



Identificação da dinâmica do braço humano através de experiências com o KUKA Lightweight Robot 4+

Ricardo Alexandre Pereira Aniceto

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Jorge Manuel Mateus Martins
Prof. Rui Miguel de Moura Antunes e Valejo Coelho

Júri

Presidente: Prof. Carlos Baptista Cardeira
Orientador: Prof. Jorge Manuel Mateus Martins
Vogal: Prof. João Carlos Prata dos Reis

Dezembro de 2021

Dedicado ao Pai, à Mãe, ao João e ao Leo

Agradecimentos

Gostaria de aproveitar esta oportunidade para agradecer a todas as pessoas que me ajudaram e apoiaram, não só na realização deste trabalho, mas também em todo o meu percurso académico.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, o professor Jorge Martins, por me terem dado a oportunidade de trabalhar no tema abordado. Agradeço pela orientação dada, pelas muitas dúvidas esclarecidas e por tudo o que aprendi ao longo da realização deste trabalho. Agradeço também ao professor Rui Coelho, que me acompanhou e ajudou na realização deste projeto.

Este trabalho também não seria possível sem a ajuda dos meus colegas de laboratório. Agradeço por toda a ajuda que me deram e por terem proporcionado um fantástico ambiente de trabalho no laboratório. Desejo-lhes a maior das felicidades no seu percurso académico e profissional.

Gostava de mencionar também, sem qualquer ordem em especial, todos os meus colegas que me acompanharam durante o meu percurso no IST e aos meus amigos próximos, a Margarida, o Diogo, a Ana Beatriz, o Miguel, a Marta, o Pedro, a Margarida, o Alexandre, o João, o Hugo e o João. Obrigado pelo apoio e pela amizade.

Por último e, indiscutivelmente, os mais importantes, agradeço ao meu pai, à minha mãe, ao meu irmão mais velho e ao meu irmão gémeo por todo o amor e o apoio incondicional que me deram durante toda a minha vida. Sem o encorajamento deles, todas as vitórias que alcancei não seriam possíveis.

Resumo

Apesar de serem feitos estudos do controlo motor humano há mais de 100 anos, ainda muito é desconhecido nesta área de estudo. Os mecanismos fisiológicos responsáveis pela geração de movimento nas articulações são de elevada complexidade, o que torna a procura de um modelo matemático que descreva estes fenómenos um problema sem uma solução exata. Mesmo assim, a investigação destes fenómenos é importante para a compreensão do braço como um sistema biomecânico, sendo profícua para áreas como a robótica colaborativa, a compreensão de doenças neuromusculares, o desenvolvimento de exercícios de reabilitação motora ou a construção de próteses.

O trabalho desenvolvido nesta tese baseia-se na identificação da dinâmica do braço humano, composto pelo ombro, o cotovelo e o pulso, através de perturbações estocásticas na mão do sujeito experimental realizadas pelo KUKA Lightweight Robot 4+. Um dos objetivos do trabalho é a exploração dos diferentes métodos de perturbação usados, que pode ser uma perturbação de força ou de posição. É feita uma análise em frequência dos dados retirados e é aproximado a dinâmica do braço a um sistema de 2ª ordem. O objetivo principal deste projeto é validar sistema robótico e os métodos utilizados para a estimação da impedância mecânica do braço em múltiplas direções 3D. Assim, são comparados os modelos estimados da dinâmica do braço humano para cada tipo de perturbação. Finalmente, a rigidez do braço é estimada para diferentes direções 3D, obtendo a anisotropia de rigidez do braço humano.

Palavras-chave: Identificação da impedância do braço humano, Modelação musculoesquelética, KUKA Lightweight Robot 4+, dinâmica de contração, rigidez direcional.

Abstract

Although human motor control studies have been done for over 100 years, still much is unknown in this area. The physiological mechanisms responsible for the force generation in the human joints are too complex, which makes the search for a mathematical model that describes these phenomena a problem without an exact solution. Nevertheless, the research of these phenomena is important for the understanding the human arm as a biomechanical system and may be beneficial for areas such as collaborative robotics, neuromuscular diseases research, motor rehabilitation and the development of limb prosthesis.

The work developed in this thesis is based on the identification of the human arm dynamics, taking into account the shoulder, the elbow and the wrist, through stochastic disturbances applied by the KUKA Lightweight Robot 4+ in the experimental subject's hand. One of the goals of this work is explore the different methods of disturbance used, which can be a disturbance of force or position. With experimental data acquired, a frequency domain analysis is employed and the dynamic behaviour of the arm is approximated to a 2nd order system. The main objective of this project is to validate the robotic system and the methods used for arm mechanical impedance estimation in multiple 3D directions. For that purpose, the estimated models of the dynamics of the human arm for each type of disturbance are compared together. Finally, the stiffness of the arm is estimated for different 3D directions, revealing the stiffness anisotropy of the human arm.

Keywords: human arm impedance identification, MusculoSkeletal modelling, KUKA Lightweight Robot 4+, contraction dynamics, directional stiffness.

Conteúdo

1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Estado da arte	2
1.2.1. Modelos do músculo.....	2
1.2.2. Identificação da dinâmica do braço humano.....	3
1.3. Estrutura da dissertação	6
2. Sistema Fisiológico	7
2.1. Geração de força no músculo	7
2.2. Configuração do sistema fisiológico.....	9
2.3. Sistema musculoesquelético.....	10
2.4. Representação num diagrama de blocos	12
3. KUKA Lightweight Robot 4+	15
3.1. Descrição do braço robótico.....	15
3.2. Fast Research Interface	16
3.3. Programa <i>server</i>	17
3.4. Estratégias de controlo.....	19
3.5. Animação.....	20
4. Identificação de sistemas.....	23
4.1. Sistema de 2ª ordem	23
4.2. Conceitos básicos sobre processos estocásticos.....	25
4.3. Relação entrada-saída (input-output).....	26
5. Métodos.....	29
5.1. Procedimento	29
5.2. Perturbação.....	30
5.3. Ensaios.....	31
5.3.1. Ensaio com o braço.....	32
5.3.2. Ensaio livre	33
5.3.3. Ensaio com massa	33
5.4. Tratamento e análise de dados.....	34
5.4.1. Correção dos dados de posição medida.....	34
5.4.2. Estimação do modelo não paramétrico.....	35
5.4.3. Estimação do modelo paramétrico.....	35

5.4.4.	Obtenção da impedância mecânica do braço	36
5.5.	Validação do método numérico	37
6.	Resultados	39
6.1.	Ensaio livres com perturbação de posição unidirecional	39
6.1.1.	Correção dos dados de posição.....	39
6.1.2.	Estimação do modelo não paramétrico.....	41
6.1.3.	Estimação do modelo paramétrico.....	42
6.2.	Ensaio com massa com perturbação de posição unidirecional	44
6.3.	Ensaio com o braço com perturbação de posição unidirecional.....	46
6.3.1.	Estimação do modelo não paramétrico.....	46
6.3.2.	Estimação do modelo paramétrico.....	48
6.4.	Ensaio livre com perturbação de força unidirecional com impedância simulada	51
6.5.	Ensaio com massa com perturbação de força unidirecional com impedância simulada	53
6.6.	Ensaio com braço com perturbação de força unidirecional com impedância simulada	54
6.6.1.	Estimação do modelo não paramétrico.....	55
6.6.2.	Estimação do modelo paramétrico.....	55
6.7.	Ensaio com braço com perturbação unidirecional de força sem impedância simulada	57
6.7.1.	Estimação do modelo não paramétrico.....	58
6.7.2.	Estimação do modelo paramétrico.....	58
6.8.	Resumo dos ensaios unidirecional.....	60
6.9.	Ensaio com perturbação de posição tridimensional.....	62
7.	Conclusão	67
7.1.	Trabalho futuro	68
	Bibliografia.....	71
	Anexos.....	73

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo inicial e da aproximação pelo t_{fest} .	38
Tabela 6.1 – Parâmetros de rigidez, k , e taxa de amortecimento, ξ , definidos a priori, p , e dados pela aproximação a um modelo de 2ª ordem, a , da FRF estimada para o ensaio livre com perturbação da posição.	42
Tabela 6.2 – Parâmetros da aproximação dos ensaios de perturbação de posição numa direção.	48
Tabela 6.3 – Parâmetros do braço resultado dos ensaios de perturbação de posição numa direção.	50
Tabela 6.4 – Parâmetros pedidos e aproximados da estimativa do ensaio livre com perturbação de força.	52
Tabela 6.5 – Parâmetros da aproximação dos ensaios de perturbação de força.	56
Tabela 6.6 – Parâmetros do braço resultado dos ensaios de perturbação de posição numa direção.	56
Tabela 6.7 – Resultados da aproximação dos ensaios de perturbação de força sem impedância.	59
Tabela 6.8 – Parâmetros dos modelos do braço estimados.	60

Lista de figuras

Figura 1.1 – Esquema de dois tipos de modelo Hill [4].	3
Figura 1.2 – Elipse de rigidez [7].	4
Figura 1.3 – Elipses de inercia (inertia), viscosidade (viscosity) e rigidez (stiffness) dum sujeito que tenta manter uma força constante numa direção x ou y [8].	5
Figura 2.1 – Representação do músculo e das suas componentes [11].	7
Figura 2.2 – Representação do sarcómero [7].	8
Figura 2.3 – Representação esquemática do músculo [7].	9
Figura 2.4 – Representação esquelética do ombro [11].	10
Figura 2.5 – Representação esquelética do cotovelo [11].	11
Figura 2.6 – Representação esquelética do ombro [11].	12
Figura 2.7 – Diagrama de blocos da dinâmica duma articulação [14].	12
Figura 3.1 – Representação da configuração do LWR adaptada de [15]: 1) Manipulador robótico; 2) Teach pendant; 3) Controlador.	15
Figura 3.2 – Representação da configuração do LWR [20]: 1) Manipulador robótico; 2) Teach pendant; 3) Controlador; 4) Computador target; 5) Computador host.	16
Figura 3.3 – Diagrama de fluxo de dados.	17
Figura 3.4 - Diagrama de blocos do programa server, adaptado de [20].	17
Figura 3.5 – Programa server em <i>Simulink</i> : <i>FRI Receive</i> a verde, <i>main controller</i> a amarelo, <i>FRI Transmit</i> a vermelho e <i>client Receive</i> a cinzento.	18
Figura 3.6 – Animação do braço robótico.	21
Figura 4.1 - Diagrama de Bode dum sistema de 2ª ordem sem zeros para $K0 = 1$, $\omega_n = 1$ e para diferentes valores de ξ .	23
Figura 4.2 - Sistema mecânico massa-mola-amortecedor.	24
Figura 5.1 – Robô e sujeito experimental durante um ensaio.	29
Figura 5.2 - Densidade espectral do sinal de referência.	30
Figura 5.3 – Sinal de referência obtido com amplitude unitária.	31
Figura 5.4 - Sistema análogo dos ensaios com braço.	32
Figura 5.5 - Sistema análogo dos ensaios com massa.	33
Figura 5.6 – FRF do modelo inicial com o modelo estimado pela função <i>tfestimate</i> .	38
Figura 5.7 – Coerência entre o sinal de entrada e o sinal de saída.	38
Figura 6.1 - Gráficos de comparação de posição corrigida e não corrigida para o ensaio de $K=3000$ N/m: sobreposição dos dois gráficos à esquerda, diferença entre os dois à direita.	40
Figura 6.2 – Modelo do robô com perturbação de posição com dados de posição corrigida e não corrigida.	40
Figura 6.3 - Função coerência dos três ensaios livres de perturbação de posição.	41
Figura 6.4 – Modelo estimado do ensaio livre com perturbação de posição para os três ensaios de rigidez cartesiana diferente.	42

Figura 6.5 – FRF estimada, aproximada e pedida do ensaio livre com $K=1500$ N/m.	43
Figura 6.6 – FRF estimada, aproximada e pedida do ensaio livre com $K=3000$ N/m.	43
Figura 6.7 – FRF estimada, aproximada e pedida do ensaio livre com $K=4500$ N/m.	43
Figura 6.8 - FRF estimada do ensaio livre e do ensaio com massa para os três ensaios de perturbação de posição.	45
Figura 6.9 – FRF da massa estimado nos três ensaios com o modelo teórico para $K=3000$ N/m.	45
Figura 6.10 – FRF do sistema robô+braço com perturbação de posição $K=1500$ N/m.	47
Figura 6.11 - FRF do sistema robô+braço com perturbação de posição $K=3000$ N/m.	47
Figura 6.12 FRF do sistema robô+braço com perturbação de posição $K=4500$ N/m.	47
Figura 6.13 – FRF da aproximação do sistema robô+braço com perturbação de posição $K=1500$ N/m.	49
Figura 6.14 - FRF da aproximação do sistema robô+braço com perturbação de posição $K=3000$ N/m.	49
Figura 6.15 - FRF da aproximação do sistema robô+braço com perturbação de posição $K=4500$ N/m.	49
Figura 6.16 - FRF do braço relaxado para os três ensaios de perturbação de posição.	51
Figura 6.17 – FRF do braço relaxado para os três ensaios de perturbação de posição.	51
Figura 6.18 – Sobreposição da resposta em frequência do ensaio livre com perturbação de força e de posição.	52
Figura 6.19 – FRF estimada, aproximada e pedida do ensaio livre com perturbação de força.	53
Figura 6.20 - FRF estimada do ensaio livre e do ensaio com massa para perturbação de força.	54
Figura 6.21 – FRF da massa estimado no ensaio de força com o modelo teórico.	54
Figura 6.22 – FRF do sistema robô+braço com perturbação de força.	55
Figura 6.23 – FRF da aproximação do sistema robô+braço com perturbação de posição.	56
Figura 6.24 – FRF do braço relaxado e contraído para ensaios de perturbação de força com impedância.	57
Figura 6.25 – FRF do braço no ensaio de perturbação de força sem impedância.	58
Figura 6.26 – FRF aproximada do braço semi-contraído no ensaio com perturbação de força sem impedância.	59
Figura 6.27 – FRF aproximada do braço contraído no ensaio com perturbação de força sem impedância.	59
Figura 6.28 – FRF estimadas do braço relaxado.	61
Figura 6.29 – FRF estimadas do braço contraído.	61
Figura 6.30 – Coerência entre a posição de referência e a posição real nas três direções cartesianas.	62
Figura 6.31 – Rigidez direcional do modelo do robô+braço nos três ensaios no plano $z = 0$	63
Figura 6.32 – Rigidez direcional do modelo do robô no ensaio livre no espaço tridimensional.	63

Figura 6.33 – Rigidez direcional do modelo robô+braço no ensaio com braço relaxado no espaço tridimensional.....	63
Figura 6.34 – Rigidez direcional do modelo robô+braço no ensaio com braço contraído no espaço tridimensional.....	63
Figura 6.35 – Rigidez direcional do modelo do braço relaxado e contraído no plano $z = 0$	64
Figura 6.36 – Rigidez direcional do braço relaxado no espaço tridimensional.....	65
Figura 6.37 – Rigidez direcional do braço contraído no espaço tridimensional	65
Figura A.1 – Coerência do ensaio com massa de perturbação de posição $K=1500$	73
Figura A.2 – Coerência do ensaio com massa de perturbação de posição $K=3000$	73
Figura A.3 – Coerência do ensaio com massa de perturbação de posição $K=4500$	73
Figura A.4 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de posição $K=1500$	73
Figura A.5 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de posição $K=3000$	74
Figura A.6 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de posição $K=4500$	74
Figura A.7 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de posição $K=1500$...	74
Figura A.8 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de posição $K=3000$...	74
Figura A.9 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de posição $K=4500$...	74
Figura A.10 – Coerência do ensaio livre de perturbação de força com impedância	75
Figura A.11 – Coerência do ensaio com massa de perturbação de força com impedância	75
Figura A.12 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de força com impedância	75
Figura A.13 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de força com impedância	75
Figura A.14 – Coerência do ensaio com braço semi-contraído de perturbação de força sem impedância	76
Figura A.15 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de força sem impedância	76
Figura A.16 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de posição tridimensional	76
Figura A.17 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de posição tridimensional	76

Lista de símbolos

C_{xy}	Correlação cruzado entre o sinal x e y
F	Força
H	Função de transferência
I	Inércia
J	Jacobiano
K_0	Ganho estático
k	Rigidez
M	Massa
q	Posição de juntas
R_{xx}, R_{xy}	Auto correlação e Correlação cruzada entre o sinal x e y
S_{xx}, S_{xy}	Densidade espectral e Densidade espectral cruzada entre o sinal x e y
t	Tempo
X	Posição medida
X_0	Posição de referência
β	Coefficiente de amortecimento
θ	Ângulo da articulação
ξ	Taxa de amortecimento
τ	Binário
ω_n	Frequência natural
a_0, a_1, b_0	Parâmetros de aproximação
M_b, β_b, k_b, H_b	Dados referentes ao braço humano
M_r, β_r, k_r, H_r	Dados referentes ao robô
EMG	Eletromiografia
FRF	Resposta em frequência
LWR	KUKA Lightweight Robot 4+

1. Introdução

Dinâmica é o estudo de forças aplicadas a um corpo e do movimento gerado através delas. Esta tese tem como foco o estudo da dinâmica do braço humano, considerando o conjunto formado pelas três articulações do ombro, do cotovelo e do pulso, e os métodos utilizados para estimar e modelar essa dinâmica.

