

SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA

CONTROLE AUTOMÁTICO DE pH DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO HUMANO

Nilo Antonio de Souza Sampaio (Mestrando UNITAU)

Samuel E. de Lucena (professor-pesquisador UNESP)

nilo.samp@terra.com.br

lucena@feg.unesp.br

Palavras-chave: automação, pH-Metro, eficiência, tempo de resposta.

1. Introdução:

Embora o ponto central deste trabalho seja o desenvolvimento de um controlador digital de pH adequado para uso em estações de tratamento de água para abastecimento humano, um mínimo sobre o pH adianta-se nesta Introdução, a fim de auxiliar o leitor não familiarizado com esta grandeza a entender melhor esta dissertação.

Durante sua pesquisa visando melhorar a qualidade da cerveja, o bioquímico dinamarquês, P. L. Sorensen, criou o conceito de “potencial hidrogeniônico” – pH (FELTRE, 2001). O pH é uma medida da concentração dos íons de hidrogênio, $[H^+]$, em uma solução aquosa e serve para indicar sua acidez (ou alcalinidade). Tendo em vista que o número de mols¹ de H^+ por litro da solução é um número ínfimo, expresso em potências negativas de 10, Sorensen optou, por razões práticas, por expressá-la apenas pelo expoente de 10 (e sem o sinal negativo). Assim, por exemplo, é de 5,3 o pH de uma solução com $10^{-5.3}$ moles de H^+ por litro. Matematicamente, o pH é calculado como segue:

$$pH = -\log [H^+]. \quad (1.1)$$

A água se dissocia em íons H^+ e íons OH^- (hidroxila), em qualquer temperatura, segundo a reação de equilíbrio a seguir:



A concentração molar de íons H^+ na água destilada², à temperatura de 25° C, é de $10^{-7.0}$ e serve como referência fundamental para o pH; ou seja, 7,0 é o valor do pH neutro. Concentrações crescentes acima desta referência indicam acidez crescente, ao passo que concentrações decrescentes abaixo desta referência indicam alcalinidade crescente (FELTRE, 2001). A Figura 1.1 mostra a escala do pH (absoluta e relativa) ilustrada com diversos produtos do dia-a-dia. Embora raras e extremamente reagentes, existem ácidos e bases fortíssimos, com pH negativo e superior a 14, respectivamente.

¹ Um mol é um número especial e vale $6,022 \times 10^{23}$. O Molar, M, medida de concentração, é, por definição, o número de mols/litro (<http://www.chemistrycoach.com>).

	Concentração relativa de H ⁺	Exemplos	
	0	10.000.000	Ácido de bateria, ácido fluorídrico forte, HCl 1 M
	1	1.000.000	Ácido de clorídrico, ácido segregado pela mucosa estomacal
	2	100.000	Suco de limão, vinagre, suco gástrico
	3	10.000	Suco de laranja, suco de uva
	4	1.000	Suco de tomate, chuva ácida
	5	100	Café preto, água potável
	6	10	Saliva, urina
Acidez ↑	7	1	Água destilada
Neutro	8	1/10	Água do mar
	9	1/100	Clorox (produto de limpeza)
	10	1/1.000	Leite de magnésia
	11	1/10.000	Solução de amônia (NH ₃)
	12	1/100.000	Água de sabão
	13	1/1.000.000	Limpa forno
Alcalinidade ↓	14	1/10.000.000	NaOH 1 M (1 mol/litro) (Soda cáustica)

Fig. 1.1: Ilustração da escala do pH e alguns exemplos com substâncias comuns.

Normas de saneamento determinam que o pH da água fornecida à população pelas companhias de abastecimento tem de encontrar-se na faixa de 7,2 a 7,6 (BERNARDO, 1993). As empresas responsáveis pelo tratamento e abastecimento da água em centenas de cidades brasileiras, até onde se sabe, realizam manualmente o controle deste pH, que pode alterar-se nos reservatórios, em decorrência de fatores tão diversos como chuva ácida, arraste por águas pluviais de material orgânico em decomposição, poluição por atividade humana, etc. Este controle manual pode levar a custo operacional maior, além de menor garantia da qualidade da água fornecida à população.

Este trabalho tem o intuito de verificar experimentalmente a viabilidade técnica de um controlador digital simples para realizar automaticamente a tarefa de manter o pH do reservatório dentro de limites pré-estabelecidos.

² Água destilada significa água livre de metais pesados, tais como lítio, magnésio, etc.

2. Medição e Controle do pH em Estações de Tratamento:

2.1 Estações de Tratamento de Água:

As ETAs são responsáveis pela captação, tratamento e distribuição da água à população. A figura 2.1 mostra as etapas do processamento da água levada a cabo pelas ETAs, com destaque para a etapa do ajuste do pH - tema central desta dissertação. A etapa de fluoretação raramente é realizada pelas ETAs.

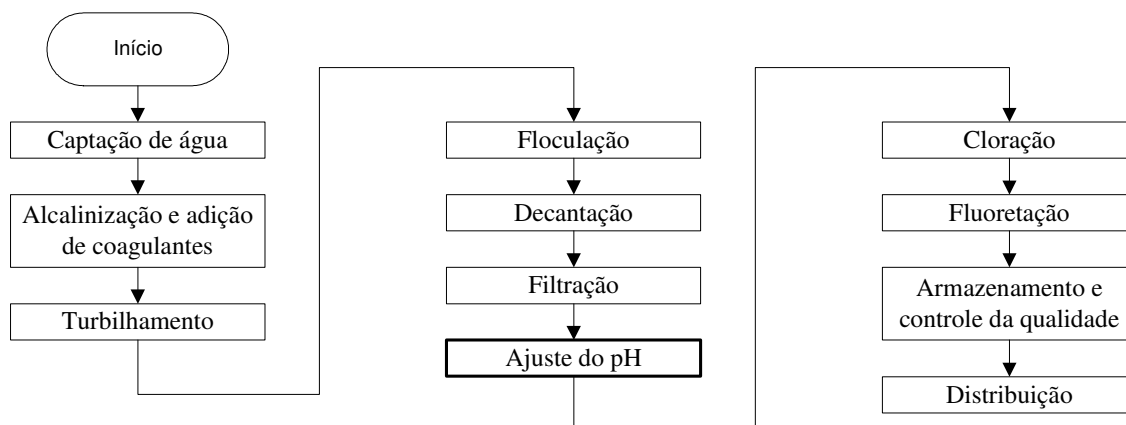


Fig. 2.1: Ilustração das etapas operacionais de uma ETA.

