

Controle Embarcado para Robôs com Acionamento Diferencial e *Encoders* de Baixa Resolução.

Autor: Luís Gabriel Pereira Condados¹

Orientador: Adelardo Adelino Dantas de Medeiros²

¹⟨gabriellgpc@hotmail.com⟩

^{1,2}Departamento de Engenharia de Computação e Automação (DCA)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

14 de dezembro de 2020

Sumário



- 1 Introdução**
- 2 Metodologia**
 - Robô
 - *Firmware*
 - Experimentos e Validação
- 3 Resultados**
 - Experimento 01
 - Experimento 02
 - Experimento 03
 - Experimento 04
- 4 Conclusões e Trabalhos Futuros**

Motivação

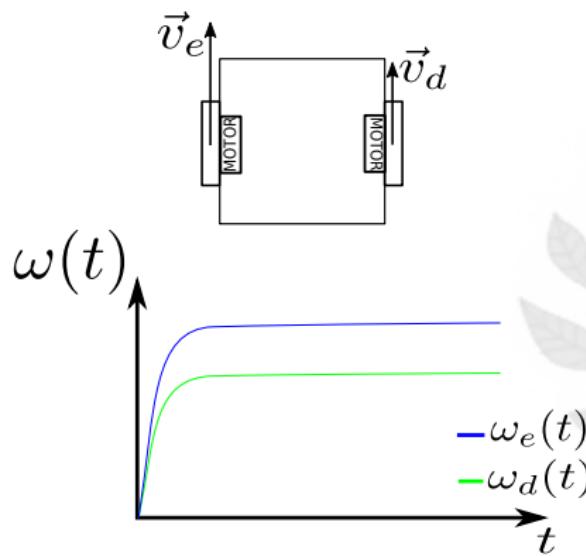


Figura 1: Ilustração. Respostas diferentes para uma mesma tensão de entrada nos motores direito e esquerdo.

Motivação

Sensores com baixa resolução.

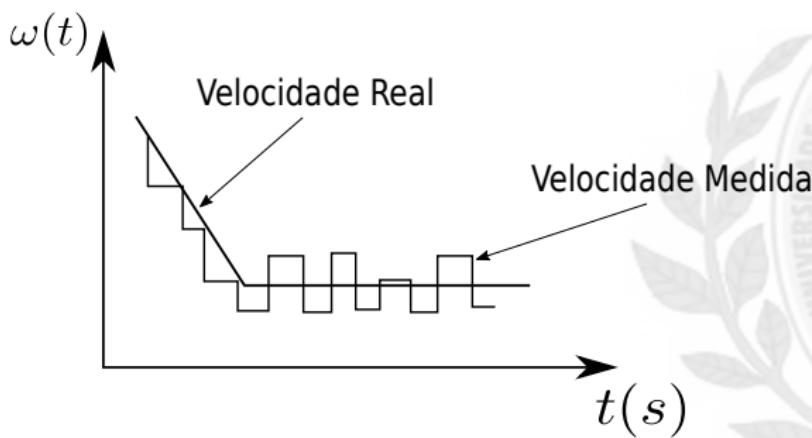
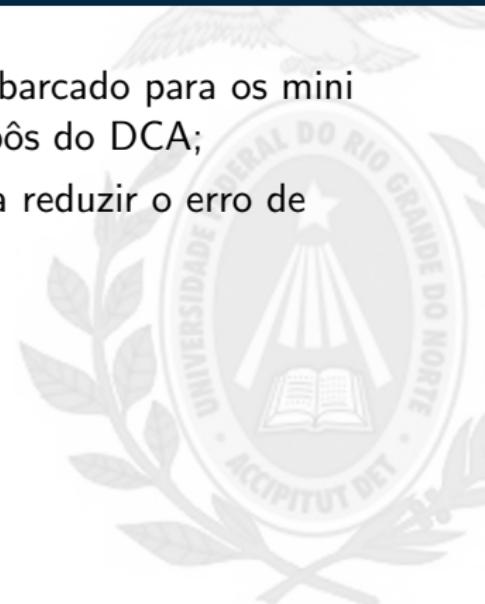


Figura 2: Ilustração do erro de quantização na medição da velocidade do motor.

Objetivos

- Implementar um sistema de controle embarcado para os mini robôs da Equipe POTI de futebol de robôs do DCA;
- Utilizar um estimador de velocidade para reduzir o erro de quantização dos sensores.



Objetivos

- Esquema de Controle: *FeedForward* + Controlador Proporcional;
- Filtro de *Kalman* como estimador de velocidade.

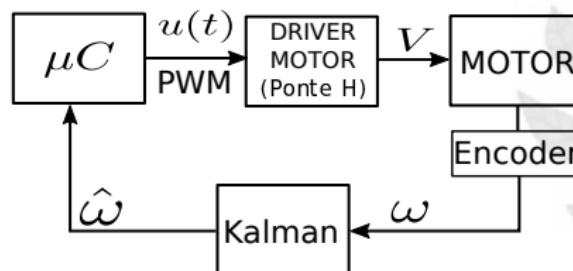


Figura 3: Diagrama simplificado do sistema de controle embarcado para um motor.

Robô

Os Robôs

- Robôs que devem caber em um cubo com 7.5cm de lado;
- Microcontrolador: ESP32;
- Sensores: *Encoder* magnéticos de 3 pulsos por revolução (PPR).

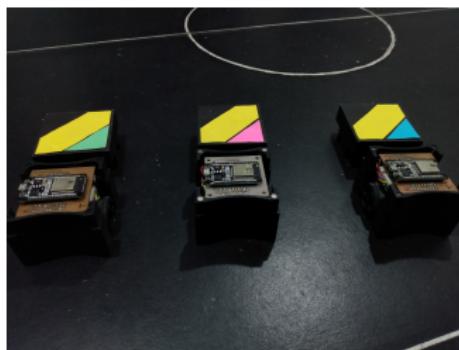


Figura 4: Robôs da Equipe POTI.

Robô

Projeto do Robô

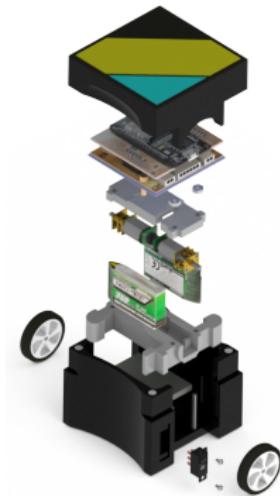


Figura 5: Visão geral do projeto dos robôs utilizados.

O Microcontrolador

- CPUs: 2 núcleos principais e um terceiro núcleo de baixo consumo enérgico.
- Frequência de operação dos núcleos: Até 240 MHz
- Interface Wireless: Wi-Fi e Bluetooth (802.11 b/g/n/e/i);
- Memória: 448 Kb de ROM, 520 Kb de SRAM e 4 Mb de Flash.



