

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

PROGRAMA DE BOLSA UNIFICADA

Estudo da passividade no ambiente de interação humano-robô na
articulação do joelho em um robô exoesqueleto.

EDITAL PUB 2022/2023

Prof. Dr. Thiago Boaventura Cunha

7 de dezembro de 2022

Sumário

1	Resumo	2
2	Justificativa	2
3	Objetivos	3
4	Métodos	3
4.1	Simulações no Simulink/Simscape	4
4.2	Metodologia de Identificação de Sistemas	4
4.3	Margem de fase de Passividade (PPM)	5
4.4	Robô exoesqueleto	6
5	Detalhamento das atividades a serem desenvolvidas pelo(a) bolsista	7
6	Resultados previstos	8
7	Cronograma de execução	9

1 Resumo

Durante tarefas de interação física, o ambiente com o qual o robô interage pode ser classificado como ativo ou passivo, uma vez que exista ou não, troca de energia mecânica entre o robô e o ambiente. No entanto, existem casos onde o ambiente alterna entre tais classificações, como no caso de uma pessoa interagindo com o robô. Tal incerteza de comportamento compromete o desempenho do controle de interação, podendo levar o sistema à instabilidade. Considerando esse cenário, o critério de passividade do sistema controlado é abordado visando garantir estabilidade e, consequentemente, segurança em tarefas com interação física humano-robô. O presente projeto de iniciação científica visa estudar tal critério no contexto sugerido. A metodologia será aplicada em uma plataforma desenvolvida para o estudo da reabilitação robótica de membros inferiores.

2 Justificativa

Com o crescimento demográfico a cima dos 60 anos, visualiza-se um aumento da demanda por dispositivos robóticos como ferramentas de auxílio fisioterapêutico. Tais dispositivos, como os exoesqueletos, são dispositivos mecatrônicos compostos por subsistemas mecânico, eletrônico e lógico. O controle pertence à lógica do robô, sendo capaz de alterar o seu comportamento, mitigar imprecisões eletromecânicas e garantir operação segura, tanto para o terapeuta, quanto para o paciente no contexto de reabilitação (TEJERA et al., 2020).

No projeto de um controle de força ou impedância, a estabilidade do sistema acoplado é determinante para caracterizar a interação física. Em específico nos robôs exoesqueletos essa interação ocorre com o ser humano, cuja dinâmica é não linear,

variável para cada sujeito e dependente tempo. Por exemplo, durante o caminhar, o humano possui momentos de interações ativas e passivas, as quais comprometem a estabilidade e o desempenho do sistema de controle do robô. Logo a implementação de um controlador variável com o movimento se torna uma alternativa para lidar com este tipo de situação (ESCALANTE et al., 2020). Nesse sentido, obter uma relação entre a zona de passividade e o desempenho do controle robótico permite implementar alterações que garantam maior estabilidade enquanto existe interação ativa com o ambiente, ou seja, quando a dinâmica humana adiciona energia ao sistema acoplado.

3 Objetivos

O objetivo central deste projeto de iniciação científica é estudar a estabilidade de sistemas acoplados em tarefas de interação física, levando em consideração a passividade no ambiente da interação. Os objetivos específicos do presente projeto são descritos a seguir:

- Implementar a metodologia de identificação de sistemas via simulações;
- Validar o modelo identificado do robô exoesqueleto;
- Determinar uma zona de passividade para diversos controladores de força e impedância implementados em um robô exoesqueleto;
- Implementar melhorias no controlador do robô exoesqueleto com base nas análises feitas.

4 Métodos

A teoria de controle explorada no presente projeto é dita baseada em modelo. O modelo matemático do robô é a base para o desenvolvimento teórico. Diante disso, o

pode ser simplificado como na Figura 4.2b. Para identificar cada uma dessas funções de transferência, são necessário dois ensaios, sendo eles feitos via simulações e no hardware.

