



BOLA NO TUBO

1. OBJETIVOS

Permitir ao aluno integrar os tópicos estudados durante o curso num modelo que emula uma aplicação real. Durante o projeto, o aluno trabalhará em equipe para desenvolver o firmware do microcontrolador e atender os requisitos definidos no roteiro.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para uma melhor compreensão do projeto, vocês precisam pesquisar sobre os temas a seguir:

- Funcionamento e controle de velocidade em motores de passo (motor 28BYJ-48 e driver ULN2003)
- Geração dos sinais de modulação por largura de pulso (PWM) para o controle da velocidade e de motores de corrente contínua (CC).
- Método ultrassom para medir distância com sensor HC-SR04.
- Método óptico (infravermelho) para detecção de objetos com sensor TCRT 5000.
- Comunicação UART/Bluetooth pelo módulo HC-05.
- Controle digital com algoritmo proporcional-integral (PI)s

A bibliografia básica sugerida para estas temáticas está listada no final do texto.

3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO E REQUISITOS DO SISTEMA DE CONTROLE

No projeto você desenvolverá um sistema de aquisição de dados e controle da altura de uma bola que flutua dentro de um tubo vertical pela ação de um fluxo de ar. O fluxo de ar é gerado por uma ventoinha e pode ser controlado mudando o ciclo útil do sinal de alimentação da ventoinha ou pela abertura ou fechamento de uma válvula acoplada a um motor de passo.

Um sensor óptico refletivo (TCRT-5000) detecta abertura total da válvula, permitindo inicializar sua posição. Este sensor entrega um valor analógico de tensão, sendo mínimo quando o sinal luminoso não reflete na válvula, indicando que está totalmente aberta. Em qualquer outra posição, onde o sensor estiver tampado pela válvula e o sinal seja refletido, o valor de tensão será máximo por conta da queda de tensão no resistor R3 e da condução do optotransistor que o sensor possui na sua saída.

Outro sensor (HC-SR04) possibilita medir a altura da bola, emitindo um sinal de ultrassom que impacta contra a bola e retorna para o sensor. O tempo de voo do sinal permite calcular a distância entre o sensor e a bola. Mas, a velocidade do som muda com a temperatura e por isso se utiliza um sensor de temperatura (LM35) para compensar a medição de altura.

Uma interface Bluetooth permite o envio e recepção de dados entre o sistema e um celular ou um computador. Um microcontrolador PIC16F1827/I-P, alimentado com 5V, controla todo o sistema.

Na Figura 1 se exibem as imagens do modelo e detalhes das partes e na Figura 2 um digrama em blocos do sistema.

O sistema também possui um programador SNAP da Microchip e um Analisador Lógico de 8 canais, que permitem programar e debuggar o firmware e visualizar os sinais digitais envolvidos.

No esquema da Figura 3 se exibe o esquemático da placa de controle e na Figura 4 os componentes externos a ela.

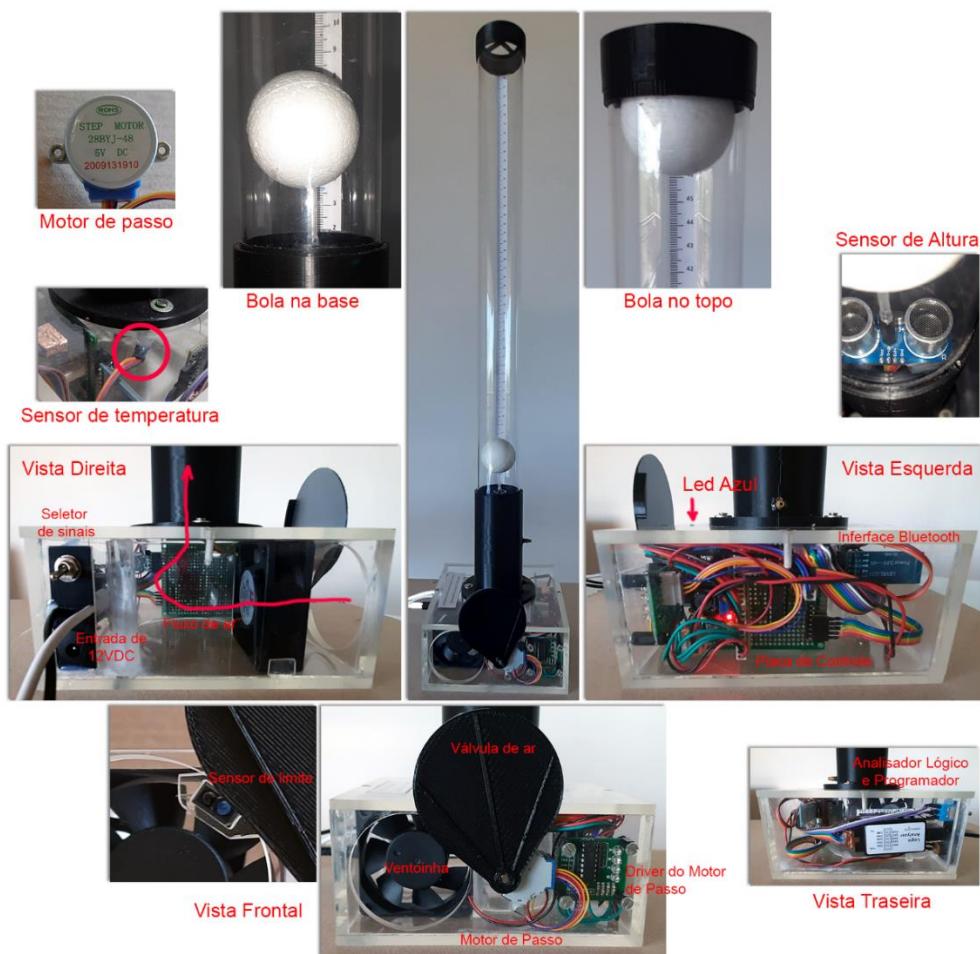


Figura 1 Imagens do modelo e circuitos de controle.