Figura 6: Placa de desenvolvimento ESP32 Dev1.

Conjunto Motor-Sensor



Figura 7: Motor equipado com *Encoder* magnético e caixa de redução de 30:1.

Firmware

Divisão de Tarefas no μC

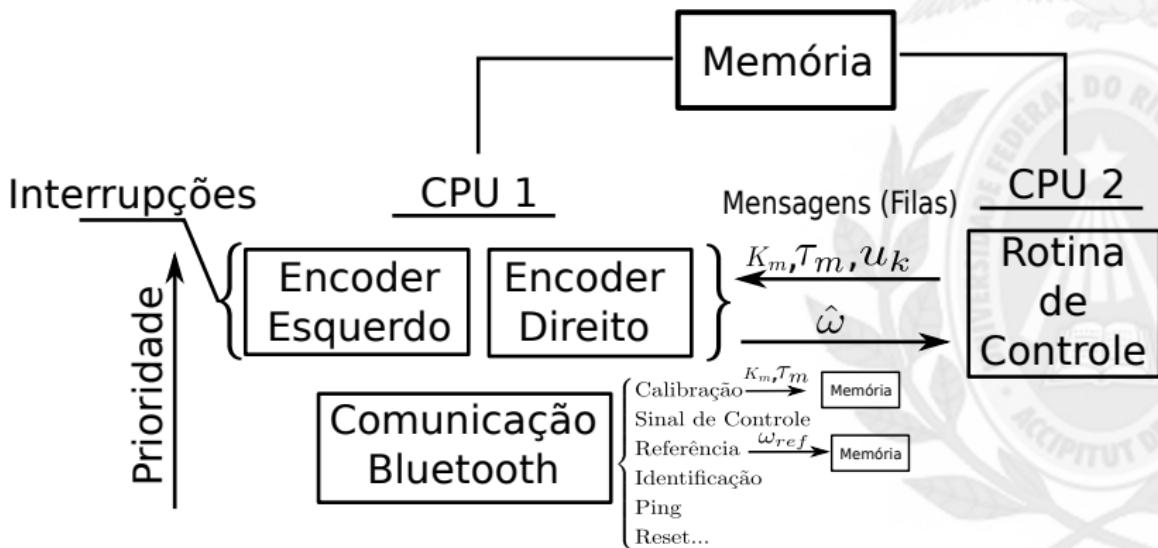


Figura 8: Visão geral do sistema embarcado.

Rotina de Comunicação

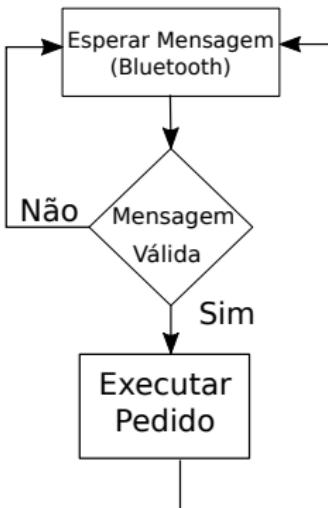


Figura 9: Fluxograma simplificado da rotina de comunicação.

Mensagem

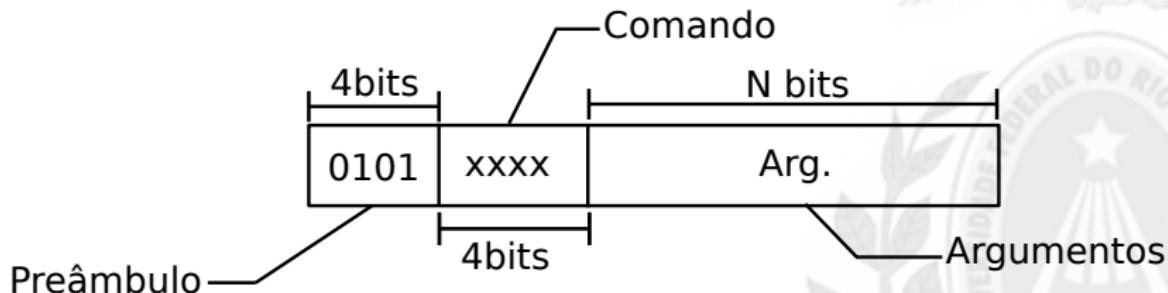


Figura 10: Ilustração de um pacote genérico.

Comandos

Comandos	Pedir dados da Calibração:	0000
	Realizar Calibração:	0100
	Velocidades de Referência:	1010
	Sinal de Controle:	1011
	Velocidades Atuais:	0011
	Iniciar rotina de coleta de dados(<i>Identify</i>):	0101
	Teste de conexão (<i>Ping</i>):	1111

Comando:Referência

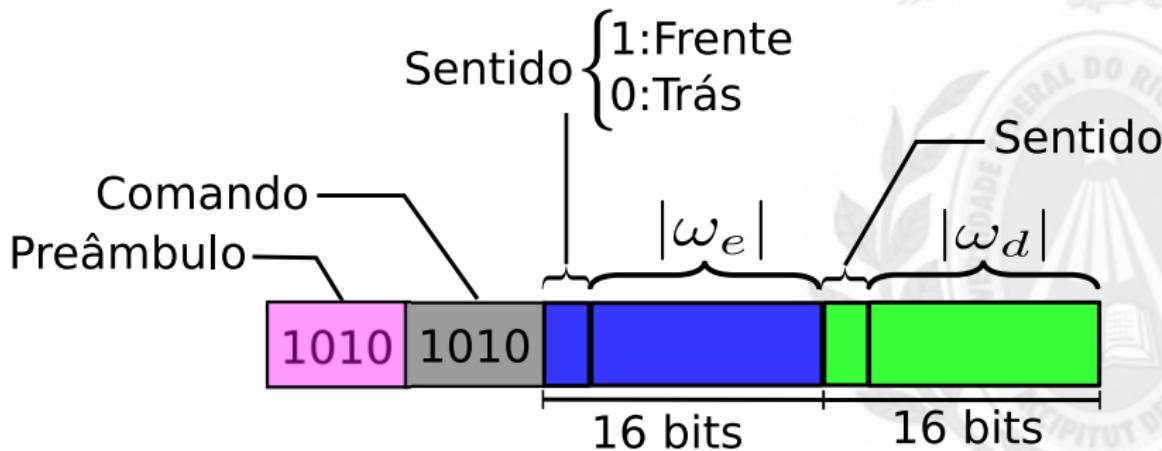


Figura 11: Telecomando de velocidades de referência.

