

## Plataforma Didática para Controle de Vazão e Nível a Partir de Resíduos Eletroeletrônicos

Pedro Marcelo Vieira Leite Júnior\* Pedro Marcelo Vieira Leite\*  
Ademar Virgolino da Silva Netto\* Carlos Alberto de Souza Filho\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail: calberto@cear.ufpb.br, ademar@cear.ufpb.br, pedro@cear.ufpb.br, pedrom.junior@cear.ufpb.br).

**Abstract:** Given the current situation of electronic waste (e-waste) production, aiming at reducing costs and development of sustainable laboratory practices, this article proposes a low-cost platform to develop experiments for automation course using e-waste. The practices are about flow and level control, which make up many industrial processes and students have the opportunity to work from the characterization of the sensors used to the controller. The developed platform can be controlled by microcontrollers or industrial programmable logic controllers (PLC) and experiments that were carried out in different subjects are discussed, which demonstrates that the platform can be versatile and flexible, being used in multidisciplinary experiments (which may involve instrumentation, control, data acquisition, human-machine interface, among others). The total cost of the platform was approximately R\$104.50 and to evaluate the result, a questionnaire was applied to students who indicated that they had approved the use of the platform. It is expected that this type of solution will be increasingly disseminated to the community.

**Resumo:** Diante da situação atual da produção de resíduos eletroeletrônicos, visando a redução de custos e elaboração de práticas laboratoriais sustentáveis, neste artigo é proposta uma plataforma para o desenvolvimento de experimentos para disciplinas da área de controle e automação de baixo custo usando resíduos eletroeletrônicos. As práticas são de controle de vazão e nível, que fazem parte de vários processos industriais e os alunos têm oportunidade de trabalhar desde a caracterização dos sensores ao controlador. A plataforma desenvolvida pode ser controlada por microcontroladores ou controladores lógicos programáveis (CLP) industriais e são abordados experimentos que foram realizados em diferentes disciplinas, o que demonstra que a plataforma pode ser versátil e flexível sendo utilizada em experimentos multidisciplinares (podendo envolver instrumentação, controle, aquisição de dados, interface homem máquina entre outras). O custo total da plataforma foi de aproximadamente R\$104,50 e para avaliar o resultado foi aplicado um questionário com os alunos que indicaram ter aprovado o uso da plataforma. Espera-se difundir para a comunidade cada vez mais este tipo de solução.

*Keywords:* Educational kit; Low-Cost,E-Waste; Automation; Reuse.

*Palavras-chaves:* Kit didático; Baixo Custo; Resíduos Eletroeletrônicos; Automação; Reaproveitamento.

### 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório da Unitar (2020), “equipamento eletrônico é todo produto que contém partes, que dependem de fonte de energia ou bateria para funcionar e quando descartado, torna-se um resíduo eletroeletrônico (REE ou *e-waste*)”. Este resíduo pode conter metais pesados que ao ser descartado inadequadamente podem contaminar o meio ambiente. Se o descarte continuar no ritmo atual, estima-se que em 2030, serão gerados em torno de 74,7Mt de resíduos equivalente a 9kg per capita. Diante destes números, os integrantes do Laboratório de Automação e Controle (LAC) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) tem investido em soluções didáticas visando a sustentabilidade e redução de custos. Já foram desenvolvidos outros trabalhos como: kit de baixo custo para o

ensino de controle digital (Cunha et al., 2018; Araújo et al., 2005a); controle inteligente e sistemas embarcados (Araújo et al., 2005b); sistemas de automação industrial (Vaz et al., 2018); sistema de aquisição de dados (Souza Filho and Silva Netto, 2020); e de instrumentação industrial (Cardoso and Souza Filho, 2019). Entretanto, nenhum deles para controle de nível e vazão. Esta plataforma visa suprir essa lacuna.

Outra premissa para o desenvolvimento deste trabalho é que o controle de nível é utilizado na indústria em diversas aplicações como: manter o nível de reservatórios utilizados para abastecer sistemas de lavagem de recipientes; determinar a quantidade de água no interior do tanque para cozimento do mosto na fabricação de cerveja; controlar a quantidade do produto final que será vendido para o usuário.

Assim como o nível, a vazão é uma grandeza de extrema relevância. Através do controle da vazão de uma substância ácida ou alcalina pode-se neutralizar o pH do efluente líquido gerado no processo, outra aplicação é controle da vazão de uma substância buscando determinar a quantidade utilizada para geração do produto final. Além de aplicações como: medir a diferença de vazão na entrada e saída de um reservatório para controlar o nível; ou o controle da vazão do vapor para o controle de temperatura do processo através de trocadores de calor; dentre outras.

Durante o curso de graduação, em muitas situações os alunos não tem oportunidade de aplicar em uma planta os conceitos vistos nas disciplinas de controle. Muitas vezes, isto está relacionado a ausência de kits didáticos disponíveis no laboratório. Já existem diversas soluções comerciais de kits didáticos para o controle de vazão e nível. Entretanto, os kits comerciais possuem um custo elevado de aquisição e manutenção. Com as restrições orçamentárias atuais está ficando mais difícil a aquisição de equipamentos desta natureza.

Na literatura encontram-se alguns trabalhos com abordagens semelhantes para o ensino de controle e automação, como (Gomes et al., 2011), (Santana, 2019), (Quintino et al., 2017), (Silveira et al., 2019), (Keles et al., 2017), (Sauer et al., 2017), (Albuquerque Neto et al., 2019).