O leitor poderá encontrar detalhes sobre cada uma das etapas em BERNARDO (1993). Entretanto, elas serão agora resumidamente aqui registradas. Primeiro, faz-se a captação da água de um rio ou represa para a ETA. Em seguida, mistura-se a água com alcalinizantes (por exemplo, hidróxido de sódio ou hidróxido de cálcio), para reduzir sua acidez. No turbilhamento, mistura-se com a água produtos químicos, como sulfato de alumínio, $Al_2(SO_4)_3$, para formar o hidróxido de alumínio, $Al(OH)_3$, e sulfato de cálcio (cal extinta), $CaSO_4$, que precipita, em forma gelatinosa, na etapa de floculação, por formar um aglomerado com alto poder de adsorção que retira toda as impurezas menores da água. Na decantação, a água passa em baixa velocidade por enormes tanques, onde os flocos se precipitam, reduzindo a turbidez da água. Na filtração, a água passa por filtros de areia ou carvão ativado que retiram dela as partículas mais pesadas. Na etapa de ajuste do pH, a água recebe substâncias (detalhadas mais tarde, neste trabalho) para fazer seu pH assumir valores na faixa recomendada para o consumo humano (6,5 a 8,5). A cloração faz-se para eliminar bactérias patogênicas, enquanto a fluoretação intenta diminuir a incidência de cárie dentária na população. Estas duas etapas realizam-se no mesmo tanque em que dá-se o ajuste do pH. Antes de ser distribuída para as caixas-d'água municipais, a água passa ainda por diversos exames e análises físico-químicas e microbiológicas. Para o consumo humano, a água deve apresentar pH na faixa de 6,5 a 8,5. Contudo, o cloro empregado em sua desinfecção, em pH ácido, é instável, e em pH superior a 8,0, apresenta ação desinfetante bastante reduzida. Por outro lado, o pH ótimo para a floculação do alume, $AlK(SO_4)$, nome comercial do sulfato duplo de alumínio e potássio, encontra-se na faixa de 7,6 a 7,8. Por estas razões, para manter uma quantidade de cloro residual e otimizar a floculação, a água deve apresentar pH ligeiramente alcalino, na faixa de 7,2 a 7,6. No período chuvoso, o ajuste do pH da água torna-se mais difícil, em virtude do arraste de material orgânico em decomposição para dentro dos rios e reservatórios. A alteração do pH por chuva ácida³ também constitui problema crescente. (BERNARDO, 1993).

O pH é muito influenciado pela quantidade de matéria morta a ser decomposta, sendo que quanto maior a quantidade de matéria orgânica disponível, menor o pH, pois para haver

³ O pH da água proveniente de chuva ácida é de cerca de 5,5.

decomposição desse material, muitos ácidos são produzidos (como o ácido húmico). As águas conhecidas como Pretas (por exemplo, o Rio Negro, no Amazonas) possuem pH muito baixo, devido ao excesso de ácidos em solução (BERNARDO, 1993).

O pH de um corpo d'água também pode variar, dependendo da área (no espaço) que este corpo recebe as águas da chuva, os esgotos e a água do lençol freático. Quanto mais ácido for o solo da bacia, mais ácidas serão as águas deste corpo d'água. Por exemplo, um Cerrado, que tem excesso de alumínio, quando drenado, leva uma grande quantidade de ácidos para os corpos d'água, reduzindo o pH. Mais um bom motivo para se estudar todas as características da bacia hidrográfica antes de recolher amostras, pois a variável em questão, o pH, é muito influenciável pelo espaço e no tempo (BERNARDO, 1993).

Em uma ETA, a etapa de ajuste do pH, quer seja manual, quer seja automático, inicia com a medição do pH. Esta operação se dá com o auxílio de um medidor eletrônico de pH (chamado de “pH-metro” ou “peagâmetro”), instrumento digital e de baixo custo relativo. No item 2.2 a seguir, detalhar-se-á o princípio de funcionamento do pH-metro, sobretudo do sensor de pH empregado intensivamente nas ETAs.

2.2 Medição Automática do pH:

Estima-se que atualmente existam milhões de pH-metros operando no mundo, em aplicações que vão das indústrias química, petroquímica, agro-alimentar e farmacêutica, à biologia e clínica. Apesar do desenvolvimento recente de novos sensores de pH (SAFAVI, BAGHERI, 2003; SHARMA, GUPTA, 2003), sua medição continua sendo realizada, em esmagadora maioria, por meio de sensor a eletrodos de vidro, descrito pela primeira vez por Haber, em 1909 (ASCH, 1999). A Figura 2.2 mostra o diagrama esquemático de uma célula eletroquímica para medição de pH. Como se vê, há dois eletrodos: um chamado de eletrodo de medição e outro, de referência. Ambos os eletrodos são preenchidos com uma solução de pH conhecido (geralmente, com cloreto de potássio, KCl, com pH igual a 7,0).