Firmware

Comando:Sinal de Controle

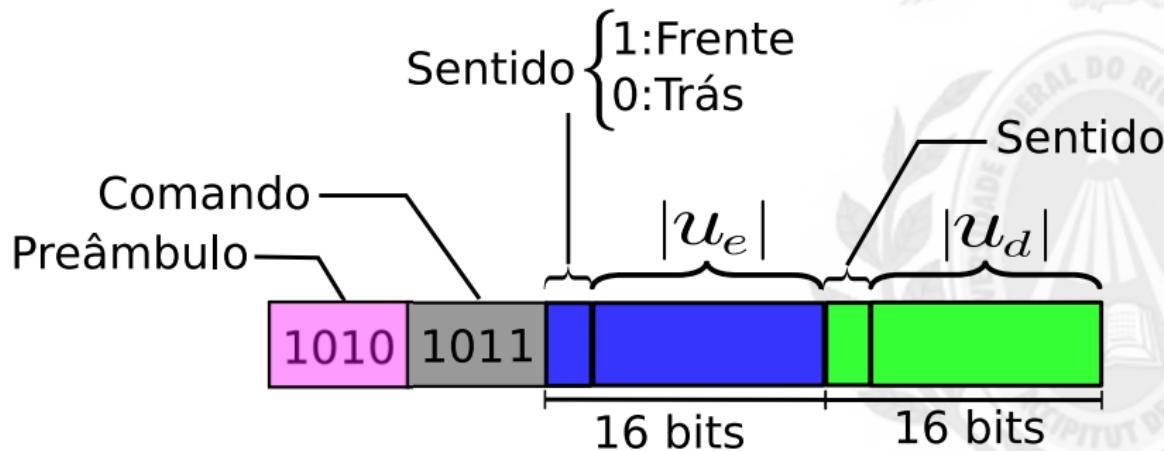


Figura 12: Telecomando de sinal de controle.

Comando: Coleta de Dados

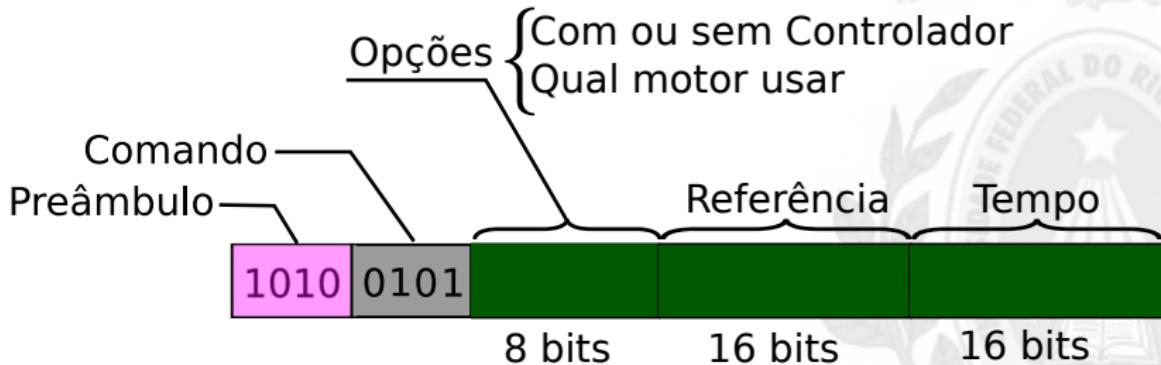


Figura 13: Telecomando para coleta de dados.

Firmware

Rotina de Calibração

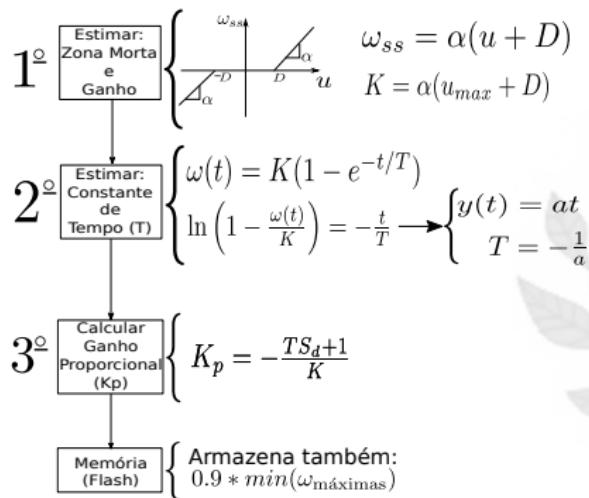


Figura 14: Visão geral da função de calibração.

Firmware

Rotina de Leitura dos Sensores

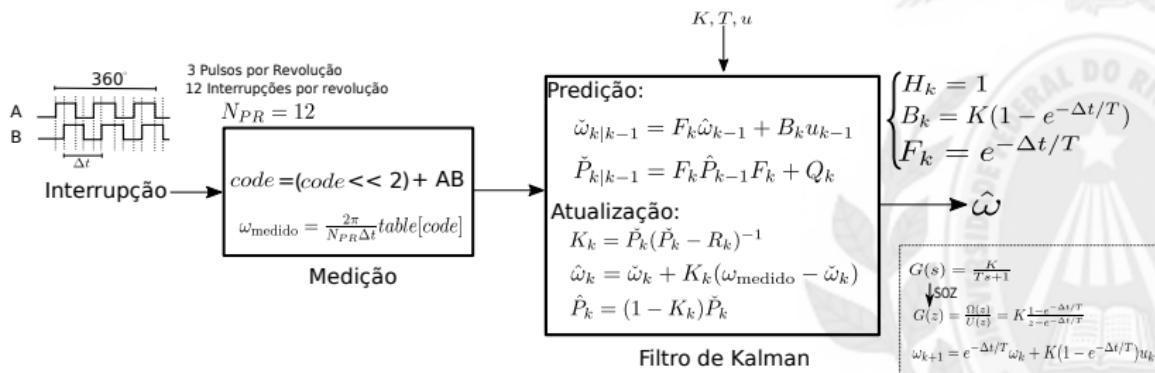


Figura 15: Rotina de leitura dos sensores.

Codificação de 4 bits

A_{ant}	B_{ant}	A_{atual}	B_{atual}	DEC
0	0	1	0	2
1	0	1	1	11
1	1	0	1	13
0	1	0	0	4

Tabela 1: Codificação de 4 bits para a rotação no sentido horário.

A_{ant}	B_{ant}	A_{atual}	B_{atual}	DEC
0	0	0	1	1
0	1	1	1	7
1	1	1	0	14
1	0	0	0	8

Tabela 2: Codificação de 4 bits para a rotação no sentido anti-horário.

Lookup Tables

Índice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Valor	0	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	0	-1	0	-1	1	0

Tabela 3: *Lookup table* para o motor direito.