Neste artigo é proposto uma plataforma de desenvolvimento de atividades práticas, para disciplinas de controle e automação de baixo custo, usando resíduos eletroeletrônicos, placas de circuito impresso e impressora de prototipação em 3D. A plataforma tem o objetivo de permitir a realização experimentos de controle de vazão e de nível, que fazem parte de vários processos industriais.

O diferencial da plataforma desenvolvida neste artigo, além da aplicação proposta, é o uso de resíduos eletroeletrônicos (motores e vidros de escâneres) e prototipação em impressora 3D e CNCs. Isto torna a plataforma um produto único, que poderá ser replicado reduzindo-se ainda mais os custos e ampliando as possibilidades de novas propostas ou adaptações, com o uso do maquinário citado.

## 2. DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA

A plataforma consiste em um tanque com dois compartimentos, com sensores (nível e vazão) e atuadores (bombas) para controle de vazão e nível, utilizando microcontrolador ou Controlador Lógico Programável (CLP) da sua preferência. Nesta seção serão apresentados: a estrutura mecânica; o sistema de bombeamento desenvolvido; o *hardware*; a comunicação; e por fim a análise dos custos de produção.

### 2.1 Estrutura Mecânica

Para a confecção da estrutura do kit optou-se por utilizar materiais reciclados de resíduos eletroeletrônicos. O kit desenvolvido está ilustrado na Figura 1.

A estrutura é composta por um reservatório principal dividido na metade formando dois tanques internos. O material utilizado para concepção dos tanques foi vidro retirado da parte do escâner de impressoras multifuncionais e colado com silicone. Cada tanque  $i$  possui uma bomba ( $B_i$ ) e um sensor de vazão ( $SV_i$ ), podendo ser utilizados de

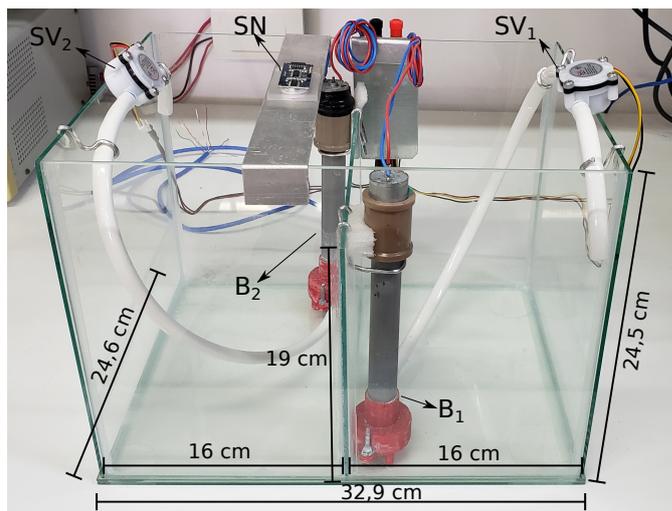


Figura 1. Estrutura mecânica da plataforma desenvolvida.

maneira independente para controle de vazão, ou acoplados para realização do controle de nível em cascata a partir da vazão. É possível realizar o controle de nível do tanque individualmente, utilizando-se o sensor de nível (SN).

Na imagem da Figura 1 estão apresentadas as medidas externas do reservatório principal, exceto pela medida de 16,0 cm que é o comprimento interno de cada tanque. As placas de vidro utilizadas na construção possuem todas a espessura de 3 mm. Foram utilizadas duas placas, uma colada sobre a outra, no fundo do reservatório para dar maior resistência. Com base nas medidas apresentadas, o volume do reservatório principal é de aproximadamente 19 l (18.992 ml). O volume interno de cada tanque é de aproximadamente 7,3 l (7.296 ml).

### 2.2 Desenvolvimento das Bombas

As bombas que realizam a sucção da água em cada tanque ( $B_1$  e  $B_2$ ) foram confeccionadas com PLA (Poliácido láctico) utilizando-se impressora 3D. A Bomba desenvolvida e todas as peças que a compõe estão ilustradas na Figura 2.

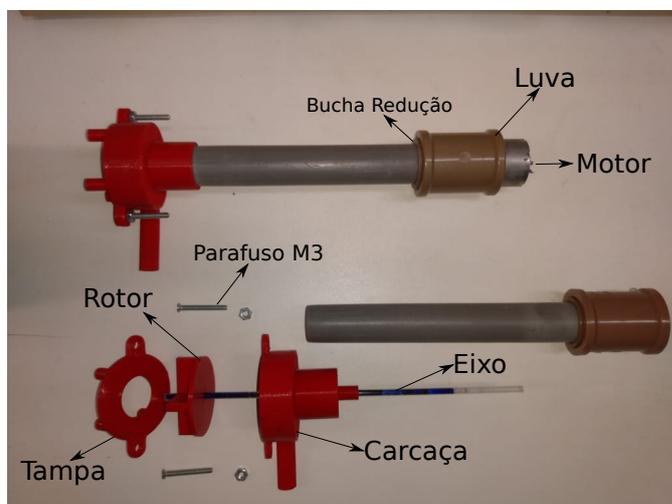


Figura 2. Peças individuais e montagem da bomba.