O eletrodo de medição é formado por um tubo de vidro impermeável, de alta resistência elétrica, ao qual se solda em sua extremidade inferior uma membrana de vidro dopado com íons de lítio (COBBOLD, 1973; ALLABOUTCIRCUITS, 2005), de formato geralmente esférica, cilíndrica ou cônica. Esta membrana é semipermeável, ou seja, neste caso, permeável apenas ao íon H^+ . Assim, dado que dentro do tubo de vidro há uma solução com pH conhecido (diga-se, com concentração molar de íons H^+ conhecida), caso a concentração molar de íons H^+ da solução que preenche o recipiente externo seja diferente daquela, acontecerá movimentação de íons H^+ do lado de maior para o de menor concentração. Esta migração iônica resultará, no equilíbrio dinâmico, em uma diferença de potencial através da membrana de vidro proporcional à diferença entre os pHs das soluções. Quantitativamente, calcula-se esta diferença de potencial por meio da equação de Nernst (ASCH, 1999; COBBOLD, 1973; NATIONAL INSTRUMENTS, 2005)

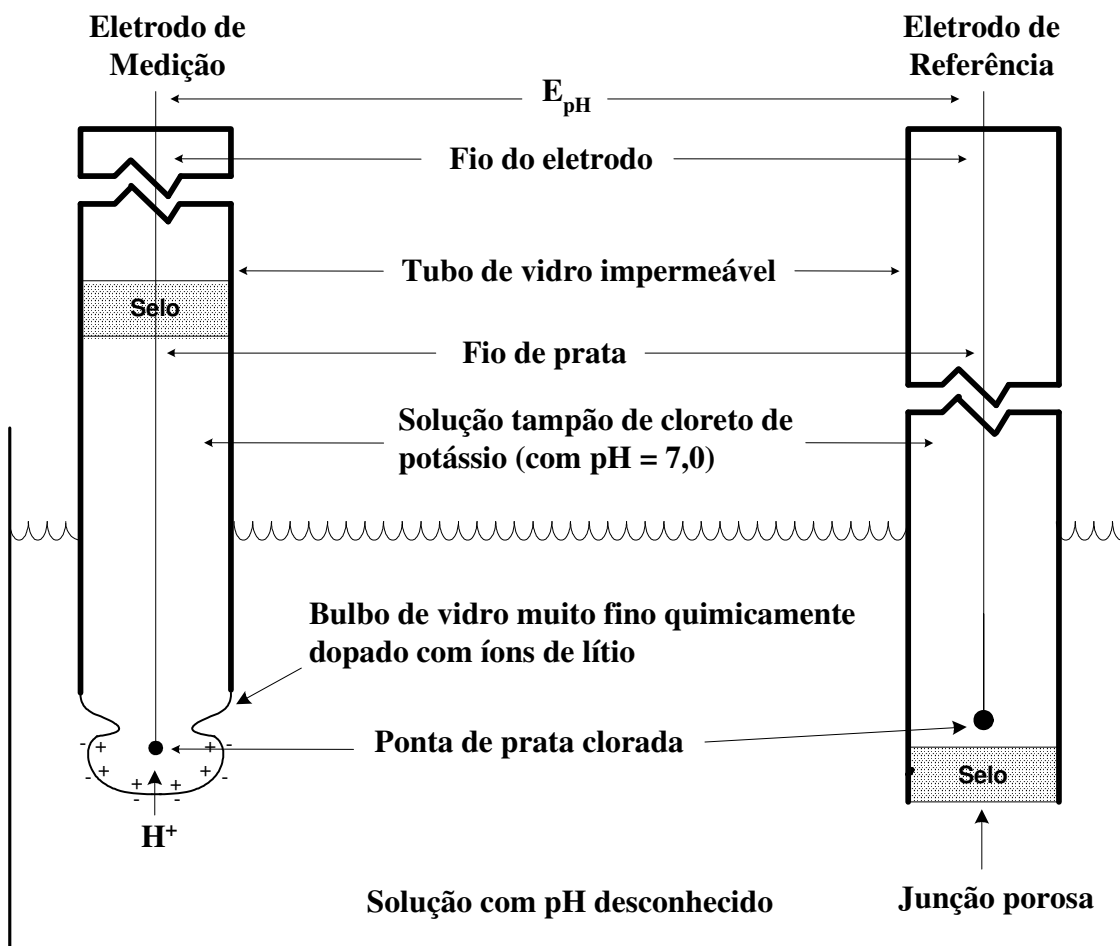


Fig. 2.2: Ilustração dos eletrodos de vidro para medição de pH.

$$E_{pH} = E_0 + \frac{2,3RT}{nF} \cdot \log[H^+] \quad (2.1)$$

- onde E_{pH} é a tensão através da membrana de vidro;
 E_0 é a diferença de tensão em uma solução de pH igual a 7,0;
 R é a constante universal dos gases ($8,3143 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$);
 T é a temperatura em Kelvin;
 n é o número de valência dos elétrons por mol (igual a 1, para o H^+);
e F é a constante de Faraday ($96487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Para medir o pH de uma solução, nela mergulham-se os eletrodos e mede-se a diferença de potencial, E_{ph} , que aparece entre eles.

A medida da tensão na célula total é usada como indicação de pH, embora seja a soma algébrica de todas as tensões do sistema. Esta tensão é gerada pelo fluxo de elétrons do sistema. As outras tensões são desprezíveis ou são valores constantes para um dado conjunto de condições. A função básica de um eletrodo sensível a pH é produzir uma variação de tensão de 59,1 mV para cada unidade de pH, a 25°C . Também é conveniente ajustar a composição da solução da célula interna sensível ao pH, para que a diferença de tensão entre o eletrodo sensível e a célula de referência seja zero para um valor de pH igual a 7. Na maioria das aplicações comerciais, o pH igual a 7 foi escolhido para representar uma solução perfeitamente neutra, como água destilada (BERNARDO, 1993).

O circuito eletrônico simplificado de um pH-metro está representado na Fig.2.3 abaixo na qual aparecem os valores mais comuns da alta resistência do eletrodo de medição e da baixa resistência do eletrodo de referência, e a diferença de tensão entre os eletrodos que posteriormente será convertida em pH. (ASCH, 1999; COBBOLD, 1973; NATIONAL INSTRUMENTS, 2005).

