

08 a 11 de Outubro de 2018  
Instituto Federal Fluminense  
Búzios - RJ

## APLICAÇÃO DA JUNÇÃO DA PLATAFORMA LIVRE SCILAB E ARDUINO PARA CONTROLE DE pH

**Annanda Alkmim Alves**<sup>1</sup> – annandalkmim@gmail.com

**Luiz Fernando Gonçalves Pereira**<sup>1</sup> – luizfernandogoncalvespereira2@gmail.com

**Letícia Lopes Alves**<sup>1</sup> – lopesleticia2403@gmail.com

**Saulo Fernando dos Santos Vidal**<sup>1</sup> – saulo\_vidal@hotmail.com

**Renan Zuba**<sup>1</sup> – Renan\_Zuba@hotmail.com

**Daniel Rodrigues Magalhães**<sup>1</sup> – drmmagalhaes@gmail.com

<sup>1</sup>Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – Montes Claros, MG, Brazil

**Resumo.** Neste trabalho, um módulo experimental foi construído para controlar o pH através da plataforma Arduino, juntamente com o software Scilab, utilizando a ferramenta Xcos. O objetivo principal foi avaliar o desempenho do sistema de neutralização de uma solução tampão, usada como efluente, após variações de ácido e base através da injeção de HCl e NaOH. O controle foi feito manipulando as bombas de ácido e base através de um controlador PID. Este foi testado ao realizar novas variações no sistema com ácido e base, e a técnica se apresentou realmente eficiente para promover a neutralização do efluente utilizado devido às suas características de tamponante, dentro da faixa estabelecida pela resolução CONAMA nº 357 de 2005.

**Palavras-chave:** Controle de feedback, neutralização de pH, Xcos, Arduino.

### 1. INTRODUÇÃO

O monitoramento e o controle do pH, comumente chamado de neutralização, é de extrema importância em várias etapas do processo de tratamento de água, no tratamento de efluentes industriais, na indústria alimentícia nos processos fermentativos e em muitos outros processos que dependem desse parâmetro. Dentre eles, se destacam os processos de condicionamento de águas residuais industriais, em que sistemas de controle de pH são amplamente utilizados, principalmente para finalidades a jusante, como segundo Cavalcanti (2012), são as correções do pH antes da descarga em um corpo d'água receptor, da descarga em sistemas públicos de esgoto sanitário, de sistemas de tratamento físico-químico e processos eletroquímicos ou oxidativos.

Em um controle do processo de neutralização, são necessários cuidados especiais, visto que, com Mallmann e Pereira (2016), a característica fortemente não-linear do pH introduz dificuldades no projeto de sistemas de controle automático com parâmetros fixos.

A implantação de um sistema automático de ajuste de pH, é de fundamental importância em sistemas de fluxo contínuo de vazão (CAVALCANTI, 2012). Nesse caso, um sistema automatizado de pH permite a adição controlada de uma base ou ácido em proporções indicadas por um eletrodo inserido no sistema, o sensor, conforme as variações de pH sofridas com a entrada de um afluente.

Quando se trata de processos que envolvem pH de uma determinada solução é desejável que esta variável não altere sob qualquer perturbação. Visto que, em processos de tratamento de efluente é necessário que o pH fique dentro dos padrões regidos pelas legislações. Desta forma, deve-se ter como critérios de escolha do controlador a ausência de *offset*, sua rápida resposta e permanência de ordem e estabilidade do processo. A partir destes critérios, o uso do controlador PID é o mais indicado, já que este apresenta as características necessárias. Entretanto, dois problemas são gerados com a implantação do PID, a estabilidade do sistema diminui devido ao termo integrativo, gerando o chamado *windup*, que ocorre devido à integração, que ao tentar corrigir o erro, pode integrar acima de 100% frente a uma perturbação grande. Além disso, o sistema pode gerar uma espécie de acúmulo de erro, no qual após uma segunda perturbação, seja necessário muito tempo para a sua eliminação, e assim, o controle responda da forma esperada. Já o termo derivativo faz o sistema passar a ter uma resposta transitória mais lenta e com mais ruído (GUERRA, 2009).