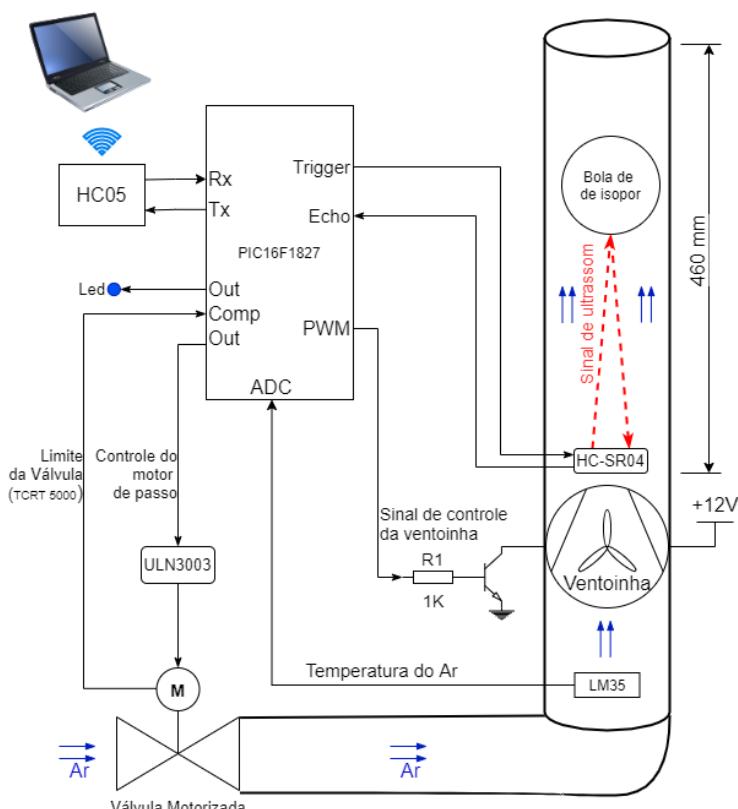


Figura 2 Diagrama em blocos.

