

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para
irrigação localizada**

Marinaldo Ferreira Pinto

**Dissertação apresentada como exigência
para obtenção do título de Mestre em
Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

**Piracicaba
2010**

Marinaldo Ferreira Pinto
Engenheiro Agrícola

Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para irrigação localizada

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

Dissertação apresentada como exigência para
obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de
concentração: Irrigação e Drenagem

**Piracicaba
2010**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Pinto, Marinaldo Ferreira

Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para irrigação localizada /
Marinaldo Ferreira Pinto. -- Piracicaba, 2010.
83 p. : il.

Dissertação (Mestrado) -- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.
Bibliografia.

1. Água para irrigação 2. Gotejadores 3. Íons 4. Irrigação localizada 5. pH I. Título

CDD 631.7
P659d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho

Aos meus pais, pois são responsáveis diretos pelos valores, que norteiam as decisões e caminhos pelos quais já pisei.

Aos meus irmãos, pela colaboração e incentivo em todos os momentos que necessitei de auxílio.

Ao povo do sertão nordestino, que tanto sofre, mas nunca desiste de lutar. Mesmo que faltem armas, nunca lhes faltarão coragem e vontade de vencer.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”

Albert Einstein

***“Quem anda com os sábios será sábio; mas o companheiro dos tolos sofre
aflição”***

Prov. 13:20

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, ao curso de pós-graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Tarlei Arriel Botrel por ter acreditado em meu potencial, me orientando, contribuindo para o meu crescimento profissional e pessoal, através de suas demonstrações de que é possível conquistar o sucesso, tomando como caminho a simplicidade, honestidade e humildade.

Aos professores do curso de irrigação e drenagem, pela colaboração em minha formação profissional.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos, ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

Aos colegas e amigos que direto ou indiretamente contribuíram profissionalmente ou me abrilhantaram com uma convivência harmoniosa, que em muitos momentos ultrapassam os laços de simples relacionamento, mas de verdadeiras amizades.

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Qualidade da água para irrigação	21
2.2 Tratamento da água para irrigação	24
2.3 Filtragem	26
2.4 Automação	29
2.5 Potencial de oxidação-redução	30
2.6 Formação de precipitados.....	32
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 Montagem do circuito eletrônico	38
3.2 Leitura do sensor de pH.....	41
3.3 Calibração do sensor	44
3.4 Sistema de injeção de ácido	47
3.5 Lógica de controle.....	49
3.6 Teste do sistema.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Resposta do sensor à mudança de pH	57
4.2 Amplificação do sinal de entrada e ajuste do sinal de saída (offset).....	59
4.3 Calibração do sensor	61
4.4 Resposta do sensor na condição de escoamento.....	63
4.5 Vazão de ácido em função do tempo relativo de abertura da válvula de controle	64
4.6 Ajuste do pH da água em função de diferentes condições iniciais de funcionamento do sistema	65
4.6.1 Ajuste do pH da água sob vazão constante	65

4.6.2	Ajuste do pH da água sob vazão variável	67
4.7	Testes do sistema em uma linha lateral	68
4.8	Análise do potencial da precipitação de íons devido à oxidação	70
5	CONCLUSÕES.....	73
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXOS.....	81

RESUMO

Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para irrigação localizada

A obstrução de emissores por causas químicas, em sistemas de irrigação localizada, é um problema crucial enfrentado pelos irrigantes, que em muitos casos, dependendo da gravidade, são obrigados a substituir o sistema existente. Isso se deve à presença de íons específicos, que em determinadas condições precipitam, provocando a obstrução dos emissores e tubulações. No entanto, pode-se intervir nas condições propícias a esse processo, de modo a preveni-lo. Uma forma de intervenção é a injeção de ácido, uma vez que este processo ocorre com maior proporção quando a água de irrigação apresenta valores de pH acima de 7. Neste contexto, objetivou-se com este trabalho desenvolver um dispositivo eletrônico de controle do pH da água para irrigação localizada. O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP). O sistema de controle apresenta de um dispositivo de injeção de ácido (atuadores) controlado através de uma válvula solenóide, comandada por pulsos elétricos, enviados pelo processador, que está associado a um circuito de leitura de um sensor, que detecta o pH da água em tempo real. A lógica de controle é baseada na diferença entre as entradas e as saídas do controlador, de modo que, as decisões futuras são baseadas nas respostas proporcionadas pelas ações anteriores. O ciclo de cada ação sobre os atuadores tem uma duração média de 3 s, que compreende o tempo entre 2 leituras consecutivas do pH e injeção de ácido na água. O sistema foi testado em águas de diferentes valores iniciais de pH (variando de 6,2 a 9,2) sob vazão constante (264 L h^{-1}) e variável. Além disso, foi instalada uma linha lateral de irrigação com comprimento de 44 m, composta de microtubos (emissores) espaçados de 1 m, aonde foi verificado os valores de pH da água na saída dos emissores ao longo da linha lateral (início, 1/3, 2/3 e fim) e em diferentes intervalos de tempos a partir do início dos testes. Os resultados obtidos comprovam a eficiência do dispositivo em manter o pH da água na faixa desejada, tanto para a condição de vazão constante, quanto variável. Em relação ao pH da água medido na saída dos emissores, não foi verificado variações significativas, tanto temporal quanto espacial, sempre se mantendo dentro da faixa desejada.

Palavras-chaves: Controle de obstrução; Precipitação de íons; Controlador de pH; Entupimento de gotejadores

ABSTRACT

Development of a control system of the pH water for drip irrigation

The clogging of emitters by chemical causes, in drip irrigation systems, is a crucial problem faced by the irrigators that in many cases, depending of the gravity, are ordered to replace the existent system. This is occurring due to the presence of the specific ions, which it precipitates in determined conditions, causing the clogging of emitters and pipes. However, it can intervene in the conditions for these processes to prevent them. A way of intervention is the acid injection, since this process occurs in major proportion, when the irrigation water shows values of pH above 7. In this context, the aim of this work was to develop an electronic device of control of the pH water for irrigation drip. The work was developed in the Laboratory of Hydraulic of Department of Biosystems Engineering (LEB), at Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP). The system of control shows a device of acid injection (actuators) controlled though a solenoid valve, commended by electric pulse that it sent by the processor, that is associated with a reading circuit of sensor, that it detects the pH of water in the real time. The logical control is based on the difference between the input and output of controller, so that the future controller decisions are based on answers caused by early actions. The cycle of each action on the actuator has the medium duration of 3 s, that it meaning the time between 2 consecutive reading of pH and acid injection in the water. The system was tested in waters of different values of pH (ranging 6.2 to 9.2) under constant (264 L h^{-1}) and variable flow. Moreover, it was installed a lateral line of irrigation with length of the 44 m, it was composed of microtubes (emitters) spaced 1 m, where it was verified the pH of water in outlet of emitters along of lateral line (begin, 1/3, 2/3 and end) and in different intervals of time after starting of tests. The results obtained proved the efficiency of the device to maintain the water pH in the desired range, for the both conditions, constant as variable flow. In relation to the water pH in the outlet of emitters, it wasn't verified meaningful variations, both temporal and spatial, it always maintained into the desired range.

Keywords: Obstruction control; Ions precipitation; PH controller; Clogging of drops

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região de estabilidade dos reagentes oxidantes e redutores em soluções aquosas.....	32
Figura 2 – Esquema de funcionamento do sistema de injeção automática de ácido na água	37
Figura 3 - Sistema de injeção automática de ácido na água.....	38
Figura 4 - Esquema do circuito eletrônico utilizado na automação da injeção de ácido na água	39
Figura 5 - Circuito eletrônico utilizado na automação da injeção de ácido na água.....	41
Figura 6 - Sensor de pH	42
Figura 7 – Resposta do sensor à variação de temperatura.....	44
Figura 8 – Seqüência de calibração do sensor	46
Figura 9 – Calibração do medidor de pH.....	47
Figura 10 – Sistema de controle do pH da água: (a) medição do pH e injeção de ácido; (b) recipiente com ácido	48
Figura 11 - Algoritmo utilizado para o controle de pH da água de irrigação e calibração do sensor de pH.....	50
Figura 12 – Esquema da lógica utilizada para o ajuste da vazão de injeção de ácido, visando o controle de pH da água.....	51
Figura 13 – Interface do programa desenvolvido para a coleta de dados através da serial.....	52
Figura 14 – Linha lateral onde foi realizado os testes de ajuste de pH da água	54
Figura 15 – Vazão do sistema em função do tempo de funcionamento.....	55

Figura 16 – Resposta do sensor de pH a 23 °C, sem amplificação de sinal elétrico	58
Figura 17 – Sinal elétrico amplificado e com offset sob diferentes valores de pH	60
Figura 18 – Leitura do conversor analógico digital em função do pH	61
Figura 19 – Calibração do sensor	61
Figura 20 – Tempo de resposta do sensor de pH	63
Figura 21 – Correção da medida do pH sob a condição de água em movimento	64
Figura 22 – Vazão de ácido em função do tempo de abertura da válvula (TR), relativo ao tempo de controle	65
Figura 23 – Tempo de ajuste do pH para estabilização do pH sob vazão constante	66
Figura 24 – Ajuste do pH da água sob vazão variável e decrescente	67
Figura 25 – pH da água durante a realização do teste	69
Figura 26 – Faixa de estabilidade dos íons e possibilidade da formação de precipitados	70
Figura 27 – Diagrama pH x potencial de redução dos sistemas: a) Ca-O-H; b) Fe-O-H; e c) Mn-O-H. Para as condições de temperatura e pressão de 298,15K e 105 Pa, respectivamente. Fonte: Adaptado de Takeno 2005.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da água de alguns mananciais da região Nordeste	22
Tabela 2 - Classificação da água de irrigação.....	23
Tabela 3 – Valores normais para os parâmetros da qualidade da água de irrigação.....	23
Tabela 4 - Cloro residual livre para o controle orgânico e de precipitados em sistemas de irrigação.....	25
Tabela 5 - Recomendação da malha da tela em função do diâmetro do emissor (1/7) .	27
Tabela 6 - Constantes de equilíbrio do carbonato em função da temperatura.....	35
Tabela 7 – Características técnicas dos principais componentes eletrônicos.....	40
Tabela 8 – Descrição dos itens sensor de pH.....	42
Tabela 9 – Características do sensor de pH	43
Tabela 10 – Características hidráulicas e componentes do sistema.....	56
Tabela 11 – Análise da sensibilidade do eletrodo à temperatura.....	58
Tabela 12 – Análise da sensibilidade do eletrodo à temperatura.....	59
Tabela 13 – Avaliação da variação do pH ao logo da linha lateral, após a correção da água	69

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água tem proporcionado uma maior procura por métodos de irrigação que possibilite um aumento na eficiência do uso da água. Sendo assim, a irrigação localizada se apresenta como um método capaz de proporcionar, além de uma melhor eficiência, uma série de vantagens como facilidade e eficiência na aplicação de fertilizantes, menor exigência de mão-de-obra e redução dos riscos de contaminação de alimentos por organismos patogênicos, visto que a água não entra em contato direto com a planta, entre outras vantagens, de acordo com Paterniani et al. (1994). No entanto, a qualidade da água utilizada na irrigação localizada pode restringir o uso da técnica, de modo que presença de sedimentos em suspensão, precipitados químicos e microrganismos podem ocasionar a obstrução dos emissores e conseqüentemente reduzir a uniformidade de aplicação de água e a sua eficiência. Portanto, a qualidade da água utilizada na irrigação localizada é de fundamental importância para o desempenho desses sistemas.

Como a irrigação localizada apresenta alta susceptibilidade à obstrução, esses sistemas normalmente são dimensionados conjuntamente com um sistema de filtragem, visando impedir a passagem de partículas com dimensão suficientemente grande para a obstrução dos emissores, pois segundo Adin e Alon (1986), a maioria das causas de entupimento se deve a presença de matérias em suspensão. Portanto, a escolha e dimensionamento do sistema de filtragem devem levar em conta as características apresentadas pela a água de irrigação, pois cada sistema se apresenta mais apropriado para uma dada característica da água, seja física, química ou biológica, sendo comum a utilização da associação de filtros (OLIVEIRA, 2005).

A presença de precipitados químicos e o crescimento microbiano têm proporcionado problemas aos sistemas de irrigação localizada, visto que a filtragem normalmente não soluciona integralmente esta problemática, sendo necessário um tratamento prévio, através da injeção de elementos que venham intervir nas características da água, de modo a torná-la apropriada à irrigação localizada.

As principais técnicas de tratamento da água de irrigação são baseadas na aplicação de substâncias químicas ou através de processos físicos, visando reduzir o

potencial de obstrução. As principais substâncias químicas utilizadas são cloro, ácido clorídrico, ácido sulfúrico e ácido fosfórico, sendo que o cloro é utilizado no controle de obstrução devido à causa biológica, enquanto os demais visam reduzir o potencial de precipitação de íons como ferro, magnésio, sulfeto de hidrogênio e carbonatos. Estes íons quando se encontram solúvel na água, passam pelos filtros sem serem retidos e quando reagem com oxigênio solúvel na água, precipitam e provocam a obstrução de emissores e/ou reduzem a seção de escoamento da tubulação.

Como esse processo é dependente do pH, potencial redox, temperatura, pressão e concentração relativa de outras substâncias, de acordo com Pitts et al. (2003), sendo que algumas dessas características não são possíveis de serem mensuradas em tempo real, como é o caso da concentração de bases, e considerando ainda que a qualidade da água pode sofrer mudanças temporais, o controle de obstrução pode ser feito com base no pH da água, através da injeção de ácido. Portanto, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um equipamento que possibilite a leitura e correção do pH da água em tempo real, diminuindo a oportunidade da ocorrência da precipitação e a conseqüente obstrução dos emissores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Qualidade da água para irrigação

A qualidade da água deve ser relacionada à finalidade a que se destina, sendo que quando se trata de irrigação os parâmetros analisados são principalmente os aspectos físicos, químicos e biológicos. De acordo com Nakayama e Bucks (1986), as características físicas da água que tem importância para a irrigação é a quantidade sólidos em suspensão. Os aspectos químicos mais importantes são: pH, sólidos totais dissolvidos, ferro total, manganês e sulfeto de hidrogênio. Estes íons apresentam maior potencial de obstrução dos emissores. Já a população bacteriana caracteriza a água quanto aos aspectos biológicos.

Segundo Morais et al. (1998) 35% das águas do semi-árido apresentam boa qualidade em relação aos aspectos químicos, sendo que um pouco menos de 6% das águas provocam problemas relativos a capacidade de infiltração de água no solo. Já nos aquíferos da região da Chapada do Apodi a água de poços tubulares rasos e profundos apresentam maiores problemas, devido a valores altos de pH e a concentração de íons carbonatos. Na área sedimentar do Estado do Rio Grande do Norte a proporção de água com $CE > 3,0 \text{ dS m}^{-1}$, se apresenta da seguinte maneira: poços tubulares 27%; poços amazonas 16% e água de mananciais livres (açudes, rios e riachos) 21%, (OLIVEIRA E MAIA, 1998).

Em trabalhos desenvolvidos na região Nordeste foi constatado que a percentagem de água enquadradas na categoria de baixa e média salinidade se apresenta da seguinte forma: 74 % na microrregião homogênea de Catolé do Rocha na Paraíba (COSTA E GHEYI, 1984); 64 % no sertão de Pernambuco (NUNES FILHO et al., 1991); 72 a 75 % no Seridó e Zona Oeste do Rio Grande do Norte (PEREIRA et al., 1992; MARTINS, 1993); 75 % nas pequenas propriedades irrigadas do Ceará, Rio Grande do Norte e Paraíba (MEDEIROS, 1992).

A Tabela 1 apresenta as características químicas de alguns mananciais do Nordeste.

Tabela 1 - Composição química da água de alguns mananciais da região Nordeste

Manancial	Município	pH	(dS m ⁻¹)	Ca	Mg	K	Na	CO ₃	HCO ₃	SO ₄	Cl
S. Francisco	Petrolina - PE	...	0,067	0,40	0,25	0,00	0,25	0,00	0,63	0,17	0,03
São Gonçalo	Souza-PB	7,1	0,240	1,05	0,80	0,20	0,61	0,00	1,69	...	0,65
Itans	Caicó - RN	8,0	0,660	0,93	2,67	0,17	3,20	0,92	1,31	...	3,70
Arm. Ribeiro	Assu - RN	7,9	0,304	0,88	0,82	0,14	1,22	0,00	1,55	...	1,63
Rio Capiá	Alagoas	7,9	5,970	5,90	13,10	0,65	38,30	0,20	2,80	4,19	51,50

As unidades dos cátions e ânions em mmol L⁻¹. Fontes: Adaptado de Gheyi et al. (1997).

As águas de poços e rios se diferenciaram quimicamente, sendo que as águas de poços podem ser consideradas, em sua maioria, de médio risco de salinidade e baixo risco de sodicidade, embora com elevados teores de bicarbonatos, próximos do limiar de restrição ao uso. Já as águas de rios, por sua vez, podem ser todas classificadas como de baixo risco de salinidade e risco severo de causar problemas de infiltração por sodicidade (NUNES et al., 2005).

Apesar de algumas características da água ter correlações com a sua fonte, estas podem ainda apresentar uma variação temporal, principalmente na concentração bacteriana, sendo que a injeção de fertilizante pode afetar as características físicas da água, aumentando tanto a turbidez quanto a concentração de sólidos em suspensão, após o ponto de injeção de fertilizantes (RIBEIRO et al., 2005).

As variações da qualidade da água de irrigação influenciam a evolução da perda de carga dos sistemas de filtragem, interferindo nos intervalos das retrolavagens. Porém, a magnitude dessa influência depende do tipo de elemento filtrante (RIBEIRO et al., 2004; RIBEIRO et al., 2005).

De acordo com as análises de qualidade da água relacionadas aos aspectos físicos, químicos e biológicos é possível prever a possibilidade de entupimento dos emissores, tomando-se as devidas medidas corretivas para evitar a possível obstrução dos emissores. A Tabela 2 apresenta os valores críticos de qualidade da água para irrigação localizada, considerando o risco de entupimento, segundo Nakayama e Bucks (1986).