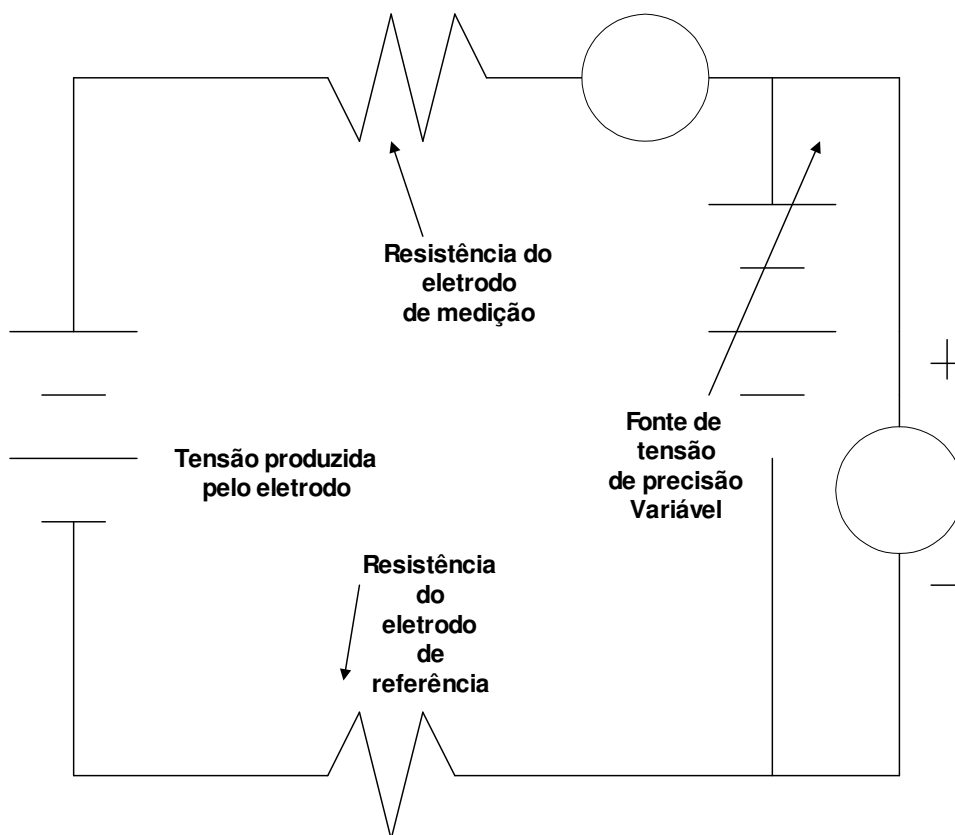


Fig. 2.3: Circuito de um pH – metro.

Substituindo todas as constantes na equação (2.1) obtém-se:

$$E_{\text{pH}} = E_{(\text{constante})} - 1,98158 \times 10^{-4} \text{ Volts/Kelvin.T. pH} \quad (2.2)$$

As únicas duas variáveis independentes na equação (2.2) são a temperatura (T) e o pH. Porque ambas afetam a tensão do eletrodo, a compensação da temperatura é muito importante na medição do pH.

O valor de $E_{(\text{constante})}$ é característico seu valor para cada eletrodo individual e varia com a temperatura . Para compensar essa variação nós introduzimos a variável E' que é menos dependente da temperatura A maioria dos eletrodos também tem sensibilidade para o pH que desvia ligeiramente da equação de Nernst ideal.

Para compensar os desvios da equação de Nernst ideal, nós introduzimos a variável s . O valor de s corresponde a como o eletrodo se relaciona com a equação de Nernst ideal, com o valor de 1 significando que o eletrodo não desvia do ideal. A introdução dessas variáveis é mostrada na equação (2.3).

$$E_{\text{pH}} = E' . T - 1,98158 \times 10^{-4} . s . T . \text{pH} \quad (2.3)$$

Com dois valores de E_{pH} , pH e temperatura conhecida, monta-se um sistema de equação com duas equações e duas incógnitas e assim se calibra o eletrodo de pH, achando-se os valores de E' e s , para tanto, usa-se a equação(2.4) descrita abaixo:

$$PH = (E'T - E_{(pH)}) / s. 1,98158 \times 10^{-4} T \quad (2.4)$$

Após a calibração, o eletrodo de pH pode fazer medições extremamente precisas e os eletrodos de hidrogênio que são os usados para esta aplicação funcionam somente à pressão atmosférica, tem uma faixa de uso de pH ilimitada, e podem ser usados em todas as temperaturas até o ponto de ebulição da solução a ser medida. Não são úteis na presença de agentes oxidantes e redutores. O eletrodo de hidrogênio é constituído de forma análoga a um tubo de ensaio invertido com uma haste de vidro no centro, pela qual passa um fio de platina. Uma alça de platina é presa à extremidade do fio e é coberta com negro de platina, a fim de aumentar a área da superfície. Quanto ao eletrodo de medição, a platina deve ser mantida livre de quaisquer materiais que fariam o eletrodo agir como catalisador na solução. Os eletrodos de hidrogênio podem ser de referência, se submersos em uma solução de íons de hidrogênio com concentração de 1 mol/litro e com um fluxo de gás hidrogênio a 1 atm. O contato com a solução de teste é feito por meio da ponte de sal e ainda vale ressaltar que, pelo fato do eletrodo ser feito de vidro, ele é atacado facilmente pelo ácido fluorídrico que ataca a sílica (óxido de silício), que é a substância que forma o vidro, e pode então afetar o resultado das medições pela descalibração do sensor. (ASCH, 1999; COBBOLD, 1973; NATIONAL INSTRUMENTS, 2005).

O eletrodos de referência deve conter um eletrólito apropriado que no caso deste trabalho, trata-se de um fio de prata recoberto com solução saturada de cloreto de prata (AgCl) ou solução 3M de KCl saturado em AgCl. A vida útil do eletrodo é limitada pelo fato do cloreto de prata que recobre o fio se depositar na solução de KCl. Por isso, é importante fazer a limpeza contínua do eletrodo com água destilada, para evitar incrustações por reação com ácidos, pepsina e solventes orgânicos (ASCH, 1999; COBBOLD, 1973; NATIONAL INSTRUMENTS, 2005).

Um sensor combinado consiste de um sensor de pH e um sensor de referência dentro de um mesmo corpo.

O gel interno recebe a corrente elétrica e transmite ao interior do sensor o fio de prata pura (tratado com cloreto de prata AgCl) capta a corrente e transmite ao cabo de conexão, que leva o sinal do sensor ao leitor/controlador.