Índice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Valor	0	-1	1	0	1	0	0	-1	-1	0	0	1	0	1	-1	0

Tabela 4: *Lookup table* para o motor esquerdo.

Firmware

Rotina de Controle

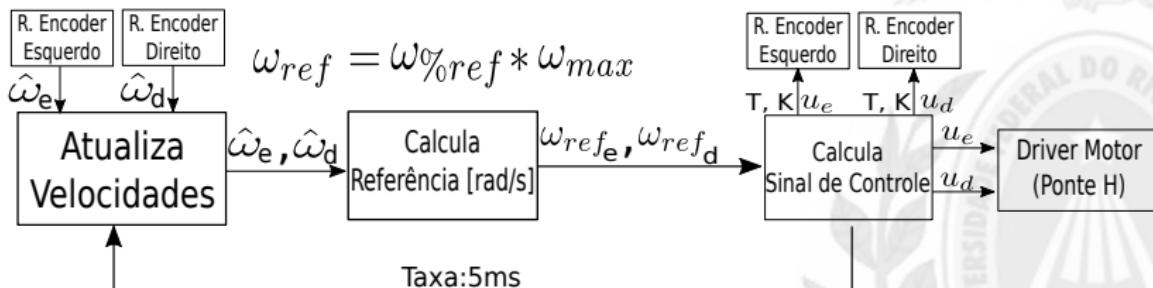


Figura 16: Visão geral da rotina de controle.

Ciclo de Controle

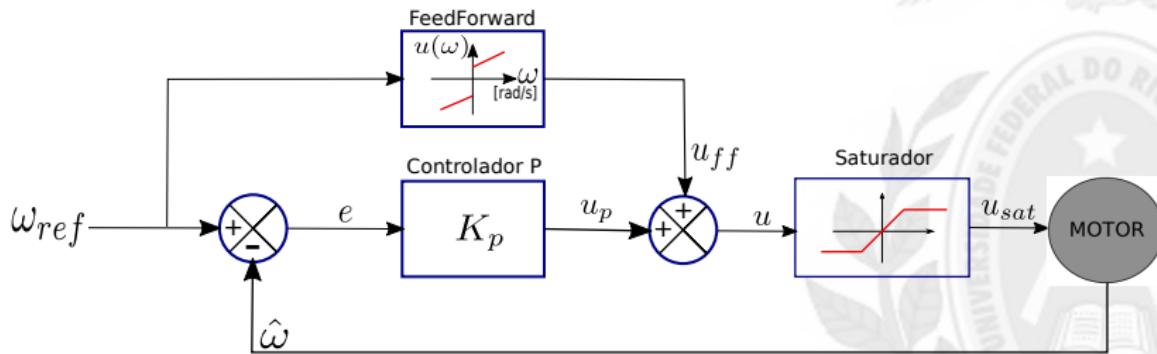


Figura 17: Diagrama de blocos do ciclo de controle.

Experimentos e Validação

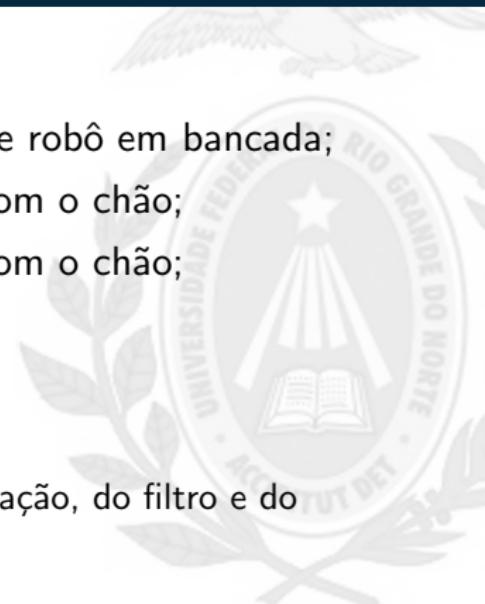
Experimentos e Validação

Experimentos:

- **Experimento 1.** Teste com protótipo de robô em bancada;
- **Experimento 2.** Robô 1 sem contato com o chão;
- **Experimento 3.** Robô 2 sem contato com o chão;
- **Experimento 4.** Robô 1 no chão.

Validação:

- Análise gráfica:
 - Análise da eficiência/acurácia da calibração, do filtro e do controlador.



Experimentos e Validação

Bancada de Testes

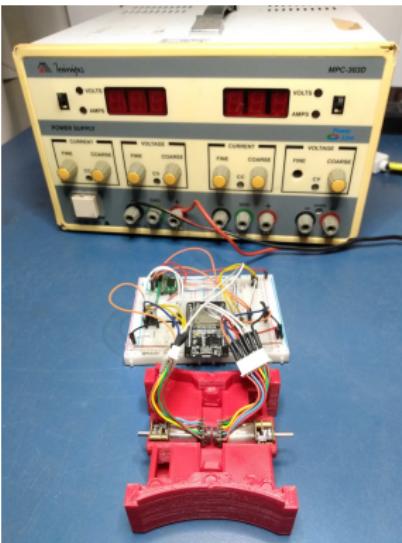


Figura 18: Protótipo.

Experimentos e Validação

Robôs

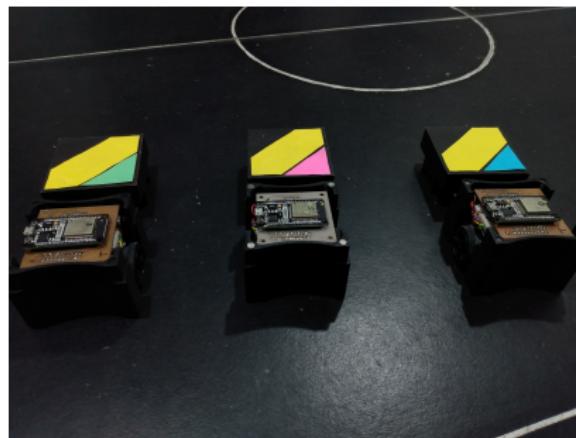


Figura 19: Robôs usados no testes. Robô 1:rosa, robô 2:verde.