O Arduino é um meio de controlar projetos e protótipos construídos de uma forma mais acessível do que outros sistemas disponíveis no mercado (SILVA *apud* CAVALCANTE, 2014). Segundo Santos (2017), o Arduino é uma plataforma *open-source* de prototipagem baseada em *hardware* e *software* flexíveis de fácil utilização. Ainda, de acordo com Cavalcante (2014), essa ferramenta permite adicionar diversos tipos de componentes eletrônicos direcionados e programados para uma determinada atividade.

Devido aos problemas que podem ser causados com utilização de um controle PID, quando utilizado junto ao Arduino, pode ser utilizado experimentalmente um sistema P, que, de acordo com Filho (2014), tem a vantagem de que quando não se tem possibilidade de uma abordagem analítica (não se conhece o modelo matemático da planta, como nesse projeto), é possível a obtenção de sintonia dos parâmetros por meio de abordagens experimentais. Para esse caso específico de controle de pH, a presença de *offset* não gera problema, desde que, ele esteja na faixa estabelecida, permitindo a utilização do controle apenas proporcional.

Esse trabalho tem como objetivo a construção de um módulo experimental para controle de pH, em que um código de programação em malha fechada e e feedback deve ser desenvolvido, o sistema sintonizado e testado a fim de verificar a eficiência do projeto proposto.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O módulo utilizado neste trabalho foi construído com o intuito de simular um sistema contínuo, em que sempre há entrada do efluente e a saída dele neutralizado. O efluente que chega ao tanque de neutralização, encontra-se com o pH fora da faixa estabelecida pela Resolução nº 357 do CONAMA, e assim o sistema deve realizar sua neutralização. O esquema do módulo construído se apresenta na Figura 1 abaixo.

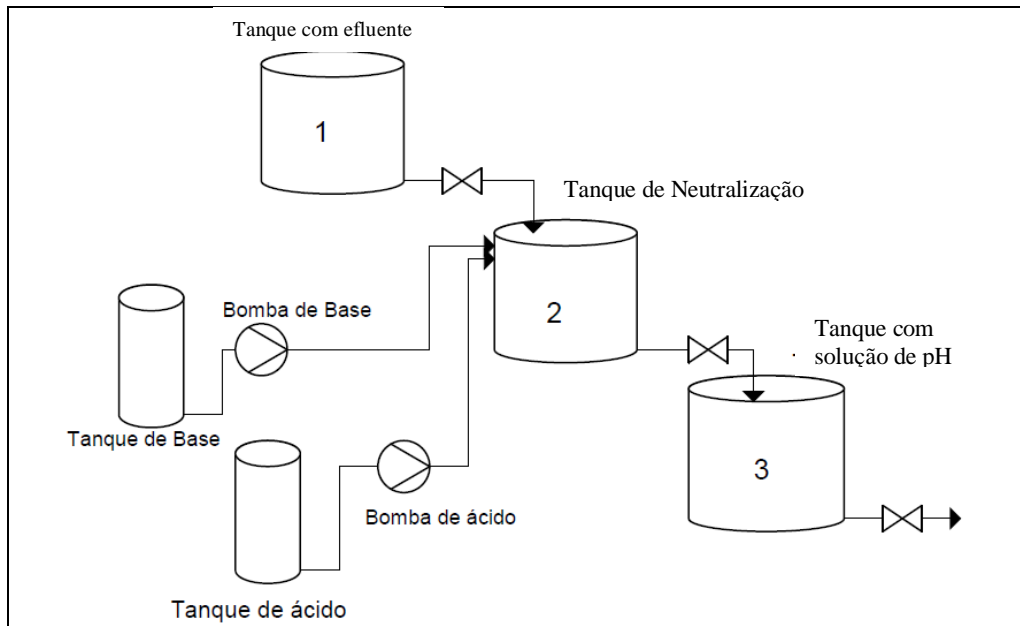


Figura 1- Fluxograma do Módulo Experimental.

