

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
ENGENHARIA MECATRÔNICA**

HEBERT ALAN KUBIS

**CONTROLE DE PROFUNDIDADE DE VEÍCULO SUBAQUÁTICO
AUTÔNOMO (AUV)**

Joinville
2025

HEBERT ALAN KUBIS

**CONTROLE DE PROFUNDIDADE DE VEÍCULO SUBAQUÁTICO
AUTÔNOMO (AUV)**

Trabalho apresentado ao Centro
Tecnológico de Joinville - CTJ da Uni-
versidade Federal de Santa Catarina
como requisito parcial para a disciplina
EMB5641 - Sistemas de Controle.

Prof. Alexandro Garro Brito

Joinville
2025

Resumo

Ainda tenho que escrever o trabalho para poder resumir

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introdução | 3 |
| 2 | Definição do sistema | 4 |
| 2.1 | Considerações | 4 |
| 2.2 | Fontes de dados | 4 |
| 3 | Modelamento do sistema | 4 |
| 3.1 | Variáveis do sistema | 4 |
| 3.2 | Equilíbrio de forças | 5 |
| 3.3 | Parâmetros do sistema | 6 |
| 3.4 | Análise do sistema | 7 |
| 4 | Controlador | 8 |
| 4.1 | Requisitos de desempenho | 8 |
| 4.2 | Análise do lugar das raízes | 9 |
| 4.3 | Projeto do controlador | 9 |
| 4.4 | Resposta em frequência | 9 |
| 5 | Implementação | 9 |
| 5.1 | Discretização do controlador | 9 |
| 5.2 | Aplicação no sistema | 9 |
| 5.3 | Testes e resultados | 9 |
| 6 | Conclusão | 9 |

1. INTRODUÇÃO

No presente relatório será descrito o processo de modelamento do sistema de controle de profundidade de um AUV (Veículo Autônomo Submarino, do inglês Autonomous Underwater Vehicle). O processo de modelamento desse sistema se dá pela união entre duas necessidades, uma é a realização do trabalho avaliativo de Sistemas de controle e a outra é a necessidade de um controle de profundidade preciso para o veículo Yvy da equipe Terra Competition da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville.

2. DEFINIÇÃO DO SISTEMA

O sistema a ser controlado é um AUV (Autonomous Underwater Vehicle) que utiliza 6 motores, 4 para controle no plano xOy e 2 para controle no eixo Z (vertical). Outra característica é que este veículo possui 2 cilindros em seu interior. Um deles está posicionado encostado na parte de cima ao longo do eixo X, sendo que neste fica toda a eletrônica responsável por controlar o veículo, e um cilindro menor na mesma orientação encostado na parte inferior do veículo, sendo que esse é o cilindro responsável por abrigar a bateria.

Dado essa descrição do veículo, pode-se definir o objetivo do sistema de controle: **estabilizar o veículo em uma dada profundidade.**

2.1. CONSIDERAÇÕES

Para o modelamento do sistema serão feitas as seguintes considerações:

- Será avaliado somente o movimento vertical do veículo, assumindo que o peso dele está homogeneamente distribuído ao longo dos outros eixos;
- Será assumido que os dois motores que controlam o movimento vertical estão equidistantes ao longo do eixo Y em relação à origem e estão sobre a origem em X. Desta forma, não será considerado o torque gerado pelos motores superiores sobre os eixos X e Y caso estes estejam desalinhados;
- O eixo Z positivo é direcionado para baixo no veículo;
- O veículo está completamente submerso.

2.2. FONTES DE DADOS

Para controlar o veículo são necessárias fontes de dados para saber como atuar na malha. Com isso, os sensores disponíveis para analisar o comportamento do veículo são:

- Sensor de profundidade, fonte precisa de dados de pressão;
- Pixhawk PX4, fonte de dados precisa de aceleração;
- Cruzamento dos dados desses dois sensores, por integração e derivação numérica, para obter a velocidade.

3. MODELAMENTO DO SISTEMA

3.1. VARIÁVEIS DO SISTEMA

Para modelar o sistema de controle de profundidade do AUV alguns dados precisam ser considerados, sendo que muitos, e talvez todos, podem sofrer alterações. Para modelar um sistema que permita controlar o veículo mesmo com a alteração de suas características, será consideradas variáveis no lugar dos dados do veículo. O seguintes dados serão usados:

- M_t - Massa do veículo;
- V_t - Volume do veículo;
- h_p - Distância que o sensor de pressão está do topo do AUV;

3.2. EQUILIBRIO DE FORÇAS

Para modelar o sistema de controle de profundidade do AUV, primeiramente é necessário analisar as forças que atuam sobre o veículo. As forças que atuam sobre o veículo são:

- Força peso, F_p ;
- Força de empuxo, F_e ;
- Força gerada pelos motores, F_m ;
- Força de arrasto, F_d .