Tabela 2 - Classificação da água de irrigação

	Baixo	Moderado	Severo
Físico			
Sólido em suspensão	< 50	50 - 100	> 100
Químico			
pH	< 7	7 - 8	> 8
Sol. Dissolvidos	< 500	500 - 2000	> 2000
Ferro total	< 0,2	0,2 - 1,5	> 1,5
Manganês	< 0,1	0,1 - 1,5	> 1,5
Sulfeto de hidrogênio	< 0,2	0,2 - 2,0	> 2,0
Biológicos			
População bacteriana (NMP mL ⁻¹)	< 10000	10000 - 50000	> 50000

As unidades dos parâmetros físicos e químicos, exceto pH, em mg L⁻¹. Fonte: Nakayama e Bucks (1986).

Os parâmetros avaliados no estudo da qualidade da água de irrigação normalmente se apresentam na faixa apresentada na Tabela 3 (Ayers e Westcot, 1991).

Tabela 3 – Valores normais para os parâmetros da qualidade da água de irrigação

Parâmetros	Unidade	Valores normais
Condutividade elétrica	dS m ⁻¹	0 - 3
Sais totais dissolvidos (TDS)	mg L ⁻¹	0 - 2000
Cálcio	meq L ⁻¹	0 - 20
Magnésio	meq L ⁻¹	0 - 5
Sódio	meq L ⁻¹	0 - 40
Carbonatos	meq L ⁻¹	0 - 0,1
Bicarbonatos	meq L ⁻¹	0 - 10
Cloretos	meq L ⁻¹	0 - 30
Sulfatos	meq L ⁻¹	0 - 20
Nitrato	mg L ⁻¹	0 - 10
Amônio	mg L ⁻¹	0 - 5
Fosfato	mg L ⁻¹	0 - 2
Potássio	mg L ⁻¹	0 - 2
Boro	mg L ⁻¹	0 - 2
pH	..	6 - 8,5
RAS	(mmol L ⁻¹) ^{1/2}	0 - 15

Fonte: Adaptado de Ayers e Westcot (1991)

2.2 Tratamento da água para irrigação

Diversos processos podem ser utilizados para o tratamento da água para irrigação, sendo que entre eles tem-se a aeração, a adição de cloro e/ou ácido. A adoção de uma dessas técnicas depende do problema que a água apresenta, podendo ser necessário a associação de todos esses processos.

A aeração artificial é um processo eficiente no tratamento da água para irrigação, com altos níveis de ferro e manganês dissolvidos na água, quando o pH da água é mantido próximo da neutralidade. Porém, a oxidação de Fe é mais eficiente que o Mn, sendo que quanto mais profundo for realizada a emissão da mistura maior a eficiência (PEREIRA et al., 2005). O uso conjunto da aeração com a cloração ou de permanganato de potássio melhora a eficiência da remoção de ferro e magnésio (FEITOSA FILHO, 2008). Apesar do processo de redução da concentração dos elementos que provocam problemas de obstrução dos emissores, através da precipitação prévia desses íons serem eficientes, demandam um grande tempo de reação e uma estrutura de elevado custo, visto que a irrigação demanda grande volumes de água.

O cloro também pode ser usado para recuperação de emissores obstruídos por causa biológica, sendo que a resposta ao tratamento, quanto à dosagem e o número de aplicações, varia de acordo com as características do emissor. Porém esse tratamento pode ser efetivo para obstrução parcial, não o sendo para emissores apresentando obstrução total (RESENDE et al., 2000). Na Tabela 4 está apresentada a recomendação da concentração de cloro residual livre para o controle orgânico e de precipitados químicos, segundo Keller e Bliesner (1990).

Outros procedimentos como a aplicação de ar comprimido não é um processo eficiente no controle da obstrução, sendo mais recomendado o uso da cloração (CARARO E BOTREL, 2007). Uma excelente opção para a desobstrução de microaspersores devido a problemas de ferro na água, é a mistura de hipoclorito de sódio (12%) com ácido sulfúrico para pH 4,5 (RIBEIRO E PATERNIANI, 2008).

Tabela 4 - Cloro residual livre para o controle orgânico e de precipitados em sistemas de irrigação

Forma de uso	Cloro	A controlar
Contínua	0,5 a 1 mg L ⁻¹	Algas
Aos 20 minutos finais da irrigação	20 mg L ⁻¹	Algas
Não descrita	3,6 a 8,4 vezes o conteúdo de S ₂ H	Sulfetos de hidrogênio
Não descrita	1 mg L ⁻¹ acima do conteúdo de Fe	Ferro-bactéria
Não descrita	0,64 vezes o conteúdo de Fe ⁺⁺	Ferro
Não descrita	1,3 vezes o conteúdo de Mn	Manganês
Manutenção ao final da irrigação	1 mg L ⁻¹	Limo

A precipitação de ferro e manganês pode ser evitada com a injeção contínua de ácido na água, de modo que a mesma permaneça em um pH menor que 7. As substâncias mais usadas para este fim são ácido clorídrico, ácido sulfúrico e ácido fosfórico. Porém, devem-se tomar os devidos cuidados, pois o ácido fosfórico pode provocar a precipitação de carbonato de cálcio presente em água dura (PITTS et al., 2003).

Por se tratar de substâncias químicas tóxicas, os ácidos devem ser manuseados tomando-se uma série de medidas, conforme recomenda Pitts et al. (2003). Dentre essas medidas, recomenda-se que a diluição do ácido concentrado seja feita em um recipiente não metálico, sendo que, deve-se adicionar ácido à água, evitando adicionar água ao ácido. Além disso, outro fator importante é evitar a injeção do ácido antes de peças e filtros, cujo material de construção seja metais, para se evitar a corrosão dos mesmos. Sendo assim, o sistema de injeção deve ser lavado com água depois da aplicação, para evitar o desgaste dos componentes em contato direto com o ácido.

Segundo Kidder et al. (2009) depois da injeção de ácido o processo de neutralização de bases continua lentamente por um período de 1 ou 2 dias. Sendo recomendado que a quantidade de ácido injetado para a neutralização de 80 a 90% das bases deve ser de tal modo que o pH da água permaneça na faixa de 4,5 a 5. Já Lamm et al. (2003), comenta que a mudança de pH se dá de forma instantânea, quando a água apresenta um pH inicial próximo de 8, sendo necessário, de modo geral, 0,5

meq L⁻¹ de ácido por unidade de pH decrescida, durante a titilação, sendo recomendado que se mantenha o pH na faixa de 6 a 7.

Pitts et al. (2003) cometa que a precipitação de cálcio e magnésio pode ser prevenida se o pH da água for mantido abaixo de 7, através da injeção de ácido. De modo que o ácido pode ainda combater a proliferação de microrganismos, quando pH é mantido em níveis ainda mais baixo. Porém, Ayers e Westcot (1991) afirma que os ácidos são caros e perigosos, e que só deve ser usados em condições extremas. A quantidade a ser aplicada, é o suficiente para manter o pH da água próximo, mais nunca inferior a 6,5. Em contra partida Clark (1998) citado por Costa (2000), observou que para um pH de 5,5, não se verificou ocorrência de precipitação de ferro, enquanto que em pH 7, o ferro começou a provocar problema de obstrução do emissores.

2.3 Filtragem

Os principais filtros utilizados no processo de remoção de partículas da água para fins de irrigação localizada são diferenciados pelo seu elemento filtrante que são principalmente areia, tela e disco. Segundo Testezlaf (2008) os filtros de areia são recomendados para remoção de contaminantes orgânicos e de algas. No entanto, segundo Phillips (1995) este pode fornecer condições favoráveis à proliferação de bactéria.

Os filtros de areia consistem, basicamente, de recipientes cilíndricos, onde fica o elemento filtrante, que deve apresentar um diâmetro de acordo com a dimensão das partículas que se deseja reter. De modo geral, recomenda-se que o elemento filtrante apresente 1/10 do diâmetro do emissor, evitando-se com isso que as partículas agrupadas venham provocar obstruções. Porém Pizarro (1996) recomenda 1/10 e 1/7 do diâmetro dos gotejadores, respectivamente para filtros de areia e tela, e 1/5 do diâmetro dos microaspersores. Na Tabela 5 está apresentado o diâmetro do emissor e o número de mesh a ser utilizado no sistema de filtragem.

Os filtros de tela ou disco são compostos de cilindros que contém no seu interior o elemento filtrante que são respectivamente a tela e um conjunto de anéis dispostos de ranhuras empilhados uns sobre os outros.

Tabela 5 - Recomendação da malha da tela em função do diâmetro do emissor (1/7)

Diâmetro do emissor (mm)	Tela	
	Tamanho do orifício (μm)	N° de mesh
1,50	214	65
1,25	178	80
1,00	143	115
0,90	128	115
0,80	114	150
0,70	100	170
0,60	86	200
0,50	71	250

Fonte: Adaptado de Pizarro (1996)

As mantas sintéticas podem ser utilizadas como elemento filtrante, tendo um desempenho satisfatório e mostrando funcionalidade e resistência. Além disso, as mantas são mais eficientes que os elementos de tela e disco, removendo maior quantidade de sólidos em suspensão quando empregadas em filtros de 1" de diâmetro. Porém, a evolução da perda de carga nas mantas é mais rápida que nos elementos de tela e discos, devido principalmente ao maior acúmulo de resíduos em sua superfície, em decorrência direta de sua maior eficiência, necessitando um maior número de retrolavagens (SCATOLINI E PATERNIANI, 2001; RIBEIRO et al., 2005).

A retrolavagem é realizada mediante a mudança na direção de fluxo a partir da tubulação de saída do filtro. Assim, tanto a tubulação de entrada deve possuir uma derivação para eliminar a água suja, como o sistema deve permitir essa mudança de direção de forma manual ou automática (TESTEZLAF, 2008).

A maioria dos filtros são retrolavados manualmente a intervalos de tempo predefinidos ou utilizando sistemas automáticos baseados em valores de perda de pressão desenvolvida a partir do entupimento da camada filtrante. Nakayama e Bucks (1986) afirmam que não existe uma regra universal para prever com precisão o momento da limpeza do filtro ou da retrolavagem. Porém, pode-se tomar como critério o aumento de 10 a 20% da perda de carga correspondente ao filtro limpo (SILVA et al., 2003) ou proceder a limpeza antes que a perda de carga ultrapasse 6 m.c.a., sendo

que a perda de carga nos filtros limpos normalmente varia de 1 a 3 m.c.a. (BERNARDO et al., 2006).

A vazão de retrolavagem tem de ser suficiente para originar a fluidização do leito filtrante, ou seja, a passagem reversa da água pela camada de areia deve determinar um estado de suspensão das partículas de areia na água, com expansão progressiva do leito até certo limite, que possibilite a manutenção da areia dentro do filtro e remova as partículas contaminantes. A vazão de retrolavagem varia com o diâmetro efetivo médio da areia, com a altura da camada filtrante e com o modelo construtivo de filtro (TESTEZLAF, 2008; KELLER E BLIESNER, 1990), sendo recomendadas vazões médias de 7 a 10 L s⁻¹ m⁻² (25,2 e 36,0 m³ h⁻¹m⁻²) para diâmetros efetivos médios de areia entre 1900 e 1000 µm, e de 14 a 17 L s⁻¹ m⁻² (50,4 e 61,2 m³ h⁻¹m⁻²) para areias com diâmetros efetivos entre 1000 e 825 µm.

A complexidade da definição do valor correto da vazão de retrolavagem se deve ao fato de essa determinação ser função do diâmetro e do modelo construtivo do filtro, do diâmetro médio efetivo, da espessura da camada de areia e da quantidade de contaminantes retidos no filtro. Outro problema que ocorre na retrolavagem são as perdas de água durante a sua operação, que dependendo da forma de manutenção e do tempo utilizado pelo agricultor, pode atingir valores excessivos. Portanto, é de fundamental importância a instalação de um sistema de retrolavagem automático por diferencial de pressão, proporcionando um melhor controle dos números de retrolavagens, melhoria no sistema de filtragem e praticidade na sua limpeza.

Uma alternativa para reduzir o desperdício de água e melhorar a eficiência do sistema de filtragem é a utilização de pré-filtragem através de hidrociclones, que apresentam a característica de retirar cerca de 98% das partículas maiores que 100 µm, sem apresentar variação de perda de carga ao longo do tempo, ao contrário dos filtros de areia, tela e disco (SOCCOL, 2003), diminuindo a necessidade de retrolavagem.

O dimensionamento dos filtros de areia deve ser feito de modo que a velocidade média da água não ultrapasse 60 m h⁻¹, sendo recomendado que a vazão seja majorada em 20 % para que se tenha uma margem de segurança (PIZARRO, 1996). A velocidade de filtragem não deve ultrapassar o limite estabelecido anteriormente, para

que não ocorram desníveis na superfície filtrante e conseqüentemente a redução da eficácia de filtração.

2.4 Automação

A automação é qualquer sistema capaz de tomar decisões sem a intervenção humana, normalmente baseada em sensores, apoiada em processadores previamente programados e destinados a substituir o trabalho humano em tarefas complexas, culminando em soluções rápidas e econômicas nos diversos setores da economia, inclusive na agricultura (ALENCAR et al., 2007).

Estes sistemas tem sido empregado em diversos setores, visando aperfeiçoar processos, baseados em informações coletadas por sensores em tempo real, como sensores de infravermelho, pH, oxigênio dissolvido, temperatura, turbidez e nível de água (FREIRE E PRADO, 2000; BECK et al., 2006).

Em processos que envolvem decisões de alta complexidade, a inteligência artificial é uma ferramenta que cada vez mais, está sendo difundida em sistemas de automação, que utilizam um grande volume de informação. As principais técnicas de controle de sistemas inteligentes são as *redes neurais* e a lógica *Fuzzy*, que é derivada do controlador proporcional integrativo derivativo (*PID*). Alguns exemplos da aplicação de sistemas *Fuzzy* são apresentados por Rosseto (2008) e Silvestre (2003), respectivamente, em um sistema de aplicação de herbicida com taxa variável e na automação e controle da qualidade da água para tanques de água doce, onde os principais parâmetros de controle foram a temperatura e o pH da água.

Na área de irrigação tem sido observado nos últimos anos, um grande avanço na automação dos sistemas (ALENCAR et al., 2007), sendo possível o uso de microprocessadores para tal finalidade, tendo em vista que são componentes compactos e de baixo custo (LOPEZ et al., 1992; IBARS, 2004). Queiroz et al. (2005) utilizaram a automação, no manejo da irrigação, baseado em um controlador e em tensiômetros. Garzella et al. (2007) automatizaram a aquisição de dados de vazão de um vertedor, enviando a leitura via rádio frequência até um computador, sendo o sistema controlado por dispositivo eletrônico baseado em um sonar e em um microcontrolador.

2.5 Potencial de oxidação-redução

A transferência de elétrons durante uma reação química é chamada de reação de oxidação-redução ou simplesmente redox. A tendência de uma substância ser reduzida ou oxidada é medida por um número denominado potencial padrão de eletrodo, medido em relação a um padrão de referência que é o eletrodo padrão de hidrogênio (EPH), cujo potencial de redução foi atribuído valor zero ($E^0 = 0 \text{ V}$). Por convenção da IUPAC (International Union of Pure and applied Chemistry) o potencial do eletrodo e o seu sinal positivo, será aplicado às semi-reações de redução.

O potencial de redução de uma substância não depende apenas de seus componentes, mas também das suas concentrações, sendo que a equação que relaciona o potencial real de uma meia célula com as concentrações das espécies oxidadas e reduzidas é conhecida como equação de Nernst.

Seja a reação de meia célula apresentada na eq. (1).



O potencial real de redução pode ser determinado segundo a eq. (2) (equação de Nernst).

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(uU)^u (vV)^v}{(xX)^x (zZ)^z} \quad (2)$$

em que:

E : potencial real da meia célula (V);

E^0 : potencial padrão de eletrodo (V);

R : constante universal dos gases ($8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$);

T : temperatura ambiente (K);

n : número de elétrons que participa da reação;

F : Faraday (96485 C mol^{-1}); e

(uU) , (vV) , (xX) e (zZ) : atividade dos reagentes e produtos da reação.

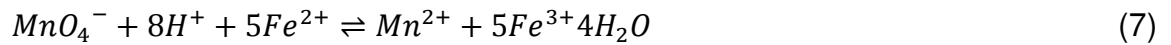
Usando-se o logaritmo na base 10 e os valores de R e F , para uma temperatura de 25°C e considerando-se que para mistura de líquidos, a atividade é aproximadamente a sua fração em mol, a eq. (2) resulta na eq. (3).

$$E = E^0 + \frac{0,059}{n} \log \frac{[U]^u [V]^v}{[X]^x [Z]^z} \quad (3)$$

Para o ferro e manganês temos:



Invertendo a eq. (4) e multiplicando por 5, culmina na eq. (6), que somada à eq. (5), resulta na eq. (7) (reação total).



Para a condição de equilíbrio, o potencial de redução pode ser calculado através da eq. (8).

$$E_{eq} = \frac{E^0_{Fe^{3+}/Fe^{2+}} + 5E^0_{MnO_4^-/Mn^{2+}}}{6} - \frac{0,059}{6} \log \frac{[Fe^{2+}][Mn^{2+}]}{[Fe^{3+}][MnO_4^-][H^+]^8} \quad (8)$$

Segundo Ohlweiler (1981) em condições adequadas a água pode sofrer redução com evolução do hidrogênio ou oxidação com evolução do oxigênio, de modo que os agentes oxidantes e redutores são estáveis em solução aquosa dentro de uma faixa de potenciais (E), relativos à concentração de hidrogênio. Esta região está compreendida entre as duas linhas contínuas da Figura 1. A estabilidade dos agentes está relacionada aos potenciais dos pares $H^+ \rightarrow H_2$ e $O_2 \rightarrow H_2O$, conforme está apresentado nas reações a seguir.