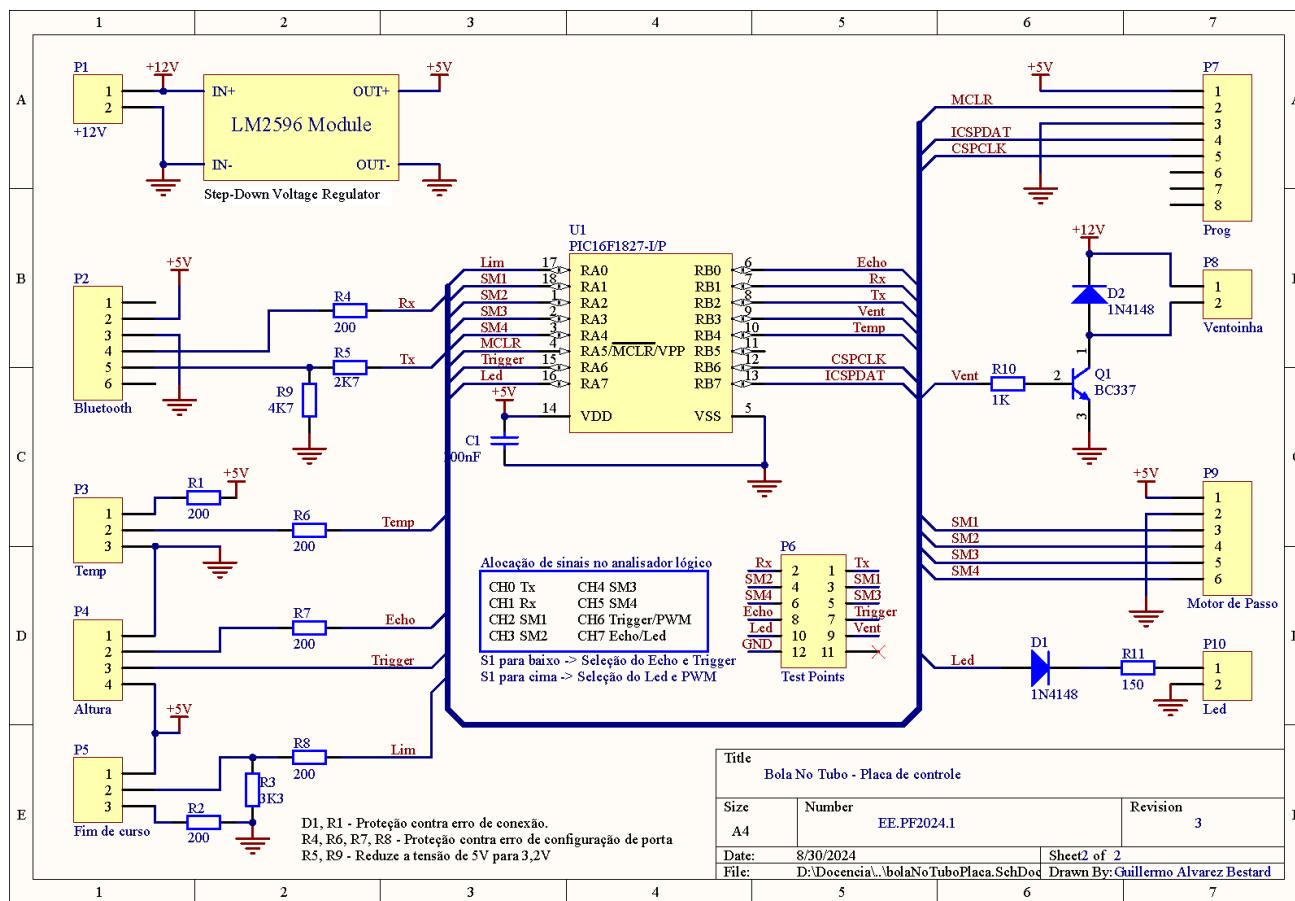


Figura 3 Esquemático da placa de controle

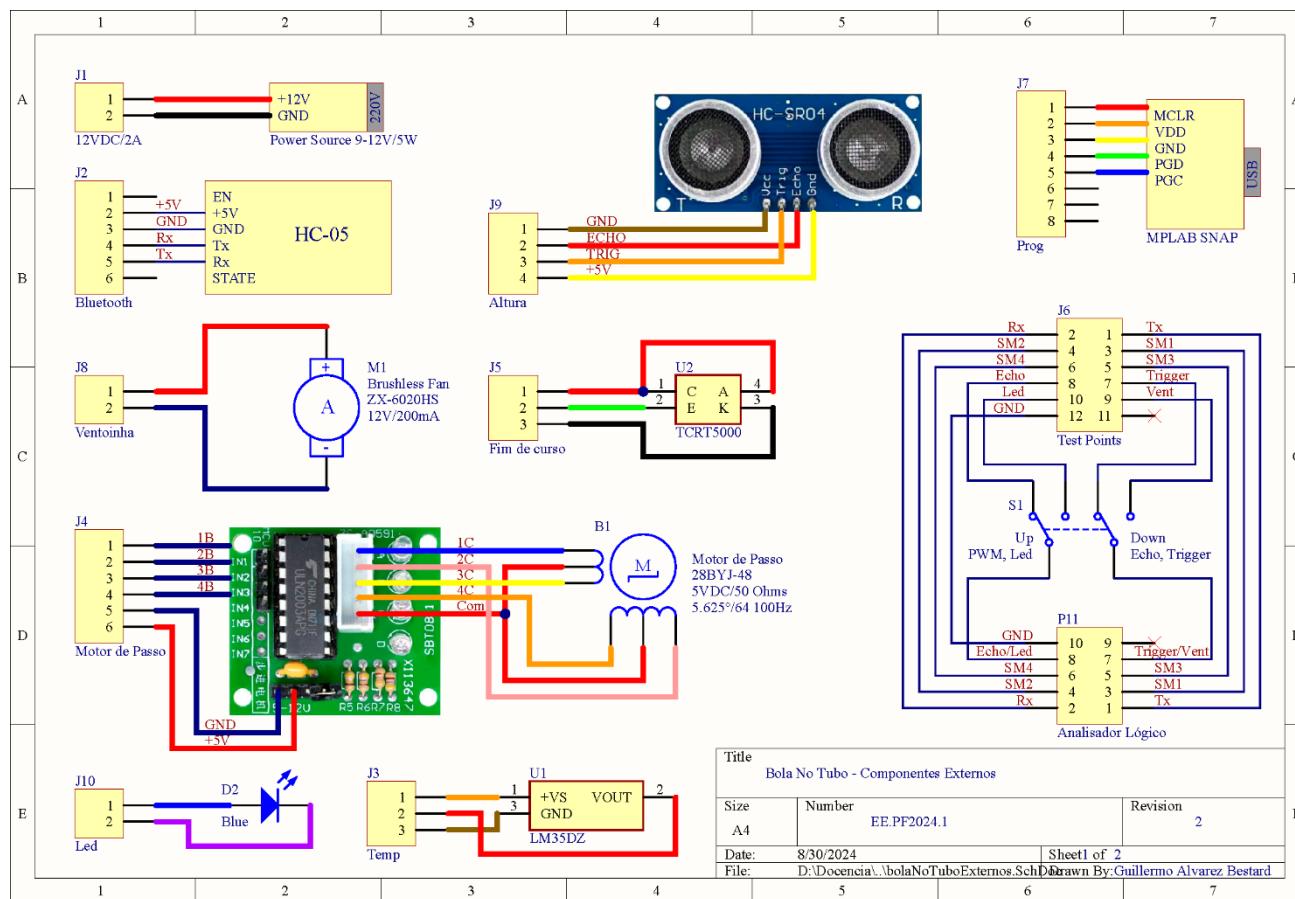


Figura 4 Esquemático dos componentes eletrônicos externos.

3.1. MEDAÇÃO DA ALTURA DA BOLA

A medição de altura será realizada usando o sensor HC-SR04, que emite um sinal de ultrassom quando ativado o *Trigger* e retorna o tempo de voo ativando o sinal *Echo*, conforme a imagem da Figura 5.