Basicamente, este sistema é constituído por três tanques: o Tanque 1, com o efluente com pH próximo a 4, o Tanque 2, de neutralização, onde são realizadas as correções do pH, e o Tanque 3, com o efluente com o pH neutralizado. Há também dois tanques menores, um com ácido e outro com base, necessários para realizar as correções do pH, e duas bombas, que levam a base e o ácido por meio de mangueiras dentro do Tanque 2. Para conectar as bombas ao sistema foram utilizadas duas pontes H, que fazem parte do sistema Arduino utilizado, além de duas fontes para alimentar as bombas. Um agitador também foi necessário e esse era alimentado por outra fonte. A leitura do pH dentro do Tanque 2 foi realizada utilizando um sensor de pH, com saída analógica, conectado a uma placa Arduino UNO, que envia os dados obtidos ao computador. O sistema recebe esses dados e realiza as comparações necessárias com o setpoint, estabelecido por meio de um programa criado no Xcos, uma ferramenta do Scilab, e então esse programa envia o comando às bombas que, caso necessário, são acionadas.

A sintonia do processo para o sistema perturbado tanto com base quanto com ácido foi feita pelo método de Ziegler e Nichols I.

O sistema de controle finalizado está apresentado na Figura 2.

Para avaliar a funcionalidade da malha de controle proposta foram realizadas perturbações no sistema, onde inicialmente tinha-se a solução de Fosfato de Sódio com Ácido Cítrico, um tampão com pH de 4,12, a ser neutralizada no Tanque 2. O controle foi ligado e foram criados três distúrbios com Ácido Clorídrico de concentração 1 mol/L, com 5, 10 e 15 mL respectivamente. Logo após foram realizadas perturbações com 5, 25 e 35 mL de Hidróxido de Sódio com concentração de 1 mol/L. Para cada perturbação, havia condições iniciais diferentes. As respostas do sistema foram obtidas através dos gráficos gerados. Durante todo o experimento a temperatura da solução foi monitorada.

A solução tampão foi escolhida, pois segundo Oliveira, Silva e Tófani (2010), às variações de pH ocorridas nas soluções tamponadas são insignificantes quando comparadas a de soluções não tamponadas e por isso, são utilizadas para manter constante o pH de um sistema. A dificuldade em causar variações no pH de uma solução tamponante foi um dos

motivos para a escolha dessa solução, visto que, após gerados os distúrbios, corrigir o pH de um tampão é mais difícil devido as suas propriedades características.