Em pH 0:



Em pH 7:





Em pH 14:

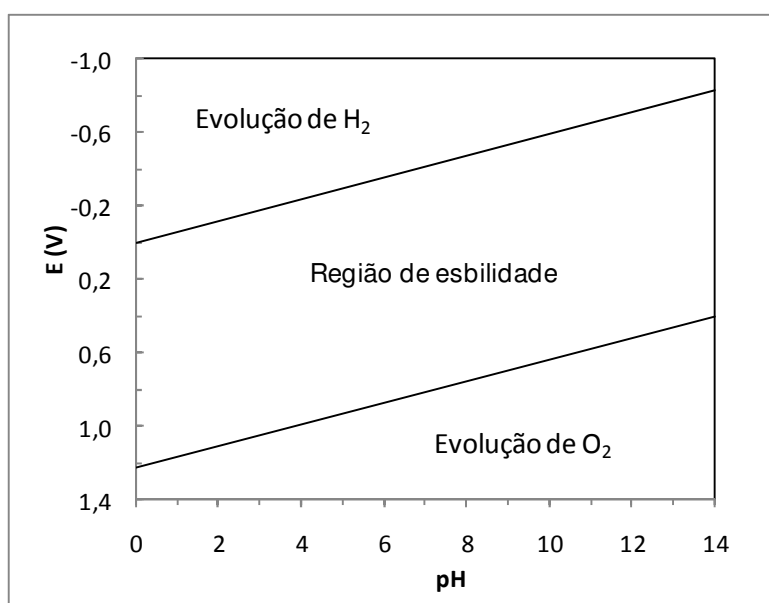


Figura 1 - Região de estabilidade dos reagentes oxidantes e redutores em soluções aquosas. Fonte: Adaptado de Ohlweiler (1981).

2.6 Formação de precipitados

A formação de precipitados é um processo cinético, onde o controle da velocidade de formação e de outras condições permite em certa extensão, conduzir a precipitação de maneira a separar a fase sólida desejada, com as melhores características físicas possíveis. Os tipos de precipitados se distinguem principalmente, pelo tamanho das partículas, sendo que esta é uma característica muito importante,

pois a qualidade do precipitado quanto à filtrabilidade está diretamente relacionado a esta característica (OHLWEILER, 1981).

De modo geral um precipitado recém formado é deixado, durante um tempo considerável, na presença da “água mãe”, antes de ser filtrado, passando por um conjunto de transformações irreversíveis durante o processo de digestão. Esse processo é chamado de “amadurecimento de Ostwald” e ocorre porque as partículas menores são mais solúveis que as maiores, tornando a solução supersaturada, provocando um crescimento das partículas maiores através da dissociação das menores. Porém, para precipitados gelatinosos como $Fe(OH)_3$ que apresenta uma solubilidade muito pequena, não permite um crescimento do cristal a uma velocidade significativa, de modo que o crescimento das partículas neste caso não tem utilidade prática (BACCAN et al. 2001).

O tamanho das partículas está relacionado ao precipitado e às condições de precipitação como a concentração dos reagentes, de modo que quanto maior a concentração, maior o grau de dispersão e menor o tamanho das partículas, como pode ser observado na equação de von Weimarn (eq. (15)).

$$\text{Grau de dispersão} = \frac{\tau(TDS - S)}{S} \quad (15)$$

em que:

S : solubilidade do precipitado no estado de equilíbrio;

TDS : concentração dos íons em solução no instante anterior a precipitação; e

τ : constante que depende da natureza do precipitado, temperatura e viscosidade da solução.

O potencial de formação de precipitados, devido à presença de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), pode ser avaliada através do índice de saturação Langelier (LAMN et al., 2007; PIZARRO, 1996; ALBUQUERQUE E DURÃES, 2008; METCALF E EDDY, 2003). Esta análise é feita baseada na concentração de cálcio e bicarbonato presente na água, levando em consideração o produto de solubilidade e a constante de dissociação desses íons. De modo que é possível estimar o pH de saturação, a partir

do qual começa haver a formação de carbonato de cálcio e a sua conseqüente precipitação. O procedimento de cálculo se dá através das eq. (16) a (29).



$$K_S = \gamma_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot \gamma_{CO_3^{2-}} \cdot [CO_3^{2-}] \quad (17)$$



$$K_D = \frac{[H^+] \cdot \gamma_{CO_3^-} \cdot [CO_3^-]}{\gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-]} \quad (30)$$

$$\frac{K_S}{K_D} = \frac{\gamma_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-]}{[H^+]} \quad (20)$$

$$\log \frac{K_S}{K_D} = \log(\gamma_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-]) - \log[H^+] \quad (21)$$

$$pH_s = -\log \frac{(\gamma_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-] \cdot K_D)}{K_S} \quad (22)$$

$$pH_s = pK_D - pK_S + p[Ca^{2+}] + p[HCO_3^-] + p\gamma_{Ca^{2+}} + p\gamma_{HCO_3^-} \quad (23)$$

em que:

K_D : produto de solubilidade do $CaCO_3$;

K_S : constante de dissociação do HCO_3^- ;

$[Ca^{2+}]$: concentração de cálcio (mol L^{-1});

$[HCO_3^-]$: concentração de bicarbonato (mol L^{-1});

γ : atividade do íon; e

p : logaritmo negativo.

Segundo Metcalf e Eddy (2003), a atividade dos íons pode ser obtida através da eq. (24), e o produto de solubilidade do $CaCO_3$ (K_D) e a constante de dissociação do HCO_3^- (K_S), que é função da temperatura, estão apresentados na Tabela 6, ou ainda podem ser calculados através das eq. (27) e (28), respectivamente, obtidas a partir de regressão dos dados apresentados na Tabela 6. Já Lamm et al. (2003) apresenta a eq. ((29) para o cálculo de $(pK_D - pK_S)$.

Tabela 6 - Constantes de equilíbrio do carbonato em função da temperatura

Temperatura (°C)	$K_D \times 10^{-11}$	$K_S \times 10^{-9}$
5	2,754	8,128
10	3,236	7,080
15	3,715	6,02
20	4,169	5,248
25	4,477	4,571
40	6,026	3,090

Fonte: Metcalf e Eddy (2003)

$$\gamma = 10^{-\frac{0,5 \cdot (Z_i)^2 \cdot \sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}} \quad (24)$$

$$I = 2,5 \times 10^{-5} TDS \quad (25)$$

$$LSI = pH + \log \frac{(\gamma_{Ca^{2+}} \cdot [Ca^{2+}] \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-] \cdot K_D)}{K_S} \quad (26)$$

$$K_D = 9,2 \times 10^{-13} T + 2,3 \times 10^{-11} \quad (27)$$

$$K_S = 9,237 \times 10^{-9} e^{-0,0277T} \quad (28)$$

$$pK_D - pK_S = 2,586 - 2,621 \times 10^{-2} T + 1,01 \times 10^{-4} T^2 \quad (29)$$

Como pode ser observado na eq. (26), o índice de saturação de Langelier (LSI), é a diferença entre o pH medido e o pH de saturação, de modo que o potencial de precipitação $CaCO_3$ pode ser avaliado como se segue:

- Se $LSI = 0 \rightarrow$ O $CaCO_3$ está em equilíbrio com a água, portanto não ocorrerá precipitação;
- Se $LSI < 0 \rightarrow$ haverá dissolução do carbonato, proporcionando uma água agressiva; e
- Se $LSI > 0 \rightarrow$ é um indicativo que ocorrerá a precipitação $CaCO_3$.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Universidade de São Paulo - USP). Onde foi construído o sistema controlado eletronicamente, cuja função era a medição e controle do pH da água (Figuras Figura 2 e Figura 3), e realizado os testes, visando verificar a eficiência do sistema em manter o pH da água em um patamar previamente estabelecido.

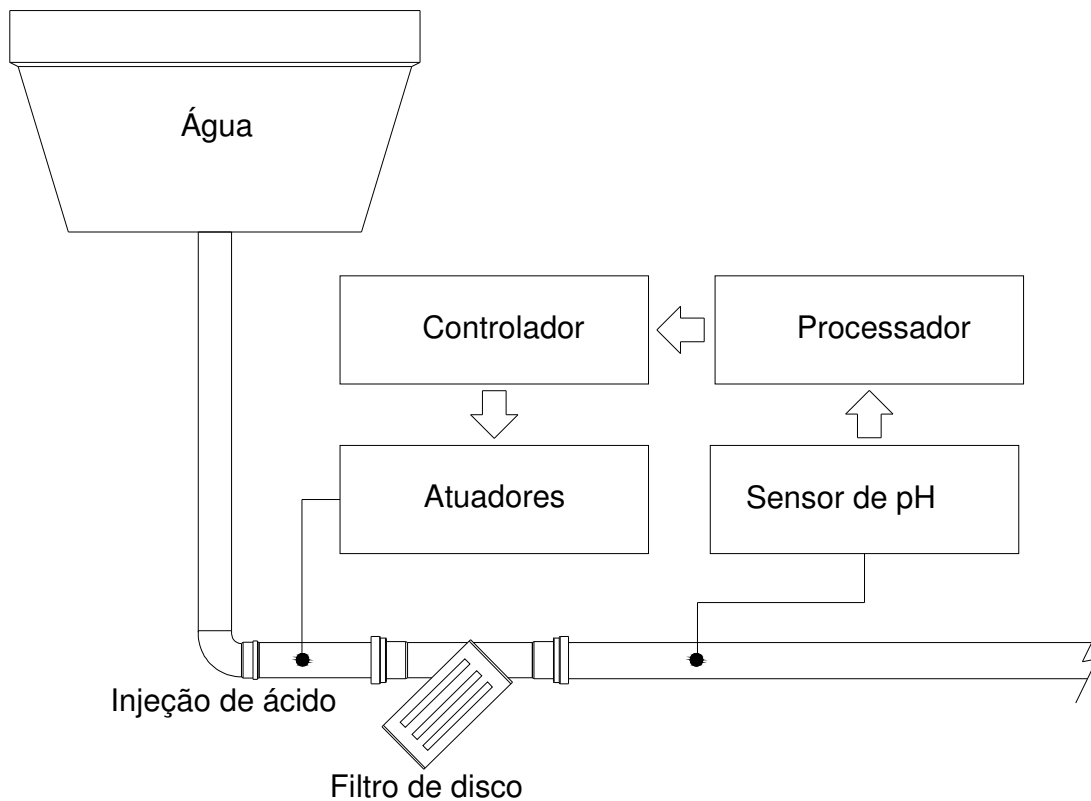


Figura 2 – Esquema de funcionamento do sistema de injeção automática de ácido na água

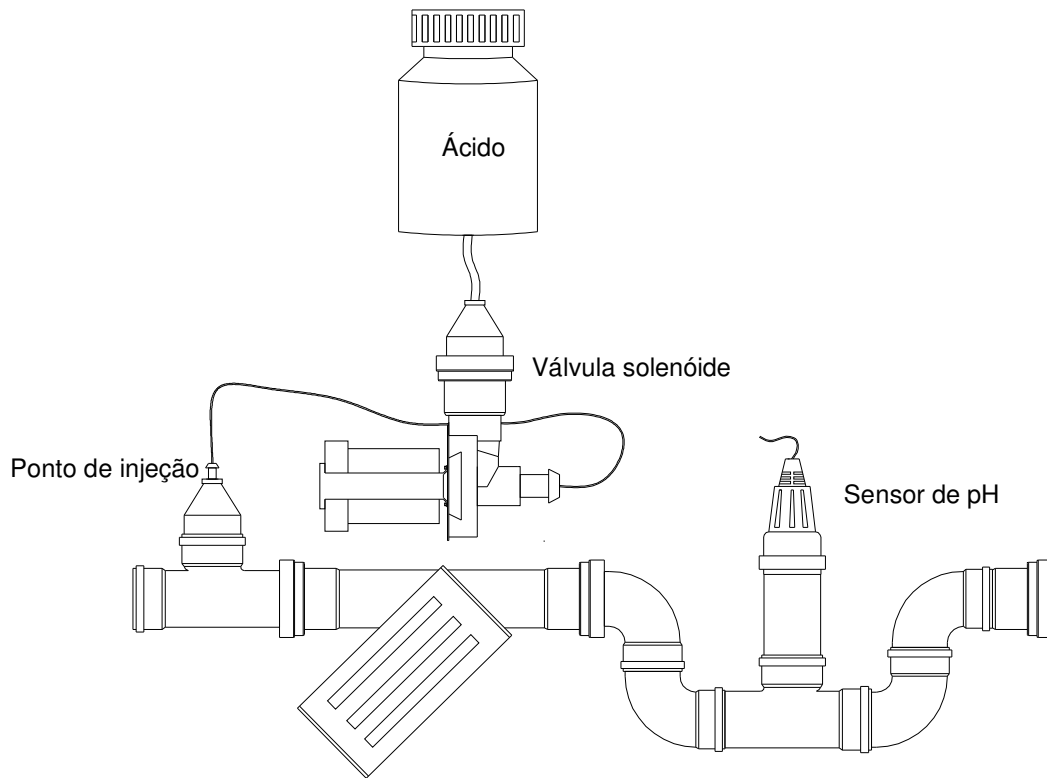


Figura 3 - Sistema de injeção automática de ácido na água

3.1 Montagem do circuito eletrônico

Os componentes eletrônicos utilizados na construção do circuito e o arranjo dos mesmos no circuito estão apresentados na Figura 4. O referido circuito pode ser descrito em quatro partes funcionais como, amplificação do sinal de entrada, aquisição e processamento das informações (micro-controlador), controle dos atuadores e a interface para comunicação com o usuário (serial e display). As características técnicas dos principais componentes estão apresentadas na Tabela 7.

O circuito foi montado em uma placa PCI universal 10X10 cm (Figura 5), sendo utilizadas as seguintes ferramentas: ferro e sugador de solda, multímetro digital e alicates de bico fino e de corte. Foi utilizado o micro-controlador PIC18F4550, da Microship, que apresenta uma memória flash de 32 kbytes, e é programado em linguagem C. Para comunicação serial, utilizou-se um circuito integrado MAX 232, visando à aquisição e visualização dos dados através da interface de computadores.

Além disso, o sistema é composto de display para a visualização imediata do pH da água durante o processo de correção.

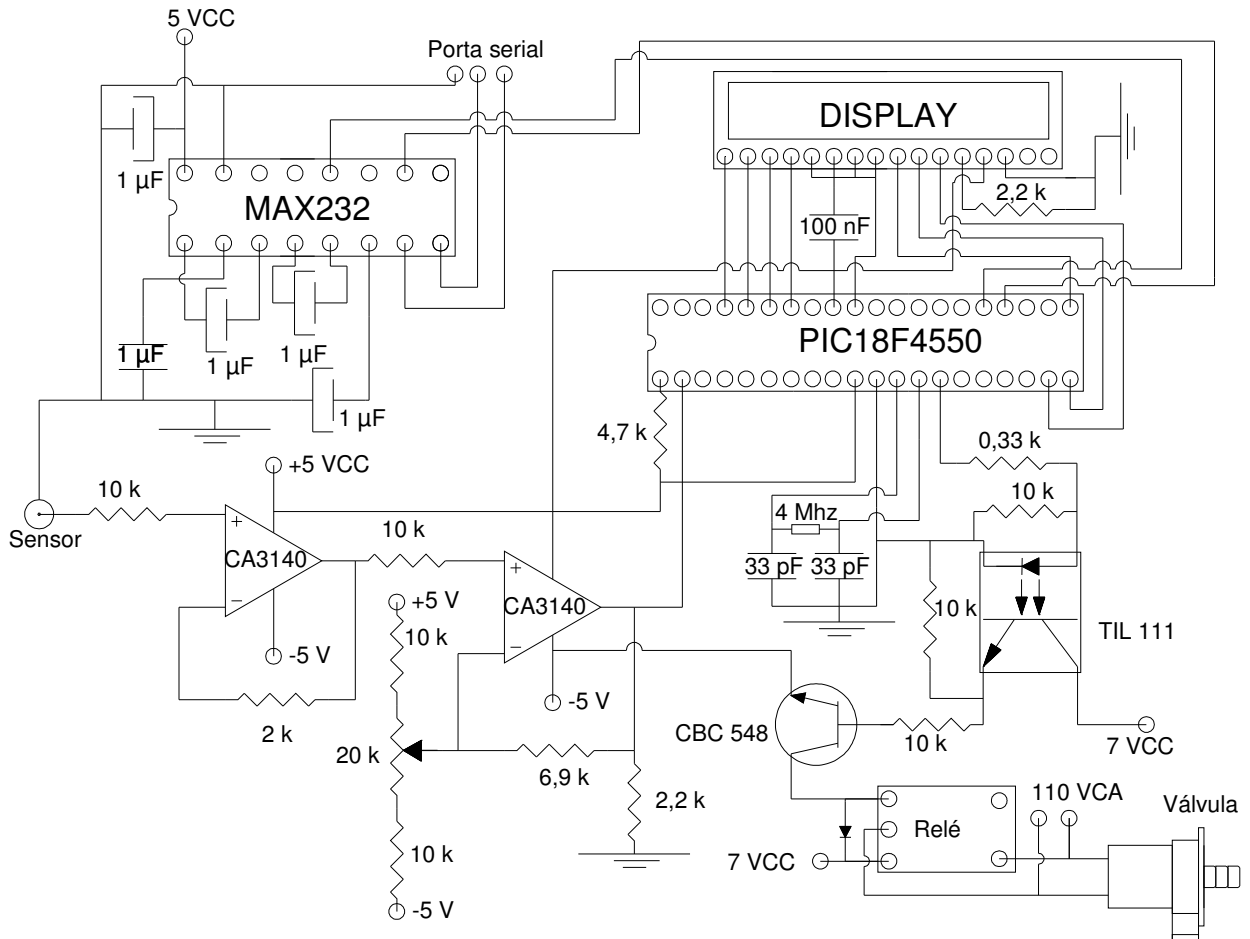


Figura 4 - Esquema do circuito eletrônico utilizado na automação da injeção de ácido na água

Tabela 7 – Características técnicas dos principais componentes eletrônicos

Componente	Característica	Unidade
PIC18F4550		
Fabricante	Microship Technology	—
Alimentação	5	V
N° pinos	40	—
Pinos		—
AD (10 bits)	13	—
Portas	5	—
Memória		
Flash	32	kBytes
EEPROM	256	Bytes
Temperatura	-40 a 85	°C
Impedância de entrada máxima	2,5	kΩ
MAX 232		
Fabricante	Texas Instruments	—
N° pinos	16	—
Temperatura	0 a 70	°C
Alimentação	5	V
CA 3140		
Fabricante	Intersil	—
N° pinos	8	—
Temperatura	-25 a 150	°C
Alimentação	4 a 36	V
Impedância de entrada	1,5	TΩ
Impedância de saída	60	Ω