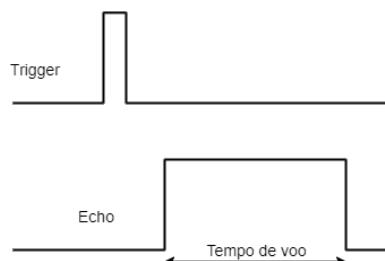


Figura 5 Sinais envolvidos na medição da altura da bola com o sensor HC-SR04.

O sinal *Echo* deve ser medida com resolução suficiente para detectar variações de 0,1 mm na faixa de 3 mm até 460 mm. O valor da altura pode ser calculado usando a equação a seguir.

$$\text{Altura} = \text{Tempo de Voo} * \text{Velocidade do som}/2 \quad (1)$$

A velocidade do som muda em função da temperatura do ar conforme a equação a seguir.

$$C = C_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (2)$$

Sendo **C** a velocidade do som compensada, **C₀** a velocidade do som à temperatura **T₀** (273,15 K) e T a temperatura do ar em Kelvin.

A variação para 1°C na altura máxima da bola é de aproximadamente 0,8 mm. No sistema será necessário compensar esse valor para a faixa de temperatura de 0°C até 50°C, com uma resolução de 1°C. Deve ser usada uma tabela de busca (look-up) para obter o valor compensado. Um sensor de temperatura LM35 se encontra disponível para obter essa medição em °C.

O período de medição da altura deve ser maior ou igual que 10 ms. Para períodos menores podem acontecer medições erradas por conta das reflexões do sinal do som dentro do tubo. A medição deve ser verificada usando o analisador lógico.

3.2. VENTOINHA

O fluxo de ar é gerado com uma ventoinha modelo ZX-6020HS que funciona com 12VDC e consome 200 mA. Se recomenda usar um sinal modulado por largura de pulso de frequência com valor próximo a 250 Hz e de 10 bits de resolução, aplicado no sinal *Vent*.

3.3. VÁLVULA MOTORIZADA

A válvula que controla a abertura para a passagem do ar puxado pela ventoinha é movimentada por um motor de passo de ímã permanente unipolar modelo 28BYJ-48, que funciona com 5 V atingindo 5.625°/64 por passo.

Com base nos testes realizados no sistema, se recomenda um tempo de passo maior ou igual a 3 ms e uma quantidade máxima de passos de 420, correspondentes a o intervalo entre a detecção de limite (posição totalmente aberta) e a posição totalmente fechada da válvula. A sequência de ativação do sinal para o controle do motor de passo (SM1, SM2, SM3 e SM4) na abertura da válvula se exibe na Tabela 1. Para fechamento se deve realizar a mesma sequência em sentido contrário.



Tabela 1 Sequência de ativação dos sinais que controlam as bobinas do motor de passo para movimento horário (abertura da válvula)

Posição	SM1	SM2	SM3	SM4
1				
2				
3				
4				

Se recomenda durante o desenvolvimento do firmware prestar atenção ao movimento da válvula e deter o movimento se acontecer o travamento dela num dos extremos. Embora isso não danifica o motor de passo, pode danificar a junção da porta plástica com o eixo.

3.4. DETECTOR DE LIMITE OU DO FIM DE CURSO DA VÁLVULA MOTORIZADA

Para detectar o fim de curso da válvula, se utiliza um sensor óptico refletivo (TCRT-5000). O sensor possui um opto-transistor na sua saída (Figura 4) que entrega um valor de corrente mínimo quando o sinal luminoso não reflete na válvula, indicando que está totalmente aberta. Em qualquer outra posição, onde o sensor estiver tampado pela válvula, o sinal refletido vai aumentar a corrente no transistor. Conforme exibido no circuito da Figura 3, o TCRT-5000 está ligado no conector P5 e no resistor R3, que terá uma queda de tensão em função da corrente entregue pelo sensor. O valor será máximo quando a válvula esteja totalmente aberta, mas pode que fique inferior ao valor limite V_{IH} da entrada digital do microcontrolador. De igual forma, o valor mínimo pode ficar maior que o limite V_{IL} .

3.5. CONTROLADOR DA ALTURA DA BOLA

Para o controle da altura da bola se deve atuar sobre a válvula ou sobre a ventoinha. Para atingir esses requisitos vamos definir 3 modos de operação associados ao controle e um modo para resetar o sistema (reset do micro por software), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 Modos de operação

Modo	Identificador	Controle	Variável Manipulada	Distúrbio
Manual	0	Manual	Ciclo útil da ventoinha e posição da válvula	Temperatura do ar
Ventoinha	1	PI ou PID	Ciclo útil da ventoinha	Temperatura do ar e posição da válvula
Válvula	2	PI ou PID	Posição da válvula	Temperatura do ar e ciclo útil da ventoinha
Reset	3	-	-	

Nos modos 1 e 2 se recomenda usar um algoritmo de controle Proporcional-Integral (PI) ou Proporcional-Integral-Derivativo (PID), mudando apenas os parâmetros de ajuste e a variável manipulada em cada modo de funcionamento. Observe que em um caso o controlador é de ação inversa (a saída do controlador aumenta se o erro de controle diminui) e no outro de ação direta (a saída do controlador aumenta se o erro de controle aumenta).