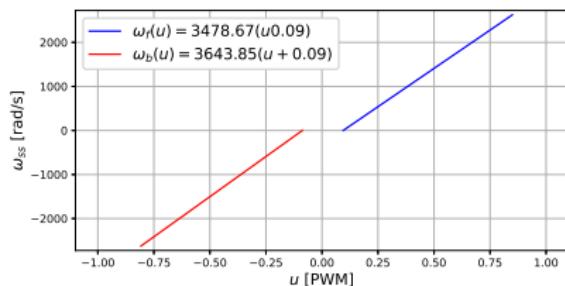
Resultados

Experimento	K_m [rad/s]		τ_m [s]		K_p [1/(rad/s)]	
	Motor Esquerdo	Motor Direito	Motor Esquerdo	Motor Direito	Motor Esquerdo	Motor Direito
1	3236.80	3047.72	7.62e-02	6.57e-02	1.37e-04	1.24e-04
2	4446.69	4514.56	5.71e-02	5.40e-02	3.01e-05	3.23e-05
3	4335.81	4394.23	5.48e-02	5.30e-02	1.54e-05	2.11e-05
4	3345.83	3644.55	4.43e-02	5.90e-02	5.55e-05	3.80e-05

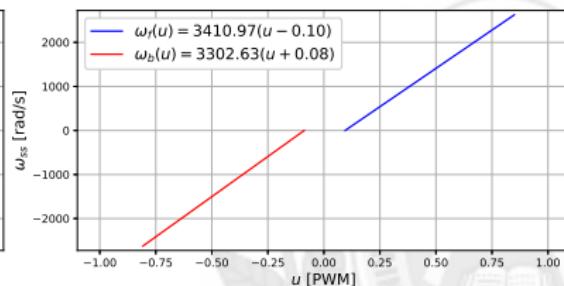
Tabela 5: Resultado da calibração para os diferentes experimentos.

Experimento 01

Resultado da Calibração



(a) Motor esquerdo.

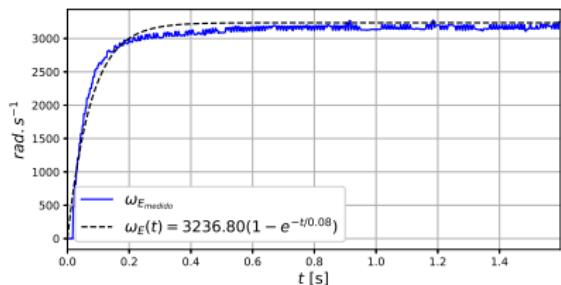


(b) Motor direito.

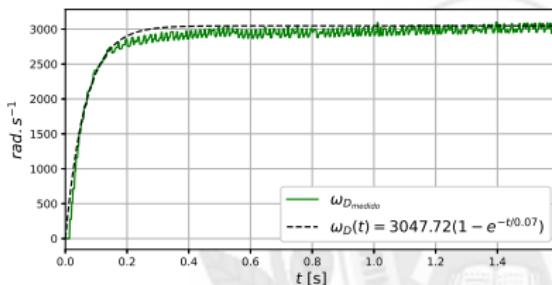
Figura 20: Curva $\omega_{ss}(u)$.

Experimento 01

Resultado da Aproximação do Comportamento do Sistema



(a) Motor Esquierdo.



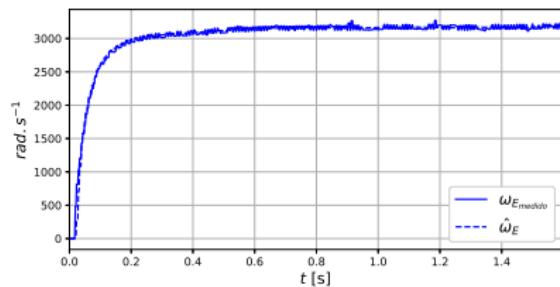
(b) Motor Direito.

Figura 21: Curva $\omega(t)$ teórica versus ω_{medido} .

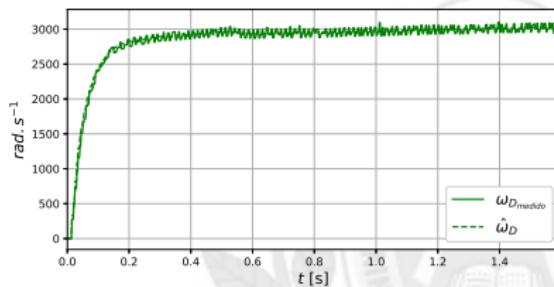


Experimento 01

Resultado da Filtragem



(a) Motor Esquierdo.



(b) Motor Direito.

Figura 22: Comparação entre a velocidade estimativa $\hat{\omega}$ e a velocidade ω medida.

Experimento 01

Resultado do Controle

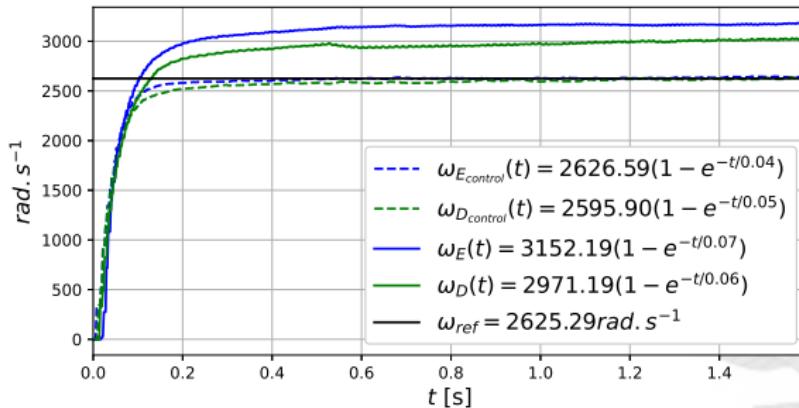


Figura 23: Comparação entre o sistema com controlador e sem controlador.

Experimento 01

Comparação

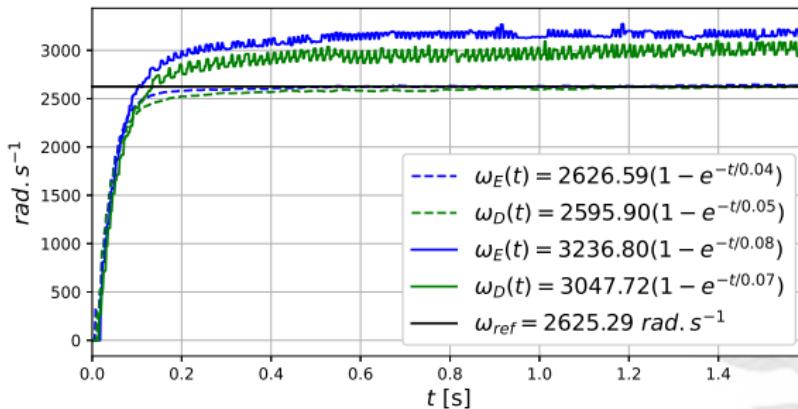
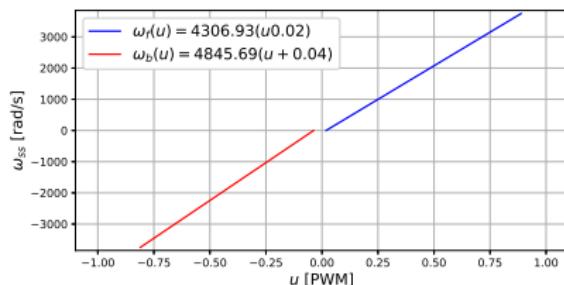


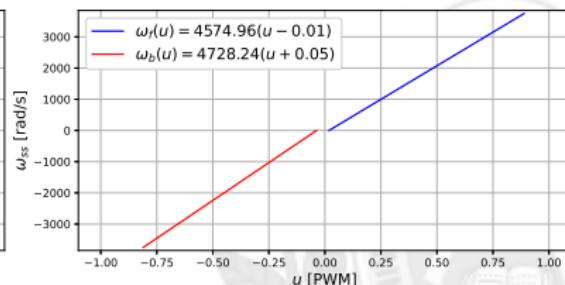
Figura 24: Resposta sem o filtro de *kalman* e sem controle versus com controlador e com o filtro.