O motor escolhido para movimentar a bomba foi um motor de corrente contínua retirado de impressoras jato de tinta. Para realizar a fixação do motor à bomba foram utilizados: fragmento de tubo de PVC de 20 mm e uma bucha de redução 25 - 20 mm em conjunto com uma luva de 25 mm. Dessa forma o motor fica fixado dentro da luva de PVC. O acoplamento entre o motor e o rotor da bomba foi feito utilizando-se um tubo de tinta de caneta. Uma extremidade do tubo é acoplado ao eixo do motor e a outra é presa ao rotor da bomba. Optou-se pela utilização de um eixo longo, para que enquanto a bomba fique submersa o motor consiga trabalhar sem entrar em contato com a água.

Na montagem da bomba foram usados dois parafusos M3 de 2 cm com porcas para fixar a tampa à carcaça. As bombas em si são formadas por quatro partes: Carcaça, Eixo, Rotor e Tampa. O movimento rotativo produzido pelo motor é transferido para o rotor através do eixo. O rotor por sua vez trabalha movimentando o fluido através da força centrífuga que ele aplica.

### 2.3 Hardware

A arquitetura de *hardware* desenvolvida para a plataforma pode ser representada pelo diagrama ilustrado na Figura 3.

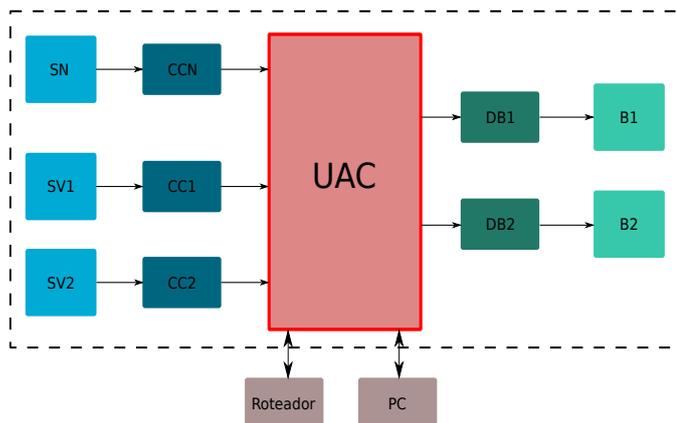


Figura 3. Diagrama de blocos do *hardware* desenvolvido

O sistema foi planejado para que tivesse a flexibilidade de ser controlado tanto por um microcontrolador quanto por um CLP, que realizam a função de unidade de aquisição e controle (UAC) da plataforma. Os sinais provenientes dos sensores foram adequados para serem compatíveis com os níveis das entradas das UACs utilizadas. Como todos os sinais dos sensores são digitais, os circuitos de condicionamento (CCN: circuito de condicionamento de nível, CC1 e CC2: circuito de condicionamento de vazão) adéquam a amplitude dos sinais dos sensores para valores de 3,3 V (quando utilizado um microcontrolador como UAC) ou de 24 V (quando utilizado o CLP como UAC). Para controlar as bombas foram desenvolvidos drives (DB1 e DB2), que possibilitam adequar a corrente de saída da UAC para movimentar os motores das bombas.

O microcontrolador *TM4C1294NCPDT* da *Texas Instruments* foi escolhido como UAC, pois já é utilizado na realização de experimentos de outras disciplinas do curso. Este microcontrolador possui um controlador *Ethernet*, o que

permite que seja conectado diretamente a um roteador e acessado através da Internet. O microcontrolador também é conectado a um PC por meio de uma porta USB, por onde pode ser programado e realizada a comunicação para transferência de dados.

O CLP escolhido para ser conectado à plataforma é o S7-300 da Siemens, devido a disponibilidade no laboratório. Ele utiliza o protocolo *Profinet*, o que permite que seja conectado a rede de computadores através de um roteador. Pode-se interligar o CLP a uma IHM (Interface Homem-Máquina), por meio do protocolo *Profibus* ou *Profinet*, para controlar e monitorar a plataforma desenvolvida.

### 2.4 Instrumentação

Para medir a vazão em cada tanque foi utilizado o sensor YF-S401. Este sensor foi escolhido pela faixa de vazão adequada à capacidade das bombas (0,3 à 6 L/min) e pelo custo reduzido. O sensor foi conectado à bomba por meio de resíduos de mangueira da ducha de chuveiro, como pode-se visualizar na Figura 1.

O sensor é alimentado com uma tensão DC entre 3,5V a 24V. O sinal fornecido pelo sensor é uma onda quadrada de amplitude de 4,7V (quando alimentado com  $V_{cc} = 5V$ ), onde a frequência  $f$  da onda varia em função da vazão. Pode-se calcular o valor da vazão  $Q$  (L/min), medida pelo sensor, utilizando-se a equação 1, onde o denominador 98 é um valor constante informado pelo fabricante.

$$Q = \frac{f}{98} \quad (1)$$

Para realizar a medição do nível foi escolhido o sensor ultrassom HC-SR04. Este sensor foi escolhido por ter um custo reduzido e faixa de medição de 2 cm a 4 m, o que está adequado ao limite de altura do nível interno do tanque que é de 19 cm.