Pode ser usado um algoritmo PI posicional conforme as equações e seguir.

$$e_k = sp_k - y_k \quad (3)$$

$$u_k = K_c \left(e_k + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_d}{T} (e_k - e_{k-1}) \right) + u_0 \quad (4)$$

sendo

sp Valor desejado da altura da bola (*setpoint*)

y Valor medido da altura da bola



- e** Erro de controle ou diferença entre *setpoint* e medição.
- u** Saída do controlador e variável manipulada (ciclo útil da ventoinha ou posição da válvula)
- uo** Estado inicial da saída do controlador (offset). Pode ser zero se a posição inicial da válvula e a velocidade da ventoinha for zero.
- Kc** Ganho do controlador (tem uma ação imediata sobre a saída do controlador)
- T** Período de controle (pode ser o mesmo usado na amostragem do valor medido)
- Ti** Tempo de ação integral (ajuda na eliminação do erro de estado estável)
- Td** Tempo de ação derivativa (ajuda a se antecipar às variações do erro)
- k** Valor obtido ou calculado no instante (iteração) atual
- k-1** Valor obtido ou calculado no instante (iteração) anterior

A saída do controlador (**u**) deve ser limitada para permanecer dentro da faixa de operação do atuador.

A sequência para o cálculo da saída do controlador pode ser definida como:

1. Inicializar **Kc**, **T**, **Ti** e **Td**
2. Inicializar em zero o termo e_{k-1} e a somatória do erro no termo integral.
3. Inicializar ação de controle (se usar **Kc** com sinal, não precisa deste passo)
4. Obter valor de y_k e de sp_k
5. Calcular e_k
6. Se for ação direta $e_k = -e_k$ (se usar **Kc** com sinal, não precisa deste passo)
7. Calcular a somatória do erro no termo integral.
8. Calcular u_k e limitar se necessário
9. Guardar o valor atual de e e de u para a próxima iteração. $e_{k-1} = e_k$
10. Repetir desde o passo 4.

Se recomenda uma máquina de estados finitos para implementar a sequência de medição e controle (passos 4-8).

O ajuste do controlador pode ser feito por tentativa e erro. Nesta atividade não será cobrado um controle preciso e estável, apenas a implementação e funcionamento correto do algoritmo.

3.5.1. CONTROLE MANUAL

Neste modo, o controlador PID não estará em funcionamento e os valores de *setpoint* da posição da válvula e do ciclo útil da ventoinha, enviados pela comunicação Bluetooth, serão atribuídos diretamente aos atuadores (motor de passo e ventoinha). Este modo pode ser usado para o teste dos atuadores e da comunicação e permite avaliar o efeito de cada variável sobre a altura da bola.

3.5.2. CONTROLE ATUANDO SOBRE O CICLO ÚTIL DA VENTOINHA

Nesta forma de controle vamos mudar o fluxo de ar variando a velocidade de rotação da ventoinha através de seu ciclo útil, considerando a posição de abertura da válvula e a temperatura do ar como distúrbios, conforme se exibe na Figura 6.

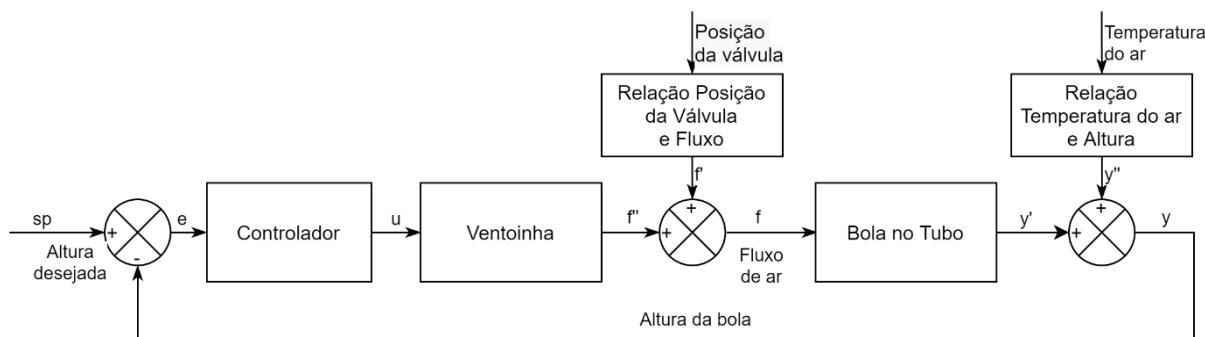


Figura 6 Malha de controle da altura da bola que atua sobre o ciclo útil do motor da ventoinha.

O valor da posição da válvula pode ser mudado através da comunicação Bluetooth.

3.5.3. CONTROLE ATUANDO SOBRE A POSIÇÃO DA VÁLVULA

Neste modo atuaremos sobre a posição da válvula para mudar o fluxo de ar, considerando o ciclo útil da ventoinha e a temperatura do ar como distúrbios, conforme se exibe na Figura 7.

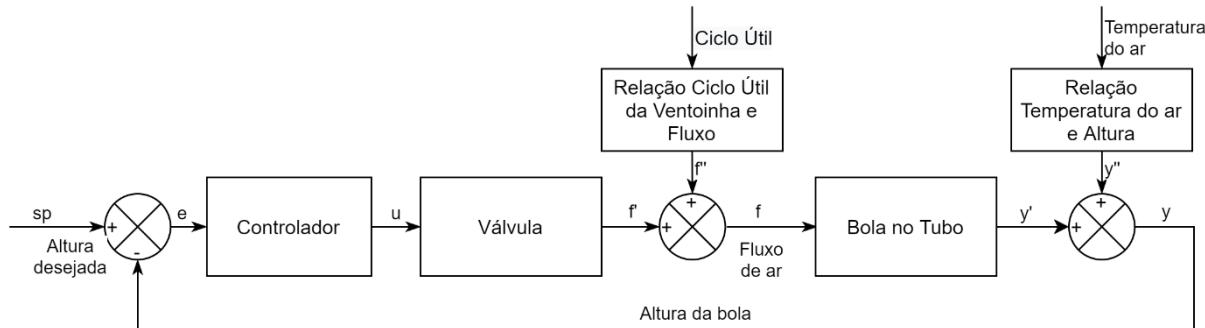


Figura 7 Malha de controle da altura da bola que atua sobre a posição da válvula de ar.