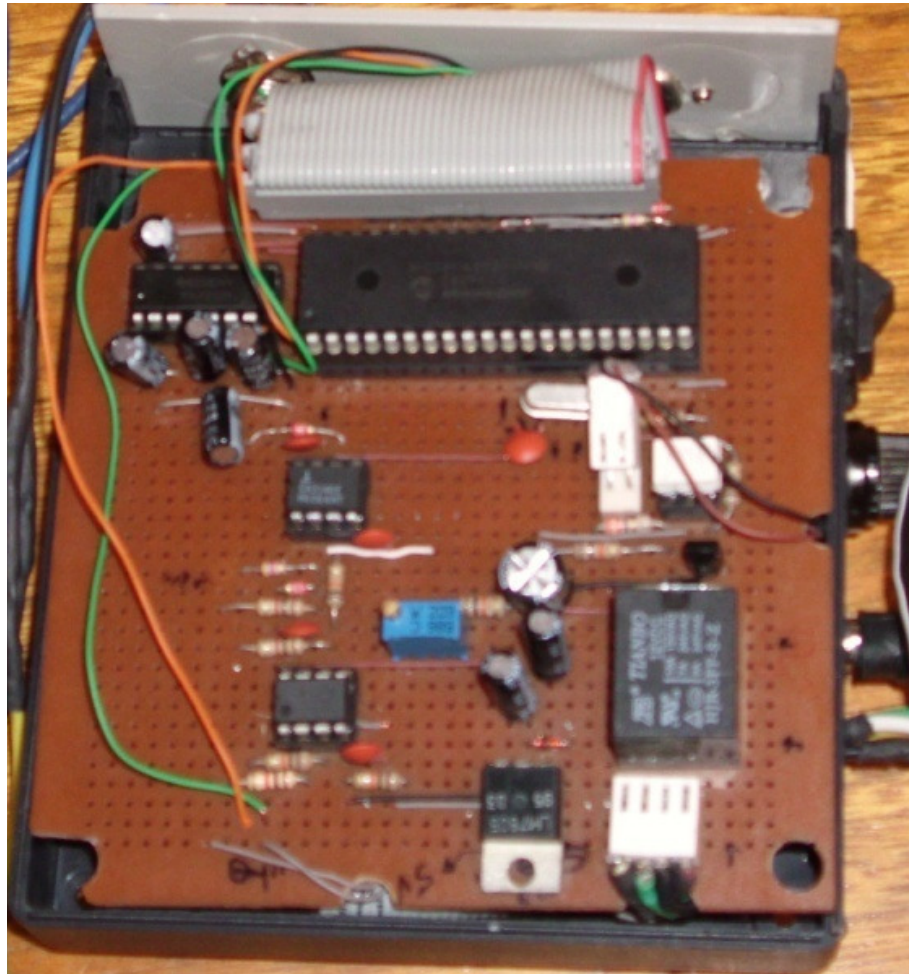


Figura 5 - Circuito eletrônico utilizado na automação da injeção de ácido na água

3.2 Leitura do sensor de pH

A medição do pH da água foi feita através de um sensor potenciométrico, composto de um eletrodo de referência e um indicador (Figura 6), de modo que cada eletrodo constitui uma meia-célula. A meia-célula que corresponde ao eletrodo indicador, quando submetida a diferentes valores de pH gera uma diferença de potencial em relação ao eletrodo de referência. A diferença de potencial é transmitida até o circuito medidor através de um cabo coaxial composto de um conector BNC universal.

O eletrodo indicador é constituído de um vidro especial que é sensível a presença de íons H^+ e apresenta um formato de bulbo, como pode ser visualizado na

Figura 6 em conjunto com a Tabela 8. As principais características do sensor estão apresentadas na Tabela 9.

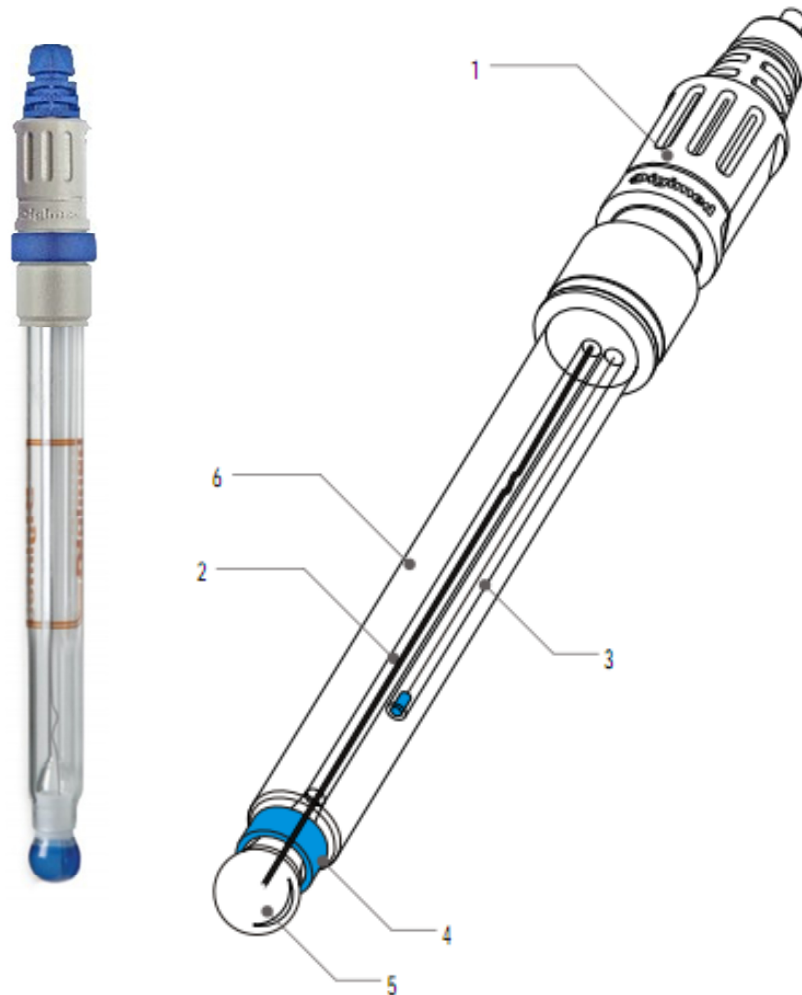


Figura 6 - Sensor de pH. Fonte: Digimed

Tabela 8 – Descrição dos itens sensor de pH

Item	Descrição
1	Cabeçote
2	Eletrodo de medida
3	Barreira iônica
4	Diafragma anular de referência
5	Bulbo de medida
6	Eletrólito gel

Tabela 9 – Características do sensor de pH

Parâmetro	Descrição
pH	0 a 14
Temperatura	0 a 100 °C
Diafragma	Cerâmica anular
Sistema de Referência	Ag/AgCl+barreira iônica
Eletrólito	Tipo difusão
Haste	108 mm
Material da Haste	Vidro
Aplicação	Meios aquosos em geral com baixa atividade iônica e águas

A impedância dos sensores de pH é da ordem de 100 M Ω (MAIA E MAIA, 2005), de modo que não é possível se fazer a leitura da diferença de potencial entre os eletrodos diretamente em um multímetro, ou no conversor analógico-digital, pois estes possuem uma baixa impedância de entrada. Sendo assim, foi utilizado um circuito amplificador que apresenta uma alta e baixa impedância de entrada e de saída, respectivamente, como pode ser observado na Tabela 7.

Além do problema da impedância, quando o sensor é submetido a uma solução com pH maior que 7, gera uma diferença de potencial negativa, ao passo que em pH menor que 7, o valor da diferença de potencial é positiva. O conversor analógico-digital (AD) do microcontrolador tem como referência apenas valores de diferença de potencial positivos. Portanto, não é possível se obter a leitura do sensor sem a transformação do sinal, para pH maior que 7, pois neste caso a diferença de potencial é negativa. Sendo assim, o amplificador tem como função proporcionar um “offset” na leitura do sensor, fazendo com que se tenha apenas valores positivos para qualquer valor de pH.

A diferença de potencial gerada entre os eletrodos indicador e de referência, além de ser função do pH da solução que se pretende mensurar, é também sensível a mudanças de temperatura. Sendo que a 25^o C, esse valor é de 59,16 mV para cada unidade de pH. Porém, este valor varia linearmente de 54,20 a 66,10 mv, para uma temperatura de 0 e 60 °C, respectivamente (Figura 7). Desse modo, os medidores comerciais vêm acompanhados de um sensor de temperatura para compensação da variação da mesma. No entanto, neste trabalho foi desprezada essa fonte de erro, tendo em vista a baixa variação de temperatura da água e a precisão necessitada pelo sistema.

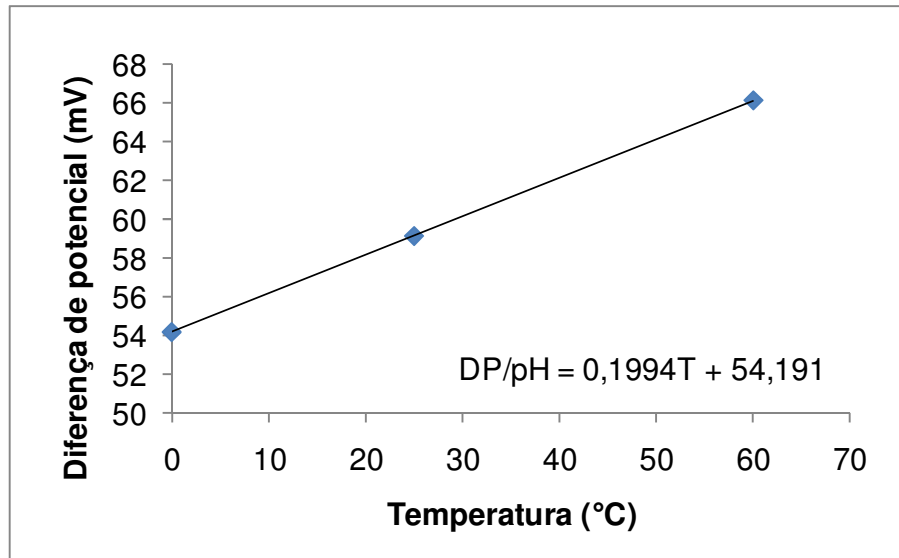


Figura 7 – Resposta do sensor à variação de temperatura

Em função da alta impedância dos sensores de pH, é comum a presença de ruídos nos circuitos de leitura destes sensores, portanto é de fundamental importância que estes estejam bem dimensionados e com sistema de aterramento eficiente (MAIA E MAIA, 2005). Neste trabalho este problema foi contornado através de filtro digital, que consiste na aquisição de um grande número de leituras ($1000 \text{ Leituras s}^{-1}$), seguido do cálculo da média dos mesmos. Este procedimento anula o efeito da presença de eventuais ruídos.

3.3 Calibração do sensor

A calibração periódica em sensores de pH é necessário, devido ao fato do fenômeno do potencial de assimetria, que consiste na diferença de potencial entre os eletrodos de referência e indicador, mesmo quando ambos estão submetidos a solução de mesmo pH. Essa diferença de potencial varia aleatoriamente com o tempo, porém, apresenta valores pequenos. Daí a necessidade de calibração periódica dos medidores de pH. Sendo assim, foi implementado uma rotina para a calibração periódica do

sensor de pH, através das soluções padrão de pH 4 e 7, utilizadas em medidores industriais.

O algoritmo de calibração está apresentado nos ANEXO A e B. Cada ponto de coleta de dados é testado para garantir que o valor de diferença de potencial ou número de bytes medido pelo micro-processador, atingiu a estabilidade. Para tal, utilizou-se do coeficiente de variação (CV) apresentado pelos dados coletados (número de dados coletados em cada ponto igual a 20) para o mesmo pH, admitindo-se um CV máximo de 0,15 %. Os parâmetros da equação de regressão, bem como o CV, são calculados conforme as eq. (30), (31) e (32).

$$a = \frac{\sum pH \sum B - 2 \sum (BpH)}{(\sum B)^2 - 2 \sum B^2} \quad (30)$$

$$b = \frac{1}{2} \left(\sum pH - a \sum B \right) \quad (31)$$

$$CV = \frac{20 \sqrt{\sum_{j=1}^{20} \left(B_j - \frac{\sum_{j=1}^{20} B_j}{19} \right)^2}}{\sum_{j=1}^{20} B_j} \quad (32)$$

em que:

CV : coeficiente de variação das 20 leituras;

B_j : j - éssima leitura do sensor (Bytes);

B : média das leitura do conversor analógico digital (Bytes); e

a e b : parâmetros de ajuste da equação $pH = a B + b$.

Para entrar na rotina de calibração, basta pressionar o botão *menu/OK* do aparelho medidor e seguir as instruções. A seqüência do processo de calibração está apresentada na Figura 8.

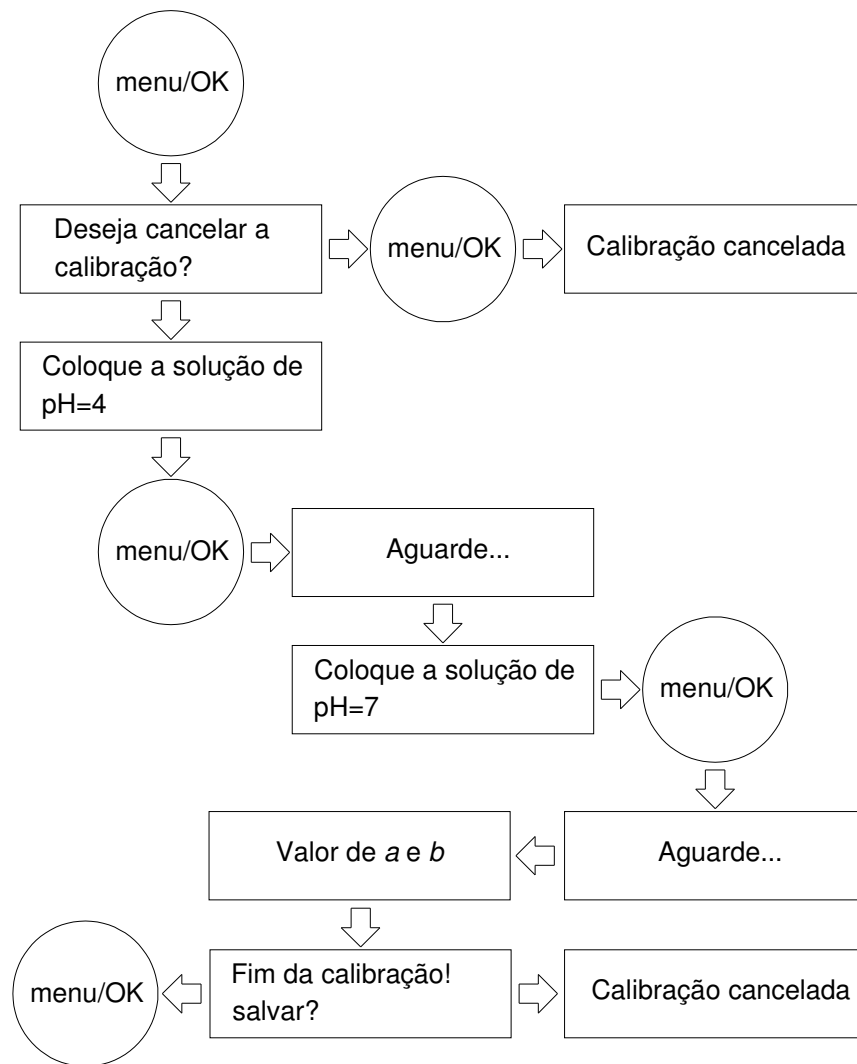


Figura 8 – Seqüência de calibração do sensor

A calibração inicial foi feita no Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ-USP, por meio de coleta de dados através da comunicação serial (Figura 9), seguida de regressão linear dos dados.

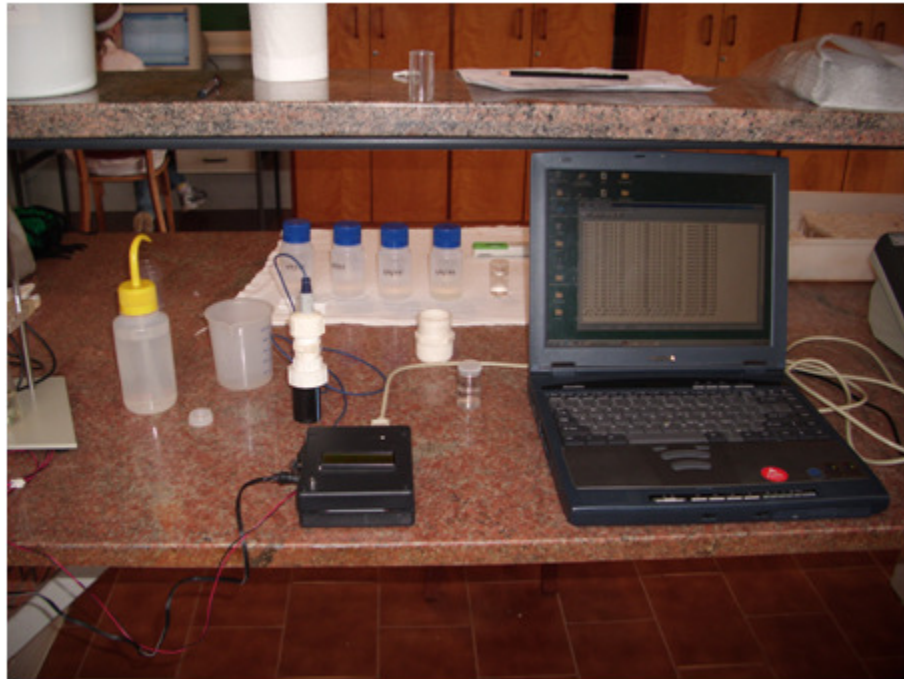


Figura 9 – Calibração do medidor de pH

3.4 Sistema de injeção de ácido

O sistema é composto de uma válvula solenóide (Figura 10 a), alimentada com ácido fosfórico (H_3PO_4) a 0,1 M, proporcionando uma vazão de injeção variável conforme o número de pulsos emitido pelo sistema de controle.

Para que o ácido seja injetado, é necessário que a sua pressão seja superior a da linha de irrigação. Sendo assim, o ácido foi colocado em um recipiente a 1 m acima do nível do reservatório que abastece a linha lateral (Figura 10 b), proporcionando uma disponibilidade de energia potencial, para que ocorra o fluxo de ácido desejado.

O sistema foi dimensionado para atender uma demanda máxima de ácido, de modo a ajustar o pH de uma água que apresente um alto risco de obstrução, em todos os parâmetros considerados por Nakayama e Bucks (1986) (Tabela 2), bem como para o limite superior dos valores normais de qualidade da água de irrigação, segundo Ayers e Westcot (1991) (Tabela 3), e para uma vazão de água máxima de 280 L h^{-1} .