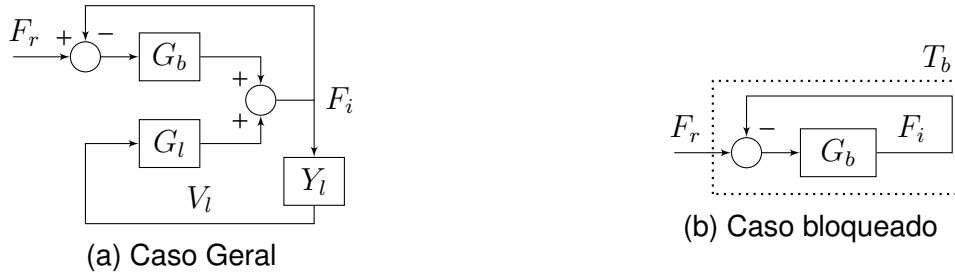


Figura 4.2: Estrutura de controle de força que divide o sistema G em dois subsistemas G_b e G_l .

4.3 Margem de fase de Passividade (PPM)

Algumas cargas/ambientes podem levar à instabilidade controladores estáveis do ponto de vista clássico (margem de fase/ margem de ganho). No entanto, se a carga for um sistema linear passivo, a estabilidade acoplada é garantida (COLGATE; HOGAN, 1988). A maioria das cargas podem ser consideradas passivas, incluindo seres humanos (DYCK et al., 2013). O primeiro passo para encontrar a condição de estabilidade é reescrever a função de transferência em malha fechada acoplada (4.1) como (4.2):

$$T_l = \frac{G_b}{1 + G_b - G_l Y_e} \quad (4.1)$$

$$T_l = \frac{1}{1 + L} T_b \quad L = K Y_l \quad K = \frac{-G_l}{1 + G_b} \quad (4.2)$$

Se o sistema isolado e bloqueado T_b é estável, então o sistema acoplado T_l torna-se instável se e somente se $L = -1$ para alguma frequência. Se Y_l for passivo, então $-\frac{\pi}{2} \leq \angle Y_l \leq \frac{\pi}{2}$. Assim, para garantir a estabilidade:

$$\angle K + \angle Y_l \neq \angle -1 \Rightarrow \angle K + \angle Y_l \neq \pi \quad (4.3)$$

Usando a condição de fase de passividade para as cargas, o sistema acoplado permanece estável se: $-\frac{\pi}{2} \leq \angle K \leq \frac{\pi}{2}$, conforme ilustrado na Figura 4.3a. Ou seja, K também deve ser passivo. Essa condição motiva uma métrica semelhante à margem

de fase clássica. Quanto maior a distância para $\frac{-\pi}{2}$ ou $\frac{\pi}{2}$, mais robusto é o sistema para cargas passivas. Portanto, uma Margem de Fase de Passividade (PPM - *Passivity Phase Margin*) é proposta da seguinte forma:

$$PPM = 90 - \sqrt{\frac{1}{\omega_{Bb}} \sum_{\omega=0}^{\omega_{Bb}} (\angle K(\omega) - 0)^2} \quad (4.4)$$

O termo é chamado de PPM complementar, ou seja o ângulo que representa a área de estabilidade, como na Fig. 4.3b. Assim, quanto maior o *PPM* melhor a estabilidade acoplada do controlador, pois ele tem mais possibilidades de expandir sua área de estabilidade uma vez acoplada a carga.

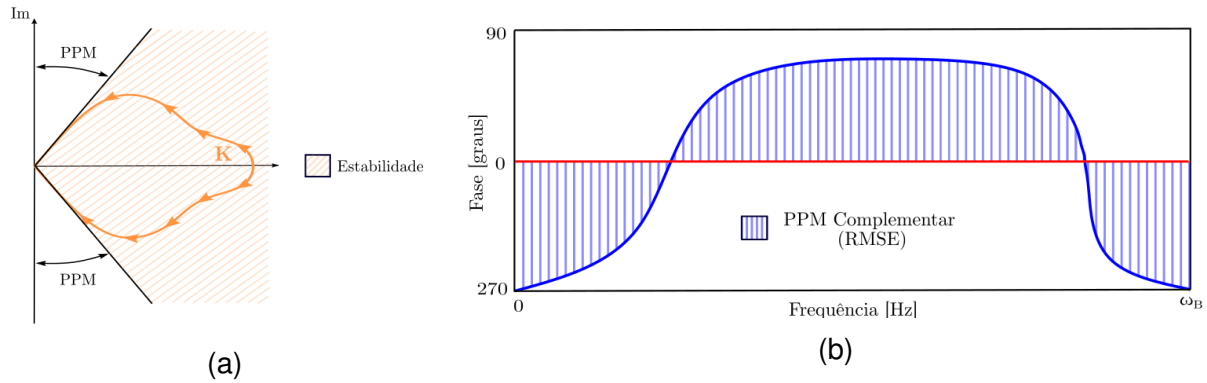


Figura 4.3: (a) Faixa de estabilidade considerando a fase de K e a definição do PPM e (b) Exemplo do cálculo da PPM complementar (RMSE).