O valor do ciclo útil da ventoinha pode ser mudado através da comunicação Bluetooth.

3.6. COMUNICAÇÃO BLUETOOTH

A comunicação com a interface Bluetooth é serial assíncrona usando o UART e os pinos Tx e Rx do microcontrolador. Vamos usar uma velocidade de comunicação (baud rate) de 115200 bps, 1 bit de início, 8 bits de dados, 1 bits de parada e sem paridade. A detecção do fim do quadro de comunicação será feita por tempo (timeout), ou seja, após 40 ms sem receber nada, se considera que o quadro de comunicação foi recebido completamente. Se recomenda usar as interrupções de recepção e transmissão na comunicação.

Devem ser enviados os dados a seguir, no formato hexadecimal como inteiro em *big-endian* a cada 100 ms:

- A. Modo de funcionamento (manual, ventoinha, válvula, reset)
- B. *Setpoint* da altura (mm).
- C. Medição da altura (mm).
- D. Valor médio da medição de tempo de voo (contagem do temporizador).
- E. Temperatura (x10 °C).
- F. *Setpoint* da posição da válvula (passos do motor).
- G. Posição da válvula (passos do motor).
- H. Ciclo útil do motor (sem converter para %, ou seja entre 0 e 1023).



Tabela 3 Quadro de comunicação para transmissão (micor->pc)

Dado	A	B	C	D	E	F	G	H
Tamanho em bytes	1	2	2	2	2	2	2	2

Serão recebidos os dados a seguir, também no formato hexadecimal como inteiro em *big-endian*:

- Modo de funcionamento (conforme tópico 0).
- Setpoint da altura (mm).
- Setpoint da posição da válvula (passos do motor).
- Setpoint do ciclo útil do motor (sem converter para %, ou seja entre 0 e 1023).

Tabela 4 Quadro de comunicação para recepção (pc->micro) e dados usados em cada modo de funcionamento

Dado	A	B	C	D
Tamanho em bytes	1	2	2	2
Modo manual				
Modo ventoinha				
Modo válvula				
Modo reset				

O computador ou o telefone celular devem ser conectados via Bluetooth à interface HC-05, mas pode ser usado apenas um equipamento por vez. No computador pode ser usado o HTerm e no celular deve ser instalado o aplicativo Serial Bluetooth Terminal. Tanto o telefone quanto o computador, devem ser pareados com a placa HC-05 antes de estabelecer a conexão Serial. O pareamento precisa ser feito apenas uma vez em cada novo dispositivo.

Para o pareamento no celular e no computador, deve ser procurado o menu Bluetooth e, dentro da lista dos dispositivos disponíveis (sem parear), deve ser selecionado o dispositivo BolaNoTubo. Uma senha será solicitada e deve ser colocado 1234.

Uma vez concluído o pareamento, no Serial Bluetooth Terminal procuramos na opção *Devices* o dispositivo BolaNoTubo e na configuração selecionamos o formato de envio e recepção hexadecimal. Em seguida, na tela do aplicativo, se ativa conexão e podem ser enviadas e recebidas as mensagens seriais desde e para o microcontrolador, conforme exibido na Figura 8.

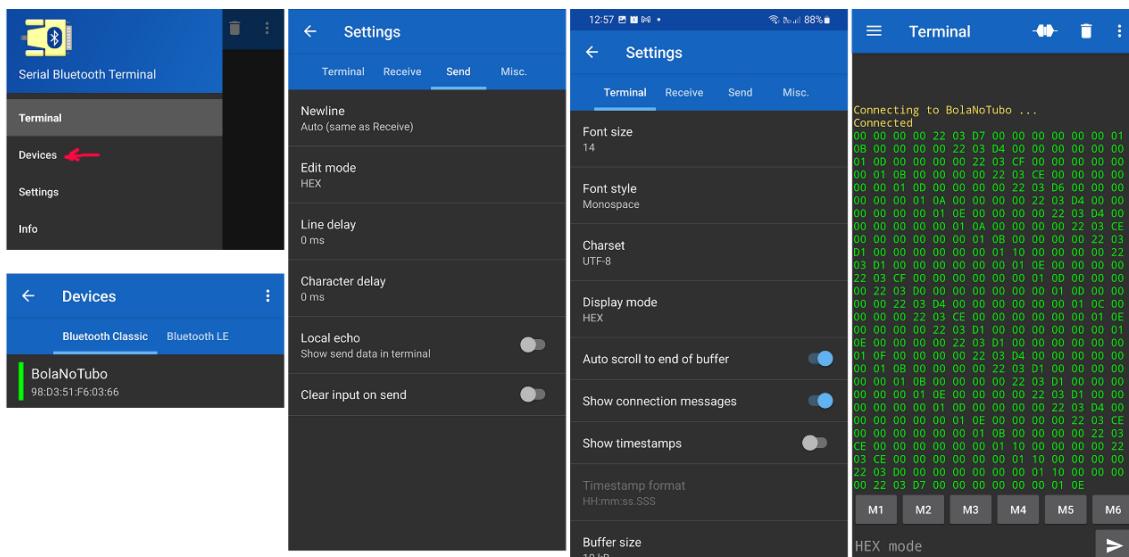


Figura 8 Telas do aplicativo Serial Bluetooth Terminal.