O objetivo principal desta tese é validar o método de identificação da impedância mecânica do braço e tornar viável a realização destes ensaios no KUKA Lightweight Robot 4+. Outros objetivos incluem verificar se a aproximação do braço a um sistema de 2ª ordem é viável na análise e determinar a impedância do braço em diferentes direções no espaço.

Neste capítulo é apresentado a motivação por detrás da realização do trabalho, seguido do estado da arte no estudo da dinâmica do braço e por fim, é apresentada a estrutura da dissertação apresentando cada um dos capítulos presentes.

1.1. Motivação

Apesar de há mais de cem anos serem feitos estudos do controlo motor humano, ainda muito é desconhecido sobre os mecanismos fisiológicos envolvidos na realização de movimentos. Estes mecanismos podem ser divididos em duas componentes: a componente neuronal, que engloba mecanismos como a perceção do ambiente através dos sentidos do corpo humano, o processamento da informação, o processo de decisão e o direcionamento da mensagem aos músculos; e a componente biomecânica, que abrange as componentes físicas das articulações como os músculos envolvidos, os ossos, os tendões, entre outros.

Devido à complexidade elevada dos mecanismos envolvidos na geração de movimento nas articulações, pode não ser possível a construção de um modelo matemática e de equações que descrevam completamente este fenómeno. Mesmo assim, o desenvolvimento de modelos matemáticos é profícuo para um conjunto variado de áreas.

Algumas doenças neuromusculares podem alterar a dinâmica do músculo. A realização de experiências em indivíduos com estas doenças pode vir a impulsionar a compreensão da relação destas doenças com as mudanças na dinâmica muscular, promovendo assim uma melhor definição, deteção e tratamento deste tipo de doenças.

O conhecimento da dinâmica duma articulação é importante para a conceção de exercícios de reabilitação de fisioterapia. Ainda na área de reabilitação motora, na construção de próteses ativas, é necessário ter um algoritmo de controlo baseado na articulação substituída.

Na área da robótica colaborativa, num sistema de interação homem-robô, é necessário formular um modelo da componente humana do sistema para implementar o controlo do sistema. Por exemplo, na construção dum exoesqueleto, que tem o objetivo de ampliar a força do utilizador, é necessário implementar o controlo com base na articulação onde é usado, tal como nas próteses ativas.

A modelação da dinâmica humana pode também ter aplicação na indústria do cinema e dos videojogos, podendo ser utilizado para uma animação realista de personagens.

1.2. Estado da arte

Neste subcapítulo são apresentados alguns estudos realizados na área de identificação do braço. Em primeiro lugar apresentam-se os modelos da dinâmica do músculo utilizados na caracterização da articulação. De seguida, são apresentados alguns estudos relacionados com a identificação do braço.

1.2.1. Modelos do músculo

Existem três modelos diferentes de caracterização da dinâmica do músculo na articulação que surgiram ao longo dos anos. O primeiro considera o músculo como um modelo de massa-mola-amortecedor, ou seja, um sistema de segunda ordem, onde a única entrada do sistema é o nível de ativação do músculo, que influencia os seus coeficientes de rigidez e de amortecimento. Tendo em conta a simplicidade do modelo, este apresenta algumas limitações tais como: a existência de apenas uma entrada do sistema ignora outros fenómenos que também se relacionam com a geração da força, como o efeito dos músculos antagonistas em co-contracção no movimento da articulação; o facto dos parâmetros que caracterizam o sistema podem vir a mudar consoante o tipo de movimento efetuado e a postura do indivíduo [1].

O segundo modelo aborda o problema do ponto de vista da engenharia, considera o músculo um sistema “caixa negra” e identifica a sua estrutura e os seus parâmetros com base em experiências [2]. Baseado no modelo de Hill [3], o sistema resulta num modelo não linear de alta ordem descrito por equações diferenciais ordinárias [1].

De uma forma simples, o modelo de Hill pode ser dividido em três componentes não lineares: um elemento elástico em paralelo (PEC na figura 1.1), que simboliza o tecido conjuntivo das fibras, um elemento elástico em série (SEC), que é dada pela contribuição dos tendões no sistema, e um elemento contrativo (CE), que representa a geração de força das fibras musculares e depende dum variado número de fenómenos. Na figura 1.1 são apresentados

dois modelos, A e B. No modelo A, a componente elástica em paralelo está em paralelo com as outras duas componentes, assim é considerado que a componente elástica em paralelo não sofre alterações durante a contração. No modelo B, acontece o oposto, a componente elástica em paralelo apenas está em paralelo com a componente contrativa e, assim, sofre alterações durante a contração [4].

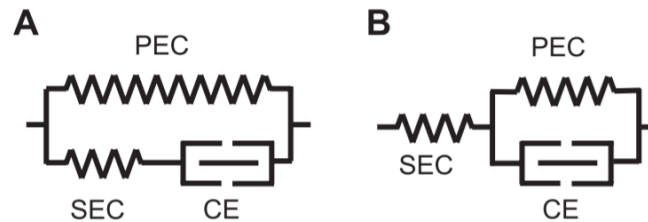


Figura 1.1 – Esquema de dois tipos de modelo Hill [4].

A componente contrativa do sistema pode ser caracterizada por duas relações que dependem ambas do nível de ativação: a relação tensão-comprimento e a força-velocidade [3].

O último tipo de modelo utilizado é baseado na análise dos mecanismos fisiológicos de contração e resulta numa descrição por uma equação diferencial parcial. Iniciado por Huxley [5], neste tipo de modelos, é feita uma identificação do fenómeno de geração de movimento no sarcómero, o elemento unitário do músculo. Apesar de ser mais rigoroso do que os outros modelos, tem uma complexidade matemática muito mais elevada, sendo que os parâmetros necessários à descrição do modelo são difíceis de obter. Por consequência, a utilização deste modelo em casos práticos é limitada [1].

As vantagens e as desvantagens dum modelo de caracterização do músculo baseiam-se na sua complexidade e na sua capacidade de descrever rigorosamente o músculo. Considera-se um bom modelo aquele que consiga manter um equilíbrio entre estes dois critérios e que consiga simular o movimento humano sem alterar os seus parâmetros para diferentes tipos de tarefas. Nos tipos de modelo apresentados, é primeiro apresentado o modelo mais simples e finalmente o modelo mais complexo e, à medida que a complexidade aumenta, a rigorosidade fisiológica do modelo também aumenta. Tendo em conta isto, justifica-se que o segundo modelo apresentado, o modelo do tipo Hill, tenha sido o modelo mais utilizado em estudos do movimento do músculo [2].

1.2.2. Identificação da dinâmica do braço humano

As primeiras medições da impedância do braço humano foram feitas por Mussa-Ivaldi, Hogan e Bizzi [6] em 1985. Foi desenvolvido um método experimental onde foi pedido aos sujeitos que mantivessem a mesma postura enquanto lhes era aplicada uma força na mão, em diferentes direções num plano através de motores de binário. Foram medidos o deslocamento e a força

aplicada na mão antes de haver uma reação voluntária pelo sujeito. Através dos dados retirados, foi observado que a contribuição das forças conservativas foi muito mais elevada que a das forças não conservativas, portanto concluiu-se que comportamento multiarticular era praticamente elástico. Sendo relação entre a força e deslocamento uma relação praticamente linear, foi estimada a rigidez nas várias direções. Desta forma, reparou-se que a rigidez estimada variava na direção da aplicação da força e, assim, para representar graficamente a rigidez direcional do braço, foi criado uma elipse onde pode ser visualizada a rigidez nas diferentes direções (figura 1.2).

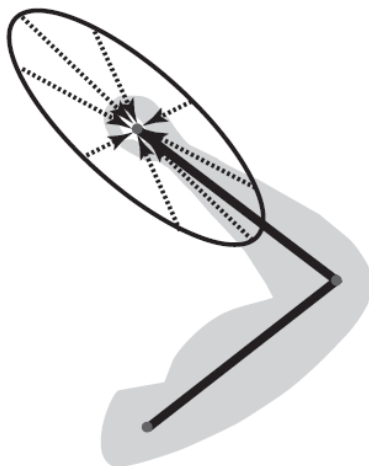


Figura 1.2 - Elipse de rigidez [7].

Foi também concluído neste estudo que a magnitude, a forma e a orientação elipse de rigidez variam com postura do braço. Estas mudanças podem ser observadas em [8], e são apresentadas na figura 1.3. Neste estudo, foram feitos ensaios semelhantes aos ensaios em [6], onde um robô com duas juntas aplicou uma perturbação de posição estocástica à mão do sujeito, que aplica uma força voluntária numa direção, e foi medido a força resultante. Através dos resultados, foi feita uma estimativa não paramétrica da dinâmica resultante e, a partir disso, foi aproximado a um modelo de 2ª ordem com os parâmetros de inércia, viscosidade e rigidez. Foi observado que a rigidez aumenta linearmente com o aumento da geração de força voluntária, e a viscosidade aumenta de forma não linear. A inércia não se altera com a variação do nível da força voluntária. Depois da parametrização, foi possível calcular o coeficiente de amortecimento e reparou-se que era constante e era aproximadamente igual a 0.26, sendo assim categorizado como um sistema sub-amortecido.

Outras estudos, como [9, 10], fizeram também o cálculo da impedância do braço, mas com este em movimento. Nestas experiências foi pedido aos sujeitos que movessem a mão duma posição inicial até uma posição final. Durante este movimento, foi-lhes aplicadas pequenas perturbações de força e foi-lhes pedido que mantivessem o braço o mais relaxado possível de forma a não contrariar as perturbações. Foi observado que a impedância aumentava sobretudo na direção do movimento em comparação com as estimações de impedância com o braço

parado. Este fenómeno foi explicado pelo facto de os sujeitos experimentais estarem a aplicar uma força voluntária para mover o braço.

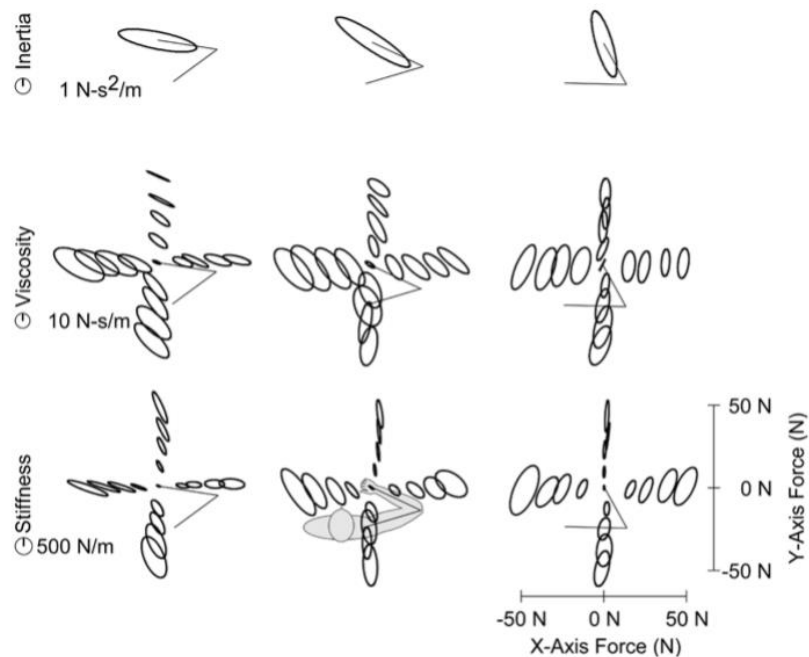


Figura 1.3 – Elipses de inercia (inertia), viscosidade (viscosity) e rigidez (stiffness) dum sujeito que tenta manter uma força constante numa direção x ou y [8].

Nos estudos [29, 30] foram usadas estratégias de eletromiografia (EMG) para monitorizar o nível de contração nos músculos do braço. Estes estudos procuram compreender o efeito do nível de contração dos músculos na impedância total do braço.

Em [22], foi utilizado um servomotor para aplicar uma força ao braço. Durante os ensaios neste estudo, o cotovelo é apoiado no eixo de rotação do servomotor e é pedido ao sujeito para segurar com firmeza um manípulo acoplado a um sensor de força. Desta forma, só é tido em conta a articulação do cotovelo. É aplicada uma perturbação de força gerada através duma soma de sinusoides com frequências entre 0.12 e 15 Hz. Com isto, é estimada a resposta em frequência da dinâmica do braço considerando como entrada o sinal da posição do motor e como sinal de saída a força medida no sensor. Na estimação do modelo da dinâmica do braço foram usadas aproximações a sistemas de 3^a ordem e a sistemas de ordem fracionária, onde foi verificado que os modelos de ordem fracionária tinham uma aproximação superior, com menos parâmetros, com menos incerteza de parâmetros e sem problemas de instabilidade, sugerindo assim a utilização destes modelos na modelação de músculos.

1.3 Estrutura da dissertação

A apresentação do trabalho desenvolvido na presente dissertação de tese é dividida em 7 capítulos. Neste primeiro capítulo foi feita uma pequena introdução do trabalho realizado, foi apresentada a sua motivação e o alguns trabalhos na mesma área.

No capítulo 2 é feita uma introdução do braço humano e de todos os fenómenos que definem a dinâmica do braço humano. No capítulo 3 é descrito o robô KUKA Lightweight Robot 4+ e é explicado a estratégia de controlo adotada. No capítulo 4 são expostos alguns conceitos básicos de identificação de sistemas usados na análise de resultados.

O capítulo 5 expõe os métodos usados na criação do modelo do braço: o procedimento e a configuração experimental, o tratamento e análise de dados e a validação dos métodos numéricos usados. No capítulo 6 são apresentados e discutidos todos os resultados obtidos. Finalmente, no capítulo 7, são feitas as conclusões finais desta dissertação e são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros a realizar.

2. Sistema Fisiológico

Para construir um modelo a dinâmica do braço, é imprescindível fazer uma análise anatômica do sistema em estudo. É importante conhecer os processos fisiológicos que levam à geração de força e a sua relação com parâmetros externos e internos ao sistema.

Neste capítulo são apresentadas os fenômenos fisiológicos responsáveis pela geração de movimento nas articulações e são apresentadas as características do braço que influenciam a sua dinâmica.

2.1. Geração de força no músculo

O tecido muscular é composto por um conjunto de fibras musculares, representado na figura 2.1. Estas fibras musculares são constituídas por um conjunto de miofibrilas, dispostas em paralelo, que por sua vez são constituídas por sarcômeros arranjados em série.

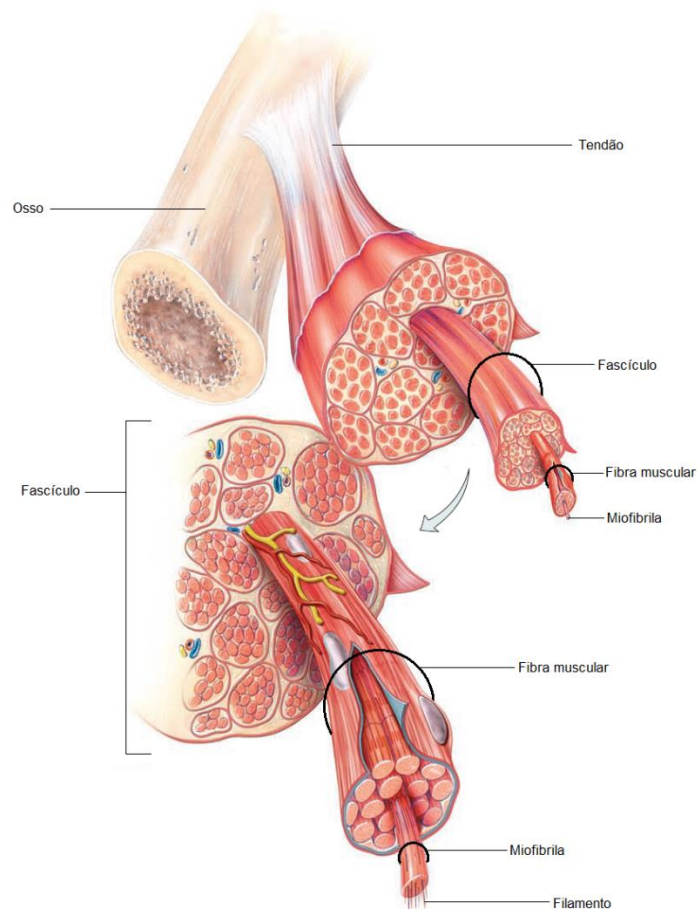


Figura 2.1 – Representação do músculo e das suas componentes [11].