O sensor é alimentado com tensão contínua de 5V no pino de  $V_{cc}$  e o terra no pino GND. Ativando-se um sinal de gatilhamento, gerado através de um pulso digital na entrada **Trig** do sensor (este pulso deve ter largura maior que  $10\mu$ ), é fornecido na saída **ECHO** um pulso digital com largura ( $ta$ ) proporcional à distância entre o sensor e o objeto. Desta forma, pode-se determinar, por meio da equação 2, a altura do nível ( $L$ ) no interior do tanque medindo-se a largura do pulso gerado na saída **ECHO** ( $ta$ ).

$$L = H - \frac{ta * V_s}{2} \quad (2)$$

onde  $H$  é a distância entre o sensor e a base do tanque,  $V_s$  é a velocidade de propagação do som no ar, que pode ser aproximada para 340,29m/s. O valor de  $V_s$  varia em função da temperatura ( $T$ ), podendo ser determinado pela equação 3.

$$V_s = 331,45 \times \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (3)$$

onde  $T_0 = 273,15$  é a temperatura a  $0^\circ C$ .

## 2.5 Caixa de Conexão e Cabo de Dados

A caixa de conexão serve para facilitar o uso do *hardware* pelos alunos e melhorar a segurança no uso dos equipamentos aproximando da realidade de um *kit* didático. Para sua construção foi utilizada uma caixa plástica reaproveitada de um reator de lâmpada fluorescente de tubo. A caixa foi utilizada para acomodar a placa de circuito. Foram instalados bornes do tipo banana de 4 mm na caixa para as conexões do *kit* e também foi instalado o conector DB9 para a conexão do cabo de dados.

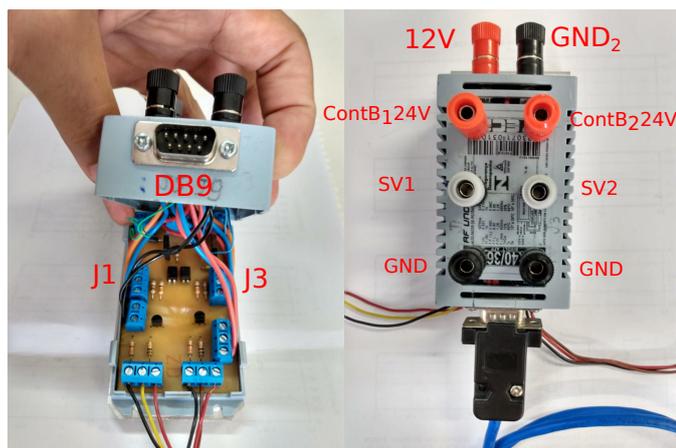


Figura 4. Caixa de conexão da plataforma

Na caixa de conexões ilustrada na Figura 4, os conectores de 4mm vermelhos são utilizados para o controle das bombas, do lado esquerdo a bomba B1 e do direito a bomba B2. Os conectores cinzas são responsáveis pela comunicação dos sensores de vazão das bombas, do lado esquerdo o sensor SV1 e do direito o sensor SV2, e os conectores de cor preta são destinados ao GND de cada bomba.

O cabo de dados foi confeccionado utilizando-se um conector DB9 Fêmea ao qual foi conectado um cabo de rede CAT5e. Este cabo contém os sinais necessários para utilização de um microcontrolador como UAC na plataforma desenvolvida. No cabo estão os sinais: de alimentação de 5V e 3,3V; de acionamento das bombas; e da saída do circuito de condicionamento dos sensores de vazão.

## 2.6 Análise de Custos

Além dos materiais reciclados utilizados foram necessários alguns componentes para a confecção da plataforma. Foi realizada uma pesquisa de preços para avaliar o custo total necessário para reprodução da plataforma. A descrição dos componentes utilizados com sua respectiva quantidade e preços está na Tabela 1.

Tabela 1. Relação e custo dos materiais

Componente	Qtd	Valor Unitário	Valor Total
Diodos	2	R\$ 0,50	R\$ 1,00
Resistores	10	R\$ 0,25	R\$ 2,50
Transistor BC547	2	R\$ 0,50	R\$ 1,00
Transistor BD677	2	R\$ 5,00	R\$ 10,00
Optoacoplador PC817	2	R\$ 2,00	R\$ 4,00
Conector KRE 01x02	4	R\$ 1,50	R\$ 6,00
Conector KRE 01x03	5	R\$ 2,00	R\$ 10,00
Placa de circuito	1	R\$ 8,00	R\$ 8,00
Bornes banana 4 mm	6	R\$ 2,00	R\$ 12,00
Sensor Nível	1	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Sensor Vazão	1	R\$ 40,00	R\$ 40,00
Total			R\$104,50

Os valores indicados na Tabela 1 foram obtidos através do preço médio encontrado em lojas nacionais. O custo total foi de R\$104,50, o que está bem abaixo de uma plataforma similar comercial.

Com exceção dos sensores de nível e vazão, é possível obter os demais componentes ou similares de REE. Pretende-se desenvolver os sensores de nível e vazão para que a plataforma seja toda construída com REE ou em peças feitas em impressora 3D.

## 3. EXPERIMENTOS REALIZADOS

A plataforma proposta permite a realização de vários experimentos na área de controle e automação. Neste trabalho, são apresentados experimentos que podem ser realizados em diferentes disciplinas de maneira sequencial e complementar.

Os experimentos sugeridos contemplam conhecimentos essenciais para um profissional de controle como: calibração do sensor de nível; protocolo de comunicação; utilização de dispositivos embarcados; acionamento de bombas; medição de vazão e nível e controle de vazão.

### 3.1 Calibração do Sensor de Nível

Este experimento é realizado na disciplina de Instrumentação Industrial e tem como objetivo desenvolver no aluno a habilidade de realização do levantamento da resposta da curva característica de um sensor, que faz parte do processo de calibração e ajuste necessário para todo sensor industrial.