O uso de amplificadores e detectores de estado sólido, com tensões controladas por diodos zener, eliminou os problemas de flutuação dos amplificadores de corrente contínua. As calibrações são normalmente boas em longos períodos de tempo e pode-se obter e manter uma elevada precisão.

Há dois tipos de sistemas eletrônicos medidores de pH: um é o tipo nulo e o outro é o de leitura direta.

As leituras pelo método “ nulo ” podem ser obtidas prontamente, usando-se um circuito potenciométrico. O cursor do potenciômetro move-se, para obter-se uma tensão de compensação ao longo da escala eletroquímica. A escala do cursor é marcada em unidades de pH cujo valor se lê diretamente quando o medidor indica uma condição de “nulo” (leitura de tensão zero) para uma dada posição do cursor, este medidor de pH pode ser feito de modo a dar a maior precisão possível às medições de pH. Tanto a temperatura como a assimetria nos tubos do eletrodo são fontes de erro nos medidores de pH, por isto a maioria dos circuitos fornece meios de compensação ou de correção. No circuito potenciométrico, uma parte da escala do cursor é feita variável para corrigir as mudanças de temperatura e algo semelhante pode ser feito, a fim de corrigir a tensão assimétrica, definida como a tensão requerida para se obter leitura zero quando eletrodos e soluções idênticas são colocadas em ambos os lados da membrana de vidro. A assimetria é causada por pequenas variações nos eletrodos comerciais. Também, em instrumentos mais antigos que usam uma bateria como fonte de alimentação, normalmente utiliza-se uma célula padrão com o fim de padronizar o instrumento. Esta é eliminada usando-se fontes de alimentação controladas por diodo Zener.

Os medidores industriais de pH são geralmente do tipo leitura direta com escalas de pH para indicação visual ou registro. O registro é normalmente empregado em aplicações de processamento contínuo.

Há dois tipos de células ou eletrodos de referência de maior aplicação. A célula de calomelano parece ser mais usada que o eletrodo de cloreto de prata. Estes dois eletrodos de referência são ilimitados quando a referências de pH e podem ser utilizados com qualquer eletrodo sensível. A vida útil da célula de calometano pode ser encurtada pelas altas temperaturas. Estas referências operam à pressão atmosférica ou reduzida em sua construção normal. Para aplicações a altas temperaturas, podem-se obter projetos especiais. A escolha do eletrodo de medição de pH depende da aplicação e existem quatro tipos que cobrem a maioria das exigências industriais. Os quatro tipos são: o de vidro, o de antimônio, o de quinhydrone e o de hidrogênio (NATIONAL INSTRUMENTS, 2005).

2.3 Controle Automático do pH:

Nas estações de tratamento de água, o pH pode variar rapidamente, por exemplo, pelo efeito de chuva ácida, pelo arraste de material orgânico por chuvas torrenciais, por contaminação com agrotóxicos, etc. Conseqüentemente, justifica-se o uso do controle automatizado, para garantir maior confiabilidade, um tempo de resposta menor, apesar de algumas dificuldades como falta de produtos automatizados específicos para a área de saneamento, a falta de mão-de-obra qualificada e o problema do pós-venda, pois é necessário suporte técnico para manutenção e operação dos equipamentos (PROVITEC, 2005)

A função básica do controlador é avaliar os erros ou desvios das variáveis controladas no processo e enviar um sinal elétrico aos dispositivos atuadores relacionados com as mesmas, de forma a atuar no sistema corrigindo os erros ou desvios encontrados (GALSTER, H, 1991).

No caso do controle liga/desliga, para pequenas variações no pH precisa ser controlada e leva um tempo relativamente grande, isto exige um ajuste do tempo de resposta ou um aumento na faixa de amplitude do pH ótimo.

3. DESCRIÇÃO DO PROJETO DO CONTROLADOR DE pH:

3.1 Descrição da montagem física do aparelho:

Realizou-se o projeto do controlador de pH usando-se o microcontrolador AT89S52, da Atmel, que tem as seguintes características:

- Compatível com os produtos MCS-51.
- 8K bytes de memória flash programável.
- Operação na faixa de 4,0 V a 5,5 V.
- Operação completamente estática de 0 a 33 MHz.
- 32 linhas E/S programáveis.
- 3 Temporizadores/Contadores de 16 bits.
- 8 fontes de interrupção.
- Canal serial full duplex UART.

Inicialmente foi realizada a ligação do Microcontrolador AT89S52, constituído de 40 pinos, a um LCD de duas linhas apresentando 14 pinos. Ambos alimentados com tensão de 5 [V].

Para uma melhor visibilidade das mensagens escritas do mostrador foi conectado a ele um potenciômetro de 10 k Ω em série com um resistor de 10 k Ω , que permite o ajuste da luminosidade do mesmo.

Efetuada a ligação, com a utilização do Software Keil, visto na figura (3.1) foi feito um programa no qual, alimentado o circuito, o display era acrescido de um caracter por vez, começando do quarto caractere, até formar a palavra “RAPHAEL”. Após o perfeito funcionamento deste programa, o próximo passo foi o deslocamento desta palavra de oito caracteres, três vezes para a direita e três vezes para a esquerda, com a escrita de um novo programa.

Além das 7 linhas de via de dados, houve a conexão de mais 2 linhas, uma para distinção entre entrada de dados e entrada de instruções, e outra para habilitação do LCD.

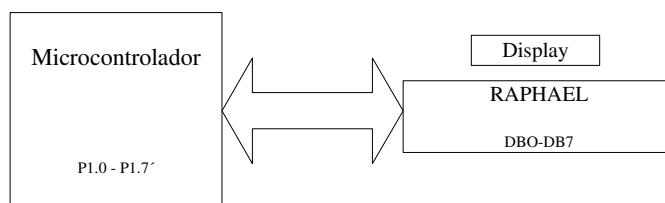


Figura 3.1– Micro-controlador conectado ao mostrador alfa-numérico.

Com o LCD funcionando, foi possível começar a fazer leituras utilizando portas de entrada e observar o resultado no mesmo.