O sarcômero, o elemento unitário mais pequeno do tecido muscular, é responsável pela geração de força fundamental do tecido muscular. Quando relaxado, tem o comprimento de 2 a 3 μm .

Na fronteira de cada sarcômero com o próximo, existe a estrutura de forma hexagonal designada por disco-Z que liga os filamentos de actina entre os dois sarcômeros, representado na figura 2.2. Os filamentos de actina estendem-se do disco-Z até ao centro do sarcômero. Unida também ao disco-Z, está a proteína titina que liga o disco-Z ao filamento de miosina. A proteína titina apresenta um comportamento elástico, sendo assim também responsável pelo comportamento elástico passivo do músculo.

No centro do sarcômero, encontra-se o filamento de miosina, que, em conjunto com o filamento de actina e com a reação com ATP, é responsável pela conversão de energia química em energia mecânica, a geração da força ativa. Durante o processo cíclico de formação e a quebra de ligações entre a miosina e a actina, ligação esta denominada por ponte cruzada, o filamento de actina desliza sobre o filamento de miosina gerando assim o movimento responsável da contração do músculo.

A força gerada por um sarcômero depende dum conjunto de fatores, entre eles os mais importantes são o comprimento atual, a velocidade da mudança de comprimento e o nível de ativação.

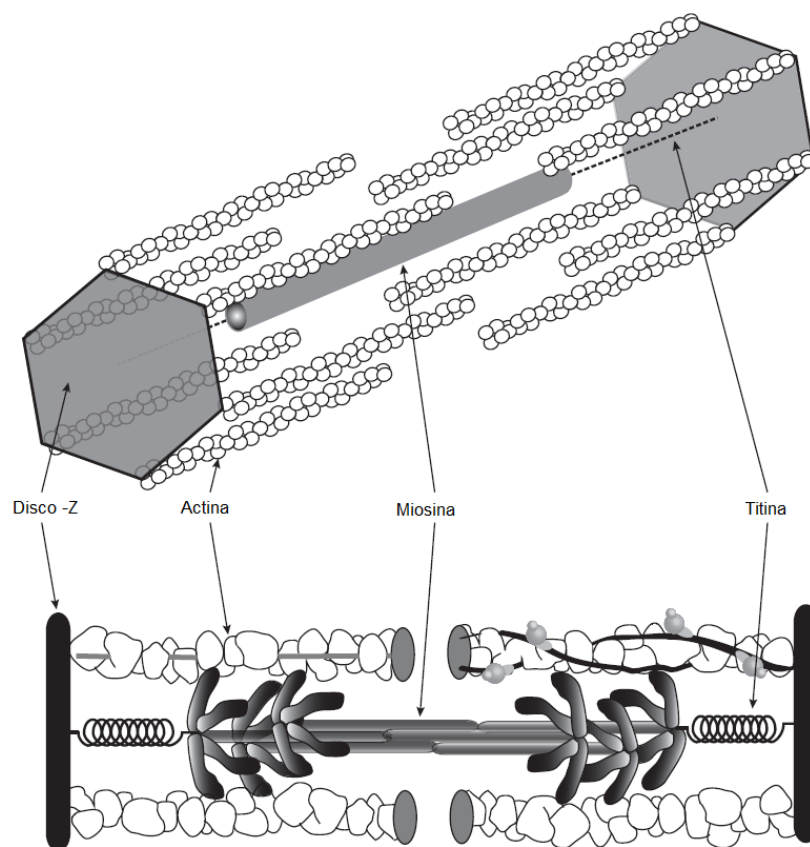


Figura 2.2 - Representação do sarcômero [7].

A formação de pontes cruzadas no sarcômero é controlada pelos nervos motores através do controle de concentração de Ca^{2+} . Com a chegada do impulso nervoso ao nervo motor local, é criado um potencial de ação que por sua vez liberta Ca^{2+} . A concentração de Ca^{2+} funciona como catalisador à formação de pontes cruzadas. Este processo rege o nível de ativação do músculo.

2.2. Configuração do sistema fisiológico

A dinâmica do braço, para além de depender da dinâmica de geração de força no músculo, é definida também pela configuração e a geometria das articulações. O músculo tem a capacidade de gerar forças lineares ao longo da direção das fibras musculares através do processo de contração. No entanto, a maior parte das articulações no corpo humano são definidas pela rotação dum osso sobre outro. Desta forma, a força gerada por um músculo é transferida em forma de binário para a articulação associada. Assim, é necessário perceber este processo da transferência de força para construir um modelo do conjunto.

As forças geradas pelo músculo são transmitidas ao esqueleto através de tendões. Numa articulação uniaxial, o músculo está ligado a dois tendões, cada um conectado a um lado da articulação diferente. Os pontos de ligação dos tendões com o esqueleto são denominados de origem, associado ao lado da articulação “fixo”, e inserção, associado ao lado “móvel”. Em alguns casos, entre a origem e a inserção pode haver mais do que uma articulação, como acontece com os bíceps e os tríceps.

A dinâmica da articulação também é afetada pela dinâmica do tendão. O tendão tem uma rigidez associada que depende da sua área e comprimento. Esta rigidez não é linear, sendo que, até 1% de deformação, esta é muito baixa e depois sobe até 4% de deformação. A partir desse valor assume um valor relativamente constante e com 10% sofre uma rutura [13].

Geralmente, os músculos formam pares agonista-antagonista, onde o antagonista gera força na direção oposta à força gerada pelo músculo agonista. Desta forma, através da ativação do músculo antagonista, é possível baixar mais rapidamente o binário aplicado na articulação em relação ao que aconteceria apenas com o relaxar do músculo agonista.

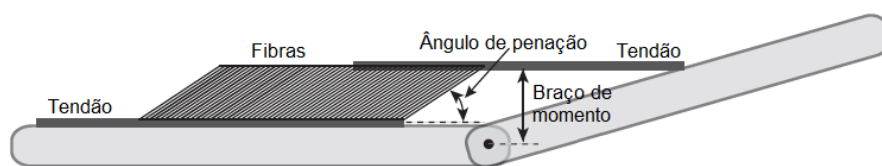


Figura 2.3 - Representação esquemática do músculo [7].

A disposição das fibras musculares também é relevante para a compreensão da articulação. A quantidade de fibras está relacionada com a quantidade de sarcômeros que agem durante o movimento, que por sua vez é proporcional à força gerada pelo músculo. A geometria e o ângulo das fibras musculares também afetam o comportamento mecânica do músculo [12]. O ângulo de penação é o ângulo entre a direção das fibras musculares e o tendão, representado na figura 2.3. Este parâmetro pode variar durante a rotação da articulação e, naturalmente, também está relacionado com a transformação de força linear a binário na articulação.

2.3. Sistema musculoesquelético

O braço é constituído por três articulações que lhe conferem sete graus de liberdade, tornando-se assim redundante no espaço tridimensional. Esta redundância confere ao braço uma liberdade de movimento no espaço nulo, ou seja, para além da posição da mão, também é importante conhecer a postura das restantes articulações, visto que diferentes posturas têm diferentes comportamentos mecânicos.

No ombro está presente a articulação gleno-umeral que, por ser uma articulação esférica entre o úmero e a omoplata, confere ao úmero três graus de liberdade. Os movimentos possíveis do ombro são os movimentos de extensão, flexão, adução, abdução, rotação interna e externa. Na figura 2.4 é apresentada a articulação do ombro.

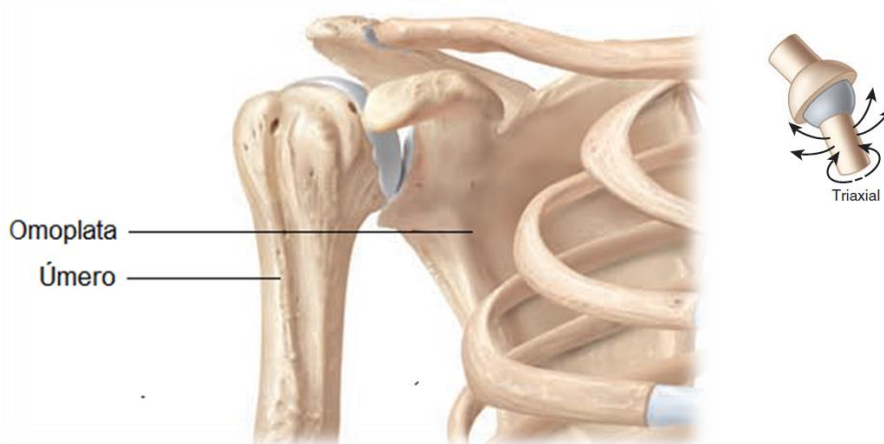


Figura 2.4 – Representação esquelética do ombro [11].

A extensão do úmero tem como agonistas principais o deltoide posterior, o grande dorsal e grande redondo. O movimento oposto, a flexão, tem como agonistas o deltoide anterior, o coracobraquial e a porção clavicular do peitoral. O deltoide anterior e o coracobraquial ainda são responsáveis pela adução, tal como o grande peitoral. A abdução do braço tem como agonista principal a porção média do deltoide. A rotação interno tem um elevado número de

agonistas em relação aos outros movimentos, tais como o grande peitoral, o deltoide anterior, o grande dorsal, o subescapular e o grande redondo. A rotação externa depende apenas de três músculos: o deltoide posterior, o infraespinhoso e o pequeno redondo.

No cotovelo existe a articulação entre o úmero e os ossos do antebraço, rádio e o cúbito. Esta articulação confere ao cotovelo dois graus de liberdade: um movimento do tipo dobradiça, através do movimento do antebraço em torno do cotovelo, e um movimento de rotação do antebraço, através da rotação do rádio em relação ao cúbito. Os movimentos associados ao cotovelo são flexão, extensão, supinação e pronação. Na figura 2.5 apresenta-se a articulação do cotovelo.

A flexão no antebraço tem como principais agonistas o bicípите braquial, o braquial exterior e o braquiorradial. O tricípите braquial é o principal responsável pelo movimento de extensão. O bicípите braquial e o braquiorradial também são agonistas do movimento de supinação, tal como o supinador. Na pronação, os agonistas são o redondo pronador e o quadrado pronador.

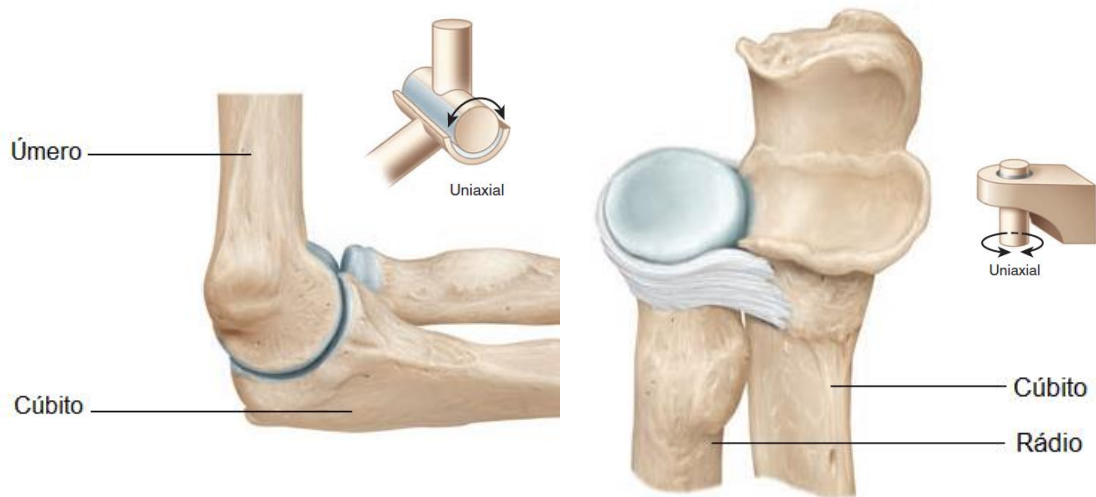


Figura 2.5 - Representação esquelética do cotovelo [11].

Por fim, o pulso é constituído pela articulação do rádio e o cúbito com os ossos do carpo. Esta articulação apresenta dois graus de liberdade. O movimento realizado pelo pulso são flexão, extensão adução e abdução. Na figura 2.6 está apresentado a articulação do pulso.

A flexão da mão tem como agonistas principais o grande palmar e o cubital anterior. Na extensão, são responsáveis o primeiro e o segundo radiais externos e o cubital exterior. O grande palmar, o primeiro e o segundo radiais externos também são agonistas da abdução, enquanto o cubital anterior e o cubital posterior são agonistas das adução.

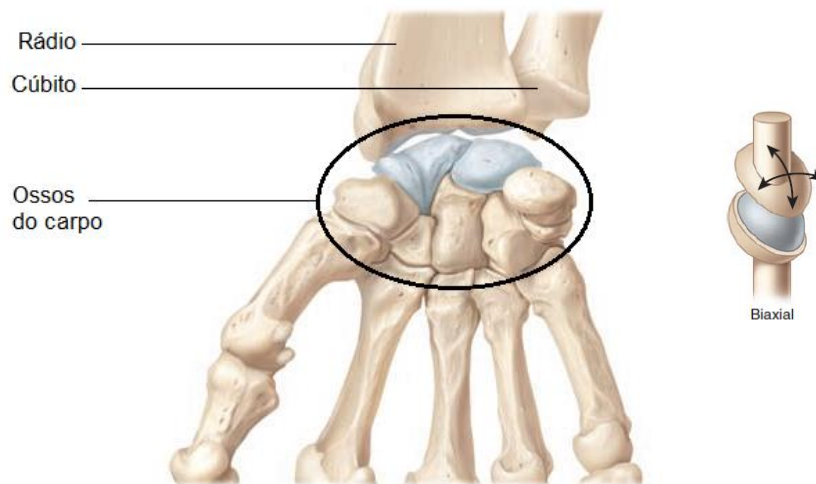


Figura 2.6 – Representação esquelética do ombro [11].

2.4. Representação num diagrama de blocos

Através dos estudo dos mecanismo responsáveis pela geração de movimento na articulação, Kearney e Hunter em [14], representaram a dinâmica do braço num diagrama de blocos. Dada a entrada do diagrama um binário exterior aplicado na articulação e como saída o ângulo dessa mesmo articulação, apresenta-se o diagrama de blocos na figura 2.7.

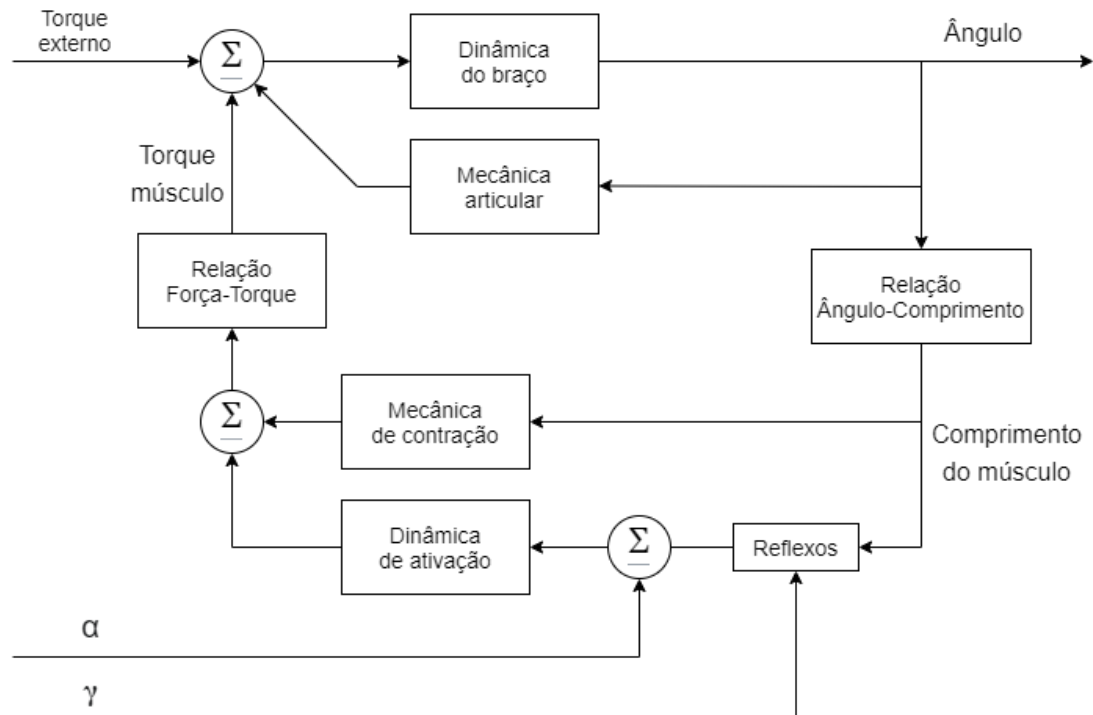


Figura 2.7 - Diagrama de blocos da dinâmica duma articulação [14].