Experimento 02

Resultado da Calibração



(a) Motor esquerdo.

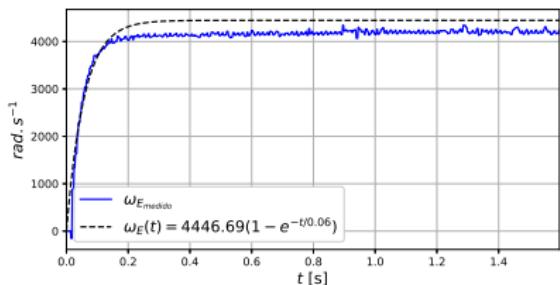


(b) Motor direito.

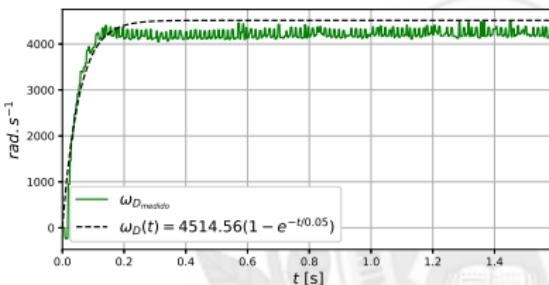
Figura 25: Curva $\omega_{ss}(u)$.

Experimento 02

Resultado da Aproximação do Comportamento do Sistema



(a) Motor Esquerdo.

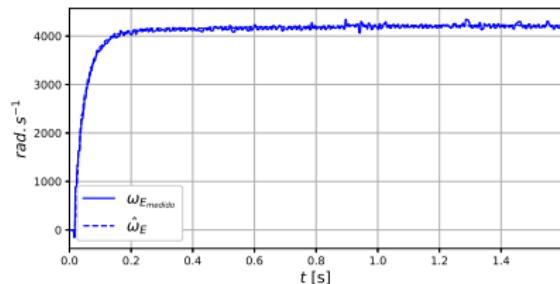


(b) Motor Direito.

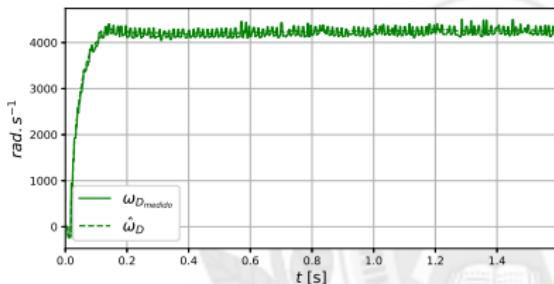
Figura 26: Curva $\omega(t)$ teórica versus ω_{medido} .

Experimento 02

Resultado da Filtragem



(a) Motor Esquerdo.



(b) Motor Direito.

Figura 27: Comparação entre a velocidade estimativa $\hat{\omega}$ e a velocidade ω medida.

Experimento 02

Resultado do Controle

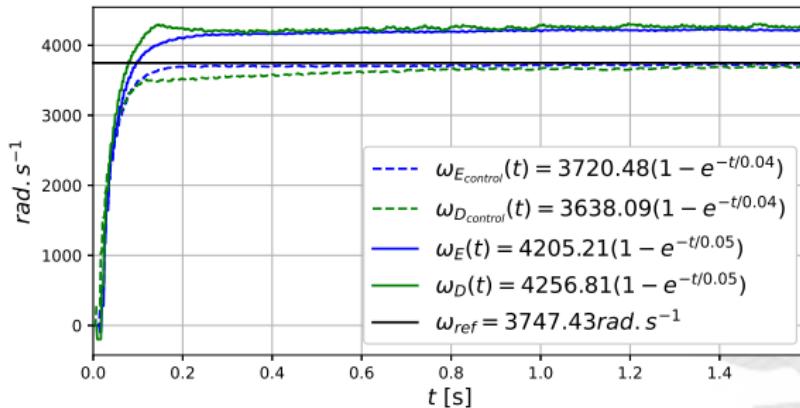


Figura 28: Comparação entre o sistema com controlador e sem controlador.

Experimento 02

Comparação

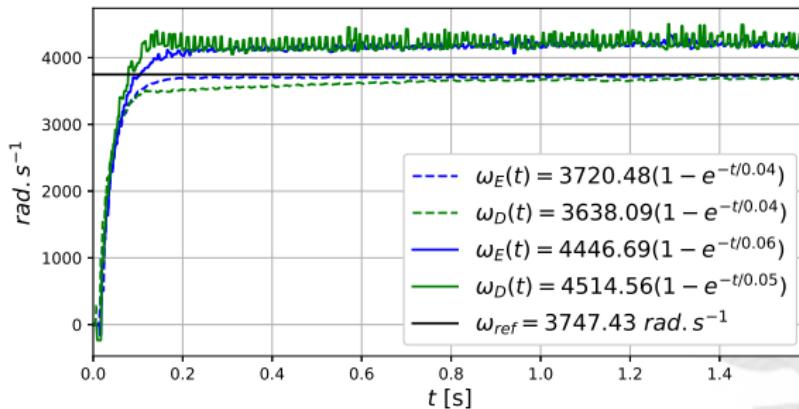
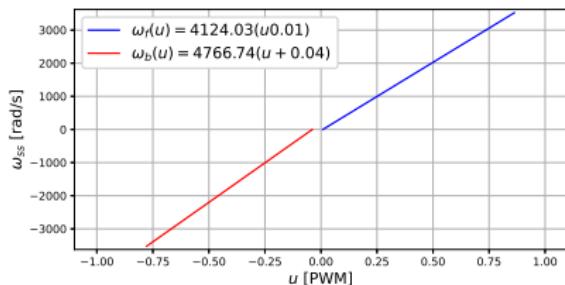


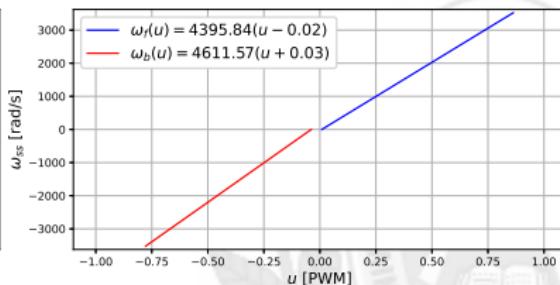
Figura 29: Resposta sem o filtro de *kalman* e sem controle versus com controlador e com o filtro.