Para a realização de leitura de variável analógica, foi utilizado o conversor A/D, ADC 0820, composto por 20 pinos, e também alimentado com tensão positiva de +5 V.

Este componente realiza a conversão de apenas uma entrada, e, se tivermos a necessidade de utilizar mais de uma, usaremos de um multiplexador, como foi feito.

Tínhamos, para teste, um *joystick*, construído com dois potenciômetros, na qual a alavanca se movimentava para a direita e esquerda e para cima e para baixo, obtendo assim, movimento na vertical, horizontal e para todos os possíveis pontos do plano. Foi aplicada aos potenciômetros uma tensão de alimentação de +5 V, idêntica à tensão de referência do A/D.

Para comprovar o bom funcionamento do circuito, foi adotado que, dependendo da posição da alavanca, teríamos um valor no eixo ‘x’ e outro valor no eixo ‘y’, valor este que varia de 0 a 255, tanto o valor de ‘x’ quanto o de ‘y’, dependendo de suas respectivas posições, lido da tensão que está sobre cada um dos potenciômetros, visto na figura (3.2).

Temos, como descrito acima, a leitura de duas entradas, precisando fazer uso do multiplexador, o 4051, constituído de 16 pinos e tendo como alimentação, a tensão de +12 V. Assim, com um sinal enviado por software, é possível escolher a entrada de dados desejável, ora para a leitura do eixo ‘x’, ora para a leitura do eixo ‘y’. Após serem lidas entradas, ambas são mostradas no visor do LCD, como, por exemplo, $x = 123$ $y = 45$. O valor da entrada é capturado freqüentemente, ao ponto que, ao movermos a alavanca do *joystick*, instantaneamente o valor mostrado no LCD será mudado para o novo valor correspondente.

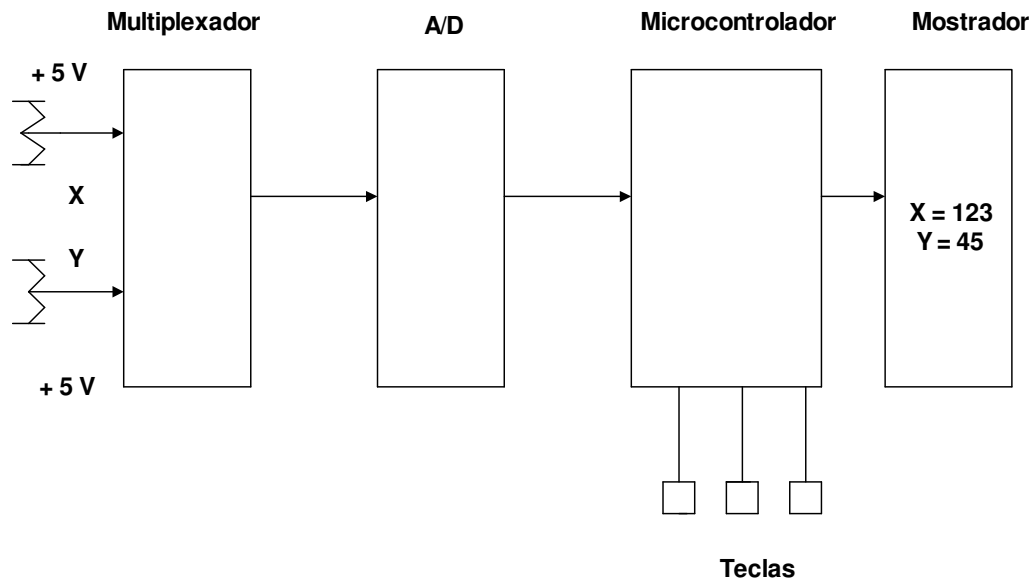


Figura 3.2– Micro-controlador realizando a leitura de posições X e Y e mostrando-as no LCD.

Estando o circuito lendo as entradas e as indicando no LCD, foi adicionado ao mesmo três teclas, com a função de escolha de opções em um menu implantado.

O LCD mostrava como menu inicial: “medir” ou “controlar”.

Com as duas teclas mais à esquerda, temos a possibilidade de escolher uma das opções, ao passo que à da direita não realiza tarefa alguma se pressionada sem uma função ainda para “controlar”, ao apertarmos esta tecla, nada acontecia, o mostrador ficava como inicialmente. Tal função será descrita e mostrada na figura (3.4). Ao escolhermos a opção “medir”, o programa mostra no LCD o valor lido da entrada de dados, até que fosse interrompido, ou seja, que a tecla de “voltar” fosse acionada (a tecla mais à direita). Acionando tal tecla, o LCD mostra o menu inicial.

A opção de “controlar”, conforme comentada acima, tem a função de manter o valor do pH entre dois limites que serão fornecidos por meio do teclado, como será descrito mais tarde.

No menu “controlar”, visto na figura (3.3) temos outro menu, “iniciar” ou “alterar”. Se optamos por “iniciar”, haverá um controle iniciado, e o LCD passará a mostrar o valor lido do potenciômetro, mas agora controlando esse valor, quando passar de 200 ou for inferior a 100, seremos alertados através de dois *led's* colocados como saída para nos indicar o controle. Quando o valor ultrapassar 200, acende o *led* vermelho, e quando for inferior a 100, o *led* amarelo é que se acende. Os valores de 100 e 200 são os já programados inicialmente, mas que podem ser alterado para quaisquer valores, utilizando a opção “alterar” do menu, quando teclamos “voltar” na medição e controle.

Na opção “alterar”, temos um outro menu, que pedirá para especificarmos um valor máximo e um valor mínimo, valores estes que, após serem digitados, ou melhor, colocados em seus respectivos locais, irão dar um sinal de quando estamos fora do valor determinado, através dos mesmos *led's* citados anteriormente.

Exemplificando, queremos que o nosso *joystick* permaneça numa faixa de 120 a 200. Lembrando que para este teste, foi desconectado um potenciômetro, fazendo a leitura de dados externa apenas de um, para podermos fazer o controle. Voltando ao exemplo, quando entramos em “alterar”, será pedido o valor máximo e mínimo, como “max =” e “min =”, e utilizando a tecla mais à esquerda, adicionamos o valor de máximo, um a um, e com a tecla do meio, o valor mínimo, também um a um. Terminados os dois, que no caso, max = 200 e min = 120, com a tecla da direita, damos um O.K.