I. Dinâmica do braço

O bloco correspondente à dinâmica do membro representa a dinâmica rotação da articulação. Se for uma articulação com apenas um eixo de rotação, seguindo a segunda lei de Newton, a relação entre o binário o ângulo da articulação pode ser representado pela equação 2.1.

$$I \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \tau(t) \quad (2.1)$$

Onde I representa o momento de inércia, θ o ângulo da articulação, τ o binário total aplicado na articulação e t representa o tempo.

II. Mecânica articular

A mecânica articular engloba todas as propriedades viscoelásticas dos componentes que constituem a articulação como os ligamentos e os tecidos de conexão. Estes componentes têm normalmente pouco efeito na dinâmica do movimento da articulação, no entanto, começam-se a sentir os efeitos destes componentes no limite do movimento.

III. Mecânica da contração

Este bloco faz parte da mecânica muscular e representa a força aplicada pelo músculo quando o nível de ativação se mantém constante. Sendo um músculo um órgão tão complexo, como descrito no subcapítulo 2.1, este componente da dinâmica da articulação é um dos mais difíceis de modelar.

IV. Dinâmica de ativação

Como visto no subcapítulo 2.1, a força gerada pelo músculo depende do nível de ativação do mesmo. Este bloco representa as mudanças do nível de ativação que podem depender de reflexos involuntários como também de mudanças voluntárias ao movimento.

Em condições normais, o nível de ativação e comprimento do músculo alteram-se ao mesmo tempo em movimentos quotidianos e, assim, é concluído que ocorrem interações entre a dinâmica de ativação e a mecânica de contração. Sabe-se que a mecânica de contração muda drasticamente com a mudança de nível de ativação, contudo, para além deste comportamento, as interações entre a dinâmica de ativação e a mecânica de contração não são facilmente modeladas.

V. Comandos nervosos e reflexos

Os sinais α e γ representam os comandos nervosos que, em conjunto com os reflexos, são responsáveis pela regulação o nível de ativação do músculo.

VI. Relação entre grandezas lineares e angulares

Na modelação do bloco da relação entre o ângulo da articulação e o comprimento do músculo, é necessário conhecer a posição de origem e de inserção. Também é necessário ter em consideração a dinâmica do tendão, que pode vir a ter um elevado efeito na dinâmica geral da relação, como visto no subcapítulo 2.2.

É modelado também um bloco de relação entre a força do músculo e o binário aplicado na articulação. A identificação do binário calculado através da força do músculo se for conhecido o ângulo de penação do músculo e a alavanca criada pela força no eixo de rotação. O problema inverso, o do cálculo da força do músculo conhecendo o binário, é mais complexo visto que, usualmente, existem vários músculos a atuar numa articulação.

3. KUKA Lightweight Robot 4+

Neste capítulo é apresentado a ferramenta principal na realização dos ensaios, o KUKA Lightweight Robot 4+. São descritas algumas características do robô, os métodos de comunicação com o robô utilizados e as estratégias de controle usadas na realização dos ensaios.

3.1. Descrição do braço robótico

O KUKA Lightweight Robot 4+, ou LWR, é um braço robótico desenvolvido pela KUKA Roboter GmbH em colaboração com o Instituto de Robótica e Mecatrônica do Centro Aeroespacial Alemão [19]. O LWR tem 7 juntas de rotação, o que o torna redundante no espaço tridimensional. Todas as juntas têm instalado sensores de posição e de binário, dando ao robô a capacidade de ser operado com entradas de posição, de velocidade ou de binário. O controle do robô é feito através do seu controlador, representado na figura 3.1, que por sua vez está ligado a um *teach pendant* operado pelo utilizador.

A interação com o LWR pode ser feita através da KUKA *Robot Language* ou através do *Fast Research Interface* (FRI). Nesta tese, foi utilizado o FRI uma vez que com esta estratégia é possível alterar mais facilmente os parâmetros principais do controle, sendo assim mais indicada para as experiências realizadas.

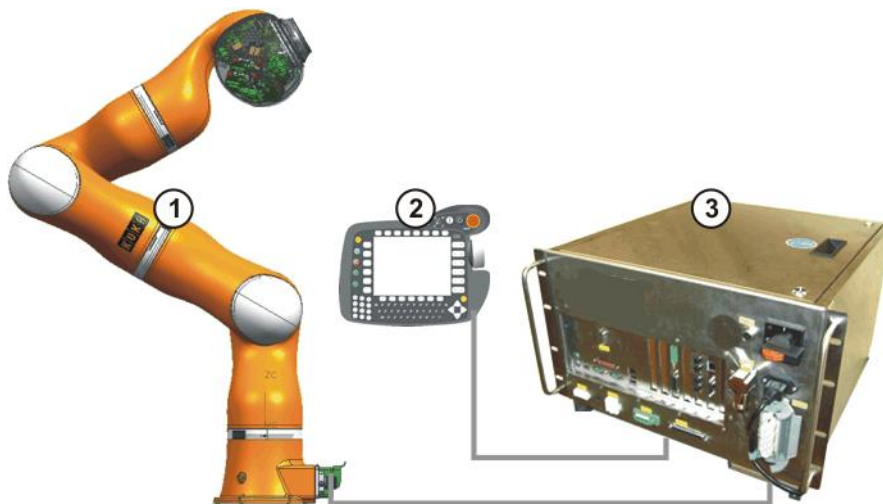


Figura 3.1 – Representação da configuração do LWR adaptada de [15]: 1) Manipulador robótico; 2) Teach pendant; 3) Controlador.

3.2. Fast Research Interface

O FRI é uma interface integrada no LWR que permite ao utilizador aceder ao controlo do robô através de um computador externo em “tempo real”. Esta interface foi desenvolvida particularmente para a realização de experiências laboratoriais [15].

Na utilização do FRI, foi adotada uma estratégia semelhante à utilizada por Žlajpah e Petrič [20]. Nesta estratégia são utilizados dois computadores adicionais, denominados como *host* e *target*, representados na figura 3.2. Na figura 3.3 é feita uma representação esquemática da transferência de dados entre os diferentes dispositivos.

No controlador do robô é inicializado um ficheiro FRI que tem a função de configurar a ligação com o computador *target*, receber e enviar os dados necessários ao controlo do robô.

No computador *host* é implementado o programa *server* em *Simulink*, representado na figura 3.5, que é convertido num programa em linguagem de programação *C*, compilado e é enviado como aplicação *Simulink Real-Time* ao *target*. É também no programa *server*, no *host*, que é feita a interação do utilizador com o controlador do robô. Neste computador, foi também implementada uma animação para visualizar o robô.

O computador *target* é inicializado com o sistema operativo do *Simulink Real-Time* e tem a função de executar a aplicação gerada pelo *host*. Ao *target* estão ligados o *host* e o controlador do robô. Estas ligações são feitas através de cabos *ethernet*, com o protocolo de comunicação UDP, de forma a garantir o tempo de amostragem requerido para a comunicação em “tempo real”. No ecrã do *target*, são disponibilizados alguns dados referentes ao robô, como a posição de juntas, o torque aplicado nas juntas e a massa aparente.

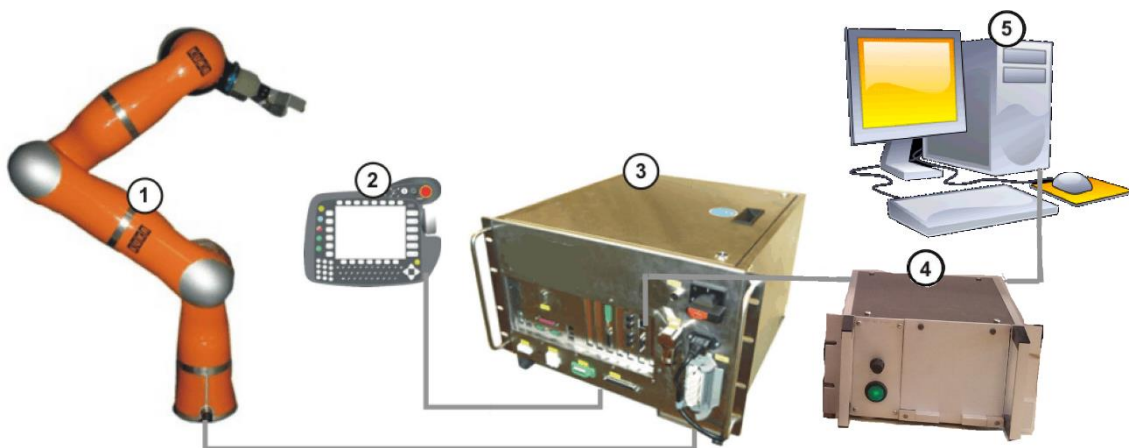


Figura 3.2 - Representação da configuração do LWR [20]: 1) Manipulador robótico; 2) Teach pendant; 3) Controlador; 4) Computador target; 5) Computador host.

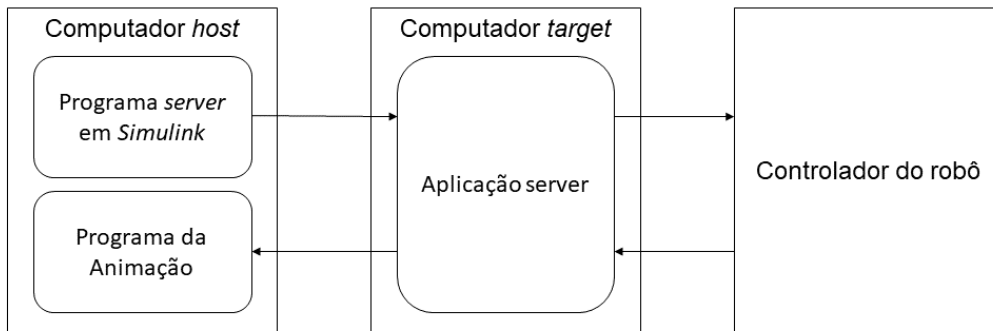


Figura 3.3 – Diagrama de fluxo de dados.

3.3. Programa server

Para programa server no computador *host*, foi utilizado o ficheiro *simulink* desenvolvido em [20]. Este programa pode ser dividido em quatro blocos, apresentadas na figura 3.4: os blocos de recepção e envio de dados do controlador do robô, o controlador principal e um bloco de recepção de dados para o controlo do robô.

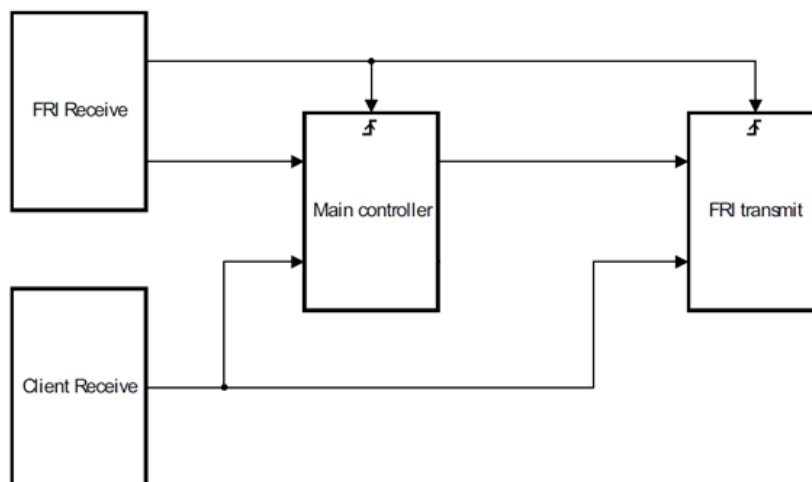


Figura 3.4 - Diagrama de blocos do programa server, adaptado de [20].

O bloco *FRI Receive* tem a função de receber os dados referentes ao robô, como a posição de juntas, a posição cartesiana, o binário de gerado nas juntas, a força sentida no *end effector*, o jacobiano, a matriz massa, entre outros. O bloco *FRI Transmit* envia os dados necessários ao controlador do robô, como a posição de juntas ou a posição cartesiana desejada e os dados de impedância necessários para a estratégia de controlo em funcionamento.

O *main controller*, ou controlador principal, recebe a informação dos blocos de receção de dados do controlador do robô e do *client*, processa a informação e envia os dados para os blocos de envio. O processamento de informação pode ser revisto em [20].

Como na abordagem utilizada não é utilizado um dispositivo externo *client* de interface com o utilizador, foram feitas alterações no ficheiro original. No bloco *client Receive* foi removido a parte de receção de dados dum dispositivo externo e foi criada uma componente de geração de entrada. É neste bloco que é feito o controlo do utilizador: é escolhida a estratégia de controlo e são definidos os parâmetros necessários à estratégia escolhida. No ficheiro original, existe um bloco *client Transmit* que foi totalmente removido, uma vez que os dados são mostrados ao utilizador através do ecrã do computador *target* e, depois de concluído o ensaio, são enviados para o computador *host* para análise. Desta forma, o esquema do programa final é apresentado na figura 3.5.

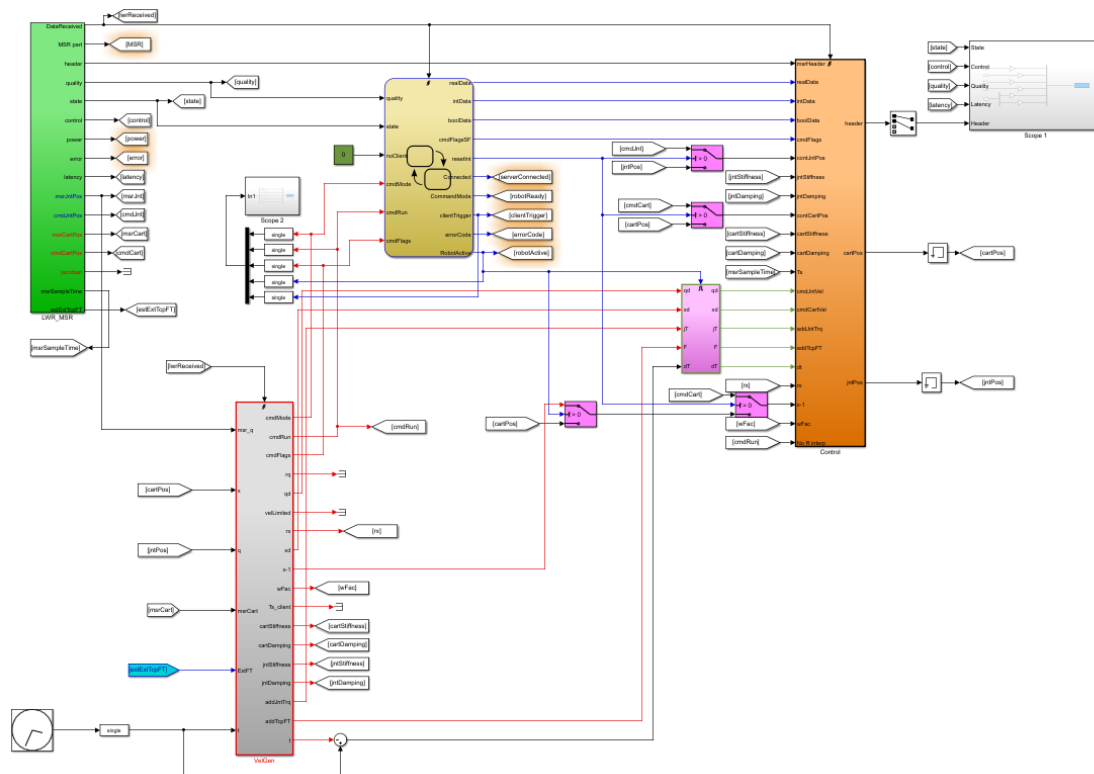


Figura 3.5 – Programa server em Simulink: FRI Receive a verde, main controller a amarelo, FRI Transmit a vermelho e client Receive a cinzento.