4.4 Robô exoesqueleto

O exoesqueleto usado na etapa experimental é composto por um atuadores elásticos em série nas juntas e foi projetado pelo Laboratório de Reabilitação Robótica da EESC-USP (SANTOS et al., 2017; SANTOS; SIQUEIRA, 2019). O robô também contém juntas no quadril e tornozelo. Todas as juntas são instrumentadas com *encoders* e o sistema de atuação é baseado em motores DC. Para esse estudo, apenas a junta do joelho será acionada, sendo as outras passivas. O conjunto do *hardware* do robô, assim como suas interfaces estão diagramados na figura 4.4. A lógica de controle e a leitura de sensores são executadas no computador principal e escritas em C++.

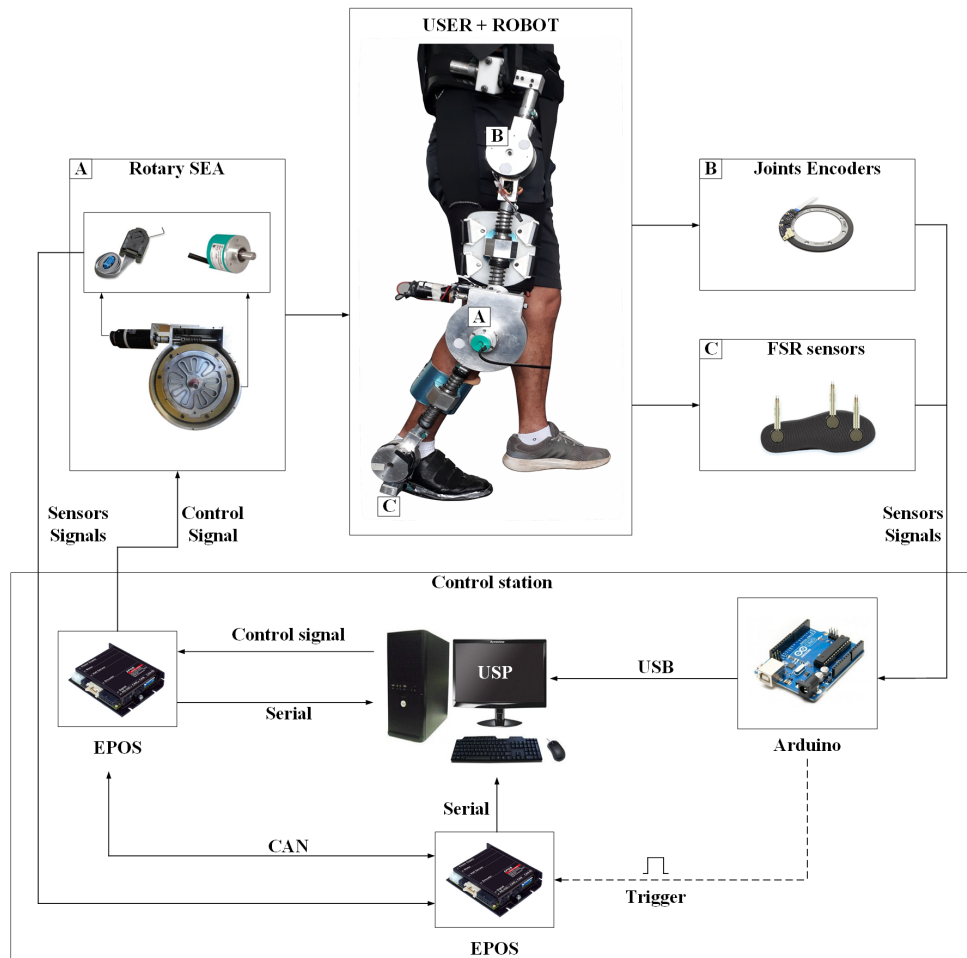


Figura 4.4: Configuração experimental. O sistema é equipado com sensores FSR para detectar as fases do caminhar e encoders para medir os ângulos das juntas.