Na realização deste experimento é utilizado um gerador de sinais conectado e entrada *Trig* do sensor para gerar um pulso de 10 $\mu$ s com tensão de 0 a 3,3V a cada 200ms. A saída *Echo* do sensor é conectada a um osciloscópio.

A altura do nível de água no tanque é incrementada de zero até o nível máximo a cada 1cm. Para cada altura é obtido o valor da largura de pulso do sinal de *echo* medida através do osciloscópio. Um resultado obtido para variação do nível do tanque está ilustrado na Figura 5.

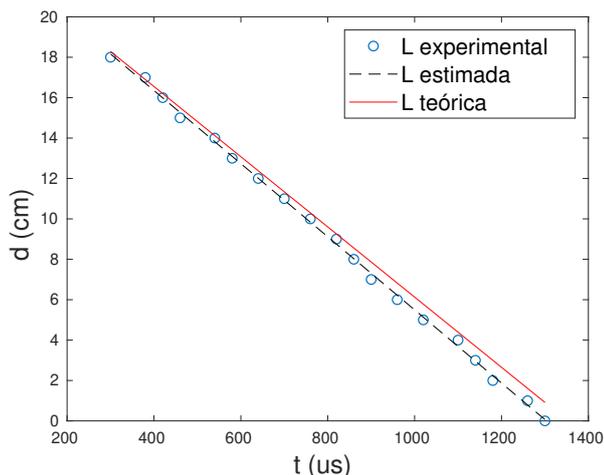


Figura 5. Curvas de Calibração e Ajuste do Sensor de Nível

Pode-se observar que os resultados obtidos experimentalmente divergem dos resultados teóricos calculados por meio da equação 2, principalmente para valores de  $L$  pequenos quando a distância entre o sensor e o líquido é maior. Este resultado reforça a necessidade do procedimento de calibração, demonstrando para o aluno que o valor indicado pelo fabricante pode ser diferente do real. Com a curva experimental obtida, foi realizado o ajuste por meio da função *polyfit* do Matlab. O procedimento de ajuste nos sensores permite minimizar o erro obtido na medição.

### 3.2 Protocolo de Comunicação Serial

O objetivo deste experimento é proporcionar ao aluno aprender a utilizar o recurso da UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) do microcontrolador, associado a um protocolo de comunicação simples baseado em caracteres ASCII.

No desenvolvimento do experimento é elaborado um *firmware* para o TM4C1294 capaz de identificar um protocolo de comunicação baseado em caracteres ASCII, utilizando a interface RS232, que contenha os campos ilustrados na Figura 6.



Figura 6. Quadro de mensagens do protocolo

Os caracteres usados para início e fim devem ser T e V. Para endereço são utilizados números entre 0 e 9. O campo referente ao comando especifica qual ação deve ser realizada pelo nó ao receber a mensagem. O campo de dados contém a informação adicional do valor referente a um comando enviado. As mensagens existentes no protocolo estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Comandos Utilizados no Protocolo

Descrição	Mensagem	Resposta enviada
Leitura do valor da vazão	TeRFnV	Vazão n=
Leitura do valor do nível	TeRLV	Nível=
Acionamento da Bomba 1	TeB1xV	B1 ligada(x=1) B1 desligada(x=0)
Acionamento da Bomba 2	TeB2xV	B2 ligada(x=1) B2 desligada(x=0)
Mudança de rotação de B1	TeSB1xxxV	Rotação B1= xxx %
Mudança de rotação de B2	TeSB2xxxV	Rotação B2= xxx %
Mudança da referência	TeSRCxxxV	Referência= xxx

Ao receber o comando através da porta serial, o microcontrolador envia como resposta a mensagem descrita na Tabela 2. Na coluna referente à mensagem o valor de  $e$  é o endereço do nó, que deve ser entre 0 a 9. No *firmware* é atribuído um endereço ao nó através de uma variável, de forma que o nó só responde ao comando quando o endereço enviado for igual ao atribuído.

Para o comando de mudança de rotação o valor da rotação deve ser entre 0 e 100%, representado na tabela como xxx.

O *firmware* implementado no microcontrolador é capaz de identificar uma mensagem válida de acordo com o quadro estipulado, separando a informação correspondente ao endereço e ao comando recebido em duas variáveis distintas. Além disto, detecta quando os caracteres recebidos excedem um número maior do que o estipulado para o quadro através de uma variável de erro.

Sempre que recebe um novo caractere de início é reiniciado o armazenamento da mensagem independente de ter finalizado a anterior. A taxa de comunicação utilizada no experimento foi de 115200 bps para uma frequência do microcontrolador de 120 MHz.

### 3.3 Acionamento das Bombas

Após desenvolver o protocolo de comunicação com a plataforma, o aluno passa a implementar as ações de acionamento das bombas existentes. Neste experimento ele pode verificar conceitos básicos, como os pinos de entrada e saída do microcontrolador podem ser utilizados para comandar uma planta industrial. Utilizando-se 2 pinos de GPIO como saída o aluno liga e desliga a bomba ao enviar o comando TeBnxV (onde n é o número da bomba) por um terminal do PC.

Em outro experimento, o aluno utiliza os pinos de GPIO como saída PWM (*Pulse Width Modulation*). É possível estimular de maneira prática a assimilação do conceito da modulação por largura de pulso, modificando o ciclo de trabalho para alterar a vazão de saída da bomba ao receber o comando TeSB1xxxV ou TeSB2xxxV.