Experimento 03

Resultado da Calibração



(a) Motor esquierdo.



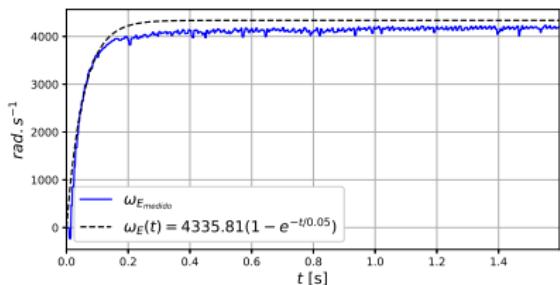
(b) Motor direito.

Figura 30: Curva $\omega_{ss}(u)$.

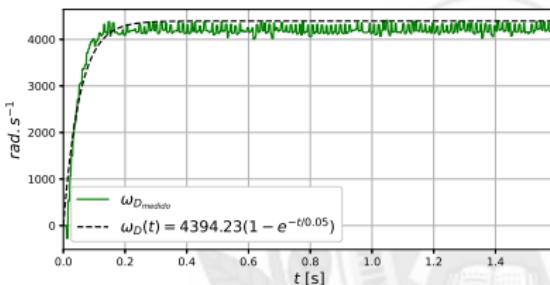


Experimento 03

Resultado da Aproximação do Comportamento do Sistema



(a) Motor Esquerdo.

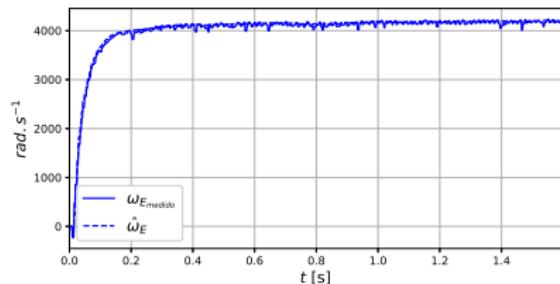


(b) Motor Direito.

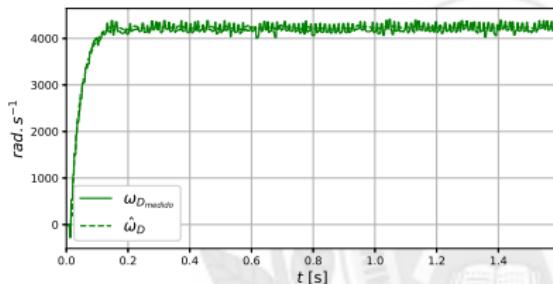
Figura 31: Curva $\omega(t)$ teórica versus ω_{medido} .

Experimento 03

Resultado da Filtragem



(a) Motor Esquerdo.



(b) Motor Direito.

Figura 32: Comparação entre a velocidade estimativa $\hat{\omega}$ e a velocidade ω medida.

Experimento 03

Resultado do Controle

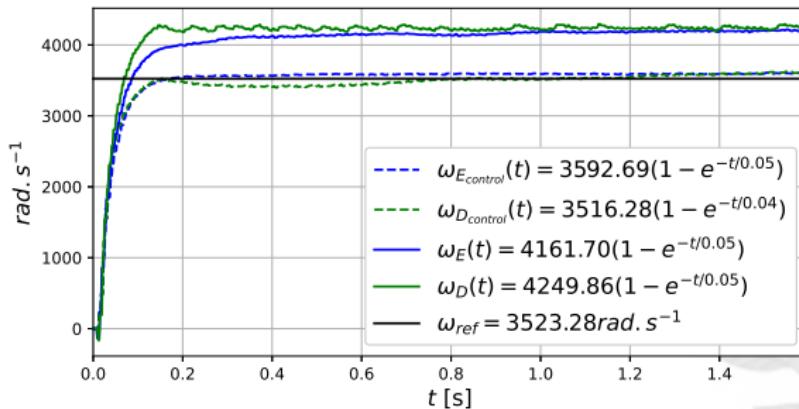


Figura 33: Comparação entre o sistema com controlador e sem controlador.

Experimento 03

Comparação

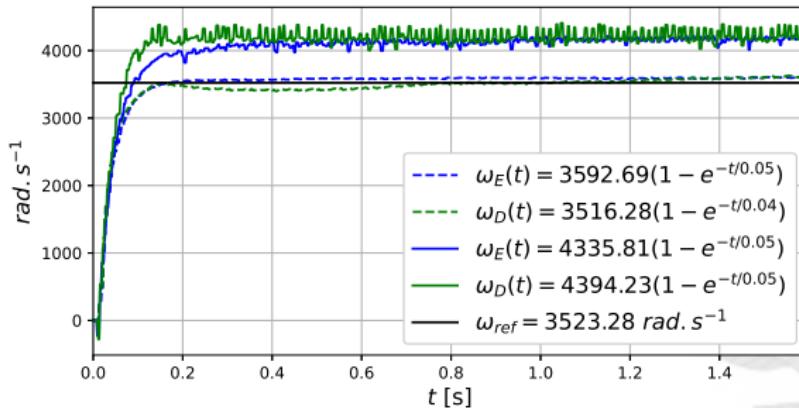
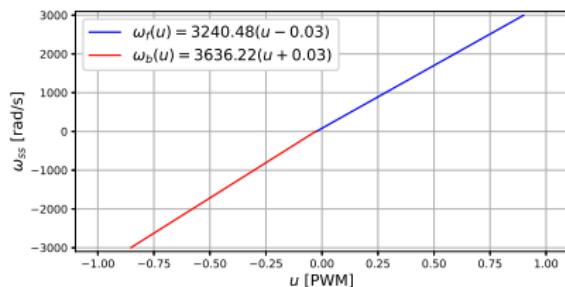


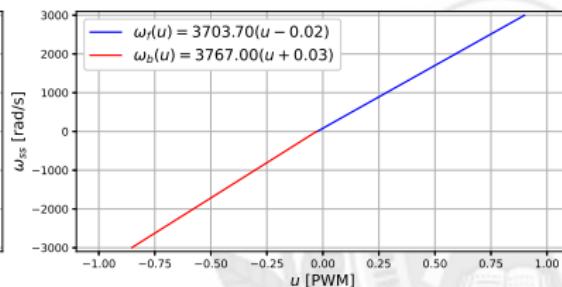
Figura 34: Resposta sem o filtro de *kalman* e sem controle versus com controlador e com o filtro.