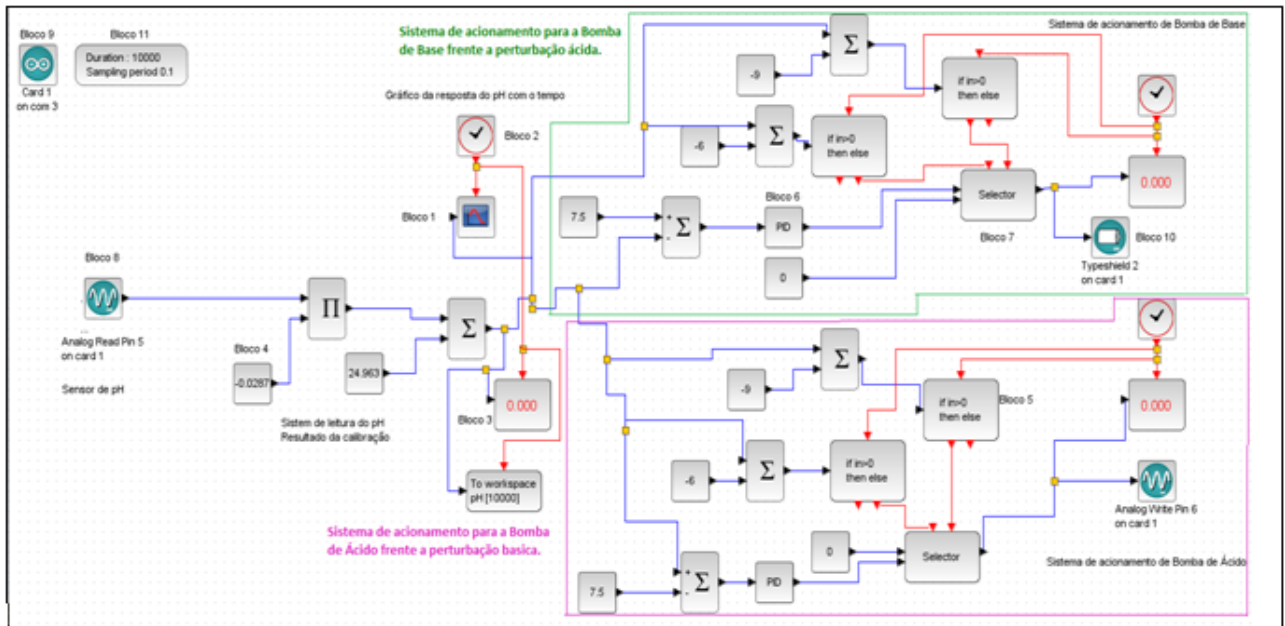


Figura 2 - Sistema de Controle em Malha fechada

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse controle foi construído para a manutenção do valor de um pH na faixa de 6 a 9, que através da sua média, 7,5, é feita a determinação do desvio em relação ao valor desejado, e da utilização deste para se gerar e aplicar uma ação de controle capaz de reduzir ou anular esse desvio.

Essa malha de controle é do tipo feedback, pois de acordo com Ogata (1997), nesse tipo de regulação automática, a ação de correção é produzida como função das diferenças entre a variável do processo e o set-point. A correção não mudará o seu sinal até que o desvio não mude. A correção é cessada quando  $PV=SP$ .

Para a construção da malha de controle fechada, o set point, pH de 7,5, foi mantido constante, e assim o objetivo do controle é minimizar os efeitos de distúrbios no sistema, como entrada de ácido ou base. Segundo Filho (2014), essa é uma característica de um sistema com problema regulatório, em que a tarefa do sistema de controle é unicamente contra-agir os efeitos dos distúrbios, buscando manter a saída no *set-point* estabelecido.

As figuras de 3 a 8 mostram os gráficos das respostas do pH versus o tempo, diante dos distúrbios e a ação do controle realizadas pelo sistema. Em cada experimento a solução inicial era o resultado da anterior.

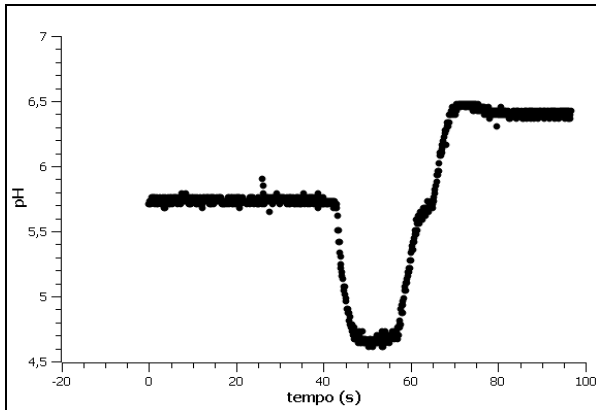


Figura 3 – Gráfico da atuação do controle ao ser adicionado 5 mL de HCl (1 mol/L)