Feito isso, o LCD novamente mostrará as opções de “iniciar” ou “alterar”, e como já foi alterado, teclamos “iniciar”, começando assim um controle do valor lido da variável analógica ultrapassando o valor de 200, o *led* vermelho é aceso, e, sendo este valor inferior a 100, o *led* amarelo é que se acende, simulando um controle, que mais tarde será utilizado para o controle de pH.

Montado os circuitos que estão no protótipo e feito o programa para a realização da medição e controle de temperatura, a mesma começou a ser medida, e mostrada no LCD. Este programa foi adicionado ao programa inicialmente escrito, em linguagem C⁺ que tem por objetivo a medição e controle do pH o contendo os menus, e adaptado para o seu funcionamento especificado.

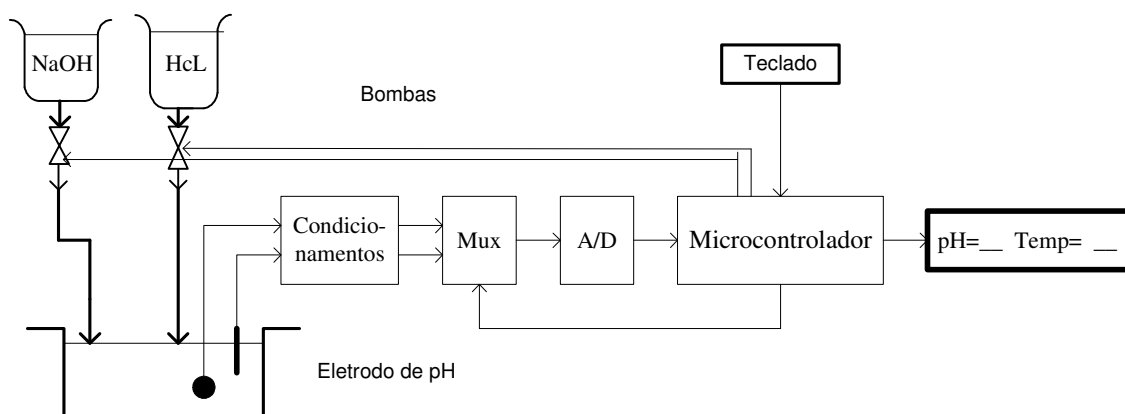


Fig.3.4 -. Diagrama de blocos do controlador de pH.

Na figura acima pode ser visto o diagrama de blocos do protótipo já pronto, com as bombas peristálticas que gotejam Hidróxido de Sódio (NaOH) e Ácido Clorídrico (HCl) para aumentar e reduzir respectivamente o pH da água, o sensor faz a medição da diferença de potencial e a mesma é transformada em pH pela equação de Nerst (fig 2.3), que está no CI gravada através do programa realizado em linguagem C⁺, assim o CI manda o sinal para as bombas gotejarem os produtos químicos para a faixa desejada, que no caso da água tratada vai de 7,2 à 7,6 (faixa ótima) .

3.2 Descrição dos Testes Realizados:

O protótipo do aparelho já pronto e funcionando pode ser visto na (fig 3.5) abaixo, e foram realizados testes de medição e controle que redundaram em sucesso, as medições foram feitas com soluções tampão de pH fixos e obtiveram erros abaixo de 1%, com uma exceção,(tab 3.1) e os testes de controle levaram o pH de 3,7 para a faixa de 7 à 8 e de 3,85 para a faixa de 8,6 à 9,6.

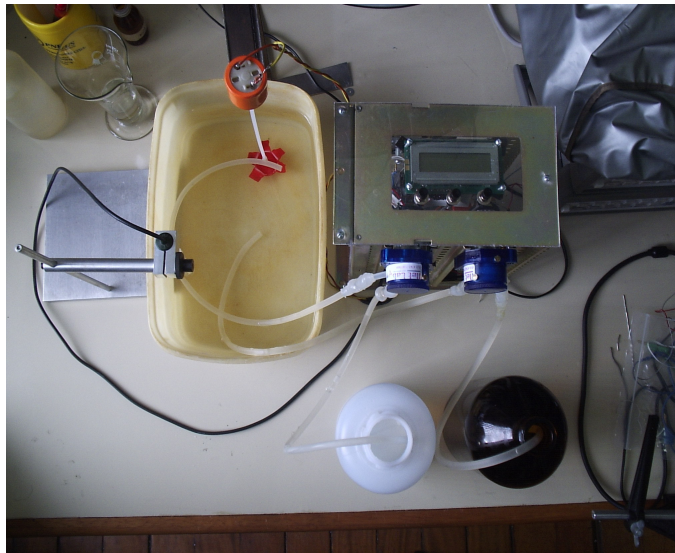
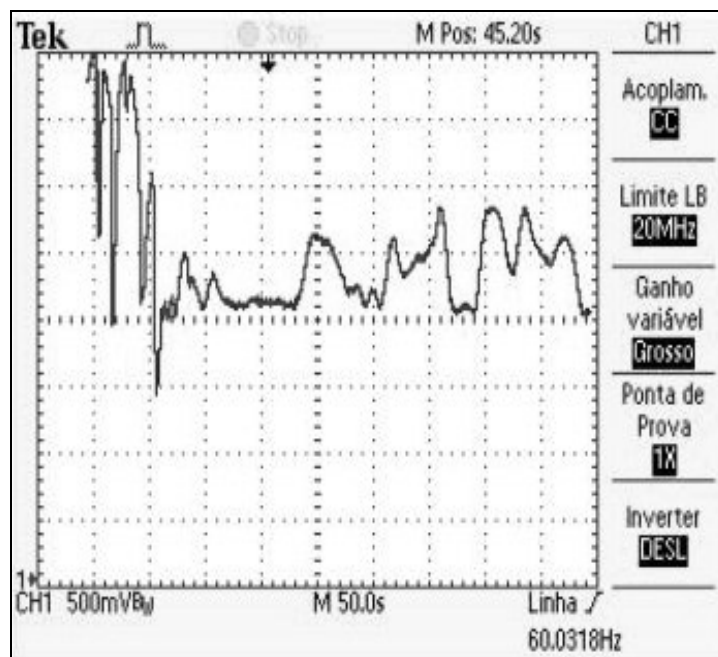