### 3.4 Medição de Vazão e Nível

Estes experimentos tem como objetivo proporcionar ao aluno a capacidade de leitura de um sinal digital, para determinar o valor da grandeza de saída de um determinado sensor. Na medição da vazão o aluno necessita medir o período da onda quadrada fornecida pelo sensor e na

medição do nível o valor é determinado através da largura de pulso do sinal da saída.

Para alcançar este objetivo o aluno utiliza de conceitos como temporizadores e interrupções do microcontrolador. Sugere-se que para realizar estes experimentos seja utilizado como base o *firmware* desenvolvido no experimento do protocolo de comunicação serial.

O valor do nível ou da vazão é enviado pelo microcontrolador por meio da porta serial, quando recebe o comando correspondente de acordo com a Tabela 2. O comando é enviado pelo aluno por meio de um terminal serial no computador.

Utilizando um osciloscópio conectado na saída do sensor, pode-se avaliar se o valor lido pelo microcontrolador está correto. Acionando-se as bombas pode-se modificar o valor do nível ou da vazão para verificar a medição em diferentes valores das grandezas.

### 3.5 Controle de Vazão

O objetivo deste experimento é desenvolver no aluno a capacidade de projetar um controlador discreto, assimilando e compreendendo as ações de controle proporcional, integral e derivativa. Além disto, o aluno é capaz de verificar a influência do ruído na ação do controlador, o que exige o tratamento adequado do sinal adquirido pelo sensor.

Durante o experimento é desenvolvido um *firmware* para o microcontrolador TM4C1294ncpdt, que seja capaz de realizar o controle de vazão da plataforma descrita neste artigo. O *firmware* desenvolvido pode ser representado pelo diagrama de estados ilustrado na Figura 7

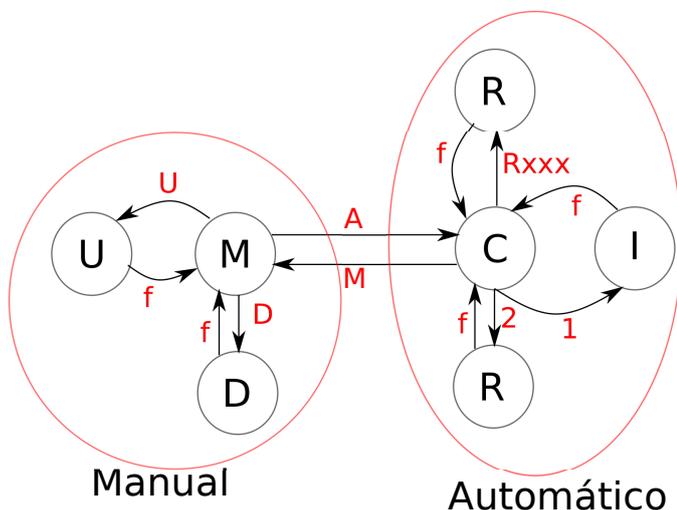


Figura 7. Diagrama de estados do *firmware* para o controlador

Para a realização do experimento deve-se colocar a mangueira com a saída de fluxo direcionada para o mesmo tanque onde está a bomba de sucção, de maneira que a água fique apenas circulando no mesmo tanque.

O *firmware* opera em dois estados distintos “Manual” e “Automático”. Ao receber o caractere M pela porta serial o *firmware* deve entrar no estado Manual.

No estado Manual o controlador é desabilitado. Ao entrar no estado Manual a bomba deve estar inicialmente desativada. Neste estado ao receber o caractere U incrementa-se o valor do ciclo de trabalho da saída da bomba. Ao receber o caractere D diminui-se o ciclo de trabalho para a saída da bomba.

Ao receber o caractere A o *firmware* entra no estado de operação automática. Neste estado o controlador é ativado desabilitando qualquer operação manual para as bombas.

O controlador implementado no *firmware* foi de acordo com a equação 4.

$$u(n) = Kp e(n) + Ki [e(n) + e(n-1)] + Kd [e(n) - e(n-1)] \quad (4)$$

onde  $u(n)$  é a ação de controle para a amostra  $n$ ,  $e(n)$  é o erro para a mostra  $n$  ( $e = R - y$  e  $y$  é valor de vazão da saída),  $Ki = (Kp * Ta) / Ti$ ,  $Kd = (Kp * Td) / Ta$  e  $Ta$  é o tempo de amostragem.

Ao receber o caractere ‘1’ incrementa-se o valor do ganho  $Kp$  e ao receber o caractere ‘2’ decrementa-se o valor. Inicialmente o valor do incremento foi 0,1.

Ao receber o comando Rxxx pela porta serial modifica-se o valor da referência  $R$  para xxx. Isto permite analisar o desempenho do controlador para diferentes pontos de operação, visualizando-se o comportamento no regime transitório.

O experimento do controlador proporcional foi realizado com um intervalo de amostragem de  $Ta = 500ms$  e diferentes valores do ganho  $Kp$ , que foi incrementado de 0,4 à 1,8. O desempenho obtido para o controlador pode ser visualizado na Figura 8.