Fazendo o somatório das forças que atuam sobre o veículo e aplicando a segunda Lei de Newton tem-se:

$$\sum F = F_p - F_e + F_m - F_d = m \cdot a \quad (1)$$

Onde a é a aceleração do veículo ao longo do eixo Z, ou seja, $a = \frac{d^2z}{dt^2}$. Substituindo as forças na equação acima:

$$M_t \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = M_t \cdot g - \rho \cdot g \cdot V_t + F_m - B_d \cdot \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

Assumindo que o AUV se encontra numa posição que é seu ponto de equilíbrio z_0 mais uma perturbação Δz , ou seja, $z = z_0 + \Delta z$. Com isso, a equação 2 fica:

$$M_t \cdot \frac{d^2(z_0 + \Delta z)}{dt^2} = (M_t \cdot g - \rho \cdot g \cdot V_t) + F_{me} + \Delta F_m - B_d \cdot \frac{d(z_0 + \Delta z)}{dt} \quad (3)$$

Onde F_{me} é a força dos motores no ponto de equilíbrio e ΔF_m é a variação dessa força. Sabendo que a derivada de uma constante é nula, ou seja, $\frac{dz_0}{dt} = 0$ e $\frac{d^2z_0}{dt^2} = 0$, tem-se:

$$M_t \cdot \frac{d^2\Delta z}{dt^2} = (M_t \cdot g - \rho \cdot g \cdot V_t) + F_{me} + \Delta F_m - B_d \cdot \frac{d\Delta z}{dt} \quad (4)$$

Da equação 2 sabe-se que no ponto de equilíbrio a parcela $\frac{d^2z}{dt^2} = 0$ e $\frac{dz}{dt} = 0$, logo:

$$0 = M_t \cdot g - \rho \cdot g \cdot V_t + F_{me} \quad (5)$$

$$F_{me} = \rho \cdot g \cdot V_t - M_t \cdot g \quad (6)$$

Substituindo a equação 6 na equação 4 tem-se:

$$M_t \cdot \frac{d^2\Delta z}{dt^2} = \Delta F_m - B_d \cdot \frac{d\Delta z}{dt} \quad (7)$$

Isolando os termos:

$$M_t \cdot \frac{d^2\Delta z}{dt^2} + B_d \cdot \frac{d\Delta z}{dt} = \Delta F_m \quad (8)$$

Agora, assumindo condições iniciais nulas, ou seja, $\Delta z(0) = 0$ e $\frac{d\Delta z(0)}{dt} = 0$, aplicando a Transformada de Laplace na equação acima tem-se:

$$M_t \cdot s^2 \cdot \Delta Z(s) + B_d \cdot s \cdot \Delta Z(s) = \Delta F_m(s) \quad (9)$$

Reorganizando a equação para obter a função de transferência:

$$\frac{\Delta Z(s)}{\Delta F_m(s)} = \frac{1}{M_t \cdot s^2 + B_d \cdot s} \quad (10)$$

Como o sistema encontrado é de segunda ordem, divide-se o numerador e o denominador por M_t para obter a forma padrão da função de transferência:

$$\frac{\Delta Z(s)}{\Delta F_m(s)} = \frac{\frac{1}{M_t}}{s^2 + \frac{B_d}{M_t} \cdot s} \quad (11)$$

Com isto é possível analisar que o sistema encontrado é de 2^a ordem do tipo 1, pois o maior grau do denominador é 2 e, reorganizando os termos, é possível visualizar que possui um polo na origem, que torna o erro em estado estacionário nulo para uma entrada degrau.

Por conta da natureza do sistema a ser controlado percebe-se que o controlador a ser implementado deve ser um P ou PD caso seja necessária uma resposta mais rápida.

3.3. PARAMETROS DO SISTEMA

Para fazer a análise do sistema é necessário definir os parâmetros que o compõem, e como este é um veículo real os parâmetros dele são os seguintes:

- Massa do veículo, $M_t = 19 \text{ kg}$;
- Volume do veículo, $V_t = 0.014 \text{ m}^3$;
- Coeficiente de arrasto, $B_d = 42 \text{ kg/s}$;
- Densidade da água de piscina, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$;
- Aceleração da gravidade, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$.