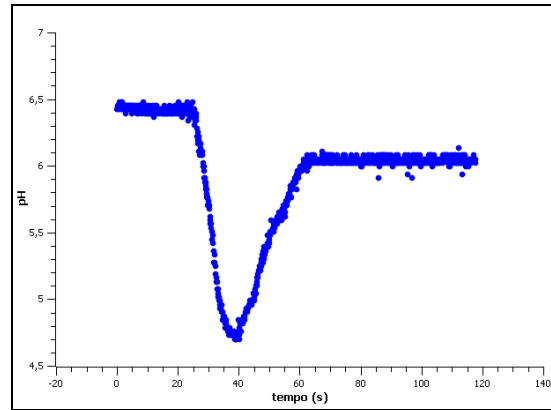


Figura 4 - Gráfico da atuação do controle ao ser adicionado 10 mL de HCl (1 mol/L)

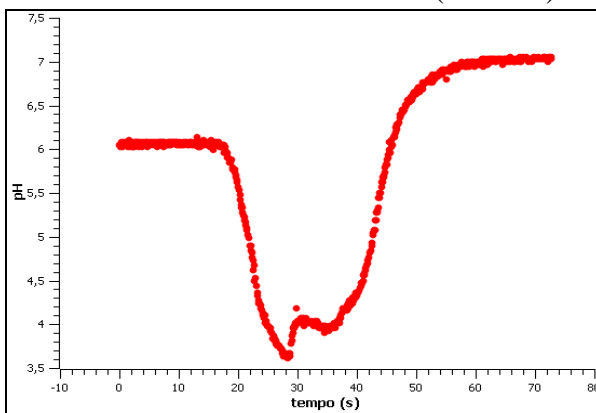


Figura 5 - Gráfico da atuação do controle ao ser adicionado 15 mL de HCl (1 mol/L).

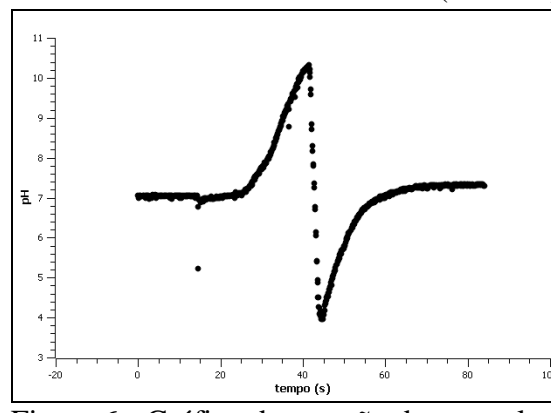


Figura 6 - Gráfico da atuação do controle ao ser adicionado 5 mL de NaOH (1 mol/L).

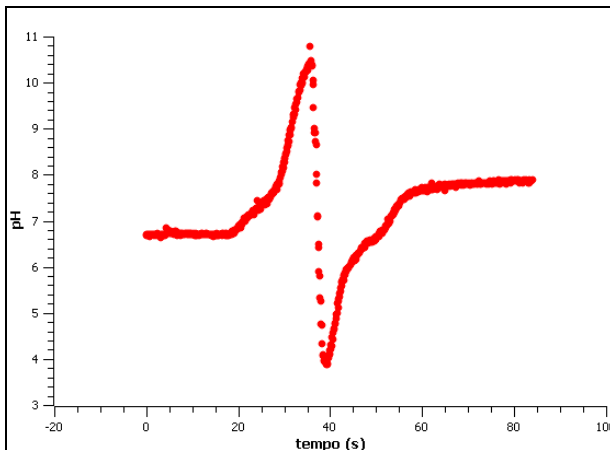


Figura 7 - Gráfico da atuação do controle ao ser adicionado 25 mL de NaOH (1 mol/L).

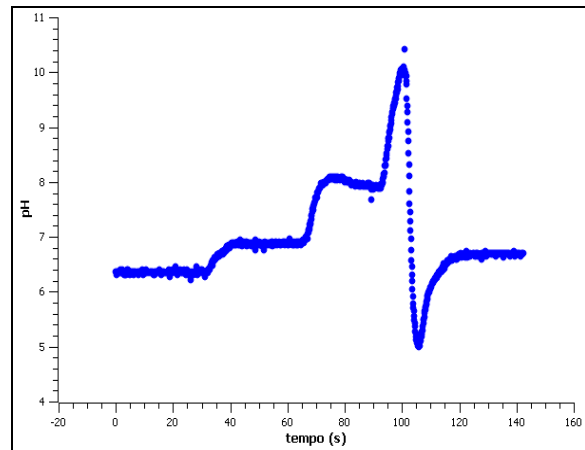


Figura 8 - Gráfico da atuação do controle ao ser adicionado 30 mL de NaOH (1 mol/L).