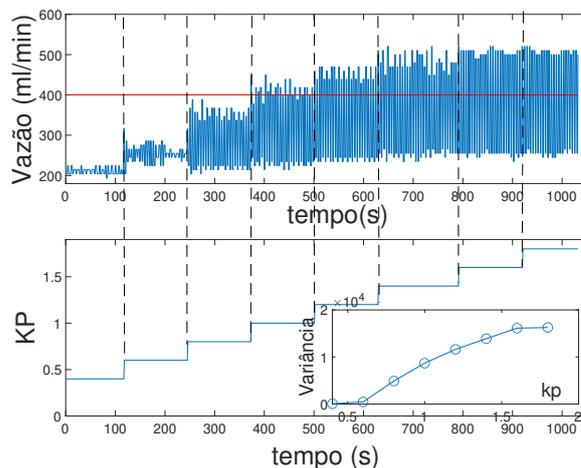


Figura 8. Evolução temporal do comportamento do controlador proporcional projetado para  $Kp$  variando de 0,4 à 1,8

Pode-se observar na Figura 8 que para valores de  $Kp$  pequenos o erro de regime permanente é elevado, o que é admissível para um controlador proporcional. Quando eleva-se o valor de  $Kp$  o erro de regime permanente diminui atingindo-se o valor da referência de 400ml/min.

Entretanto, observa-se que o valor das oscilações aumenta bastante com o incremento do ganho  $K_p$ , o que é indesejável para o correto funcionamento da planta. No gráfico inserido na Figura 8, foi traçado o comportamento da variância do sinal de vazão calculada para os diferentes valores de  $K_p$ . Observa-se que existe um aumento significativo da variância com a elevação de  $K_p$ , o que leva o sistema a instabilidade.

Após testar o controlador proporcional, o aluno modifica o controlador para acrescentar as ações integral e derivativa. Na Figura 9 é ilustrado o resultado do comportamento do controlador PI desenvolvido pelos alunos.

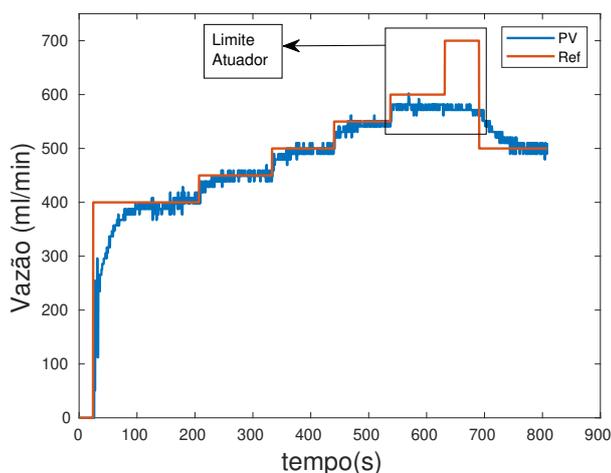


Figura 9. Evolução temporal do comportamento do controlador PI implementado

Foi utilizado como parâmetros do controlador  $K_p = 0,3$  e  $T_i = 12,5$ . Pode-se observar que o valor da variável de processo PV (vazão de saída) segue o comportamento aplicado na referência (Ref) da malha de controle. Entretanto, na região destacada pelo retângulo, a saída da planta satura em  $581\text{ml}/\text{min}$ . Isto ocorre devido a limitação da bomba utilizada que não consegue fornecer uma vazão maior. A limitação do atuador, não é algo que normalmente é considerado e percebido pelo aluno em atividades apenas teóricas ou por simulação.

#### 4. AVALIAÇÃO DA PLATAFORMA

Para validar a utilização da plataforma foi realizado um questionário anônimo com alunos das disciplinas de Sistemas de Aquisição de Dados e Interface e da disciplina de Instrumentação Industrial. O questionário utilizou 6 questões pontuadas em uma escala tipo *Likert* enumeradas de 1 a 5, onde 1 representa o pior conceito e 5 o melhor. O consolidado dos resultados obtidos são indicados na Tabela 3.

Tabela 3. Avaliação por parte dos Alunos

Questão	$\mu$	$\sigma^2$
Auxilio na fixação dos conteúdos teóricos	4,67	0,22
Facilidade na utilização	4	0,67
Qualidade Estética	3,67	0,22
Utilização dos Sen. e Atu.	4,67	0,22
Recomendação para replicação	4,83	0,14
Utilização de REE	4,83	0,14

Como pode-se verificar na Tabela 3, houve uma excelente aceitação dos alunos quanto a utilização e relevância da plataforma. A pequena variância obtida demonstra que houve consenso nos conceitos atribuídos pelos alunos.

Por fim, no questionário também foi colocado uma questão aberta para que os alunos indicassem sugestões para melhoria da plataforma. Foi sugerido colocar indicações das conexões e dispositivos utilizados, além de propor que os próprios alunos construíssem a plataforma durante a disciplina. As sugestões indicadas no questionário e expressas verbalmente justificam a menor nota com relação ao aspecto estético. Ainda é preciso colocar etiquetas nos dispositivos e melhorar a escala gradual para indicação do nível da plataforma.

Ao questionar o aluno sobre a relevância da utilização da plataforma para auxiliar a fixação dos conteúdos teóricos, 67% dos alunos atribuíram o conceito máximo com média das notas de  $\mu = 4,67$ . Sobre a recomendação da replicação da plataforma para realização dos experimentos de laboratório, 83% dos alunos atribuíram conceito máximo com média de  $\mu = 4,83$ . O resultado obtido nestas duas questões demonstram a importância da utilização da plataforma para auxiliar o desenvolvimento do aluno.