Os blocos *main controller* e *FRI Transmit* só são ativados quando é recebida os dados do robô no bloco *FRI Receive*. Isto acontece porque o tempo de amostragem do programa *server* não igual ao tempo de amostragem do controlador do robô. Enquanto o programa *server* tem um tempo de amostragem igual a 0.2 ms, o controlador do robô funciona a 1 ms e, desta forma, só são recebidos dados do robô com o tempo de amostragem do controlador do robô. Por esta razão, também é necessário a interpolação dos dados. Este cálculo é realizado no bloco *client Receive*.

3.4. Estratégias de controlo

A interface FRI tem dois estados: o *Monitor mode* e o *Command mode*. No *Monitor mode* é apenas disponibilizado ao utilizador a informação do robô, como a posição e o binário realizado pelas juntas. Apenas quando a qualidade da comunicação é assegurada, é possível enviar o sinal de mudança de estado para *Command mode*. Neste estado é possível enviar comandos ao braço robótico em “tempo real”.

No *Command mode*, são possíveis três estratégias de controlo apresentadas abaixo:

I. Controlo de posição de juntas

Nesta estratégia é controlada a posição das juntas do robô e a sua rigidez é elevada. O robô segue a regra de controlo da equação 3.1.

$$q_r = q_d \quad (3.1)$$

Onde q_r é um vetor das posições de juntas reais e q_d representa a posição das juntas desejado. Nesta estratégia, q_d é o único parâmetro que pode ser alterado pelo utilizador.

II. Controlo de impedância de juntas

Nesta estratégia o robô move-se no espaço de juntas e o utilizador pode alterar a impedância sentida em cada junta. Ou seja, cada junta funciona como um sistema massa-mola-amortecedor onde a massa é uma propriedade que dependa do peso de cada componente e da configuração do robô. A posição de referência, a taxa de amortecimento e a rigidez para cada junta são definidas pelo utilizador. A regra de controlo seguida é a da equação 3.2.

$$\tau_{cmd} = k_{jnt}(q_d - q_r) + \beta_{jnt} + f_{dyn}(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d) + \tau_d \quad (3.2)$$

Onde τ_{cmd} é o binário enviado às juntas do robô, τ_d é o binário adicional em cada junta desejado pelo utilizador e f_{dyn} representa o modelo dinâmico do robô. A rigidez das juntas é representada na matriz k_{jnt} e o amortecimento no vetor β_{jnt} .

Quando a rigidez de todas as juntas é definida a zero, o robô entra num estado de compensação gravítica. Isto é, neste estado a força dos motores compensa apenas a força do peso do robô e a maior parte da sua inércia, mantendo-se em repouso se não tiver perturbações e movendo-se facilmente com aplicação forças exteriores.

III. Controlo de impedância cartesiano

Nesta estratégia o robô move-se com a posição cartesiana do *end effector* como referência. O utilizador pode especificar a posição e impedância cartesiana. Ou seja, o comportamento do robô assemelha-se a um sistema composto por seis sistemas massa-mola-amortecedor a atuar em direções diferentes de movimento (três dimensões lineares e três angulares). A massa do sistema análogo é a massa aparente no *end effector* e os parâmetros de rigidez e taxa de amortecimento são definidos pelo utilizador. É seguida a regra de controlo da equação 3.3.

$$\tau_{cmd} = J^T(k_{car}(x_d - x_r) + \beta_{car} + F_d) + f_{dyn}(q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d) \quad (3.3)$$

Onde J é o jacobiano do robô, x_d e x_r são as posições cartesianas do *end effector* desejadas e reais, respetivamente, e F_d é a força adicional dada pelo utilizador. A matriz k_{car} e o vetor β_{car} representam a rigidez e o amortecimento, respetivamente, sentidas no *end effector*. É possível definir uma rigidez e um amortecimento diferente para cada uma das seis dimensões espaciais.

Como o robô é redundante no espaço, existem várias configurações que servem de solução à pose de referência. Este conjunto de soluções é denominado como espaço nulo. Assim, surge a necessidade de controlar este espaço nulo, que é feito numa forma semelhante ao controlo de impedância de juntas. São definidos pelo utilizador a posição das juntas desejada e a impedância do espaço nulo, a sua rigidez e taxa de amortecimento. A definição da posição de juntas deve ser coerente com a posição cartesiana do robô, assim, é calculada a cinemática inversa do robô e é dado o resultado como referência da posição de juntas.

Também nesta estratégia de controlo, se for colocada a rigidez em cada uma das direções a zero, o robô entra num estado de compensação gravítica.

3.5. Animação

De forma a poder visualizar o robô, o binário gerado nas juntas e a força aplicada no *end effector*, foi criada uma animação noutra ficheiro *simulink* que é implementado e inicializado no computador *host*. Com esta animação pretende-se observar a configuração do robô, o binário gerado nas juntas e a força aplicada no *end effector* podendo assim ser utilizado como feedback visual nos ensaios.

Como visto no subcapítulo 3.2, já existe uma ligação por cabo *ethernet* entre os dois computadores. Assim, foi estabelecido uma comunicação entre o programa *server*, executado no computador *target*, e o programa da animação no *host*, como apresentado na figura 3.3.

O *simulink Real-Time* permite marcar sinais do programa *server* com a etiqueta *xPCTag* para que sejam enviados para outro programa *simulink*. Desta forma, foram marcados os sinais do bloco *FRI Receive*, que nele contém as informações recebidas diretamente do robô como a

posição das juntas, o binário gerado em cada uma delas e a força aplicada no *end effector*. Estes sinais marcados são enviados para o programa da animação através de blocos *From target*. Os sinais destes blocos servem de parâmetros da animação criada em *VRML*.

Foram definidos oito referenciais, o referencial da base e os referenciais de junta do robô, que são definidos pela matriz de parâmetros de Denavit–Hartenberg do robô. Ou seja, a posição do referencial da primeira junta, depende da posição ângulo da junta e da posição do referencial da base, onde os restantes referenciais dependem da posição do referencial anterior e do ângulo da respetiva junta. Os dados de posição das juntas definem a configuração do robô na animação. Na animação, os referenciais são substituídos pela geometria das peças do robô, representado assim todo o robô na animação. O referencial da junta 7 não foi substituído, representando assim o referencial do *end effector*. Este referencial é representado nos vetores a preto na figura 3.6 com as direções x , y e z .

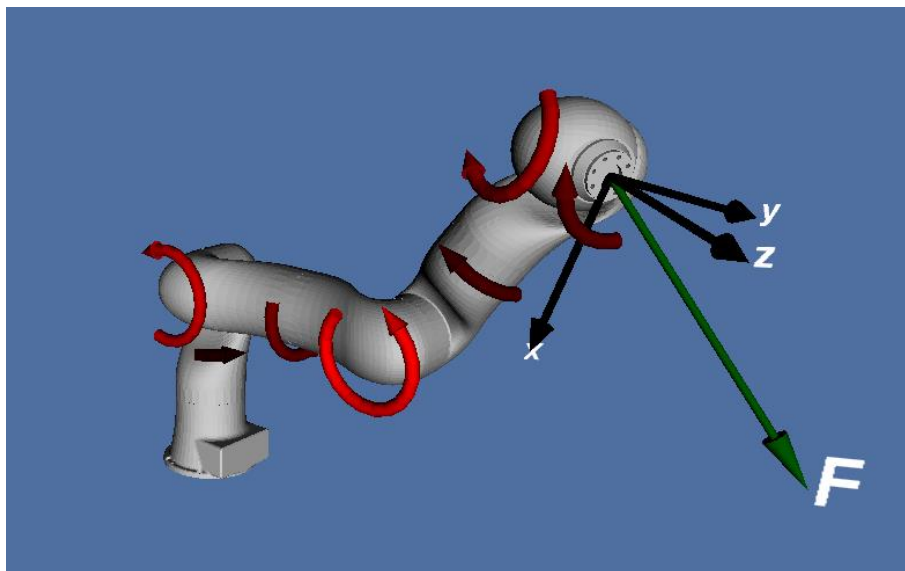


Figura 3.6 – Animação do braço robótico.

As setas circulares a vermelho representam o binário gerado nas juntas do robô. Dependendo dos dados de binário recebidos, estas setas mudam gradualmente de cor e de tamanho, sendo vermelhos e mais compridas com binários elevados e, com o binários inferiores, perdem a cor vermelha para preto e são mais curtas. A orientação da seta muda consoante o sinal do binário recebido, apontando sempre na direção do binário real gerado. Estas setas alteram a sua posição tendo em conta a posição da câmara da animação, estando sempre do lado mais visível ao utilizador.

Foi criado também um vetor da força externa no *end effector*. Este vetor é representado a verde, perdendo a cor para preto quando a força aplicada é menor, como as setas de binário. O valor de força é recebido do bloco *From target* nas três componentes cartesianas x , y e z . Com os valores de força recebidos, é calculado o vetor da força num sistema de coordenadas

esféricas, onde é definido o módulo da força e a sua direção. O módulo da força é representado pelo tamanho do vetor e a direção da força pela direção do vetor na animação.

Foi ainda implementado um sensor do rato para controlo da posição de câmara. O sensor é definido por um plano entre a câmara e a animação do robô e é ativado com o pressionar do botão esquerdo do rato. Na janela de visualização da animação, quando pressionado o botão, se o rato for arrastado para a esquerda ou para a direita, a câmara tem um movimento circular em torno do robô segundo o eixo vertical. Caso o rato seja arrastado para cima ou para baixo, a câmara move-se em torno dum eixo horizontal paralela plano da câmara, mantendo sempre a mesma distância à base do robô.

4. Identificação de sistemas

Neste capítulo são introduzidos alguns conceitos básicos de identificação de sistemas e são apresentadas as estratégias de identificação.

4.1. Sistema de 2ª ordem

A maior parte dos sistemas utilizados e analisados nos ensaios realizados nesta tese são sistemas de 2ª ordem, ou seja, sistemas com dois polos. Na definição de sistemas de 2ª ordem sem zeros são necessários três parâmetros: o ganho estático K_0 , a frequência de corte, ou frequência nominal, ω_n e a taxa de amortecimento ξ . Na equação 4.1 é apresentada a função transferência típica dum sistema de 2ª ordem sem zeros.

$$H(s) = K_0 \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.1)$$

Através de observação do diagrama de bode, apresentado na figura 4.1, um sistema de segunda ordem sem zeros é facilmente identificável tendo em conta a sua forma simples. Uma década antes da frequência natural do sistema, o ganho do sistema é constante e é equivalente ao ganho K_0 , enquanto a fase é igual a 0° . Uma década depois, o ganho desce a 40 dB por década e a fase é igual -180° . Na zona da frequência natural, o comportamento é descrito pela taxa de amortecimento. Quanto menor a taxa de amortecimento, maior a oscilação no ganho e mais rápida é a transição de fase de 0 para -180° .

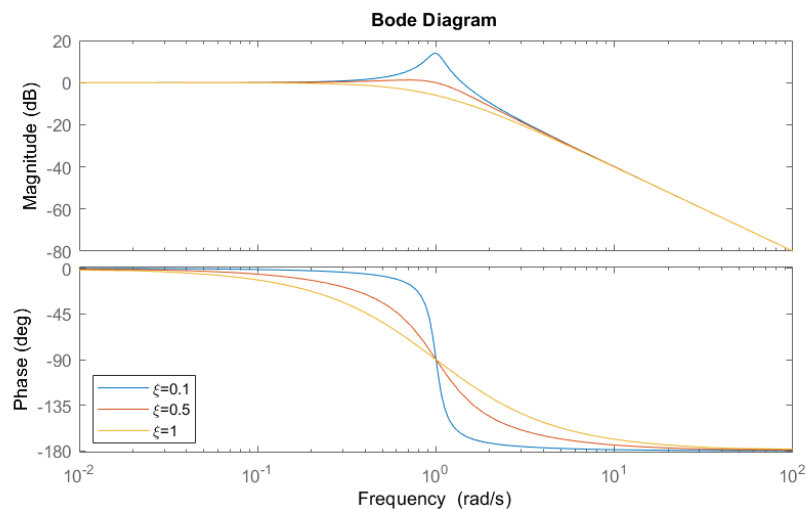


Figura 4.1 - Diagrama de Bode dum sistema de 2ª ordem sem zeros para $K_0 = 1$, $\omega_n = 1$ e para diferentes valores de ξ .

Um sistema massa-mola-amortecedor é um sistema mecânico de 2º ordem sem zeros. É composto por uma massa M , uma mola de rigidez k e um amortecedor com um coeficiente de amortecimento β , apresentados na figura 4.2.

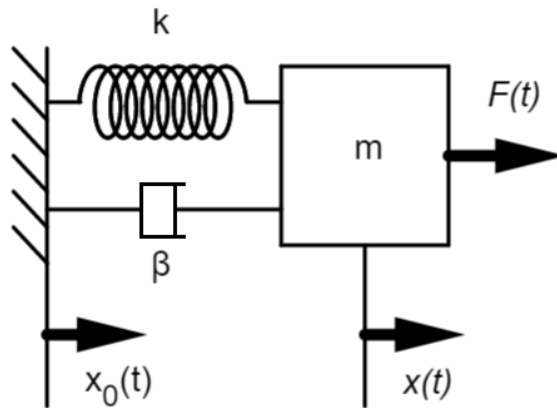


Figura 4.2 - Sistema mecânico massa-mola-amortecedor.

Considerando uma força $f(t)$ aplicada na massa, pode-se escrever uma a relação entre esta e o deslocamento da massa $x(t)$ através da equação 4.2.

$$f(t) = M \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \beta \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) \quad (4.2)$$

Aplicando a transformada de Laplace, onde $\mathcal{L}[x(t)] = X(s)$ e $\mathcal{L}[f(t)] = F(s)$, e arranjado a expressão de forma que fique uma função transferência, obtém-se a equação 4.3.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{k} \frac{\frac{k}{M}}{s^2 + \frac{\beta}{M}s + \frac{k}{M}} \quad (4.3)$$

Comparando esta função transferência com a função transferência típica apresentada na equação 4.1, obtém-se as seguintes relações de parâmetros nas equações 4.4, 4.5 e 4.6.

$$K_0 = \frac{1}{k} \quad (4.4)$$

$$2\xi\omega_n = \frac{\beta}{M} \quad (4.5)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k}{M} \quad (4.6)$$

Nesta tese também são realizados ensaios com uma perturbação de posição de referência. Desta forma, obtém-se uma força exterior nula e pretende-se analisar a relação entre a posição real x com a posição de referência x_0 . Admitindo que o amortecimento é feito em relação a um referencial exterior estático, a relação entre a posição real e de referência é apresentada na equação 4.7 e a função de transferência dela derivada apresenta-se na equação 4.8.

$$0 = M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \beta \frac{dx(t)}{dt} + k(x(t) - x_0(t)) \quad (4.7)$$

$$\frac{X(s)}{X_0(s)} = \frac{\frac{k}{M}}{s^2 + \frac{\beta}{M}s + \frac{k}{M}} \quad (4.8)$$

Neste caso, como o ganho da relação entre a posição real e a posição de referência é unitário, só restam duas relações entre os dois parâmetros. Desta forma, se for obtida uma função de transferência numérica e seja necessário obter os parâmetros M , β e k , é necessário conhecer *a priori* um dos parâmetros.

4.2. Conceitos básicos sobre processos estocásticos

Um processo estocástico é um conjunto de funções aleatórias que podem ser descritas pelos mesmos parâmetros probabilísticos, como a função densidade e a média. Antes do cálculo da relação de entrada com a saída, explicada na secção 4.3, é necessário introduzir alguns parâmetros probabilísticos. Os primeiros são a auto correlação $R_{xx}(\tau)$ e a correlação cruzada $R_{xy}(\tau)$, entre dois sinais $x(t)$ e $y(t)$, que são calculados através do valor esperado E do produto entre os sinais (equações 4.9 e 4.10).