No gráfico da Figura 3, é possível ver claramente como o controle funciona, o efluente inicialmente estava com o pH a 5,7 a temperatura de 21 °C e a partir do tempo de 40 segundos a perturbação de ácido foi detectada e assim, depois de um tempo morto, o controle ativou a bomba de base, que foi ligada injetando no Hidróxido de Sódio no Tanque 2. A partir de 58 segundos, quando a base entrou no sistema, o pH começou a se elevar até que a bomba de

base foi desligada quando o pH atingiu a faixa estabelecida, nesse caso, devido ao tempo morto para desligar a bomba, o pH resultante foi 6,5.

Assim como o gráfico da Figura 3, as Figuras 4 e 5 mostram as respostas do controle a distúrbios de volumes ainda maiores de ácido. Na Figura 4, para o pH inicial do efluente de 6,5 a temperatura de 21 °C, o tempo de resposta do sistema foi de aproximadamente 20 segundos, assim, a bomba de base foi ligada próximo aos 40 segundos e só desligou após o pH atingir a faixa estabelecida. De forma similar, a Figura 5 mostra como o controle atuou ao corrigir o pH, que inicialmente estava a 6,05 a 21°C, e aos 14 segundos foi adicionado 15 mL de ácido, que gerou um tempo de resposta do sistema de aproximadamente 14 segundos, no qual a bomba de base foi acionada aos 28 segundos. Nessa figura é possível observar uma pequena oscilação no tempo de 30 a 35 segundos, isso pode ter ocorrido devido a falha do sensor de pH, comportamento da solução tampão utilizada como efluente e até mesmo uma agitação não eficiente. No entanto, o pH final obtido, por volta de 7, está dentro da faixa estabelecida.

Os gráficos das Figuras 6, 7 e 8 mostram as respostas dos sistemas frente a perturbações de base. Na Figura 6, para o efluente com pH inicial de 7, a 21 °C, o distúrbio com 5 mL de Hidróxido de Sódio foi realizado próximo aos 25 segundos, para esse caso, também houve uma demora na resposta do sistema por volta de 15 segundos, e assim, aos 40 segundos, a bomba de ácido foi acionada. No entanto, a bomba de ácido lançou uma quantidade muito grande de HCl no sistema, o que causou um decréscimo muito grande no pH, como pode ser visto no gráfico entre 40 e 45 segundos, isso levou o sistema a desligá-la e acionar a bomba de base que corrigiu esse problema e só desligou quando o pH da solução atingiu a faixa estabelecida, em um pH de 7, aproximadamente. Na Figura 7 foi possível observar um comportamento bem similar ao descrito para a o gráfico da Figura 6, o valor do pH da solução inicialmente estava próximo a 6,8, a 21 °C, e aos 20 segundos foi feita a perturbação com 25 mL de base. O sistema ligou a bomba de ácido aos 38 segundos e posteriormente a bomba de base, devido ao mesmo comportamento descrito para a Figura 6. O pH final obtido foi de 7,4 aproximadamente, também dentro da faixa. Por fim, na Figura 8, foi realizada uma perturbação de 30 mL de base em um sistema com pH inicial de 6,3 a 21 °C. Para esse caso, foi possível observar aumentos graduais no pH, isso porque a base para o distúrbio foi acrescentada de 10 em 10 mL, pois o sistema não saiu com o pH fora da faixa com menos de 30 mL nessas condições iniciais. Assim como as Figuras 6 e 7, a bomba de ácido foi desligada logo após ser acionada devido ao decréscimo rápido e significativo do pH, e nesses casos a bomba de base foi acionada pelo sistema e o pH obtido no final ficou dentro da faixa estabelecida, com o valor de 6,4 aproximadamente.