No computador abrimos o HTerm e procuramos uma nova porta COM criada no pareamento do dispositivo (duas portas COM serão adicionadas, mas apenas uma pode ser usada para a comunicação). A porta deve ser selecionada e a conexão ativada. Após isso, o HTerm pode ser usado como habitualmente fazemos, mas devemos destacar que a conexão pode demorar até 5 segundos após clicar no botão conectar. Observe na Figura 9 a configuração do HTERM.

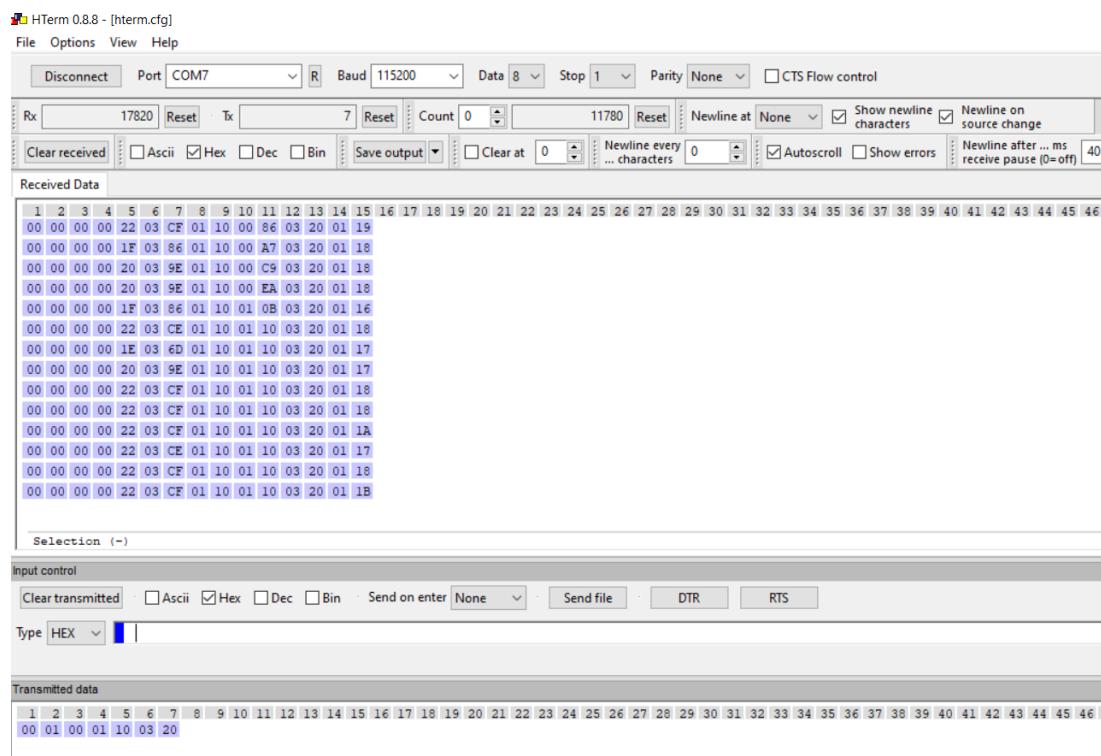


Figura 9 Tela do HTERM.

Antes da conexão, o Led vermelho do HC-05 permanece piscando a intervalos curtos. Após a conexão, pisca duas vezes num intervalo maior. Para conectar outro telefone ou o computador, o anterior deve ser desconectado no aplicativo.

4. PROCEDIMENTO DE TRABALHO

O projeto final pode ser desenvolvido em grupos de 3 alunos. Cada estudante deverá desenvolver e testar uma parte do código. É importante fazer testes rigorosos no simulador para conseguir eliminar a maior quantidade dos erros antes da integração das partes. Se recomenda, mas não é mandatório, dividir o trabalho nos módulos a seguir:

- Medição de altura da bola
- Movimento do motor de passo e detecção do fim de curso
- Controle PI ou PID
- Comunicação serial-BT

Desenhe o fluxograma (ou os fluxogramas) necessários para atender as especificações descritas anteriormente (podem usar <https://www.diagrams.net/> ou <https://www.mermaidchart.com/>). Com base nisso, desenvolva o firmware necessário no microcontrolador. Coloque comentários no código descrevendo o funcionamento de forma clara. As variáveis globais e funções que são usadas por várias partes, devem ser definidas entre todos os integrantes da equipe no início do projeto com o intuito de garantir a integração final.

O projeto tudo será testado na simulação observando cada detalhe e deve ser elaborado um vídeo explicando o funcionamento de cada parte do código. Todos os integrantes da equipe devem participar. Elabore também um relatório de até 5 páginas com as atividades desenvolvidas pela equipe e por cada participante. Especifique os estímulos utilizados e os resultados obtidos na simulação.

Apenas depois de verificar o correto funcionamento em simulação, o teste poderá ser realizado no Lab NEI2, onde ficará disponível o modelo da bola no tubo no horário de 8h até 17h de segunda a sexta, com a presença de um técnico no local.

Programe o microcontrolador com o código simulado usando a interface MPLAB Snap In-circuit Debugger. Teste o funcionamento do sistema com o Snap no modo debugger e com o Analisador Lógico.