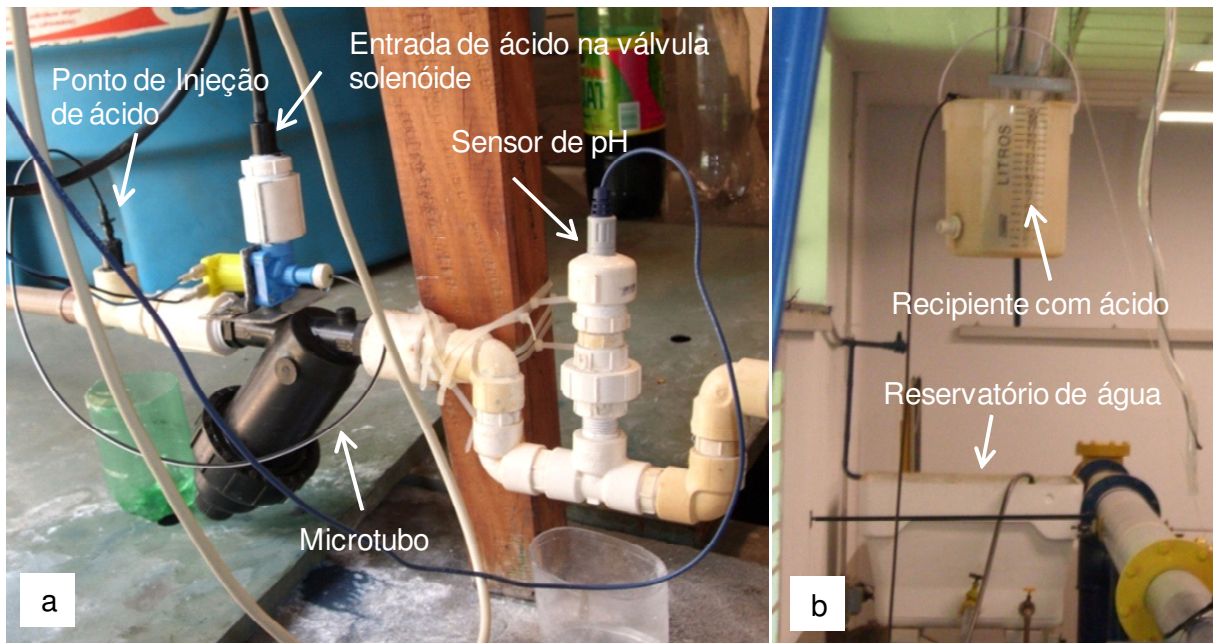


Figura 10 – Sistema de controle do pH da água: (a) medição do pH e injeção de ácido; (b) recipiente com ácido

A vazão máxima de ácido necessária para a correção do pH da água foi calculada através das eq. (33), (34) e (35) respectivamente, apresentadas por Pizarro (1996).

$$p[Alk]_c = p[Alk] + LSI \quad (33)$$

$$\varepsilon = \frac{[Alk] - [Alk]_c}{3} \quad (34)$$

$$q_a = Q \frac{\varepsilon}{C} \quad (35)$$

em que:

q_a : vazão de ácido;

Q : vazão do sistema de irrigação;

$[Alk]$: alcalinidade total (eq/L);

LSI : Índice de saturação de Langelier;

ε : fator de correção (mol L^{-1}); e

C : concentração do ácido (mol L^{-1}).

Como a vazão de ácido em relação à de água é muito pequena, foi dimensionado um microtubo com diâmetro de 0,8 mm, visando limitar a vazão de ácido na válvula solenóide. O dimensionamento foi feito para que o regime de escoamento seja laminar, conforme eq. (36).

$$L = \frac{g\pi d^4 \Delta P}{128\mu q_a} \quad (36)$$

em que:

d : diâmetro do microtubo (m);

μ : viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

ΔP : diferença de pressão (m.c.a); e

L : comprimento do microtubo (m).

3.5 Lógica de controle

A quantidade de ácido calculado na eq. (35) supõe que a alcalinidade da água é conseqüência apenas do carbonato, porém, outros elementos presentes na água podem influenciar em suas características químicas. Além disso, a alcalinidade total da água não pode ser obtida em tempo real, visto que não existem sensores para tal fim. Portanto, o controle do pH da água é feito por tentativas, conforme está apresentado no algoritmo mostrado na Figura 11.

O parâmetro T_c é calculado através da eq. (37). Sendo que a lógica de controle de pulsos é baseada em um controlador proporcional integrativo derivativo (PID), que tem como base de decisão o erro entre as entradas e saídas do controlador. Pode-se entender melhor o princípio de funcionamento do ajuste da vazão de injeção de ácido, através da visualização da Figura 12, que ilustra a lógica adotada na rotina de programação do microcontrolador.

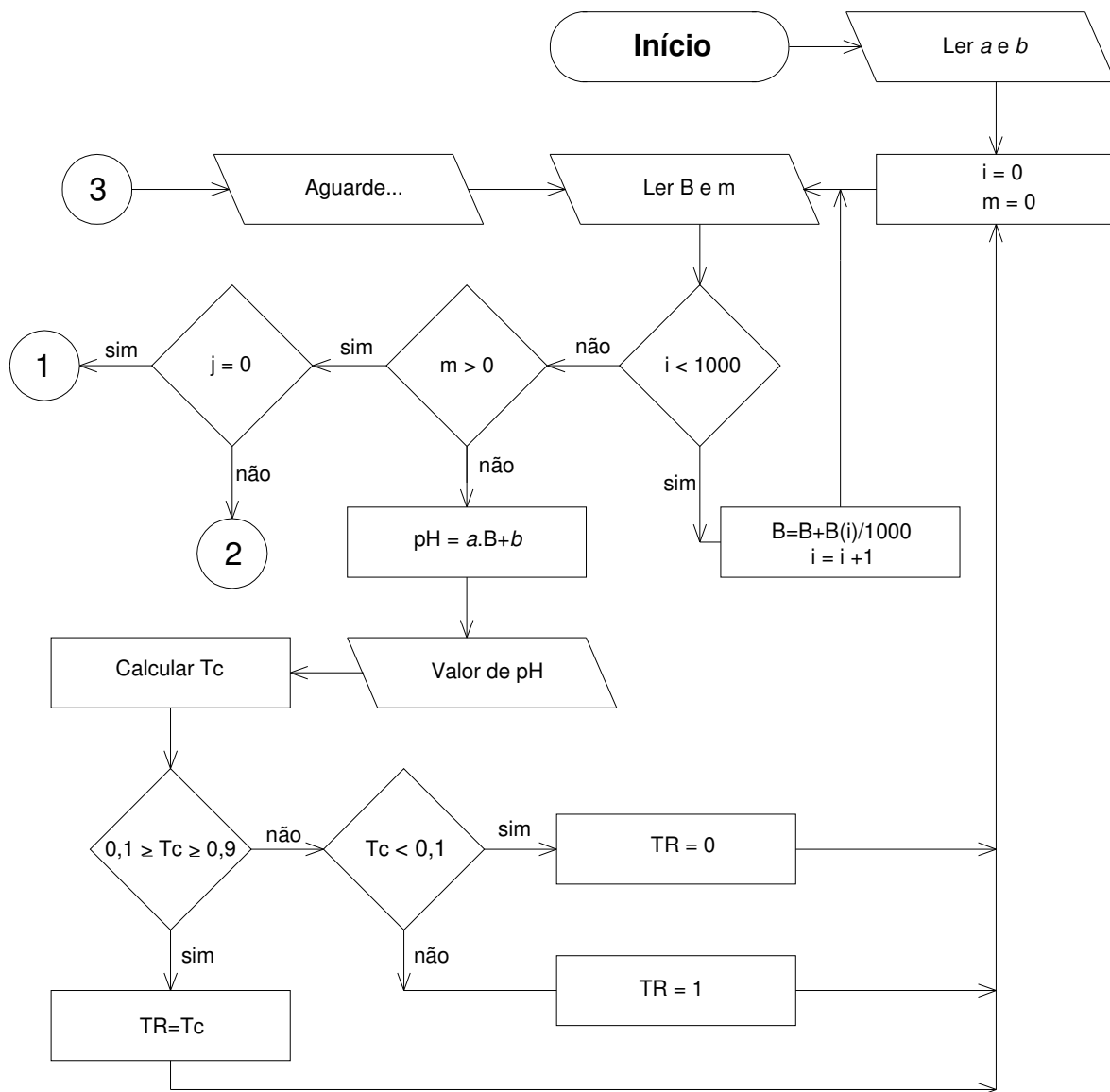


Figura 11 - Algoritmo utilizado para o controle de pH da água de irrigação e calibração do sensor de pH

$$Tc = TR_{(k-1)} + \left(\frac{TR_{(k-1)} - TR_{(k-2)}}{pH_{(k-1)} - pH_{(k-2)}} \right) (pH - pH_c) \quad (37)$$

em que:

Tc e TR : fração do tempo de controle (1 s) que a válvula ficará aberta; e
 pH e pH_c : pH medido e de controle, respectivamente.

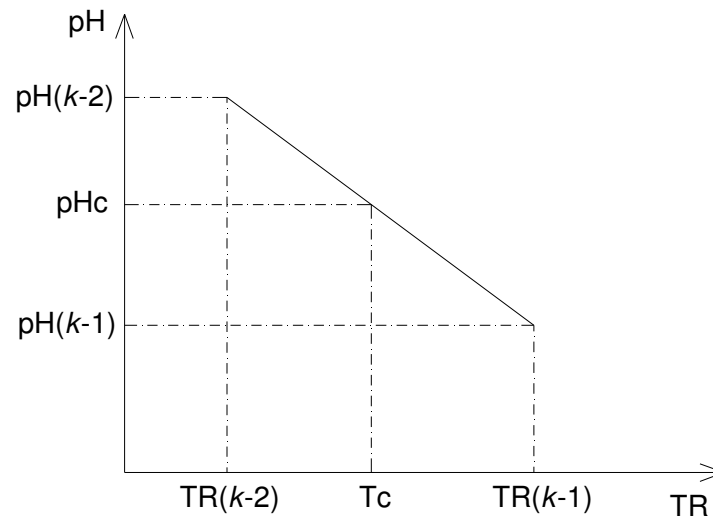


Figura 12 – Esquema da lógica utilizada para o ajuste da vazão de injeção de ácido, visando o controle de pH da água

As subrotinas 1, 2 e 3, apresentadas na Figura 12, são relativas ao processo de calibração do sensor de pH e estão detalhadas nos ANEXOS A e B.

3.6 Teste do sistema

A eficiência do sistema no ajustamento do pH da água, foi verificada através da realização de uma série de testes, para águas com diferentes valores de pH inicial, seja para uma vazão constante, ou sob a condição de vazão variável, simulando a variabilidade temporal da qualidade da água.

A coleta de dados foi feita através da porta serial do controlador e armazenado em um microcomputador, através um programa desenvolvido em Delphi (Figura 13), para a recepção dos dados de pH medidos pelo sensor instalado no sistema. O programa apresentava a data e a hora de realização dos testes, bem como as variáveis disponibilizadas pelo microcontrolador, a uma taxa de transferência dos dados de 9600 bits por segundo.

Os dados eram salvos automaticamente a cada 10 minutos, no formato VCS (separado por aspas), sendo possível de serem manipulado no Excel. Além do

procedimento de armazenamento automático, era possível salvar um arquivo em uma pasta direcionada pelo usuário.

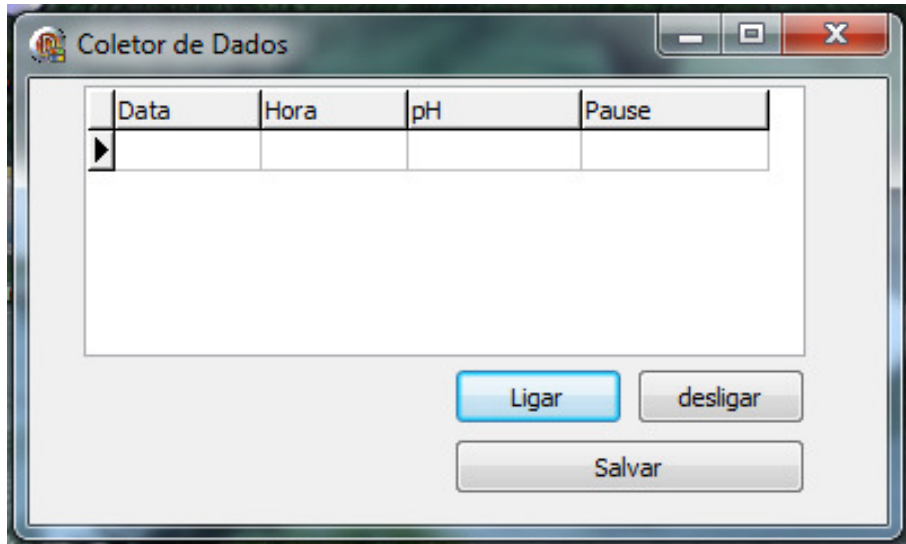


Figura 13 – Interface do programa desenvolvido para a coleta de dados através da serial

O sistema de controle foi acoplado em uma tubulação de 25 mm, responsável pela condução de água para a uma linha lateral composta de microtubos, dimensionada para uma vazão de 264 L h^{-1} . A linha estava situada em um terreno com uma declividade de 2,3 % e apresentava um comprimento de 44 m, totalizando 44 microtubos espaçados 1 m entre si, sendo que cada microtubo emissor foi dimensionado para proporcionar uma vazão de 6 L h^{-1} .

A variação do valor do pH da água ao longo da linha lateral foi avaliada através de coletas de água feitas no início, a 1/3, 2/3 e final da linha lateral. Posteriormente o pH da água foi mensurado em um pHmetro da Digimed, modelo DM 21, cujo objetivo era verificar se a reação do ácido continuava acontecendo, a jusante do ponto de aplicação até a saída do emissor. Além do pH, também foi medido o potencial oxidação-redução da água.

O comprimento de cada microtubo, para a mesma vazão, foi calculado conforme a equação de Darcy-Weisbach, que está apresentada na eq. (38), sendo que a pressão

em cada microtubo foi obtida por meio da eq. (42) e (43), para o primeiro ponto ($i = 0$) e os pontos subseqüentes ($i > 0$), respectivamente.

O fator de atrito (f) foi calculado através das eq. (39) e (40), para o regime laminar e turbulento, respectivamente. A equação de Blasius, eq. (40), foi aplicada para a condição de tubos hidraulicamente lisos, que corresponde à faixa $3000 < Re < 10^5$.

$$L_i = \frac{g\pi^2 d^5 P_i}{8f q^2} \quad (38)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad (39)$$

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (40)$$

$$Re = \frac{4q}{\pi\mu d^2} \text{ ou } Re = \frac{4Nq}{\pi\mu D^2} \quad (41)$$

$$P_i = \Delta H - hf_p \quad (42)$$

$$P_i = P_{i-1} - hf_i + \alpha\Delta L \quad (43)$$

$$hf_i = \frac{8f((N-i)q)^2 L_i}{g\pi^2 D^5} \quad (44)$$

$$hf_p = \frac{8f(Nq)^2 L_p}{g\pi^2 D_p^5} + \frac{8(Nq)^2}{g\pi^2 D_p^4} \sum K \quad (45)$$

em que:

L_i : comprimento do microtubo ou da tubulação localizado (a) no trecho i (m);

L_p : comprimento da linha principal (m);

D : diâmetro da linha lateral (m);

D_p : diâmetro da linha principal (m);

Re : número de Reynolds;

P_i : pressão no ponto onde está localizado o microtubo i (mca);

q : vazão do microtubo (m^3s^{-1});

N : número total de microtubo;

hf_i : perda de carga no trecho i (mca);

hf_p : perda de carga na linha principal (mca);

K : coeficiente de perda de carga localizada;
 ΔH : desnível entre o reservatório e o início da linha lateral (m);
 ΔL : espaçamento entre emissores (m); e
 α : inclinação do terreno (m/m).



Figura 14 – Linha lateral onde foi realizado os testes de ajuste de pH da água

Como alguns testes foram feitos sob vazão variada, foi modelado à variação desta em função do tempo, considerando a situação de escoamento laminar, como pode ser observado nas eq. (46) a (50) e na Figura 15. As características hidráulicas do sistema estão apresentadas na

Tabela 10.

$$A(Y) = (B_x + 2\lambda Y)(C_x + 2\lambda Y) \quad (46)$$

$$B_x C_x \ln \left| \frac{H - Y_1}{H - Y} \right| + 2\lambda(B_x + C_x) \left[Y_1 - Y - H \ln \left| \frac{H - Y_1}{H - Y} \right| \right] + 4\lambda^2 \left[\left(\frac{Y_1 - Y}{2} \right) (Y_1 + Y - 2H) + H^2 \ln \left| \frac{H - Y_1}{H - Y} \right| \right] = \frac{Nt}{NK_1 + K_2} \quad (47)$$

$$K_1 = \frac{128\mu L_p}{g\pi D_p^4} \quad (48)$$

$$K_2 = \frac{128\mu L}{g\pi d^4} \quad (49)$$

$$Q = \frac{H + Y}{K_2 + (NK_1)^{-1}} \quad (50)$$

em que:

B_x e C_x : dimensões da base do reservatório (m);

Y_1 : altura inicial de água no reservatório (m);

Y : altura de água no reservatório, transcorrido um tempo t de esvaziamento (m);

$A(Y)$: área da sessão transversal do reservatório, para uma altura Y (m²);

λ : inclinação das paredes do reservatório (m/m);

K_1 : constante relativa às características hidráulicas da linha principal;

K_2 : constante relativa às características hidráulicas do microtubo; e

Q : vazão da linha principal em função da altura de água no reservatório (m³s⁻¹).