5 Detalhamento das atividades a serem desenvolvidas pelo(a) bolsista

As atividades a serem desenvolvidas neste projeto de iniciação científica serão divididas em 3 tarefas (T) principais:

- *T1 - Entender e caracterizar o problema:* Familiarização com os conceitos de impedância mecânica e a estabilidade de sistemas acoplados, i.e., sistema humano-

robô. Uma vez familiarizado com os tópicos principais do projeto de iniciação científica, formular e implementar o modelo do sistema acoplado em ambiente de simulação.

- *T2 - Estudo de simulação:* Estudar o conceito de controlador de força e impedância aplicado no modelo acoplado da T1. A aplicação do controlador permitirá entender o comportamento do sistema controlado baseado nos índices de desempenho tradicionais de sistemas de segunda ordem. Posteriormente será implementado o método de análise de passividade, cuja informação será decisiva visando melhorar o desempenho do controle de interação.
- *T3 - Testes em hardware:* A suposição de um modelo conhecido do ser humano é muito importante para permitir o desenvolvimento de movimentos colaborativos com o exoesqueleto. Para os testes experimentais iniciais poderão ser realizados em ambientes totalmente controlados, i.e., movimentos a uma taxa de frequência baixa. Posteriormente, a robustez do método deverá ser demonstrada em ambientes mais desafiantes, isto é, considerando movimentos mais complexos e.g., caminhar em esteira com diferentes velocidades.

6 Resultados previstos

A seguir enumera-se os resultados esperados para as tarefas propostas:

- Resultados quantitativos e qualitativos que permitam estabelecer uma relação entre passividade e desempenho de controladores de interação aplicado no exoesqueleto de membros inferiores para uma junta;
- Melhorar a margem de fase e ganho dos controladores de força e impedância levando em consideração a metodologia proposta, diante um cenário de interação humano-exoesqueleto;
- Consolidar o método de análise de passividade em sistemas SISO, visando futuramente estender o método para sistemas de múltiplas entradas e múltiplas

saídas (MIMO), diante o mesmo cenário de aplicação.

7 Cronograma de execução

As principais tarefas a serem desenvolvidas neste projeto estão relacionadas com uma lista de eventos (E) importantes que marcam o progresso do trabalho. A proposta de projeto é para 1 ano de duração, o cronograma planejado está apresentado com detalhes na Tabela 7.1.

- E1. Revisão bibliográfica, elaboração de textos científicos e relatórios;
- E2. Desenvolvimento das simulações da junta do joelho do exoesqueleto;
- E3. Implementação da metodologia do *benchmarking* de controladores de força/torque nas simulações;
- E4. Validação das simulações através de teste experimentais com o exoesqueleto;
- E5. Cálculo da métrica de passividade;
- E6. Estudo de correlação nos valores da métrica com o movimento da junta;
- E7. Implementação de alterações nos controladores da junta;
- E8. Testes experimentais e validação.

Tabela 7.1: Cronograma proposto em meses, com tempo total de execução de 12 meses

Atividade	Mês											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E1												
E2												
E3												
E4												
E5												
E6												
E7												
E8												

Referências Bibliográficas

COLGATE, J. E.; HOGAN, N. Robust control of dynamically interacting systems. *International journal of Control*, Taylor & Francis, v. 48, n. 1, p. 65–88, 1988.

DYCK, M.; JAZAYERI, A.; TAVAKOLI, M. Is the human operator in a teleoperation system passive? In: *2013 World Haptics Conference (WHC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 683–688.

ESCALANTE, F. M. et al. Robust markovian impedance control applied to a modular knee-exoskeleton. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 53, n. 2, p. 10141–10147, 2020.

SANTOS, W. M. Dos; CAURIN, G. A.; SIQUEIRA, A. A. G. Design and control of an active knee orthosis driven by a rotary series elastic actuator. *Control Engineering Practice*, v. 58, p. 307 – 318, 2017. ISSN 0967-0661.

SANTOS, W. M. Dos; SIQUEIRA, A. A. G. Design and control of a transparent lower limb exoskeleton. In: *Wearable Robotics: Challenges and Trends*. Pisa, Italy: Springer, Cham, 2019. p. 175–179. ISBN 978-3-030-01886-3.

TEJERA, J. A. de la et al. Systematic review of exoskeletons towards a general categorization model proposal. *Applied Sciences*, MDPI, v. 11, n. 1, p. 76, 2020.