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t) x(t + \tau)] \quad (4.9)$$

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t) y(t + \tau)] \quad (4.10)$$

Um outro parâmetro essencial à análise é a densidade espectral $S_{xx}(f)$ e a densidade espectral cruzada $S_{xy}(f)$ que são calculadas através das transformadas de Fourier da auto correlação e da correlação cruzada (equações 4.11 e 4.12).

$$S_{xy}(f) = \mathcal{F}[R_{xy}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (4.11)$$

$$S_{xx}(f) = \mathcal{F}[R_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (4.12)$$

O último parâmetro a apresentar é a função de correlação entre dois sinais C_{xy} . Este parâmetro permite concluir a relação entre duas variáveis, sendo que, para um sistema perfeito linear de parâmetros constantes com uma saída e uma entrada, esta função é igual a 1 em todo o seu domínio. Na situação real, se a função coerência não tiver valores perto de 1, conclui-se que o sistema é perturbado por ruído exterior, não é linear ou a potência do sinal de entrada é baixa. De qualquer das formas, é impossível criar um modelo de sistema de entrada e saída única fiável. O cálculo deste parâmetro é apresentado na equação 4.13.

$$C_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (4.13)$$

Nesta tese, é usado como perturbação de entrada um sinal de um processo estocástico denominado como ruído branco. O ruído branco é caracterizado por uma densidade espectral constante para todas as frequências, uma média nula e um valor quadrático médio infinito, sendo assim um sinal com potência infinita. Este tipo de sinais pode ser emulado com uma largura de banda limitada, ou seja, com uma densidade espectral constante dentro dum intervalo escolhido e nula nas restantes frequências, onde o valor quadrático médio é finito.

4.3. Relação entrada-saída (input-output)

Assumindo que um sistema determinístico de entrada e saída únicas, definido por uma função no tempo t de parâmetros constantes $h(t)$ e uma função de transferência $H(f)$ de resposta em frequência f , é submetido a uma entrada bem definida $x(t)$ calculado a partir dum processo estocástico e produz uma saída bem definida $y(t)$, esta saída pertence também a um processo estocástico. Em condições ideais, a saída $y(t)$ é dada pelo integral de convolução descrito na equação 4.14.

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) x(t - \tau) d\tau \quad (4.14)$$

Desta relação, pode-se substituir t por $t + \tau$, trocar τ por α e multiplicar $x(t)$ a ambos os lados da equação, é alcançada a equação 4.15.

$$x(t)y(t + \tau) = \int_0^{\infty} h(\alpha) x(t) x(t + \tau - \alpha) d\alpha \quad (4.15)$$

A partir desta equação, calculando o valor esperado, simbolizado por E , de ambos os lados a partir da definição de função de correlação cruzada na equação 4.10 e a função de auto correlação na equação 4.9, obtém-se a equação 4.16.

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} h(\alpha) R_{xx}(\tau - \alpha) d\alpha \quad (4.16)$$

Aplicando a transformada de Fourier, onde $S_{xy}(f)$ é a densidade espectral cruzada de $x(t)$ e $y(t)$, calculada a partir da transformada de Fourier da função de correlação cruzada, e $S_{xx}(f)$ é a densidade espectral de $x(t)$, obtida através da transformada de Fourier da função de auto correlação, pode se escrever a equação 4.17.

$$S_{xy}(f) = H(f) S_{xx}(f) \Leftrightarrow H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (4.17)$$

Assim, com esta expressão, através do cálculo da densidade espectral cruzada e da densidade espectral com a análise dos dados de entrada e saída obtidos, é possível determinar a relação entre a entrada e a saída do sistema na resposta em frequência, apresentada na equação 4.18, onde $X(f)$ e $Y(f)$ representam a transformada de Fourier dos sinais $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente.

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (4.18)$$

5. Métodos

Neste capítulo é descrito o procedimento dos ensaios e os tipos de perturbação usados, são explicados os tipos de ensaios realizados e o método de identificação usado para modelar o braço. No último subcapítulo, é apresentado a validação do método numérico usado na identificação

5.1. Procedimento

Nos ensaios realizados, é utilizado o robô KUKA LWR 4+ para aplicar uma perturbação no braço em repouso. Para isso, foi impressa uma peça de ligação entre o braço robótico e o braço do sujeito experimental. Esta peça pode-se designar como um manípulo simples aparafusado ao *end effector* do robô e é segura com a mão pelo sujeito experimental.

O primeiro passo do procedimento experimental é usar o controlo de posição do robô, descrito no subcapítulo 3.4, e colocar o robô na configuração inicial usada nos ensaios. Depois disso, a estratégia de controlo é alterada para controlo de impedância cartesiana, onde é definido a posição do *end effector*, a rigidez e o amortecimento nas seis coordenadas espaciais e a posição, a rigidez e o amortecimento do espaço nulo. De seguida, com o robô preparado para o ensaio experimental, é pedido ao sujeito que se sente na cadeira e que segure o manípulo com mão. Finalmente, é aplicada uma perturbação durante 30 segundos e são recolhidos e analisados os dados.

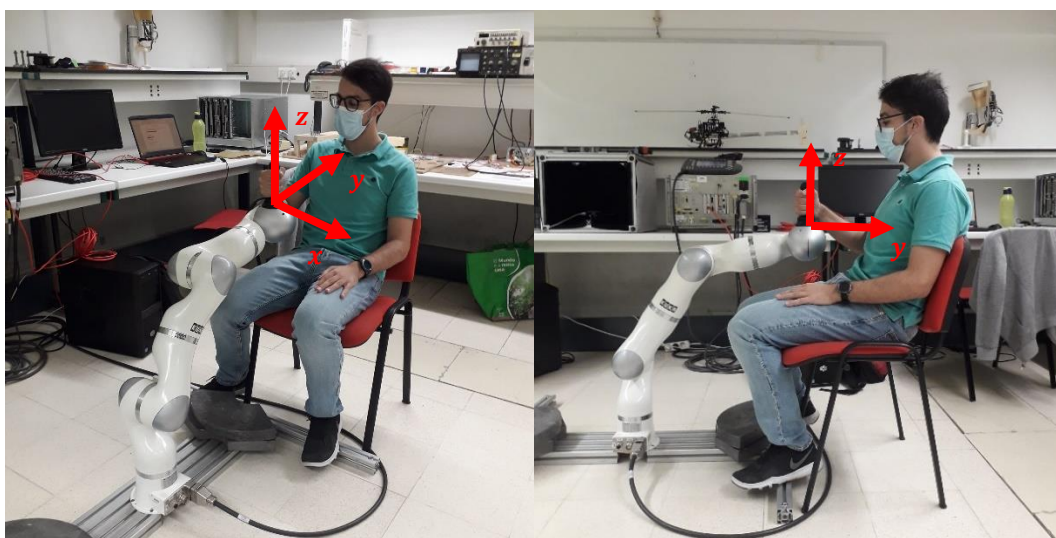


Figura 5.1 – Robô e sujeito experimental durante um ensaio.

Para este procedimento experimental, foram implementadas medidas de segurança: no ficheiro FRI, estão presentes limitadores de posição, velocidade e de força; no programa *server* existem interpoladores de posição que calculam a trajetória considerando uma velocidade máxima definida pelo utilizador. Para além destas medidas, existe um botão de segurança no *teach pendant* que trava todas as juntas do robô e está, em toda a duração do ensaio, na posse do utilizador.

5.2. Perturbação

Para a estimação da impedância mecânica do braço utilizando o método de identificação apresentado no capítulo 4, foi criado um sinal composto pela soma de sinusoides, que emula ruído branco para uma determinada gama de frequências, isto é, a densidade espectral de potência do sinal de entrada é constante numa gama de frequências entre 0.1Hz e 15Hz. Escolheu-se este intervalo de frequências com base na suposição de que a dinâmica do braço tem uma largura de banda até aos 10 Hz, como é feito em [22].

Sendo A_n a amplitude da senoide n , f_n a frequência que tem valores aleatórios entre o intervalo de 0.1 a 15 Hz, θ_n a fase inicial da senoide e 20 000 o número de sinusoides, escreve-se o cálculo do sinal de referência s_r na equação 5.1. A figura 5.2 apresenta o espectro de potência do sinal resultante e na figura 5.3 é apresentado o sinal resultante no tempo.

$$s_r = \sum_{n=1}^{20\,000} A_n \sin(2\pi f_n t + \theta_n) \quad (5.1)$$

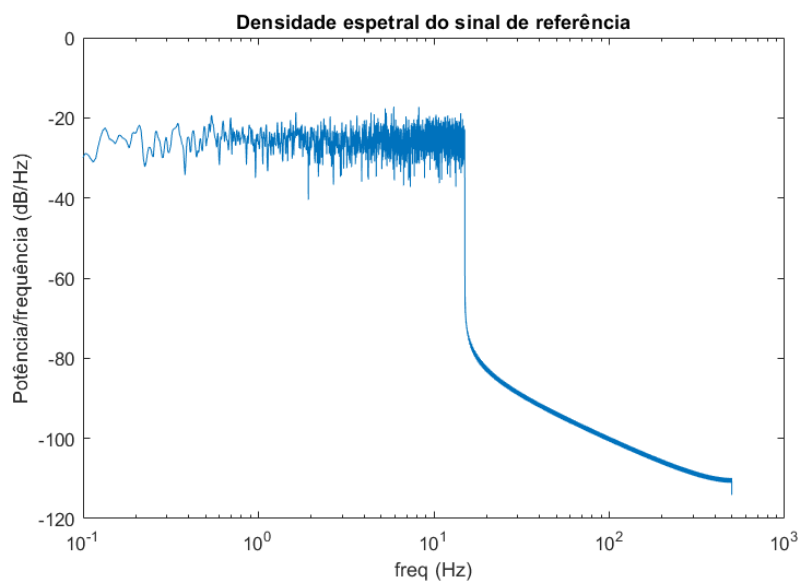


Figura 5.2 - Densidade espectral do sinal de referência.

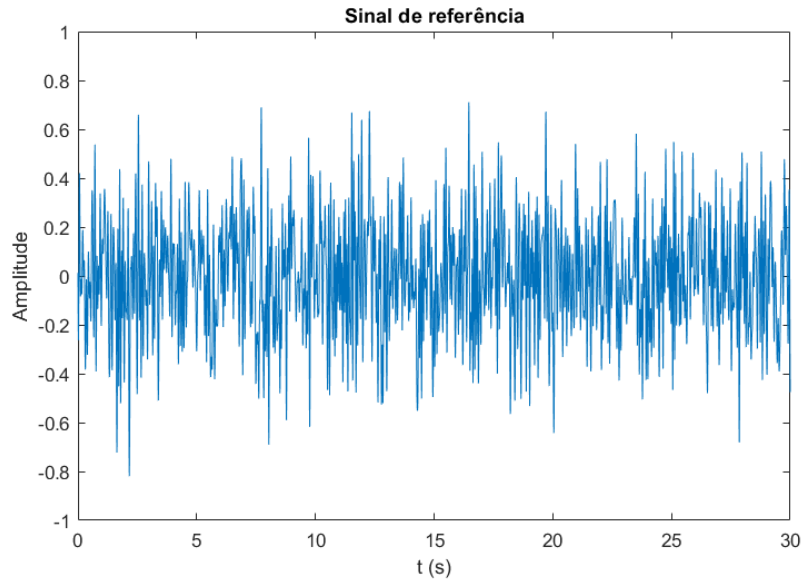


Figura 5.3 – Sinal de referência obtido com amplitude unitária.

O sinal de perturbação foi aplicado na posição de referência, x_d no algoritmo de controle do robô na equação 3.3, ou na força aplicada desejada F_d da mesma equação.

5.3. Ensaios

Numa primeira fase dos ensaios foi aplicada a perturbação em apenas uma direção, mantendo a referência das outras direções constantes. Os objetivos principais destes primeiros ensaios são validar o método de identificação usado e verificar se o braço tem um comportamento semelhante a um sistema massa-mola-amortecedor. Nesta fase, para além dos ensaios no braço, são realizados também ensaios livres e ensaios com massa. Todos estes ensaios são realizados para vários valores de rigidez do sistema emulado pelo robô no espaço cartesiano e são usadas perturbações de força ou de posição de referência, de modo a verificar se as duas abordagens são ou não equivalentes.

Numa segunda fase foram aplicadas diferentes perturbações nas três direções lineares do espaço cartesiano, mantendo orientação do *end effector* constante. Os objetivos destes ensaios são calcular a impedância do braço em todas as direções de perturbação e estimar a elipse de rigidez mencionada em [6, 9 e 10]. Nesta fase de ensaios, apenas são realizados ensaios de perturbação de posição de referência.

5.3.1. Ensaio com o braço

Para os ensaios com o braço, foi seguido o procedimento descrito no subcapítulo 5.1. Assumindo que o braço tem o comportamento dum sistema de 2ª ordem, o sistema total compara-se a um sistema composto por dois sistemas massa-mola-amortecedor. A figura 5.4 representa o sistema análogo ao sistema deste ensaio.

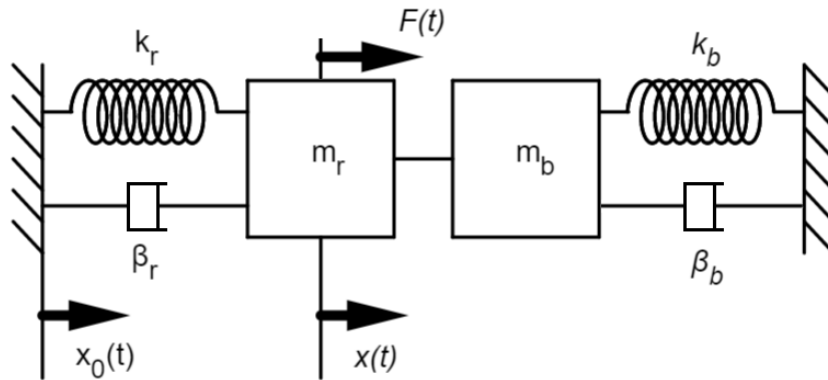


Figura 5.4 - Sistema análogo dos ensaios com braço.

Sendo M_b , k_b e β_b a massa, a rigidez e o coeficiente de amortecimento do braço, respetivamente e M_r , k_r e β_r os mesmos parâmetros para o sistema emulado pelo robô, escreve-se a equação do sistema na equação 5.2.

$$F(t) = (M_r + M_b) \frac{d^2x(t)}{dt^2} + (\beta_r + \beta_b) \frac{dx(t)}{dt} + k_r(x(t) - x_0(t)) + k_b x(t) \quad (5.2)$$

Para o ensaio com perturbação de força, a posição de referência é constante e é desprezada. Desta forma, aplicando a transformada de Laplace, tem-se a função transferência do sistema total na equação 5.3. No caso do ensaio com perturbação de posição de referência, a força é nula e obtém-se a função de transferência da equação 5.4.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{k_r + k_b} \frac{\frac{k_r + k_b}{M_r + M_b}}{s^2 + \frac{\beta_r + \beta_b}{M_r + M_b} s + \frac{k_r + k_b}{M_r + M_b}} \quad (5.3)$$

$$\frac{X(s)}{X_0(s)} = \frac{k_r}{k_r + k_b} \frac{\frac{k_r + k_b}{M_r + M_b}}{s^2 + \frac{\beta_r + \beta_b}{M_r + M_b} s + \frac{k_r + k_b}{M_r + M_b}} \quad (5.4)$$

Note-se que, nas funções de transferência apresentadas, estão incluídos os parâmetros do sistema emulado do robô. Assim, é necessário conhecer a impedância do sistema emulado e subtrair a sua contribuição no sistema total para obter a impedância mecânica do braço. A impedância do sistema emulado é obtida através dos ensaios livres.

Foram feitos ensaios onde foi pedido ao sujeito experimental que mantivesse o braço relaxado e outros ensaios em que foi pedido que mantivesse o braço contraído de forma a tentar manter uma posição fixa. Foram feitos estes dois tipos de ensaio para testar o efeito do nível de ativação na impedância do braço.

5.3.2. Ensaio livre

A impedância cartesiana do sistema definida pelo utilizador não é exatamente igual à impedância emulada pelo robô. Assim, surge a necessidade de identificar a impedância realmente emulada. Foi realizado um ensaio com o *end effector* do robô livre, isto é, um ensaio sem qualquer força externa aplicada, seja por um objeto ou um braço. Esta identificação será usada para comparar a identificação noutros ensaios, uma vez que, para identificar uma perturbação exterior, é necessário subtrair a contribuição do sistema emulado pelo robô.

O sistema emulado é aproximado a um sistema de 2ª ordem e é análogo ao sistema apresentado na equação 4.3.

5.3.3. Ensaio com massa

Após a identificação do sistema do robô, de forma a comprovar o método de identificação usado, é feito o ensaio com um acréscimo de uma massa conhecida. Neste ensaio é esperado identificar o efeito da inércia desta massa no sistema. O sistema análogo ao deste ensaio é apresentado na figura 5.5.

