; // Bomba 2
break;
case 3: // Cloro
tempo_acionamento = 89.13657828 * volume; // Bomba 3
break;
default:
tempo_acionamento = -50;
break;
}
}
/*****/

void tratamento() {
digitalWrite(B8, LOW);
delay(5000);
if(produto == 1) { // Elevador
digitalWrite(B9, LOW);
delay(tempo_acionamento);
digitalWrite(B9, HIGH);
} else if(produto == 2) { // Redutor
digitalWrite(B10, LOW);
delay(tempo_acionamento);
digitalWrite(B10, HIGH);
} else if(produto == 3) { // Cloro
digitalWrite(B11, LOW);
delay(tempo_acionamento);
digitalWrite(B11, HIGH);
}
delay(5000);
digitalWrite(B8, HIGH);
}

void informacao() {
Serial.println(F(-- UPDATE --));
}

```

```

Serial.print(F("pH: ")); Serial.println(pH_medio, 1);
Serial.print(F("Temperatura: ")); Serial.println(temperatura_medio, 1);
Serial.print(F("ORP: ")); Serial.println(ORP_medio, 3);
Serial.print(F("Amostra: ")); Serial.println(cont);
Serial.print(F("Produto: ")); Serial.println(produto);
Serial.print(F("Dose: ")); Serial.println(dose, 4);
Serial.print(F("volume: ")); Serial.println(volume, 4);
Serial.print(F("Tempo de acionamento: ")); Serial.println(tempo_acionamento, 4);
Serial.println(F("-- UPDATE --"));
}
/***** Loop Principal *****/
void setup() {
  portas();
}
void loop() {
  unsigned long currentMillis = millis();
  /* Maquina de estados */
  // Estado 0 - Recirculação
  if (estado == 0) {
    contador_estados == 0;
    digitalWrite(B8, LOW);
    for(int i=0; i <= 20; i++) { // Delay 20 Segundos
      delay(1000);
    }
    digitalWrite(B8, HIGH);
    for(int i=0; i<= 60; i++) { // Delay 60 Segundos
      delay(1000);
    }
    estado = 1;
  }
  if (estado == 1) { // Estado 1 = Leitura de pH
    Po_t = ADCparaTensao(analogRead(A0));
    pH = TENSAParaPH(Po_t, pH_medio);
    leituraPH[cont] = pH;
    To_t = ADCparaTensao(analogRead(A1));
    T = 284.048090012776 * To_t - 1029.74296231147;
  }
}

```

```
leituraT[cont] = T;
pH_medio = media(samp, leiturapH);
temperatura_medio = media(samp, leituraT);
if (contador_estados == 200) {
  contador_estados = 0;
  get_produto();
  if (produto == 0) { // pH == 7.5
    estado = 3;
  } else if (produto == 1) { // pH < 7.5
    estado = 2;
  } else if (produto == 2) { // pH > 7.5
    estado = 2;
  }
  } else {
  contador_estados = contador_estados + 1;
  }
  }
  if (estado == 2) { // Estado 2 - Tratamento de pH
  get_produto();
  get_dose();
  get_volume();
  get_tempo_acionamento();
  tratamento();
  estado = 5;
  }
  if (estado == 3) { // Estado 3 - Leitura de ORP
  ORP = ADCparaTensao(analogRead(A2));
  ORP2 = (ORP - 2.500)/(3.069238095238095);
  leituraORP[cont] = ORP2;
  ORP_medio = media(samp, leituraORP);
  if (contador_estados == 200) {
  if (ORP_medio >= 0.650) {
  estado = 5;
  } else {
  estado = 4;
  }
  }
```

```
} else {
contador_estados = contador_estados + 1;
}
}
if (estado == 4) { // Estado 4 - Tratamento de ORP
produto = 3;
get_dose();
get_volume();
get_tempo_acionamento();
tratamento();
estado = 5;
}
if (estado == 5) { // Estado 5 - Espera
for(int j=0; j<=15; j++){ // Delay 30 minutos
for(int i=0; i<=60; i++) { // Delay 60 segundos
delay(1000);
}
}
estado = 0;
}
if (estado == 6) { // Estado 6 - FIM
informacao();
delay(10000);
}
if(cont >= samp-1){cont = 0;} else {cont = cont +1;} // Contador de leituras
/* Tempo de ciclo */
delay(1);
}
```