A massa do veículo foi medida com uma balança no Laboratório de Interação Fluido-Estrutura (LIFE) da Universidade Federal de Santa Catarina. Já o volume foi obtido a partir do modelo CAD do veículo, que foi feito no SolidWorks.

Para obter o coeficiente de arrasto foi assumido que o AUV é um cubo de lado 0.4 m já que suas dimensões são de 0.38 x 0.4 x 0.38 m. Assim, calculando o número de Reynolds para $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.001 \text{ Pa.s}$, $v = 0.1 \text{ m/s}$ e $L = 0.4 \text{ m}$ tem-se:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0.1 \cdot 0.4}{0.001} = 40000 \quad (12)$$

Com este valor que é $Re > 10^4$ o coeficiente de arrasto para um cubo é $C_d = 1.05$ [3]. Mas, como é possível ver na equação 2 não é de C_D que se necessita, mas sim do coeficiente B_d que é usado para tratar o arrasto de forma linear. Assim, para obter B_d é necessário definir uma velocidade de operação do veículo, que foi assumida como 0.5 m/s para os cálculos se baseando em velocidades de operação de outros AUVs, como o BlueROV2 da BlueRobotics [2] e o BBAUV 4.5 da Bumblebee [1] que podem se mover até 1.5 m/s.

Com isso, o coeficiente B_d é obtido a partir da formula do arrasto:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{op}^2 \cdot C_d \cdot A \quad (13)$$

Onde A é a área de seção transversal do veiculo, que é 0.16 m^2 ($0.4 \times 0.4 \text{ m}$), v_{op} é a velocidade de operação (0.5 m/s), ρ é a densidade do fluido (1000 kg/m^3) e C_d é o coeficiente de arrasto (1.05). Assim, unindo isto a formula do arrasto linear:

$$F_d = B_d \cdot v_{op} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{op}^2 \cdot C_d \cdot A \quad (14)$$

Isolando B_d tem-se:

$$B_d = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{op}^2 \cdot C_d \cdot A}{v_{op}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{op} \cdot C_d \cdot A \quad (15)$$

Substituindo os valores conhecidos:

$$B_d = \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 0.5 \cdot 1.05 \cdot 0.16 = 42 \text{ kg/s} \quad (16)$$

É importante ressaltar que o coeficiente de arrasto B_d assumido é válido em torno da velocidade de operação escolhida, e que uma velocidade maior fara com que o controlador seja atue de maneira lenta no sistema, ja que o arrasto será maior do que previsto. Ja se a velocidade for menor o controlador atuará de maneira mais agressiva, podendo causar oscilações no sistema.

3.4. ANÁLISE DO SISTEMA

Com os parametros definidos, a função de transferência do sistema fica:

$$\frac{\Delta Z(s)}{\Delta F_m(s)} = \frac{\frac{1}{19}}{s^2 + \frac{42}{19} \cdot s} = \frac{0.0526}{s^2 + 2.2105 \cdot s} \quad (17)$$

Onde os valores foram arredondados para 4 casas decimais.

Com isso é possivel fazer a análise do sistema plotando o seu lugar das raízes no matlab, como mostrado na figura 1.