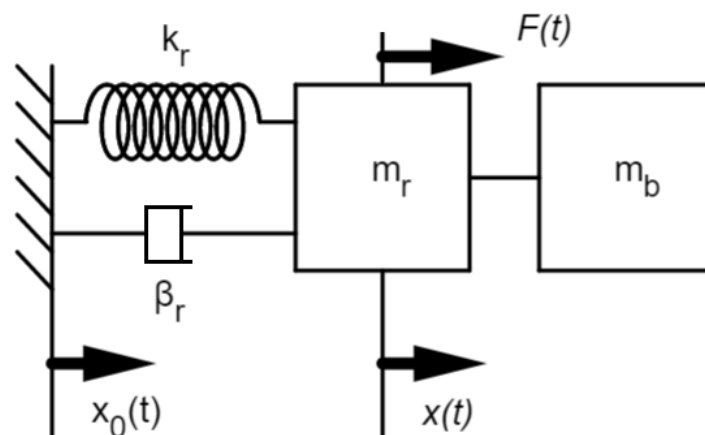


Figura 5.5 - Sistema análogo dos ensaios com massa.

Sendo M_r , k_r e β_r os parâmetros do sistema emulado pelo robô e M_b a massa adicionada no *end effector*, a equação 5.2 é a equação que descreve o sistema.

$$F(t) = (M_r + M_b) \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \beta_r \frac{dx(t)}{dt} + k_r(x(t) - x_0(t)) \quad (5.5)$$

Aplicando a transformada de Laplace, para o caso de perturbação de força resulta, a função de transferência do sistema na equação 5.6. Caso não haja força imposta e a perturbação seja na posição de referência, tem-se a equação 5.7.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{k_r} \frac{\frac{k_r}{M_r + M_b}}{s^2 + \frac{\beta_r}{M_r + M_b}s + \frac{k_r}{M_r + M_b}} \quad (5.6)$$

$$\frac{X(s)}{X_0(s)} = \frac{\frac{k_r}{M_r + M_b}}{s^2 + \frac{\beta_r}{M_r + M_b}s + \frac{k_r}{M_r + M_b}} \quad (5.7)$$

5.4. Tratamento e análise de dados

Depois de realizados os ensaios, é iniciado o processo de tratamento e análise de dados. Nesta fase é feita a construção do modelo do sistema com sinal de entrada única, a posição de referência x_0 , e de saída única, a posição medida x para os ensaios de perturbação de posição, ou, para os ensaios de perturbação de força, o sinal de entrada da força de referência F e a posição medida como sinal de saída.

5.4.1. Correção dos dados de posição medida

As juntas do robô, quando lhes aplicado um binário, têm tendência a sofrer uma pequena deformação. Esta deformação tem uma rigidez associada que não é registada pelos sensores de posição das juntas. Assim, surge a necessidade de corrigir os dados de posição do robô antes de fazer a análise dos resultados.

Em alguns estudos realizados sobre este fenómeno, como [27] e [28], nas juntas 1 à junta 5 foi estimada uma rigidez de 10 000 N/rad e nas juntas 6 e 7 uma rigidez de 7500 N/rad. Conhecendo a rigidez de cada junta, a correção é feita junta a junta e é feita através da expressão 5.8.

$$q_n^r(t) = q_n^m(t) + \frac{\tau_n(t)}{k_n} \quad (5.8)$$

Onde q_n^r é a posição real da junta n , q_n^m a sua posição medida, τ_n o binário medido nessa junta e k_n a sua rigidez. Depois disso, é calculado a cinemática direta do robô para obter a posição do *end effector* no espaço cartesiano.

5.4.2. Estimação do modelo não paramétrico

Em primeiro lugar é feita o cálculo da coerência entre os dois sinais. Este cálculo é feito através da função *matlab mscohere*, que usa a expressão 4.13, calculando a densidade espectral cruzada entre os sinais de saída e de entrada e a densidade espectral do sinal de entrada através do método de Welch que utiliza o método dos periodogramas, explicado com detalhe em [23]. Foram definidas as frequências de 0.1 a 15 Hz e no parâmetro de *window* e *noverlap* foram dados vetores vazios, usando assim os parâmetros predefinidos pela função: a *window* usa uma janela de Hamming onde é dividido o sinal em 8 segmentos com 50% de *overlap* entre eles. Só é garantida uma relação de linearidade entre os dois sinais caso a função de coerência tenha valores próximos de 1 em todo o domínio de frequências analisado. Caso contrário, a criação dum modelo fiável não é possível.

Para construir um modelo não paramétrico do sistema, é feita uma análise no domínio da frequência. Esta análise é feita através da função *matlab tfestimate*. Para fazer uma estimativa do modelo, esta função usa o método descrito na equação 4.17, que usa também o método de Welch para calcular a densidade espectral. Os parâmetros de *window* e *noverlap* são iguais aos definidos na utilização da função *mscohere*. É devolvida a resposta em frequência (FRF) do sistema onde é apresentada num diagrama de Bode.

5.4.3. Estimação do modelo paramétrico

Depois de estimada o modelo do sistema no domínio da frequência, é feita uma aproximação a um sistema de 2ª ordem através da função *matlab tfest*. Esta função devolve a aproximação da resposta em frequência estimada a uma função transferência com parâmetros constantes e com o número de zeros e pólos definidos previamente, devolvendo também o resultado *%fit* da aproximação, que é calculado a partir do da raiz do erro quadrático médio normalizado e serve como medida de qualidade da aproximação calculada. Com isto, é obtida uma função transferência de parâmetros b_0 , a_0 e a_1 apresentada na equação 5.9.

$$H(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1s + a_0} \quad (5.9)$$

Se for considerado a perturbação de posição de referência, é necessário conhecer um dos parâmetros para obter os restantes parâmetros do sistema total formado pelo robô e o braço, como mencionado no subcapítulo 4.1. Conhecendo a massa do sistema, que é dada pela massa aparente do robô no *end effector*, é possível igualar as equações 4.8 ou 4.1 à equação 5.9 obtida pela aproximação e obter assim os parâmetros k e β ou os parâmetros ω_n e ξ do sistema formado pelo robô e o braço. As equações 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13, representam o cálculo deste parâmetros recorrendo aos parâmetros da aproximação calculada.

$$k = a_0 M \quad (5.10)$$

$$\beta = a_1 M \quad (5.11)$$

$$\omega_n = \sqrt{a_0} \quad (5.12)$$

$$\xi = \frac{a_1}{2\omega_n} \quad (5.13)$$

Caso seja considerado uma perturbação de força, igualando a equação 4.3 à equação 5.9 é possível obter a massa do sistema tanto como os restantes parâmetros. A equação 5.14 representa o cálculo da massa. Os restantes parâmetros são calculados de forma semelhante ao caso com perturbação na posição de referência.

$$M = \frac{1}{b_0} \quad (5.14)$$

5.4.4. Obtenção da impedância mecânica do braço

Para obter o modelo isolado da massa ou do braço H_b , é necessário fazer uma subtração do modelo H_T calculado nos ensaios com massa e com o braço com o modelo do robô H_r obtido através dos ensaios livres. Esta subtração pode ser realizada antes ou depois da parametrização do sistema. Caso seja antes, são subtraídos os valores numéricos diretamente da FRF estimada em todos os valores de frequência. Se for após a parametrização, apenas é necessário a resolução dum sistema de equações. De qualquer das formas, a equação usada para calcular a contribuição do braço ou da massa aplicada apresenta-se na equação 5.15, onde H_T é o sistema total estimado do ensaio, H_r o modelo estimado no ensaio livre do robô e H_b o modelo do braço, representando-se H_b^f para o modelo do ensaio com perturbação de força e $H_b^{x_0}$ para o modelo do ensaio com perturbação de posição.

$$H_b(s) = \left(\frac{1}{H_T(s)} - \frac{1}{H_r(s)} \right)^{-1} \quad (5.15)$$

Para os ensaios de perturbação de força com a massa, H_r , que é dada pela equação 4.3 e H_T pela equação 5.6, tem-se a equação 5.16.

$$H_b^f(s) = \left((M_r + M_b)s^2 + \beta_r s + k_r - (M_r s^2 + \beta_r s + k_r) \right)^{-1} = \frac{1}{M_b s^2} \quad (5.16)$$

No caso do ensaio no braço tem-se a equação 5.17, onde H_T é dado pela equação 5.3.

$$H_b^f(s) = \left(((M_r + M_b)s^2 + (\beta_r + \beta_b)s + k_r + k_b) - M_r s^2 + \beta_r s + k_r \right)^{-1} = \frac{1}{M_b s^2 + \beta_b s + k_b} \quad (5.17)$$

Para os ensaios de perturbação de posição de referência, no caso do ensaio com massa tem-se a equação 5.18, onde H_r é dado na equação 4.8 e H_T na equação 5.7.

$$H_b^{x_0}(s) = \left(\frac{(M_r + M_b)s^2 + \beta_r s + k_r}{k_r} - \frac{M_r s^2 + \beta_r s + k_r}{k_r} \right)^{-1} = \frac{k_r}{M_b s^2} \quad (5.18)$$

E no caso do ensaio no braço, sendo H_T apresentado na equação 5.4, obtém-se a equação 5.19.

$$H_b^{x_0}(s) = \left(\frac{(M_r + M_b)s^2 + (\beta_r + \beta_b)s + k_r + k_b}{k_r} - \frac{M_r s^2 + \beta_r s + k_r}{k_r} \right)^{-1} = \frac{k_r}{M_b s^2 + \beta_b s + k_b} \quad (5.19)$$

Nos ensaios de perturbação de força, obtém-se diretamente a função de transferência da massa ou do braço. No caso dos ensaios de perturbação da posição de referência, as funções de transferência apresentam um ganho igual ao valor da rigidez simulada do robô.

5.5. Validação do método numérico

De forma a validar a função usada para fazer a estimação da resposta em frequência do modelo, *tfestimate*, e a função de aproximação e estimação dos parâmetros, *tfest*, foi feito um teste numérico. Em primeiro lugar é definida uma função transferência de 2ª ordem sem zeros e é feita a simulação da resposta com a entrada usada nos ensaios. De seguida, é usada a função *tfestimate* para calcular o modelo não paramétrico do sistema no domínio da frequência com base na resposta simulada. Finalmente, é feita uma aproximação da resposta em frequência estimada a um modelo linear de 2ª ordem, através da função *tfest*, e comparam--se os parâmetros estimados com os valores reais. Na figura 5.6 são apresentados o diagrama de bode da função de transferência inicial em sobreposição com a resposta em frequência estimado pela função *tfestimate*. Na tabela 5.1 são apresentados os parâmetros da função de transferência inicial e os da aproximação de 2ª ordem feita através da função *tfest*. Sendo que a qualidade da aproximação do modelo estimado, dada pelo resultado *%fit*, tem um valor muito próximo dos 100%, conclui-se que o método usado na identificação de modelos é válido na gama de frequências entre 0.1 e 15 Hz. A partir dos 15 Hz a aproximação deixa de ser válida devido ao tipo de perturbação usada, como visto pelo valor da coerência apresentado na figura 5.7.

Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo inicial e da aproximação pelo *tfest*.

ω_{n_i} (Hz)	ξ_i	K_{0_i}	ω_{n_e} (Hz)	ξ_e	K_{0_e}	<i>fit</i> (%)
5	0.7	1	5.06	0.709	0.9996	98.4

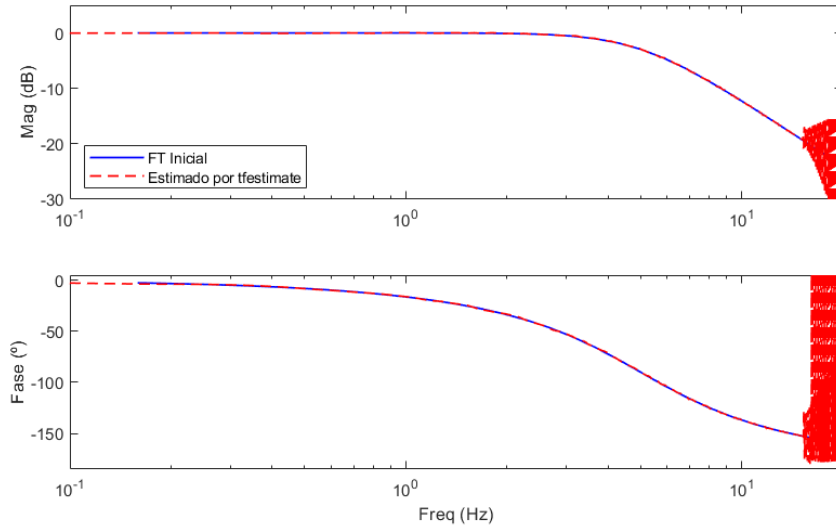


Figura 5.6 – FRF do modelo inicial com o modelo estimado pela função *tfestimate*.

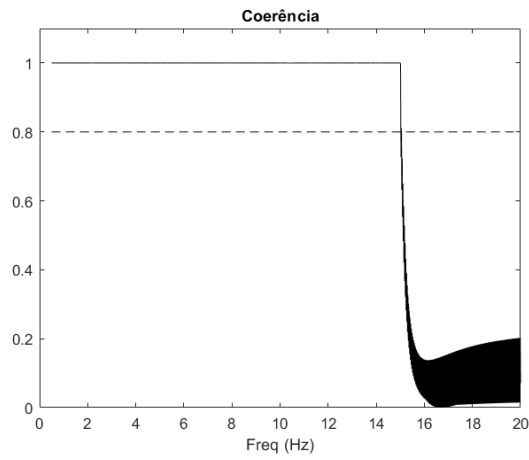


Figura 5.7 – Coerência entre o sinal de entrada e o sinal de saída.

6. Resultados

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos nos ensaios realizados e é feita a discussão dos mesmos. São realizados ensaios livres, com massa e com o braço relaxado e contraído com perturbação de posição e de força unidirecional, sendo apresentados os modelos do braço estimados apresentados e comparados. Finalmente são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de perturbação tridimensional.

6.1. Ensaios livres com perturbação de posição unidirecional

Os primeiros ensaios realizados foram ensaios sem uma massa ou uma mão acoplada ao *end effector*. Foram realizadas experiências com três níveis de rigidez cartesiana na direção em x , representada na figura 5.1. O sistema emulado pelo robô nestes ensaios tem uma rigidez 1500 N/m, 3000 N/m e 4500 N/m, uma taxa de amortecimento igual a 0.5, com perturbações de amplitude máxima de 1 cm e com uma duração de 30 segundos.

6.1.1. Correção dos dados de posição

Como mencionado na secção 5.4.1, em primeiro lugar é necessário fazer uma correção da posição real do *end effector* em relação à posição medida. Esta correção é feita através dos dados de binário e de posição de cada junta e é feita em todos os instantes de tempo recorrendo do método descrito na equação 5.8. Na figura 6.1 apresenta-se uma comparação entre os dados de posição não corrigida (valor diretamente medido pelo robô) com os dados após a correção para uma rigidez cartesiana igual a 3000 N/m num intervalo de 5 segundos: à esquerda está apresentada a sobreposição de gráficos e à direita está a diferença entre os dados.

Fez-se ainda uma análise em frequência do sistema, tendo como entrada a posição de referência, x_0 , e como saída a posição do *end effector*, x , tanto para o caso sem correção como para com correção, apresentado na figura 6.2.

Nesta primeira fase de ensaios, a força aplicada nas juntas deve-se apenas à inércia do robô. Por isso, é de esperar que a deformação nas juntas seja menor que nos outros ensaios. Neste ensaio a diferença entre as posições corrigidas e não corrigidas é relativamente baixa, sendo uma ordem de grandeza abaixo da perturbação de posição pedida, no entanto não pode ser desprezada. Como se pode observar na figura 6.2, verificou-se que os modelos estimados

diferem para frequências mais altas. Assim, para as análises realizadas, foi sempre utilizada a posição após a correção da deformação.

Uma vez que é usada uma perturbação de ruído branco entre o intervalo de frequências de 0.1 a 15 Hz, não é possível estimar a resposta em frequência do sistema fora deste intervalo. Nestes ensaios, verifica-se uma subida acentuada no ganho e na fase a partir dos 10 Hz. Devido a este fenómeno as análises realizadas são feitas até aos 10 Hz.