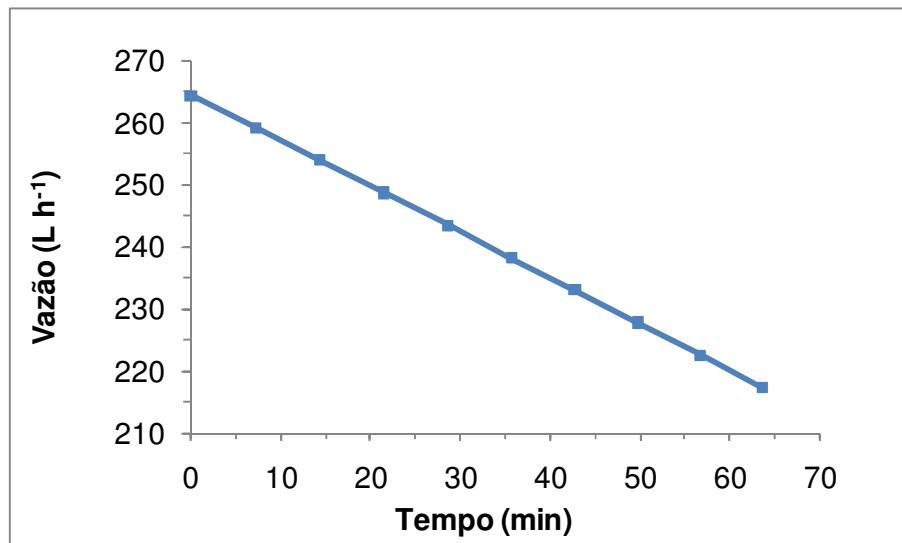


Figura 15 – Vazão do sistema em função do tempo de funcionamento

Tabela 10 – Características hidráulicas e componentes do sistema

Acessórios			
Componentes	Diâmetro (mm)	Quantidade	*K
Entrada	25	1	0,50
Registro gaveta	25	1	0,20
Cotovelo de 90°	25	2	0,90
	20	4	0,90
Redução	25	6	0,15
Ampliação	25	2	0,30
Tê	20	2	0,60
Total			28,30
Outros			
	Especificação	Quantidade	Unidade
Tubulação	25 mm	20	m
	16 mm	44	m
Filtro	120 mesh	1	

*Fonte: AZEVEDO NETTO et al. (2005).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resposta do sensor à mudança de pH

A Figura 16 apresenta a resposta do sensor à variação de pH a 23 °C, medida em um multímetro digital, na saída de um amplificador operacional, dimensionado para um ganho unitário, uma vez que não é possível medir diretamente a diferença de potencial em sensores de pH, devido a alta impedância desses sensores.

Observa-se que a diferença de potencial nos terminais do sensor foi de 56,289 mV por unidade de pH, sendo que os valores de diferencial de potencial medidos, foram de 168,7, -3,7 e -113,3 mV para as soluções padrão de pH 4, 7 e 9, respectivamente. Estes resultados diferem da especificação do fabricante, que apresenta a resposta do sensor em função da temperatura de medição da solução. A diferença de potencial por unidade de pH apresentado pelo fabricante foi de 54,20 e 66,10 mV, para uma temperatura de 0 e 60 °C, respectivamente, sendo que para valores de temperatura intermediário a resposta do sensor (diferença de potencial unitária) tem um comportamento linear. Sendo assim, para uma temperatura de 23 °C, o valor de diferença de potencial elétrico seria de 58,76 mV.

Além disso, o fabricante afirma que a resposta do sensor em pH 7 é de 0 mV, sendo que se obteve um valor de -3,7 mV. Esta diferença é chamada de potencial de assimetria e é variável ao longo do tempo, o que justifica a calibração periódica de sensores de pH.

Percebe-se também que conforme a teoria, o comportamento da resposta do sensor à variação de pH é linear, sendo que o modelo ajustado através de regressão linear apresentou um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9997 para o teste realizado (Figura 16), ou seja, praticamente 100% da variância é explicada pelo modelo de regressão.

A Tabela 11 apresenta a sensibilidade do sensor de pH à variação de temperatura. Os valores de pH apresentados foram obtidos através dos dados de resposta do sensor disponibilizados pelo fabricante. Pode-se observar que para uma

variação de temperatura de 15 a 30 °C, a variação máxima no valor do pH seria 0,93 %, em uma faixa de -150 a 150 mV, o que abrange toda a faixa de valores de pH das águas de irrigação. Sendo assim, pode-se constatar que o compensador de temperatura é dispensável para esta aplicação, tendo em vista que não se necessita de uma precisão maior do que o sensor apresentará nesta condição.

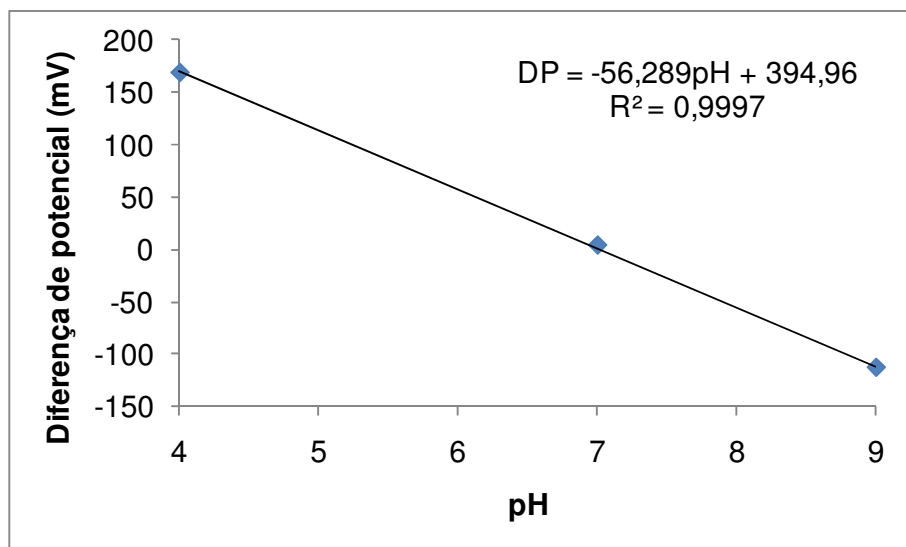


Figura 16 – Resposta do sensor de pH a 23 °C, sem amplificação de sinal elétrico

Tabela 11 – Análise da sensibilidade do eletrodo à temperatura

T	E (mV)			
	150	100	-50	-150
15	4,38	5,25	7,87	9,62
16	4,39	5,26	7,87	9,61
17	4,39	5,26	7,87	9,61
18	4,40	5,27	7,87	9,60
19	4,41	5,28	7,86	9,59
20	4,42	5,28	7,86	9,58
21	4,43	5,29	7,86	9,57
22	4,44	5,29	7,85	9,56
23	4,45	5,30	7,85	9,55
24	4,46	5,30	7,85	9,54
25	4,47	5,31	7,84	9,53

(continua)

Tabela 12 – Análise da sensibilidade do eletrodo à temperatura

				(conclusão)
26	4,47	5,32	7,84	9,53
27	4,48	5,32	7,84	9,52
28	4,49	5,33	7,84	9,51
29	4,50	5,33	7,83	9,50
30	4,51	5,34	7,83	9,49
CV(%)	0,93	0,52	0,18	0,43

4.2 Amplificação do sinal de entrada e ajuste do sinal de saída (offset)

O conversor analógico-digital (AD) do microcontrolador utilizado no circuito de controle, funciona em uma faixa máxima de 0 a 5 V, com uma resolução máxima de 10 bits. Sendo assim, o sinal de entrada foi amplificado com o intuito de melhorar a precisão do sistema, além de se ajustar o sinal de saída do circuito amplificador para que a diferença de potencial seja sempre positivo, uma vez este apresenta valores negativos como ser observado na Figura 16.

A curva de resposta do sensor depois da amplificação e ajuste do sinal elétrico, através de offset, está apresentada na Figura 17, tendo um coeficiente de correlação de 0,999. Observa-se que o ajuste de offset proporcionou uma diferença de potencial de 1,146 V para um pH de 7, que representa a metade da escala de pH, sendo que o valor correspondente na escala do conversor analógico-digital é de 2,5 V. Porém, o sistema de amplificação, quando submetido ao offset obteve a saturação para um sinal elétrico de 2,9 V, restringindo a faixa de medição, para o ganho que o sistema foi dimensionado, que foi de 5 vezes.

O ganho real fornecido pelo amplificador foi de 4,91, diferindo do valor previsto que foi de 5. Isto se deve a variação das características elétricas dos componentes que compõe o circuito amplificador, que de modo geral, é elevada. Daí a necessidade da aferição dos mesmos.

Como o ajuste de offset do amplificador é manual, através de um resistor variável do tipo trimpot, que pode sofrer variações com o tempo, alterando a resposta do sensor,

a calibração periódica do mesmo é essencial para a confiabilidade das medidas e conseqüente controle do pH da água.

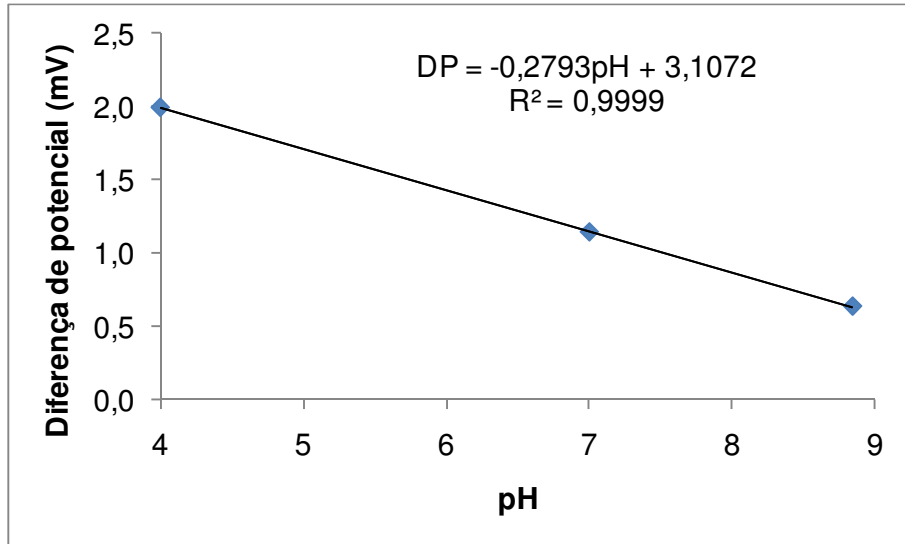


Figura 17 – Sinal elétrico amplificado e com offset sob diferentes valores de pH

A curva de calibração do sensor, feita em laboratório, bem como a equação de calibração obtida através de regressão linear, estão apresentadas na Figura 18, sendo que esta equação, utilizada na rotina programação do microcontrolador, apresenta uma restrição em relação à escala de pH (0 a 14). Pode-se constatar, através da equação de regressão, que o pH máximo de medição do sistema é de 11,124, quando o conversor é submetido a uma diferença de potencial de 0 V. Para valores de pH superiores a 11,124, o conversor estará sob uma tensão negativa, então a leitura do conversor analógico-digital é tomado como um valor nulo.

O limite inferior do sistema consiste no pH que proporciona uma diferença de potencial de 2,9 V (potencial de saturação do amplificador operacional) no AD. Este valor é de 0,669, de acordo com equação de regressão da Figura 17.

A solução para abranger toda faixa de medição de pH (0 a 14), seria reduzir o ganho do amplificador, porém, como a faixa de pH que as águas de irrigação apresentam é mais restrita que esta apresentada pelo sistema, optou-se por mantê-lo nesta condição.

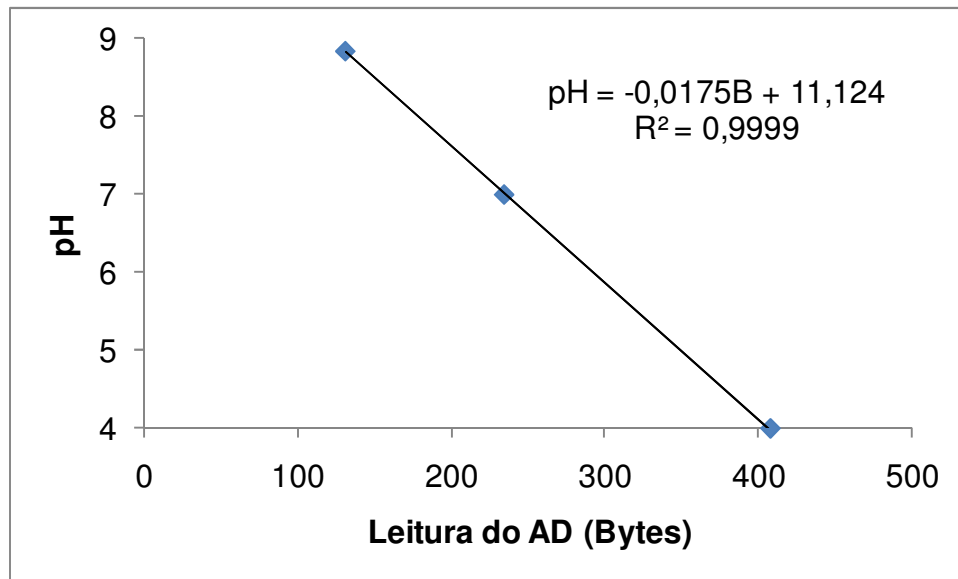


Figura 18 – Leitura do conversor analógico digital em função do pH

4.3 Calibração do sensor

A Figura 19 apresenta a sequência de procedimentos para a calibração periódica do sensor de pH, tendo como base 2 valores de pH de soluções padrão (4 e 7), utilizadas em medidores comerciais.



Figura 19 – Calibração do sensor

Sabe-se que para se realizar uma regressão linear tem que se dispor de um grande número de dados, e não apenas dois como nesse caso, uma vez que entre dois pontos é sempre possível a construção de uma reta, sem que esta apresente dispersão dos dados. Neste caso não se trata de uma regressão, mas apenas a obtenção da inclinação da reta que une os dois pontos. Porém, para o caso de sensores de pH, dos quais já é conhecido o seu comportamento, que é fornecido pelo fabricante, é possível a realização da calibração baseada apenas em dois pontos. Esta calibração é feita com o intuito de corrigir as variações de resposta do mesmo, devido ao potencial de assimetria, que apresenta baixas magnitudes.

De modo geral, a calibração realizada nos medidores comerciais é feita com base em apenas dois pontos, ou seja, utilizando as soluções padrão disponíveis para aquisição (pH 4 e 7). Então, optou-se por tal procedimento, para o controlador desenvolvido.

Para a verificação da estabilidade da leitura do sensor durante a calibração, utilizou-se o coeficiente de variação, que se mostrou eficiente para tal fim. A verificação da estabilidade do sensor é um procedimento necessário, uma vez que quando o mesmo é submetido a uma solução de pH diferente daquele que o mesmo estava exposto, este tem um tempo para detectar esta mudança. Logo, durante uma calibração se este tempo não é levado em consideração, a diferença de potencial lida no sensor não representaria a condição para o qual está submetido. Entretanto, quando são realizadas várias amostragens e estas apresentam baixa dispersão, é constatado que as leituras se tornaram constante, ou seja, a resposta do sensor está estável, como pode ser observado na Figura 20.

Esta figura apresenta os resultados de resposta do sensor para pH de 4, 7 e 9, respectivamente, sendo que cada ponto representa o coeficiente de variação médio de amostras compostas de 20 leituras e 3 repetições. É perceptível que as amostras coletadas a partir de 2 minutos apresentaram um coeficiente de variação constante, indicando a estabilidade da leitura.

Nota-se ainda que o coeficiente de variação, quando a leitura se encontra estabilizada é inversamente proporcional ao pH da solução. Isto está relacionado a resposta do sensor, que também é inversamente proporcional ao pH, de modo que

quanto maior o pH, menor será a resposta do mesmo e conseqüentemente, maior será o efeito de ruídos nas medidas. Vale salientar que, o tempo de estabilização do sensor, não sofreu variações significativas para os diferentes pH ensaiados.

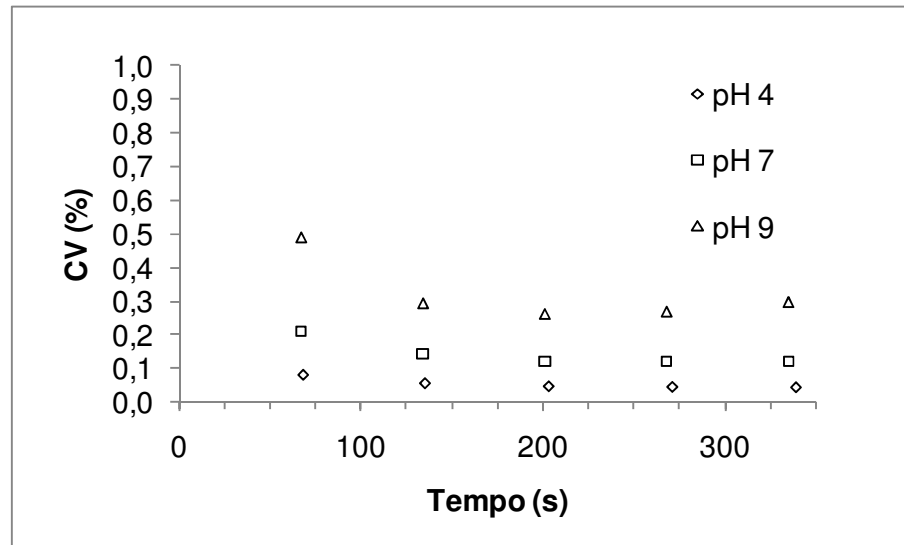


Figura 20 – Tempo de resposta do sensor de pH

4.4 Resposta do sensor na condição de escoamento

Quando o sensor de pH sofre perturbação mecânica, altera-se suas características. Portanto a sua utilização em sistemas dinâmicos, como é o caso da medição do pH da água em movimento, difere daquele medido sob a condição estática. Isto pode ser verificado na Figura 21 que relaciona o pH medido sob condição estática e dinâmica. Pode-se constatar que essa diferença teve um comportamento linear com a razão entre o pH estático e dinâmico, respectivamente.

Observa-se na Figura 21 que os dados estão um pouco dispersos da reta de regressão, o que lhe proporciona um valor de coeficiente de determinação de 0,9715, apesar de se observar uma tendência nítida de linearidade dos dados. Isso deve ao fato da precisão do aparelho medidor que era de 0,1, ou seja, os valores de pH intermediários não foram contabilizado no processo de medição. Mesmo assim, percebe-se que o ajuste da função é satisfatório.

A influência do movimento da água na medida do pH depende da faixa que este é mensurado, de modo que quando o pH se encontra superior a 7, esta medida é subestimada, enquanto em pH menor que 7 este valor é superestimado. Já para um pH próximo de 7 os valores praticamente coincidem. Portanto, como pode ser observado na Figura 21, a taxa de variação do pH real em relação ao medido, tem uma resposta linear e decrescente. De modo que em pH próximo de 7, as leituras são equivalentes.