Quanto a facilidade de utilização da plataforma foi obtida uma média de 4 divididas igualmente em 33,3% entre as pontuações de 3 à 5. Sobre a utilização funcional dos sensores e atuadores utilizados, 66,7% dos alunos atribuíram conceito máximo com nota média de  $\mu = 4,67$ . Estes resultados demonstram que a plataforma apresenta uma boa usabilidade.

Os autores também avaliaram se a utilização do uso de resíduos eletroeletrônicos, para confecção de plataformas didáticas, poderia impactar negativamente com relação a aceitação dos alunos. Entretanto, 83,3% dos alunos atribuíram o conceito máximo com  $\mu = 4,83$  avaliando como muito útil o uso de REE.

#### 5. CONCLUSÃO

A partir desta plataforma, espera-se difundir soluções de aplicação de controle e automação de baixo custo para uso didático, visando reuso de componentes eletrônicos e possibilitando aos alunos atividades práticas nem sempre acessíveis, pois no geral as universidades adquirem soluções comerciais caras e em pouca quantidade, dificultando o acesso dos alunos. Em relação à avaliação feita pelos alunos sobre a plataforma o resultado foi satisfatório. A partir do questionário, eles indicaram que a plataforma auxilia bastante na fixação do conteúdo, na utilização dos sensores e atuadores e recomendaram a replicação, indicando o potencial da mesma para disciplinas da área de

controle. Os alunos inclusive tiveram interesse em montar a plataforma, que poderia ser desenvolvida nas disciplinas integradoras de projetos.

Os experimentos propostos são uma forma de indicar que pode-se explorar a plataforma de diferentes formas, desde a aquisição dos dados, caracterização de sensores e principalmente aplicar os projetos de controle calculados muitas vezes de forma exaustiva pelos alunos e que não são colocados em práticas, não visualizando as dificuldades inerentes a aplicação prática, como restrição do atuador. Por fim, espera-se propor novos experimentos, integração com diferentes softwares supervisórios, controle em cascata ou adaptativo de nível, criação de interfaces gráficas e banco de dados, desenvolvimentos de diferentes sensores de vazão e nível, conexão com servidores em nuvem utilizando IOT (*Internet of Things*) e utilização de CLP para controle da planta.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecer ao Fablab/UFPA por disponibilizar a impressora 3D para a confecção de peças para a plataforma.

#### REFERÊNCIAS

- Albuquerque Neto, F.R., Belém, G.S., Albuquerque Neto, D.P., Alexandre, G.B., and Baltar, R. (2019). Bancada didática para controle de nível e temperatura. In *Congresso Técnico Científico de Engenharia e da Agronomia - CONTECC*.
- Araújo, T.V.G.P., Sousa Filho, C.A., Lima, A.M.N., and Barros, P.R. (2005a). Kit de desenvolvimento para microcontroladores aduc aplicado ao ensino de controle e automação. In *XXXIII COBENGE-Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Campina Grande*.
- Araújo, T.V.G.P., Sousa Filho, C.A., Lima, A.M.N., and Barros, P.R. (2005b). Plataforma de estudo para aplicações de controle inteligente e sistemas embarcados. In *VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI/IEEE-LARS*.
- Cardoso, J.T. and Souza Filho, C. (2019). Development of a didactic ultrasonic level sensor through a modular approach. In *Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia*.
- Cunha, M.F., Silva, T.C.B., and Souza Filho, C.A. (2018). Plataforma didática térmica multidisciplinar para controle, automação e redes de sensores. In *Congresso Brasileiro de Automática*, volume 1.
- Gomes, F.J., Baldiotti, H.R., Gama, V.A., and Queiroz, F.P. (2011). Módulo laboratorial de baixo custo, baseado em foss, para educação em engenharia de controle de processos industriais. In *THE 9th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2011*, 1–7.
- Keles, N.A., Silva, M.A., Campos, V.C.S., and Braga, M.F. (2017). Módulos didáticos para o ensino de análise e controle de sistema dinâmicos. In *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*.
- Quintino, L.F., Santos, V.J.S., Junior, E.M.C., and de Andrade, A.A. (2017). Kit didático de baixo custo para práticas interdisciplinares em cursos de engenharia eletrônica. In *Revista principia, IFPB*, 34, 124–131.
- Santana, A.C. (2019). Plataforma didática para ensino de controle. In *Trabalho de conclusão de curso, UTFPR*.
- Sauer, C., Paixão, E.P., Silva, J.V.C., and Reimbold, M.M.P. (2017). Plataforma didática para o ensino de controle. In *IV Congresso Internacional de Educação Científica e Tecnológica*.
- Silveira, A.S., Machado, E., and Souza, J.A. (2019). Construção de uma bancada didática de baixo custo para ensino de sistemas de controle. In *Brazilian applied science review*, volume 3, 133–144.
- Souza Filho, C.A. and Silva Netto, A.V. (2020). Desenvolvimento de mesa de coordenadas didática a partir de resíduos eletroeletrônicos. In *Congresso Brasileiro de Automática*, volume 2.
- Unitar (2020). United nation institute for training and research. the global e-waste monitor 2020 - quantities, flows, and the circular economy potential. <https://ewastemonitor.info/gem-2020/>.
- Vaz, I.S., Flores, T.K.S., de F. Medeiros, D., and Netto, A.V.S. (2018). Desenvolvimento de kit didático sustentável para ensino de automação industrial. In *Congresso Brasileiro de Automática*, volume 1.