Experimento 04

Resultado da Calibração



(a) Motor esquerdo.

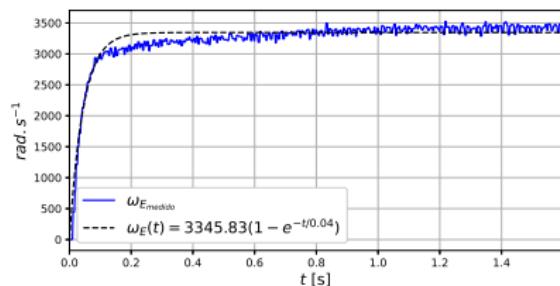


(b) Motor direito.

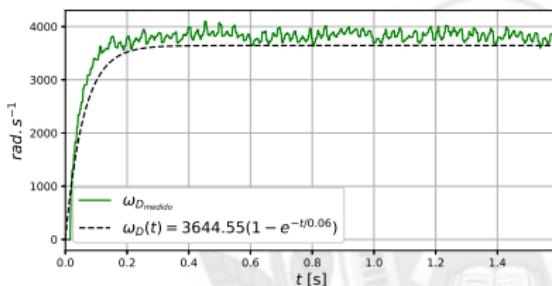
Figura 35: Curva $\omega_{ss}(u)$.

Experimento 04

Resultado da Aproximação do Comportamento do Sistema



(a) Motor Esquerdo.

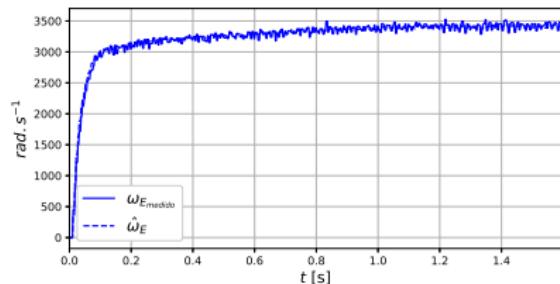


(b) Motor Direito.

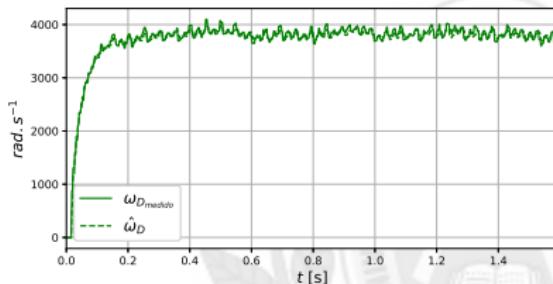
Figura 36: Curva $\omega(t)$ teórica versus ω_{medido} .

Experimento 04

Resultado da Filtragem



(a) Motor Esquerdo.



(b) Motor Direito.

Figura 37: Comparação entre a velocidade estimativa $\hat{\omega}$ e a velocidade ω medida.

Experimento 04

Resultado do Controle

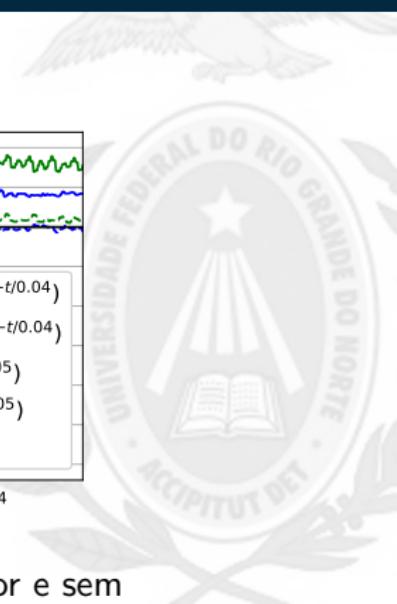
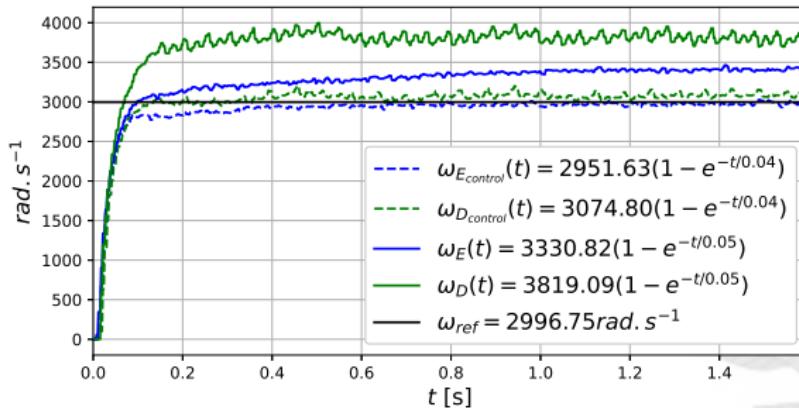


Figura 38: Comparação entre o sistema com controlador e sem controlador.

Experimento 04

Comparação

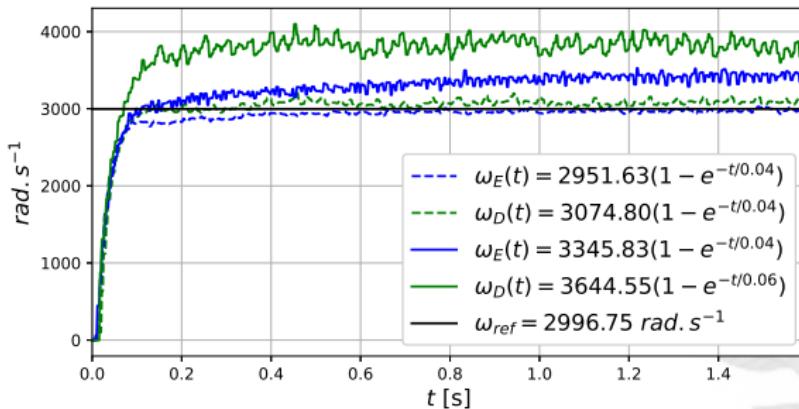


Figura 39: Resposta sem o filtro de *kalman* e sem controle versus com controlador e com o filtro.

Conclusões e Trabalhos Futuros

Conclusões:

- Comportamento da planta foi como o esperado;
- Filtro de *Kalman* conseguiu reduzir bastante o erro de quantização;
- Esquema de controle com bons resultados.

Trabalhos Futuros:

- Adição da ação integral;
- Calibração automática.