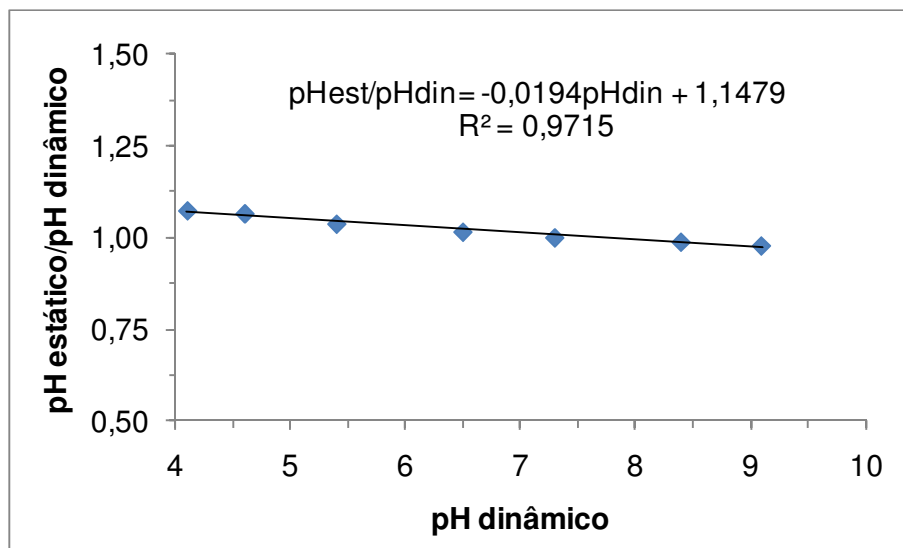


Figura 21 – Correção da medida do pH sob a condição de água em movimento

4.5 Vazão de ácido em função do tempo relativo de abertura da válvula de controle

A relação da vazão de ácido com os pulsos emitidos tem uma relação linear, como pode ser observado na Figura 22, para uma faixa que corresponde ao tempo de resposta da válvula solenóide que é de aproximadamente 100 ms. Portanto, a equação apresentada na Figura 22 é válida apenas para esta situação, além de ser restrita às condições para as quais os testes foram realizados (desnível de 1 m e um microtubo de injeção de ácido com diâmetros de 0,8 mm e comprimento de 0,31 cm). A vazão máxima de ácido foi de 28,6 mL min⁻¹ para as condições de ensaio citado anteriormente.

Para um tempo relativo (TR) menor que 100 e maior que 900 ms o comportamento da reta de ajuste é alterado, devido ao tempo de resposta da válvula, de modo que para um TR de valor 0 o fluxo de ácido é totalmente obstruído, porém, de acordo com reta de ajuste este valor seria de $1,95 \text{ mL min}^{-1}$, o que não condiz com a realidade. Entretanto, isto não representa complicações ao sistema, pois a vazão de ácido é calculada por meio de tentativas, não dependendo diretamente do comportamento da mesma com o TR.

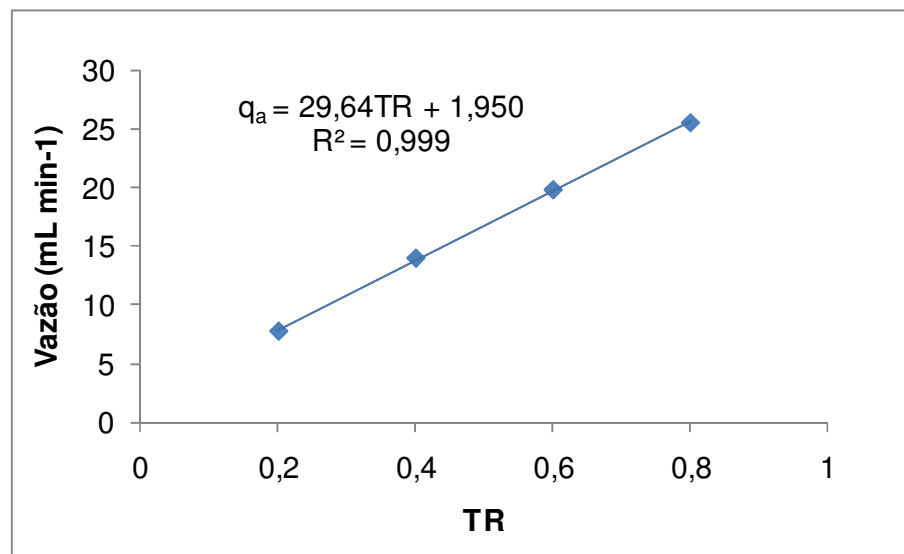


Figura 22 – Vazão de ácido em função do tempo de abertura da válvula (TR), relativo ao tempo de controle

4.6 Ajuste do pH da água em função de diferentes condições iniciais de funcionamento do sistema

4.6.1 Ajuste do pH da água sob vazão contante

O comportamento do ajuste do pH da água sob vazão constante está apresentado na Figura 23. Pode-se observar que o sistema se mostrou eficiente para diferentes valores iniciais de pH, compreendendo uma faixa de 6,2 até 9,2. O tempo de resposta da estabilização do pH em torno do valor desejado (5,5) se deu por volta de 1 minuto para todos os valores iniciais de pH da água ensaiados, o que mostra a

eficiência do sistema de controle, primeiramente para estimar a vazão de ácido necessária para decréscimo do pH da água para o valor estabelecido, e depois em mantê-lo neste valor, de forma estável.

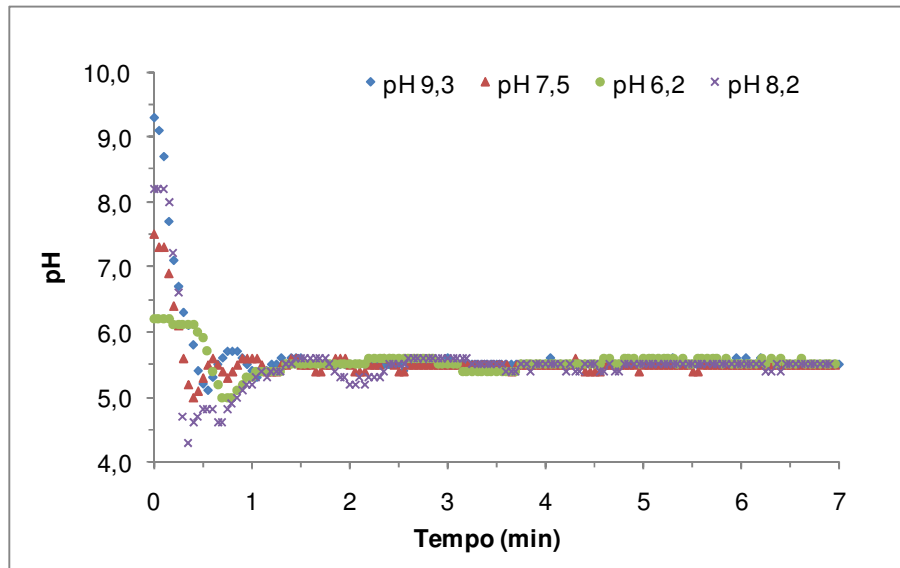


Figura 23 – Tempo de ajuste do pH para estabilização do pH sob vazão constante

O tempo de resposta do ajuste de vazão está muito mais relacionado com o hardware do que com o software, pois a injeção de ácido é feita a montante do ponto de medição, atrasando a detecção da mudança de pH. Porém, isto é necessário para que ocorra a mistura do ácido na água, tendo como dispositivo de mistura um filtro de disco. Como a velocidade da água no filtro é baixa, em torno de $0,6 \text{ m s}^{-1}$, há uma defasagem de tempo entre a injeção de ácido e a medição do pH da água.

Apesar das oscilações observadas nos valores iniciais de pH, depois que o sistema ajusta a vazão de ácido, o pH da água é mantido dentro de uma faixa de 5,4 a 5,6, porém, quase sempre em 5,5, como pode ser observado nas Figuras Figura 23 e Figura 24. Esta variação é perfeitamente permissível para a aplicação considerada, pois nessa faixa, os íons causadores de obstrução nos emissores, não precipitam.

4.6.2 Ajuste do pH da água sob vazão variável

Os resultados dos testes realizados sob vazão variável, simulando a condição de uma água com mudanças temporais de pH, estão apresentados na Figura 24. Nota-se que nesta condição o sistema ajustou o pH da água de maneira similar à condição de vazão constante, ou seja, mantendo o pH da água entre 5,4 e 5,6, demonstrando que lógica de controle utilizada foi adequada para este fim. Percebe-se que o percentual de tempo em que a válvula de controle de vazão permaneceu aberta (TR), foi decrescente ao decorrer do teste, isto porque a vazão de água aplicada também foi decrescente, o que reduz a necessidade de ácido, para manter o pH da água, uma vez a qualidade da água não sofreu variação durante a realização destes testes.

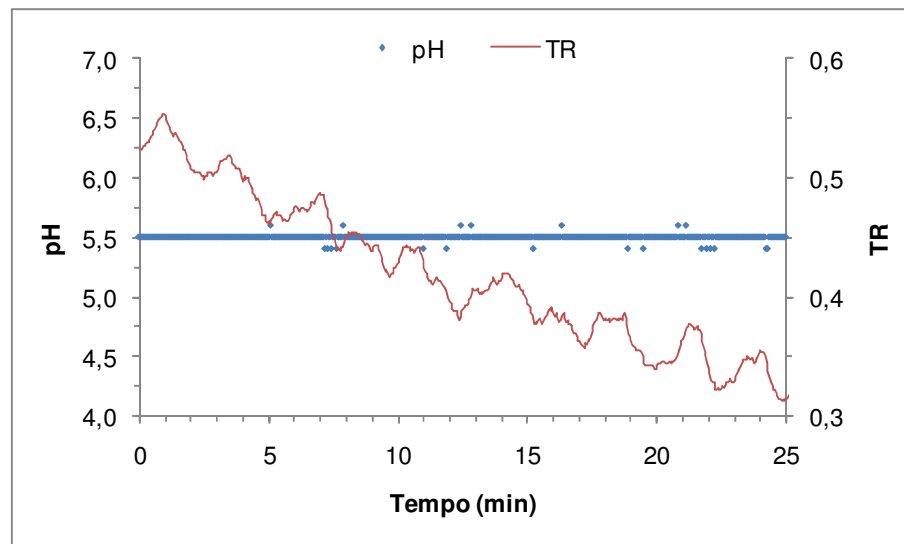


Figura 24 – Ajuste do pH da água sob vazão variável e decrescente

A variação da vazão de foi feita com base no esvaziamento do reservatório que continha a água aplicada no sistema, reduzindo a carga hidráulica nos emissores e reduzindo a vazão do sistema. A Figura 15 apresenta a curva de redução de vazão com o tempo de aplicação de água. Como a água permaneceu com mesma quantidade de bases, a redução da vazão simulou uma possível variação do conteúdo destas, ao longo da irrigação, pois segundo Medeiros (1992) a qualidade da água pode sofrer

modificações temporais, principalmente as água de lagos, comumente usadas para fins de irrigação.

4.7 Testes do sistema em uma linha lateral

A Tabela 13 apresenta os resultados dos testes realizados na linha lateral, em diferentes pontos de coleta (início, 1/3, 2/3 e final da linha lateral). Pode-se observar que não ocorreram diferenças significativas tanto nos valores de pH quanto nos valores de potencial de redução, a 5% de significância. Além disso, o pH médio em cada ponto medido, se manteve nas proximidades do valor ajustado no início da linha lateral, que foi 5,5, com variação máxima $\pm 0,1$. Como a faixa de pH em que a precipitação de íons não ocorreria é mais ampla, pode-se considerar que os resultados obtidos foram satisfatórios.

Em relação ao tempo de funcionamento do sistema, pode-se constatar que tanto o pH quanto o potencial de oxi-redução diferiram estatisticamente, sendo que o pH sofreu um decréscimo com o tempo, ao passo que o potencial redox teve um conseqüente aumento ao longo do teste.

A redução do pH está relacionado a condição em que foi realizado teste, pois o sistema era ligado inicialmente com um pH elevado, sendo iniciado o processo de correção. Desse modo, a linha lateral de irrigação era abastecida inicialmente com uma água de pH mais elevado, refletindo no valor do pH medido ao longo da linha lateral, mesmo que o pH na saída do sistema de injeção estivesse corrigido para o valor estabelecido (Figura 25). Em condições normais de irrigação este processo não ocorreria, uma vez que a irrigação subsequente manteria a água da rede hidráulica sempre com pH corrigido, contribuindo para um funcionamento mais estável do sistema.

O aumento do potencial de redução é, portanto, uma conseqüência da redução do pH da água, uma vez estes parâmetros são inversamente proporcionais, como pode ser observado na eq. (8), sendo este um dos motivos pelos quais se propõe o ajuste do pH da água, de modo a proporcionar a diminuição da probabilidade de oxidação dos agentes causadores de obstrução de emissores, em irrigação localizada.

Tabela 13 – Avaliação da variação do pH ao longo da linha lateral, após a correção da água

Tempo (min)	Fração da linha lateral				Média
	0	1/3	2/3	1	
	pH				
0	5,68	5,64	5,78	5,64	5,69 A
30	5,76	5,61	5,68	5,65	5,68 A
60	5,59	5,50	5,55	5,53	5,54 AB
90	5,62	5,44	5,54	5,49	5,52 B
120	5,63	5,52	5,55	5,57	5,57 B
Média	5,66 A	5,54 A	5,62 A	5,58 A	
Tempo (min)	Redox				
0	546,7	581,6	580,2	561,1	567,4 A
30	619,5	629,3	622,4	601,8	618,3 B
60	682,0	670,8	655,7	662,9	667,9 BC
90	681,2	675,5	666,0	686,2	677,2 C
120	694,4	692,9	699,9	703,7	697,7 C
Média	644,8 A	650,0 A	644,8 A	643,1 A	

As medias seguidas de mesma letra não diferem entre si, pelo o teste de Tukey a 5 % de significância

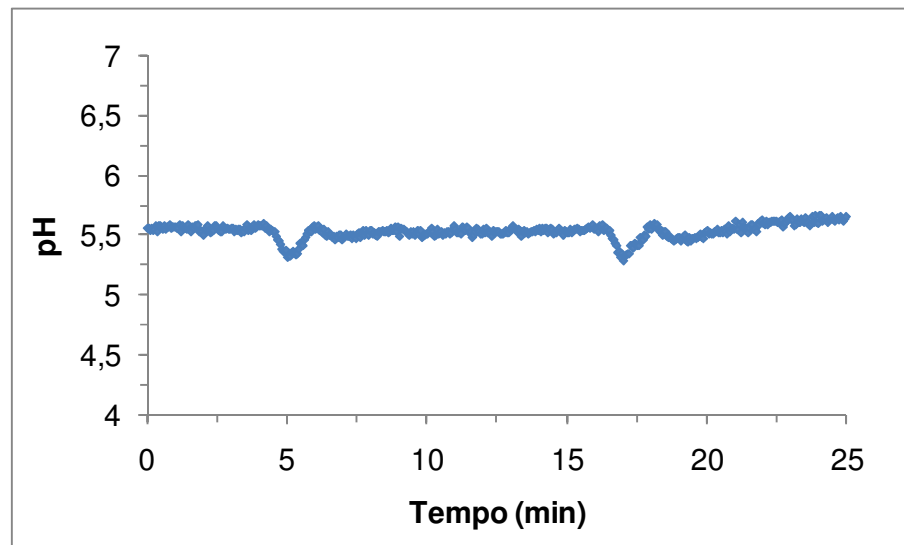


Figura 25 – pH da água durante a realização do teste

4.8 Análise do potencial da precipitação de íons devido à oxidação

Na Figura 26 estão apresentados os dados de pH e de potencial de redução medidos ao longo da linha lateral em diferentes tempos de funcionamento do sistema de correção do pH da água. Estes dados foram correlacionados com a região de estabilidade dos íons, compreendida entre as duas linhas contínuas apresentadas na Figura 26. Pode-se observar que para a condição testada, os íons presentes na água não sofreriam oxidação, nem redução, comprovando a eficiência da aplicação de ácido na água.

Porém, ressalta-se que é indispensável o dimensionamento de um sistema de filtragem eficiente, uma vez que o dispositivo proposto não interfere nas características físicas da água, mas apenas nas características químicas, evitando que as substâncias solúveis venham precipitar a jusante do sistema de filtragem. Portanto, o sistema de filtragem precisa ser eficiente na retenção de partículas sólidas como ferro na forma Fe^{3+} , que provocaria a obstrução dos emissores, independente da presença, ou não, de íons solúveis.

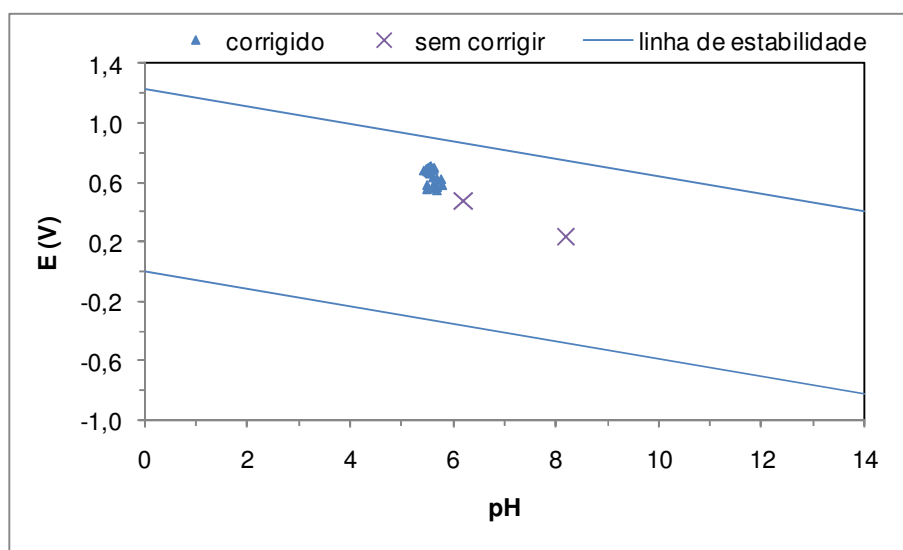


Figura 26 – Faixa de estabilidade dos íons e possibilidade da formação de precipitados

Na Figura 27 estão apresentados os diagramas pH x potencial de redução do cálcio, ferro e manganês, para o sistema O-H (adaptado de Takeno 2005). Percebe-se

que o cálcio e o manganês, apresentam-se na forma Ca^{2+} e Mn^{2+} , respectivamente, para condições de pH e potencial de redução da água ensaiada, conforme está destacado na Figura 27. Já o ferro, para as mesmas condições, se apresenta na forma $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$ que é insolúvel. No entanto, pode-se observar que antes da correção da água, este elemento já se encontrava nesta forma e, portanto seria retido no sistema de filtragem. Além disso, os diagramas apresentados na Figura 27 foram elaborados para o sistema íon-O-H, ao passo que a água de irrigação apresenta outros elementos que interferem neste processo. O fato é que não ocorreria a oxidação do Fe^{2+} , e conseqüente problemas de obstrução dos emissores.