Em todas as perturbações realizadas foi possível perceber um tempo de resposta do sistema, além disso, a agitação realizada foi lenta frente à quantidade de base e ácido acrescentadas, o que pode ter levado a uma demora até o eletrodo captar a variação de pH. Ademais, a solução tampão utilizada tem comportamento diferente quando recebe volumes diferentes de ácido ou base, o que pode justificar o comportamento dos gráficos obtidos, principalmente o da Figura 8 que não sofreu grandes variações de pH ao se adicionar mais de 20 mL de base.

#### 4. CONCLUSÃO

Obteve-se êxito com o módulo acerca dos objetivos experimentais, pois a simplicidade e eficácia do funcionamento deste proporcionaram resultados dentro da faixa de pH estabelecida e a comprovação da funcionalidade do projeto. O controle P implementado em

malha fechada se mostrou muito eficiente visto que para esse projeto um offset de 1,5 era permitido, devido à faixa do CONAMA 357/2005 utilizada como limites do controle.

O controle ainda permite a utilização de outras faixas de pH, diminuindo-se essa escala de variação, deixando-o mais criterioso. No entanto, ao se diminuir o erro, o controle P não poderá ser utilizado, devido ao offset gerado por ele, e assim o PID deve ser implementado para esse caso. Então, um sistema anti-*windup* deverá ser construído, além de trocar a plataforma Arduino por outra que permita a presença de ruídos devido a utilização do termo derivativo.

## REFERÊNCIAS

- Cavalcante, M.M. et al (2014), “A Plataforma Arduino para fins didáticos: Estudo de caso com recolhimento de dados a partir do PLX-DAQ”. *XXXIV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*, Brasília, vol.1, 1687-1696.
- Cavalcanti, J. E. (2012), “*Manual de Tratamento de Efluentes Industriais*”, 3° ed, LTDA, São Paulo.
- Guerra, W. A. (2009), “*Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis*”. Tese de Doutorado, CTG/UFP, Recife.
- Filho, M.D (2014), “*Síntese de Controlador PID para controle de pH em um reator com otimização via algoritmos genéticos*”. Tese de Doutorado, UENF, Campos dos Goytacazes.
- Mallmann, C. Pereira, R. (2016), “*Simulação Dinâmica em microcontrolador do controle de pH em reator CSTR*”, *XXV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Gramado.
- Ogata, K. (1997), “*Engenharia de Controle Moderno*”, 3° ed. Pearson Education do Brasil, São Paulo.
- Oliveira, I.M.F; Silva, M.J; Tófani, S.B (2010), “*Fundamentos de Química Analítica. Curso de Licenciatura em Química, Modalidade a Distância*”. UFMG, Belo Horizontes. Disponível em: <http://www.quimica.ufpr.br/nunesgg/CQ108/Equilibrio%20em%20solu%C3%A7%C3%A3o%20aquosa/solucao%20tampao.pdf>. Acesso: 17/07/2018.
- Santos, E.N.M. Minatel, M.G. Santoro, B.F (2017), “*Controle de pH em Tratamento de Efluente utilizando Dióxido de Carbono*” . *XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, São Paulo, vol.1, 5-10.

**Abstract.** *In this work, an experimental module was built to control pH through the Arduino platform, along with the Scilab software, using the Xcos tool. The main goal was to evaluate the performance of the neutralization system of a buffer solution, used as an effluent, after acid and base variations through the injection of HCl and NaOH. Control was made manipulating the acid and base pumps through a PID controller. The control was tested when performing new variations in the system with acid and base, and the technique presented itself as really efficient to promote the neutralization of the effluent used because of its buffering characteristics, inside the range established by CONAMA resolution no. 357 from 2005.*

**Keywords:** *Feedback control, pH neutralization, Xcos, Arduino.*