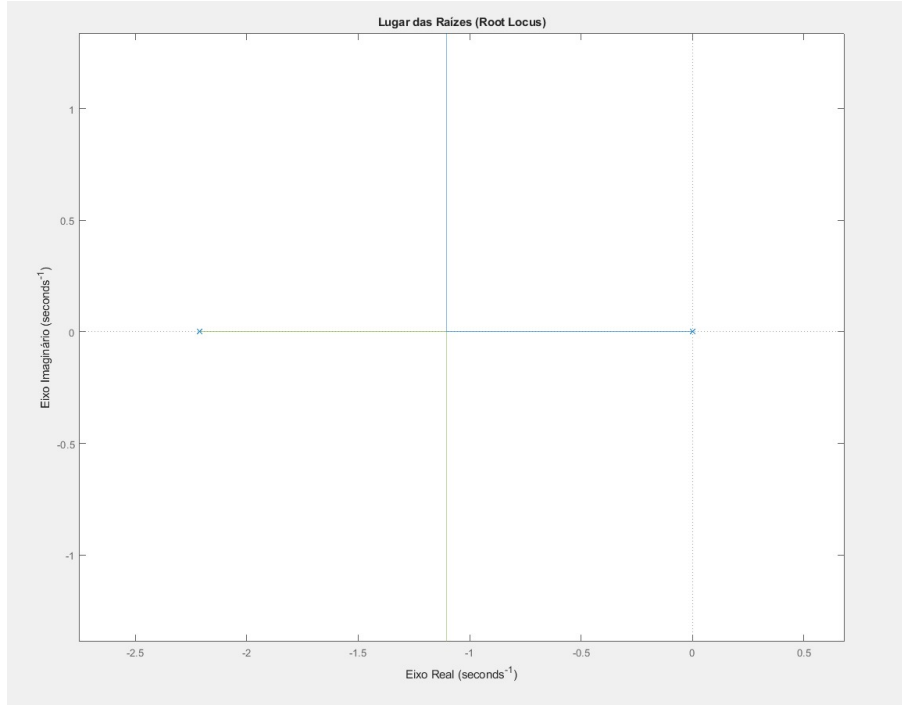


Figura 1: Lugar das raízes do sistema

Com isso é possível perceber que o sistema em malha aberta é marginalmente estável por conta do polo em zero já mencionado. Outro ponto importante é que um controlador proporcional é suficiente para estabilizar o sistema, já que os polos de malha fechada nunca cruzam para o semiplano direito, portanto isso confirma a análise anterior de que um controlador P ou PD é suficiente para controlar o sistema.

4. CONTROLADOR

4.1. REQUISITOS DE DESEMPENHO

Para o sistema de controle de profundidade do AUV é necessário definir os requisitos de desempenho do sistema controlado. Para isso, é necessário analisar o ambiente e as condições em que o AUV opera. Pensando que o AUV pode estar a 1m de profundidade e pode ser dado um comando em degrau para que ele se posicione a 5m de profundidade, um percentual de sobressinal aceitável seria algo como $PSS = 5\%$. A principal justificativa para limitar o Percentual de Sobressinal (PSS) é a **segurança operacional e a integridade do veículo**.

O AUV Yvy pode ser comandado a operar em profundidades muito próximas do solo (seja o fundo do mar ou o piso do tanque de testes). Por exemplo, se o sistema de controle comandar uma profundidade de referência $z_{ref} = 5,0$ m quando o solo está mapeado em $z_{solo} = 5,1$ m, um PSS de apenas 5% já seria catastrófico. O cálculo do sobressinal seria:

$$\Delta z = z_{ref} - z_{inicial} = 5,0 \text{ m} - 1,0 \text{ m} = 4,0 \text{ m} \quad (18)$$

$$z_{pico} = z_{ref} + \left(\Delta z \times \frac{PSS}{100} \right) = 5,0 \text{ m} + (4,0 \text{ m} \times 0,05) = 5,2 \text{ m} \quad (19)$$

Neste cenário, o AUV tentaria atingir 5,2 m, colidindo com o solo em 5,1 m. Mesmo que a velocidade no pico seja momentaneamente nula, a colisão poderia

danificar sensores frágeis (como câmeras ou sonar) e levantar sedimentos, comprometendo a missão.

Portanto, um $PSS \leq 5\%$ é definido como um requisito de segurança crítico para garantir uma margem operacional mínima, aliado a uma condição de que $z_{ref} \leq 0.95 \cdot h_{max}$, onde h_{max} é a profundidade máxima do ambiente onde o AUV se encontra.

Outro critério que deve ser definido é o tempo de acomodação T_s do sistema controlado, que é o tempo entre dar a entrada no sistema e ele realmente chegar à profundidade especificada. Pensando em uma diferença de profundidade de 4m, partindo de 1m e chegando em 5m, e a velocidade de operação definida como 0.5m/s, é aceitável definir um tempo de acomodação de 10s, visto que demoraria cerca de 8s para que o veículo chegue a profundidade especificada e mais 2s de espera definido arbitrariamente para que ele estabilize.

O último requisito de desempenho que o sistema controlado deve atingir é que o erro em regime permanente seja 0, ou seja, que o AUV realmente chegue na referência e fique nela. De todo modo, este requisito é garantido pelo que já foi discutido antes, o polo na origem, que se traduz como um integrador, classificando o sistema como de 2^a ordem do tipo 1, ou seja, com e_{ee} nulo para uma entrada em degrau.

4.2. ANÁLISE DO LUGAR DAS RAÍZES

4.3. PROJETO DO CONTROLADOR

4.4. RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

5. IMPLEMENTAÇÃO

5.1. DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR

5.2. APLICAÇÃO NO SISTEMA

5.3. TESTES E RESULTADOS

6. CONCLUSÃO

REFERÊNCIAS

- [1] BlueRobotics. Bluerov2.
- [2] Bumblebee. Bumblebee auv 4.5, 2025.
- [3] Wikipedia. Drag coefficient, 2025.