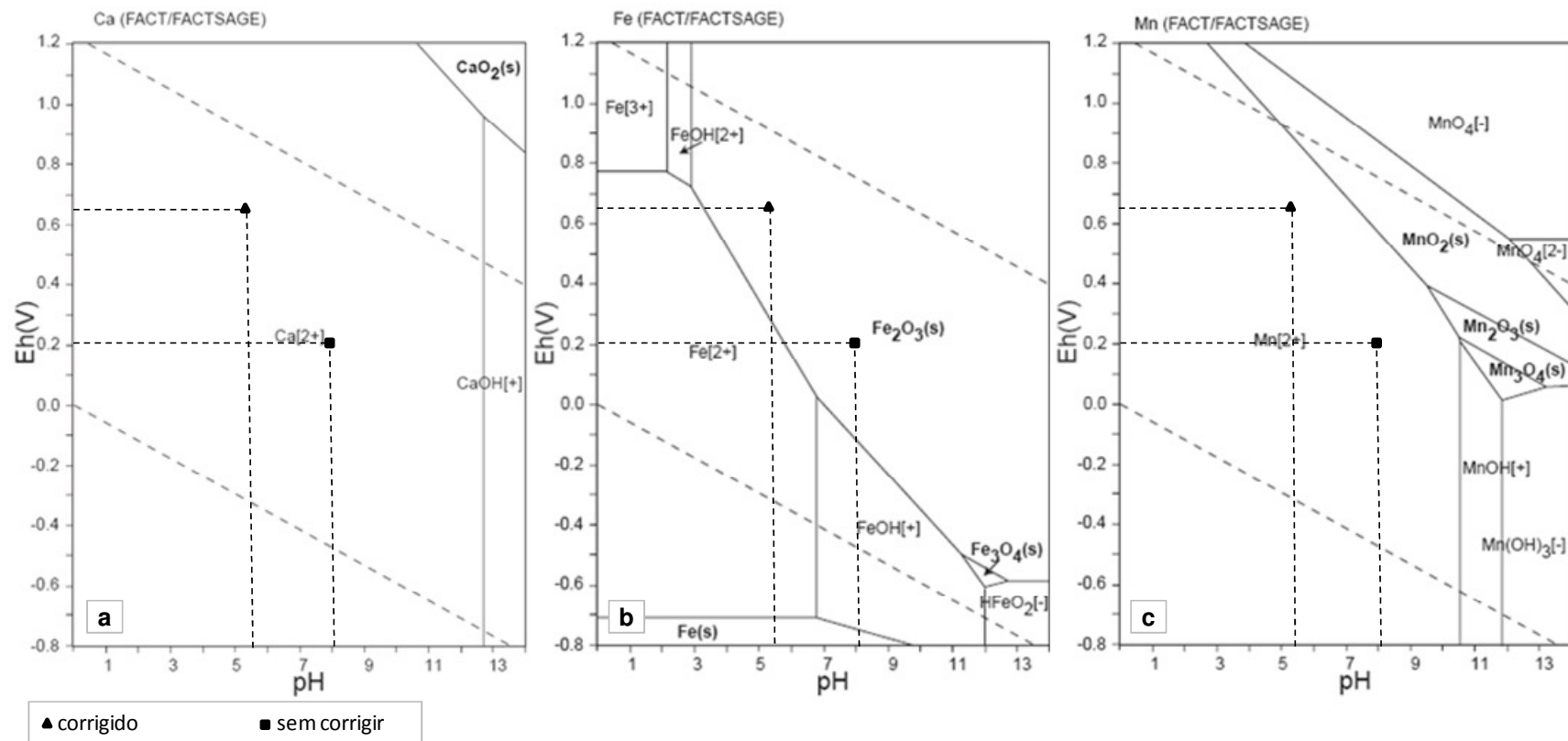


Figura 27 – Diagrama pH x potencial de redução dos sistemas: a) Ca-O-H; b) Fe-O-H; e c) Mn-O-H. Para as condições de temperatura e pressão de 298,15K e 105 Pa, respectivamente. Fonte: Adaptado de Takeno 2005.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, para as condições em que se realizou este trabalho, podem-se verificar as seguintes constatações:

- O circuito de leitura de pH se mostrou eficiente na obtenção deste parâmetro para esta aplicação;
- O emprego da filtragem digital de eventuais ruídos nas leituras do sensor de pH apresentou resultados satisfatórios;
- A técnica de controle, baseada no erro proporcionado pelos eventos antecedentes, foi eficaz no ajuste do pH da água;
- A medida do pH da água na condição dinâmica difere daquela feita sob a condição estática, sendo necessária a sua correção;
- A injeção por dispositivos pulsantes conduziu a bons resultados, porém, para a ampliação da aplicabilidade deste sistema de controle, seria necessário o emprego de uma bomba de alta pressão e de baixa vazão para injeção do ácido na água, sendo controlada eletronicamente pela a mesma lógica de controle empregada neste trabalho;
- O sistema desenvolvido pode ser empregado no controle do pH da água para a irrigação localizada.

REFERÊNCIAS

- ADIN, A.; ALON, G. Mechanisms and process parameters of filter screens. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Jerusalem, v.112, n.4, p. 293-304, 1986.
- AZEVEDO NETTO, J. M. de; FERNANDEZ, M. F. y; ARAUJO, R. de; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.
- ALENCAR, C.A.B DE; CUNHA, F.F. DA; RAMOS, M.M.; SOARES, A.A.; PIZZIOLLO, T. DE A.; OLIVEIRA, R.A. DE. Análise da automação em um sistema de irrigação convencional fixo por miniaspersão. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.15, n.2, p.109-118, 2007.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. (1991). **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de GHEI, H. R.; MEDEIROS, J. F.; DAMASCO, F. A. V. Campina Grande: UFPB, 1999.153 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29, revisado 1).
- BACCAN, N.; ANDRADE, J.C. DE; GODINHO, O. E.S.; BARONE, J.S. **Química analítica quantitativa elementar**. São Paulo: Edgard Blücher, 2001.. 308 p.
- BECK, J.C.P.; SILVA, I. N.L. DA; GUERRA, K.; MESSIAS, D.E. Automação e controle de tanque para piscicultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA. 2006. Passo Fundo. **Anais ...** Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2006. p. 1-3.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**, Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- CARARO, D.C.; BOTREL, T. A. Uso de cloração e ar comprimido no controle do entupimento de gotejadores ocasionado pela aplicação de água residuária. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.336-345, 2007.
- COSTA, C.C. **Estudo da susceptibilidade de tubos gotejadores ao entupimento por precipitados químicos de ferro**. 2000. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.
- COSTA, R.G.; GHEYI, H.R. Variação da qualidade da água de irrigação da microrregião do Catolé do Rocha, PB. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n.8, p. 1021-1025, 1984.
- FEITOSA FILHO, J.C. **Aeração, cloração, uso de permanganato de potássio e controle do pH seguidos de filtragem no tratamento do excesso de íons de ferro manganês em água de irrigação**. 2008. 124 p. Tese (Pós-Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

FREIRE, C.C.A.; PRADO, R.T.A. **Emprego de dispositivos automáticos em aparelhos sanitários para uso racional da água.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2000.p. 1-14. (Boletim Técnico).

GARZELLA, T.C.; ARMINDO, R.A.; BOTREL, T.A.; QUEIROZ, T.M. Automação da leitura de vazão de um vertedor utilizando mecanismos de radiofrequência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Anais...**Bonito: SBEA, 2007. p. 1- 4.

GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. **Manejo e controle das alidade na agricultura irrigada.** Campina Grande: SBEA, 1997. 383 p.

IBARS, R.A.F. **Desenvolvimento e avaliação de tubos Venturi para medição de vazão.** 2004. 61p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and Trickle Irrigation.** New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KIDDER, G.E.; HANLON, A. **Neutralizing excess bicarbonates from Irrigation water.** Florida: University of Florida, Florida Cooperative Extension Service, 2009. 12 p. (SL, 142).

LAMN, F.R.; AYARS, J. ; NAKAYAMA, F.S. **Microirrigation for crop production: Design, Operation, and management.** Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2007. 618 p.

LEITE, L.M. **Caracterização da qualidade da água superficial na bacia Capiá-AL, para fins de irrigação.** 1991. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1991.

LOPEZ, R.J.; ABREU, J.M.H.; REGALADO, A.P.; HERNÁNDEZ, J.F. **Riego localizado.** Madrid: Iryda, 1992. 405 p.

MAIA, F.J. de O.; MAIA, J. de O. Estudo da estabilidade e de outras características de um dispositivo eletrônico para a calibração de eletrodos de medição de pH. In: ENCONTRO PARA A QUALIDADE DE LABORATÓRIOS, 2005, São Paulo. **Anais...**São Paulo: REMESP, 2005. p. 1- 6.

MARTINS, L.H. **Avaliação da qualidade da qualidade da água nos mananciais superficiais para irrigação na Zona Oeste Potiguar.** 1993. 97 p. Monografia (Especialização), - Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Mossoró, 1993.

MEDEIROS, J.F. **Qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo “GAT” nos estados do RN, PB e CE.** 1992. 173 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1992.

MORAIS, E.R.C. DE; MAIA, C.E.; OLIVEIRA, M. DE. Qualidade da água para irrigação em amostras analíticas do banco de dados do departamento de solos e geologia da Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Mossoró-RN. **Caatinga**, Mossoró, v.11, p. 75-83, 1998.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986. 383 p.

NUNES FILHO, J.; GERRA, C. A.M.; SOUZA, A.R.; SÁ, V.A.L.; SOARES, M.J.C.C. Qualidade da água de açudes, para fins de irrigação no sertão de Pernambuco. **ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna**. Brasília, n.44, p. 35-39, 1991.

NUNES, W.A. G.DE A.; KER, J.C.; NEVES, C. L.; RUIZ, H. A.; FREITAS, G.A.; BEIRIGO, R.M. Qualidade da água de irrigação de poços tubulares e do Rio Gorutuba na região de Janaúba-MG. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 4, p. 403-410, 2005.

OHLWEILER, O.A. **Química analítica quantitativa**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 1981. 226 p.

OLIVEIRA, C. F. **Perda de carga em filtros de tela e disco utilizados na irrigação localizada**. 2005. 57 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

OLIVEIRA, M. DE; MAIA, C.E. Qualidade físico-química da água para irrigação em diferentes aquíferos na área sedimentar do estado do rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, p.17-21, 1998.

PATERNIANI, J.E.S.; MATSURA, E.E.; ROSTON, D.M.; PAULA JR., D.R.; TESTEZLAF, R.; RIBEIRO, T.A.P. Diagnóstico da qualidade da água de irrigação em propriedades produtoras de hortaliças da região de Campinas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23., 1994. Campinas. **Anais...** Campinas: SBEA, 1994. p. 1- 4.

PEREIRA, F.A.M.; HOLANDA, J.S. de; MEDEIROS, J. de A. F.; BRITO, R.A.L. Qualidade da água para irrigação no Seridó – RN. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. 1992, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABID, 1992. p. 543-562.

PEREIRA, P.A.; FEITOSA FILHO, J.C.; SILVA, M. S. M. A. Aeração artificial no tratamento de ferro e manganês dissolvidos em água de irrigação. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, Campina Grande, v. 5, n.1,p. 1-10, 2005.

PHILLIPS, K.P. Long-term operation of microirrigation filtration systems: successes, failures and operational solutions. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 15., 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASAE, 1995. p. 579-585.

PITTS, D.J.; HAMAN, D.Z.; SMAJSTRLA, A.G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems.** Florida: University of Florida, Florida Cooperative Extension Service, 2003. 12 p. (Bulletin, 258).

PIZARRO CABELO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia.** Madrid: Ediciones Mundi-Prensa, 1996. 511 p.

QUEIROZ, T.M. de; CARVALHO, J. de A.; RABELO, G.F.; ANDRADE, M.J.B. Avaliação de sistema alternativo de automação da irrigação do feijoeiro em casa de vegetação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.632-641, 2005.

RESENDE, R.S.; COELHO, R.D.; PIEDADE, S.M. de S. Eficiência da cloração da água de irrigação no tratamento de gotejadores com entupimento de causa biológica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.382-389, 2000.

RIBEIRO, T.A.P.; AIROLDI, R.P. da S.; PATERNIANI, J.E.S.; SILVA, M.J.M. da. Efeito da qualidade da água na perda de carga em filtros utilizados na irrigação localizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.1, p.1-6, 2005.

RIBEIRO, T.A.P.; AIROLDI, R.P. da S.; PATERNIANI, J.E.S.; SILVA, M.J.M. da. Variação temporal da qualidade da água no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.450-456, 2005.

RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S. Microaspersores entupidos devido a problemas de ferro na água. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.5, p.1456-1459, 2008.

RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S.; AIROLDI, R.P. da S.; SILVA, M.J.M. da. Performance of non woven synthetic Fabric and disc filters for fertirrigation water treatment. **Science Agrícola**, Piracicaba, v.61, n.2, p.127-133, 2004.

RIBEIRO, T.A.P.; PATERNIANI, J.E.S.; AIROLDI, R.P. da S.; SILVA, M.J.M. da. Water quality and head loss in irrigation filters. **Science Agrícola**, Piracicaba, v.61, n.6, p. 563-572, 2004.

ROSSETO, F R. **Controlador fuzzy para um sistema de aplicação de herbicidas a taxa variável.** 2008. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SCATOLINI, M.E.; PATERNIANI, J.E.S. Remoção de sólidos suspensos na água de irrigação utilizando mantas sintéticas não tecidas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.3, p.382-385, 2001.

SILVA, L.G.F.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M. **Irrigação localizada**. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. Irrigação. Piracicaba: SBEA, 2003. v.2, cap.12, p.259-309. (Série Engenharia Agrícola)

SILVESTRE, C.A. **Controle inteligente da qualidade da água para tanques de água doce**. 2003. 122 p. Dissertação (Mestrado em automação industrial) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.

SOCCOL, O.J. **Construção e avaliação de hidrociclone para pré-filtragem de água para irrigação**. 2003. 89 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

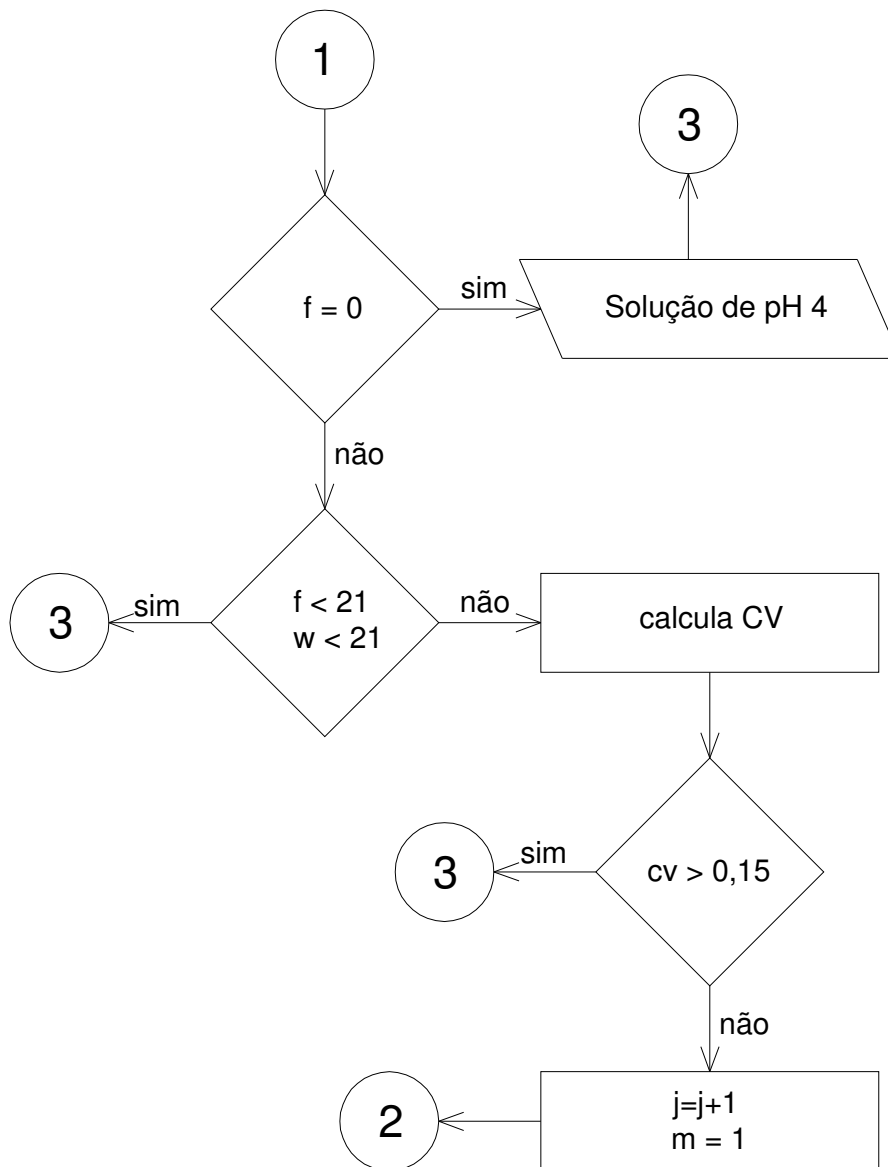
TAKENO, N. **Atlas of Eh-pH diagrams**. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Research Center for Deep Geological Environments, 2005. 287 p. (Geological Survey of Japan Open File Report, 419.)

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. Revised by. New York: Metcalf E Eddy, 2003. 1890 p.

TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.604-613, 2008.

ANEXOS

ANEXO A – Algoritmo de calibração para o pH 4



ANEXO B – Algoritmo de calibração para o pH 7.