Figura 3.5 – Foto do protótipo do controlador digital de pH

Tabela 31.: Valores de pH medidos x Valores de pH Nominais.

pH Medido	pH Nominal	Erro (%)
1,03	1,03	0
2,08	2,07	0,48
3,97	4,01	0,99
5,27	5,01	5,19
6,88	6,86	0,29
9,15	9,18	0,33
11,92	12,02	0,83



3.6 - Resultado do controle trazendo de 3,7 para a faixa de 7 a 8

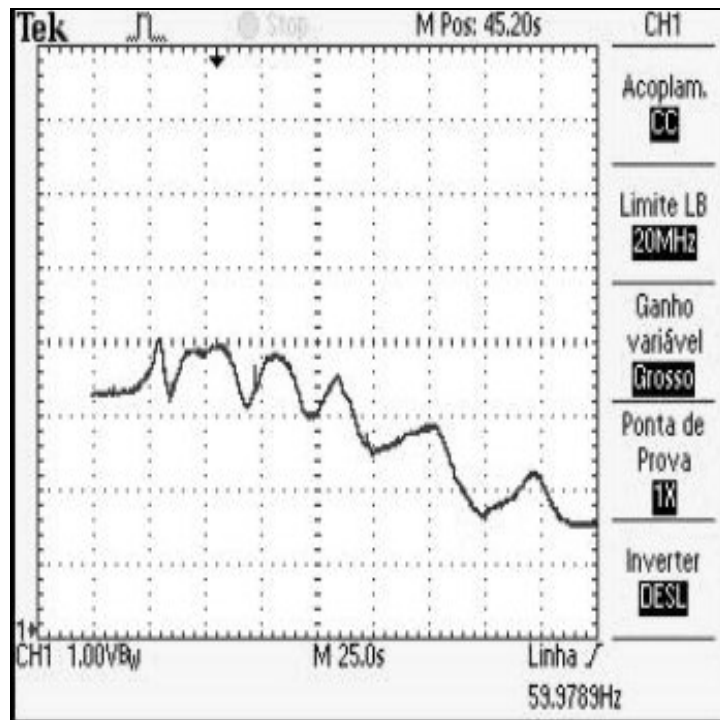


Figura 3.7 - Resultado do controle trazendo de 3,85 para a faixa de 8,6 a 9,6

4. Conclusão:

As companhias de saneamento, responsáveis pelo tratamento da água abastecida à população, devem manter o pH da água entre 7,2 e 7,8. Com efeito, a automação do controle do pH em estações de tratamento de água para abastecimento humano pode melhorar a qualidade da água, além de reduzir o custo desta operação nas ETAs.

Apesar da não linearidade da relação entre o pH da água de um reservatório e o volume de solução corretiva (ácida ou básica) a ele adicionado, a automação do controle do pH pode tornar-se relativamente simples, quando se emprega a técnica de controle liga/desliga e ajustam-se empiricamente os tempos de atuação das bombas dosadoras.

O controlador digital automático, do tipo liga/desliga, desenvolvido neste trabalho, mostrou-se capaz de manter o pH de um reservatório, preenchido com 4 litros de água potável, dentro dos limites pré-estabelecidos. Seu tempo de resposta, da ordem de alguns minutos, parece aceitável para esta aplicação. No entanto, destaca-se que este tempo pode sofrer reduções, em função do volume injetado da solução corretora, em cada ciclo de atuação do controlador, ou, ainda, da concentrar molar destas soluções

5. Referências Bibliográficas:

- ALLABOUTCIRCUITS. pH measurement. Disponível em <http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_9/6.html>. Acessado em 27/01/2005.
- ASCH, G. (ed.) **Les capteurs en instrumentation industrielle**. 5^e édition. Paris, Dunod, p.749-775, 1999.
- BABUSKA, R.; OOSTERHOFF, J.; OUDSHOORN, A.; BRUIJN, P. M. Fuzzy self-tuning PI control of pH in fermentation. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v.15, p.3-15, 2002.
- BERNARDO, L. de **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 5^a edição. Rio de Janeiro, ABES, 1993, p. 84-85.
- COBBOLD, R. S. C. **Transducers for biomedical measurements: principles and applications**. New York, John Wiley & Sons, p.349-371, 1974.
- FELTRE, R. **Química: físico-química (v. 2)**. 5^a. edição. São Paulo, Editora Moderna, 2001, p. 210-220
- GALSTER, H. **pH Measurement: Fundamentals, methods, Applications, Instrumentation**, 1^a edição. New York, VCH Publishers, 1991, p. 303 – 319.
- HUROWITZ, Scott E.; BOBKOV, A.; RIGGS James B. pH Control Using Advanced Proportional – Integral Controls with the Dual – Injection In –Line Process. **Ind.Eng.Chem**, v.39, p.248 – 246, 2000.
- JIN, Y.; SUN, X.; FANG, C. Adaptive control of bilinear systems with bounded disturbances, and its Application. **Control Eng. Practice**, v.4, n.6, p.815-822, 1996.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORP. **pH measurement tutorial**. Disponível em <http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/webmain/0127178E1F609C1586256CE20067DE4C?opendocument&node=dz00000_us>. Acessado em 27/01/2005.
- PROMINENT BRASIL LTDA. **Dulcometer D1 C**. São Bernardo do Campo, SP, s.d. Disponível em <www.prominent.com.br>. Acessado em 12/01/2005.
- PROVITEC SISTEMAS DE CONTROLE E DOSAGEM LTDA. **Dosatronic série C**. São Paulo, São Paulo, s.d.. Disponível em <<http://www.provitec.com.br>>. Acessado em 12/01/2005.