No software para configurar e obter os sinais digitais (Logic) do Analisador Lógico, carregue o arquivo de *preset* disponibilizado. Para isso, acesse ao menu File a opção Presets e importe o arquivo *BolaNoTubo.logic2Preset* (disponibilizado no Aprender). Finalmente carregue (Load) o *preset*.

Um exemplo do funcionamento se exibe na Figura 9, onde se observa os sinais de comunicação, do motor de passo e do sensor de altura. Para obter esses sinais o seletor de sinais S1 deve estar voltado para baixo. Para obter os sinais do ciclo útil da ventoinha e do Led, S1 deve estar para cima.

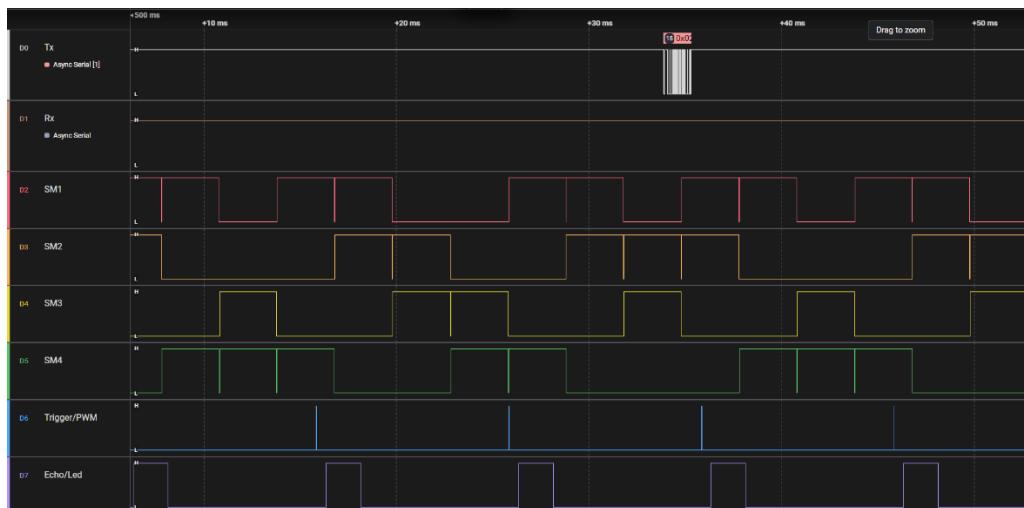


Figura 10 Sinais de comunicação, do motor de passo e do sensor de altura, obtidas no analisador lógico.

Quando estiver tudo pronto faça um vídeo exibindo de forma clara apenas o funcionamento, com os sinais do analisador lógico e a comunicação com o aplicativo ou o computador. Todos os integrantes devem participar na elaboração do vídeo. A duração não deve superar os 10 minutos.

5. QUE DEVE SER ENTREGUE

A equipe deve entregar uma pasta no Aprender contendo:

- O firmware do projeto.
- Documentação gerada no Doxygen no formato HTML ou PDF.
- O arquivo PDF com o relatório da simulação. Defina o que foi feito por cada integrante.
- O link do vídeo da simulação (deve ficar disponível até 1 ano).
- O link do vídeo dos testes em bancada (deve ficar disponível até 1 ano).



6. AVALIAÇÃO.

A avaliação do projeto será através dos arquivos entregues no Aprender e pela apresentação em sala de aulas (esse dia o modelo estará disponível). Será conferida a simulação, o funcionamento, e que este coincida com o código enviado. **Podem ser feitas perguntas a cada membro da equipe sobre as técnicas utilizadas no desenvolvimento, independentemente da parte que ele desenvolveu.**

As dúvidas serão esclarecidas em sala de aulas, pelo e-mail, WhatsApp, com os monitores ou com o professor.

As datas de serão definidas no plano de ensino.

7. LINKS.

- O que é motor de passo? Funcionamento, tipos e como testar
<https://www.makerhero.com/blog/o-que-e-motor-de-passo-entenda-seu-funcionamento-e-aplicacoes/#:~:text=Existem%20tr%C3%AAs%20tipos%20principais%20de,e%20motores%20de%20passo%20h%C3%ADbridos>.
- Pid Digital
[https://presys.com.br/pid-digital-blog/#:~:text=O%20Algoritmo%20PID%20Digital&text=Pode%2Dse%20entender%20esta%20aproxima%C3%A7%C3%A3o,\)%2B%20%E2%88%86t.x\(k\)](https://presys.com.br/pid-digital-blog/#:~:text=O%20Algoritmo%20PID%20Digital&text=Pode%2Dse%20entender%20esta%20aproxima%C3%A7%C3%A3o,)%2B%20%E2%88%86t.x(k)).
- Conversor Serial/Bluetooth
<https://www.olimex.com/Products/Components/RF/BLUETOOTH-SERIAL-HC-06/resources/hc06.pdf>
- Serial Bluetooth Terminal
https://play.google.com/store/apps/details?id=de.kai_morich.serial_bluetooth_terminal&hl=pt_BR&gl=US
- SNAP <https://www.microchip.com/en-us/development-tool/PG164100>
- Analisador lógico <https://support.saleae.com/getting-started>
- Doxygen
 - <https://www.doxygen.nl/files/doxygen-1.9.7-setup.exe>
 - <https://www.doxygen.nl/download.html>
 - <https://www.doxygen.nl/manual/index.html>