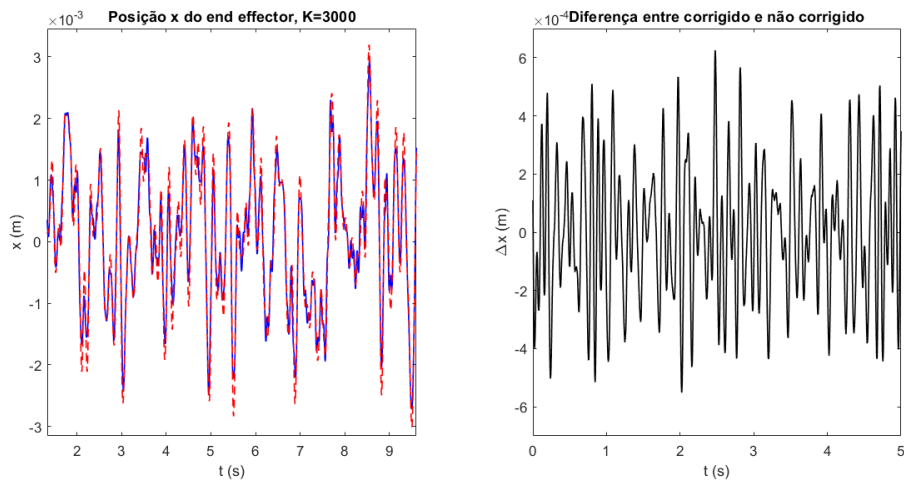


Figura 6.1 - Gráficos de comparação de posição corrigida e não corrigida para o ensaio de $K=3000$ N/m: sobreposição dos dois gráficos à esquerda, diferença entre os dois à direita.

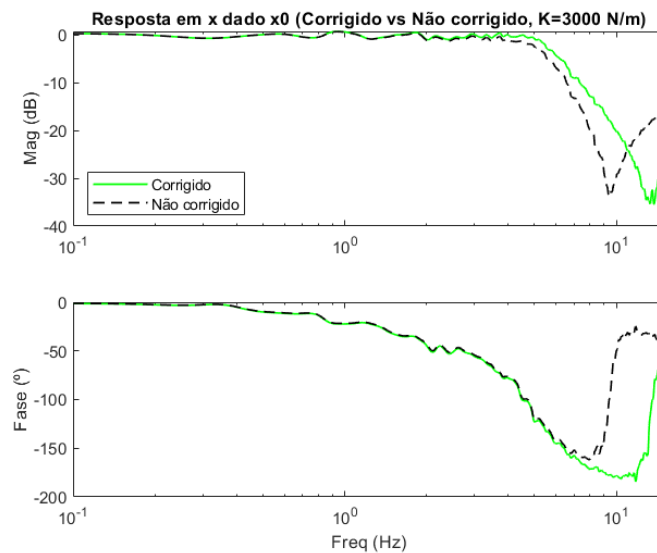


Figura 6.2 – Modelo do robô com perturbação de posição com dados de posição corrigida e não corrigida.

6.1.2. Estimação do modelo não paramétrico

Com a correção de posição realizada, o primeiro passo da análise de dados é a verificação da coerência entre o sinal de perturbação da posição, x_0 , e a posição real, x . Na figura 6.3 apresenta-se o gráfico da função de coerência entre os sinais. Verifica-se que a coerência é, na maior parte do seu domínio, superior a 0.8, para os três os ensaios. Por isso, pode assumir-se que existe uma relação linear entre a perturbação e a posição real, como esperado. No entanto, é verificado uma descida na coerência entre os 10 e os 15 Hz nos três ensaios que pode vir a afetar a qualidade dos resultados obtidos.

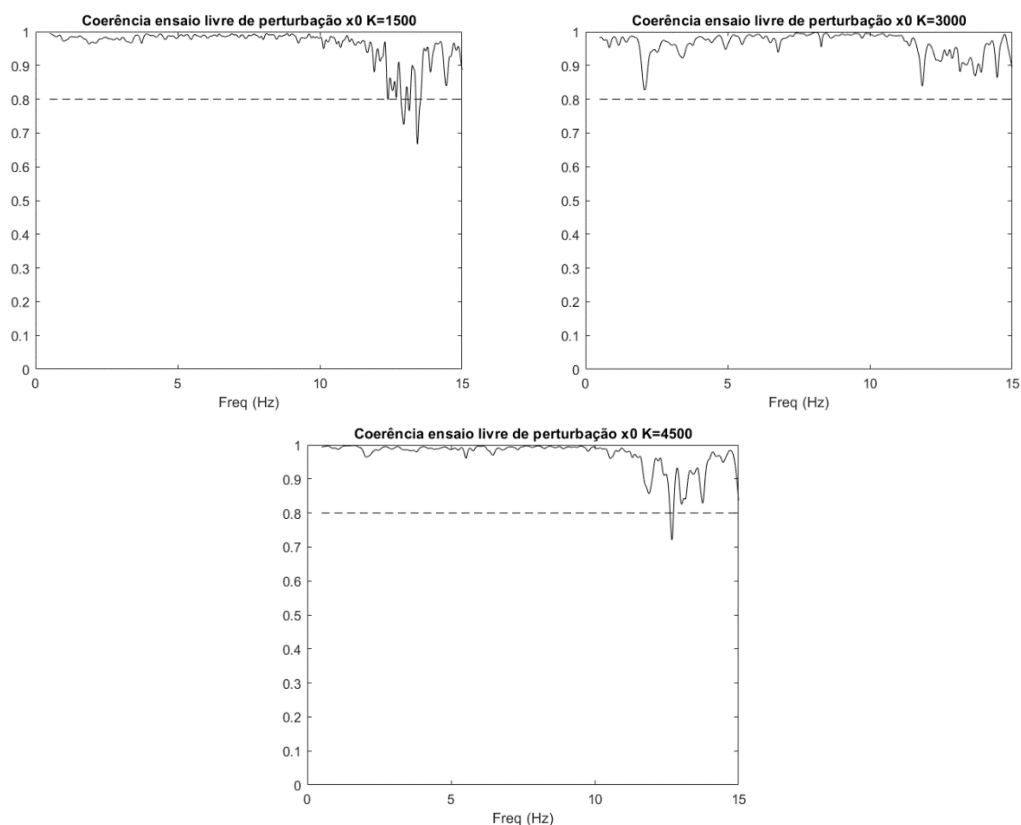


Figura 6.3 - Função coerência dos três ensaios livres de perturbação de posição.

Com isto, é realizada a análise em frequência e obtém-se a resposta em frequência para os três ensaios representada num diagrama de bode na figura 6.4.

Fazendo uma análise em frequências abaixo de 10 Hz, note-se que o sistema tem um comportamento muito semelhante a um sistema de 2ª ordem, como o esperado pela estratégia de controlo usada. Também se verifica que o ganho do sistema estático é constante e unitário, como esperado, pela expressão 4.8. As estimativas dos três ensaios são semelhantes entre si, com a principal diferença na mudança de frequência de corte. Esta diferença é de esperar uma vez que a frequência de corte apenas depende da rigidez e da massa, como apresentado na equação 4.6.

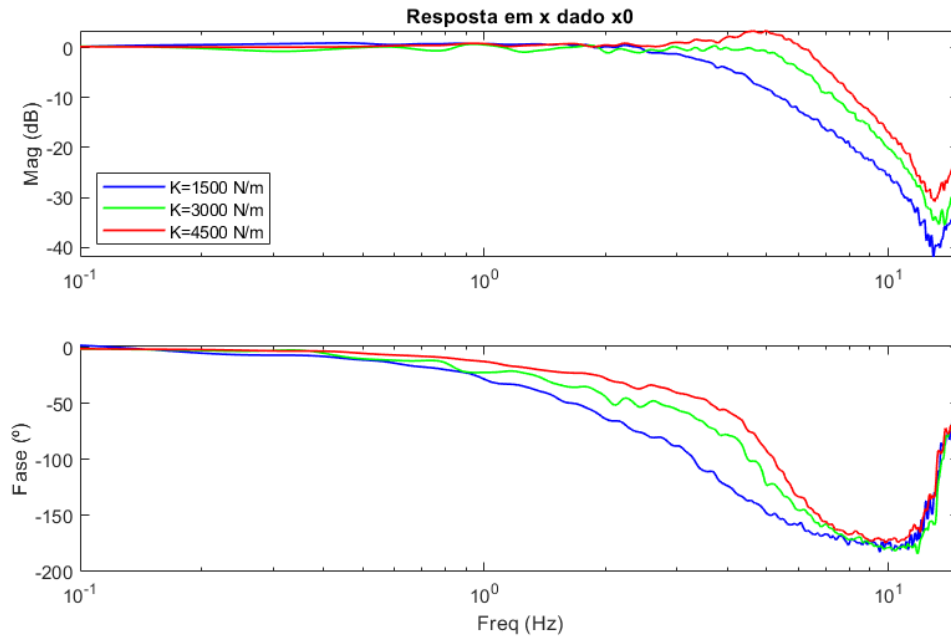


Figura 6.4 – Modelo estimado do ensaio livre com perturbação de posição para os três ensaios de rigidez cartesiana diferente.

6.1.3. Estimação do modelo paramétrico

A resposta em frequência estimada é então aproximada a uma função de transferência de 2ª ordem, através da função *tfest*. Estes resultados são comparados com a função de transferência esperada para o sistema, definida pelos parâmetros de rigidez e amortecimento pedidos e pela massa aparente conhecida. Nas figuras 6.5, 6.6 e 6.7 são apresentados a função de transferência estimada, a aproximação da resposta em frequência a um sistema de 2ª ordem e a função de transferência do sistema pedido pelo utilizador nos três ensaios.

Na tabela 6.1 está apresentada uma comparação entre os parâmetros de rigidez k_p e taxa de amortecimento ξ_p do modelo definido pelo utilizador com os parâmetros estimados através da aproximação feita k_a e ξ_a . Estes parâmetros foram calculados através das expressões 5.10, 5.12 e 5.13. Na última coluna também se apresenta o resultado *%fit* da aproximação.

Tabela 6.1 – Parâmetros de rigidez, k , e taxa de amortecimento, ξ , definidos a priori, p , e dados pela aproximação a um modelo de 2ª ordem, a , da FRF estimada para o ensaio livre com perturbação da posição.

Ensaio	k_p (N/m)	ξ_p	k_a (N/m)	ξ_a	fit (%)
1	1500	0.5	1258	0.590	86.6
2	3000	0.5	2687	0.451	75.0
3	4500	0.5	3673	0.307	79.2

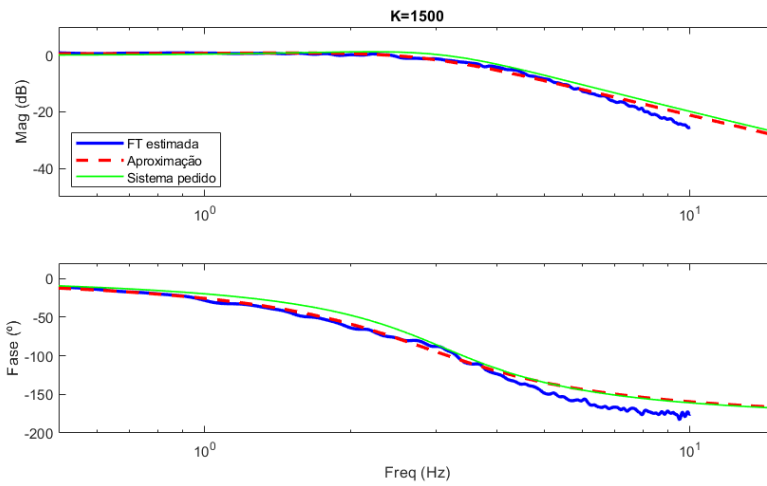


Figura 6.5 – FRF estimada, aproximada e pedida do ensaio livre com $K=1500$ N/m.

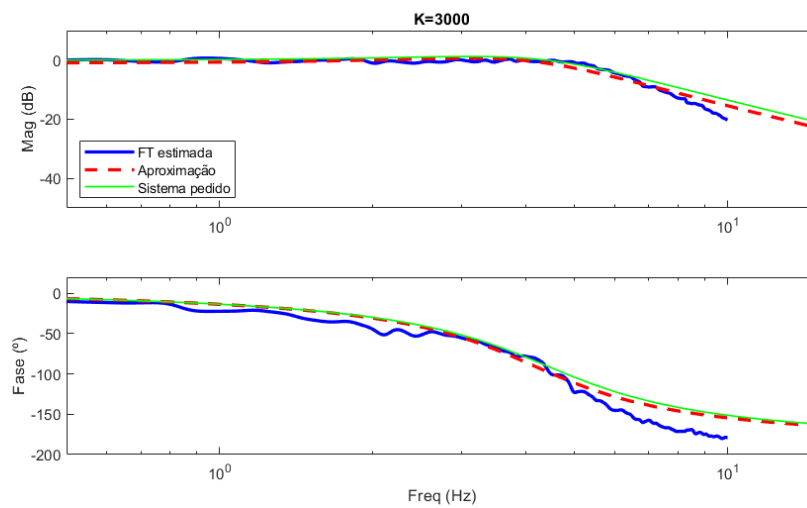


Figura 6.6 – FRF estimada, aproximada e pedida do ensaio livre com $K=3000$ N/m.

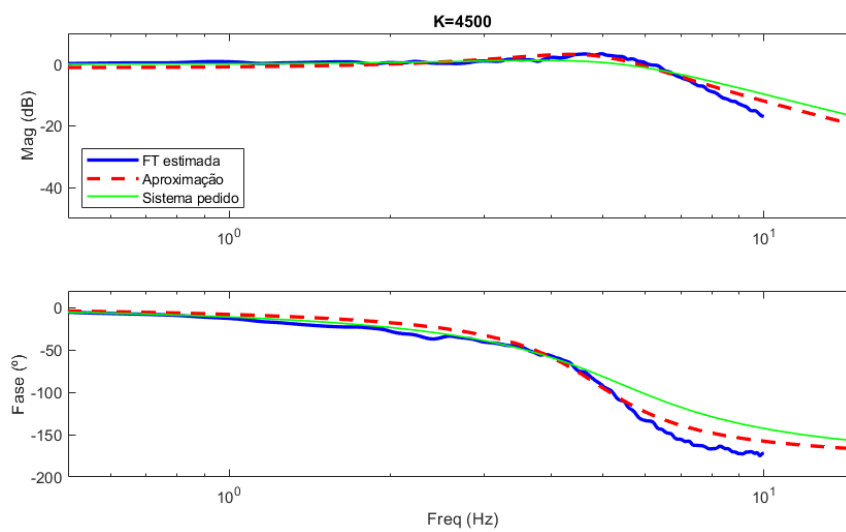


Figura 6.7 – FRF estimada, aproximada e pedida do ensaio livre com $K=4500$ N/m.

Analisando qualidade da aproximação de cada ensaio, conclui-se que, para uma rigidez mais alta a *%fit* diminui, pelo que, o sistema simulado pelo robô aparenta ser menos eficaz a simular um sistema de 2ª ordem. Verifica-se também que, a partir dos 6-8 Hz, o ganho do sistema tem uma descida mais acentuada do que esperado para um sistema de 2ª ordem, sendo maior do que -40 dB por década. No entanto, até frequências um pouco acima da frequência de corte, a aproximação a um sistema de 2ª ordem verifica-se aceitável para a realização de ensaios no braço.

6.2. Ensaios com massa com perturbação de posição unidirecional

Nos seguintes ensaios, foi aplicada uma perturbação de posição com um objeto de massa conhecida (1 kg) acoplado no *end effector*. O objetivo destes ensaios é validar o método de identificação usado, identificando apenas a inércia do objeto. Para isso, é subtraído o sistema identificado nos ensaios livres do sistema total identificado nos ensaios com massa, como representado na equação 5.15.

Foram realizados três ensaios com a massa, variando a rigidez ($k=1500$ N/m, $k=3000$ N/m, $k=4500$ N/m), mantendo constante o amortecimento ($\xi=0.5$), amplitude de perturbação (1 cm) e duração da perturbação (30 s), tal como nos ensaios em regime livre. Antes de fazer uma estimativa do modelo total do sistema, foi verificada a coerência entre o sinal de perturbação e a posição real, apresentado no anexo A.1, e verificou-se, mais uma vez, que se encontrava numa gama de valores superiores a 0.8 para uma análise fiável, no domínio de frequências analisado.

Na figura 6.8, está apresentada a estimativa da resposta em frequência para os ensaios livre e com massa. Como esperado, verifica-se que a frequência de corte do sistema diminui ligeiramente do ensaio livre para o ensaio com massa para todos os valores de rigidez. Este fenómeno pode ser explicado pelo facto de a frequência de corte diminuir com o aumento de massa do sistema, como apresentado na equação 5.7. Também é de esperar que a taxa de amortecimento diminua com a subida da massa total do sistema, visto que esta depende do coeficiente de amortecimento, que não se altera, e com a massa total do sistema. Desta forma, espera-se também que haja uma maior oscilação na zona da frequência de corte. No entanto, isso não é verificado, o que pode ser justificado pelo facto da massa acrescentada ser cerca de um quarto da massa aparente do sistema na configuração do ensaio e, portanto, a contribuição da massa acrescentada na taxa de amortecimento da sistema não se considera significativa.

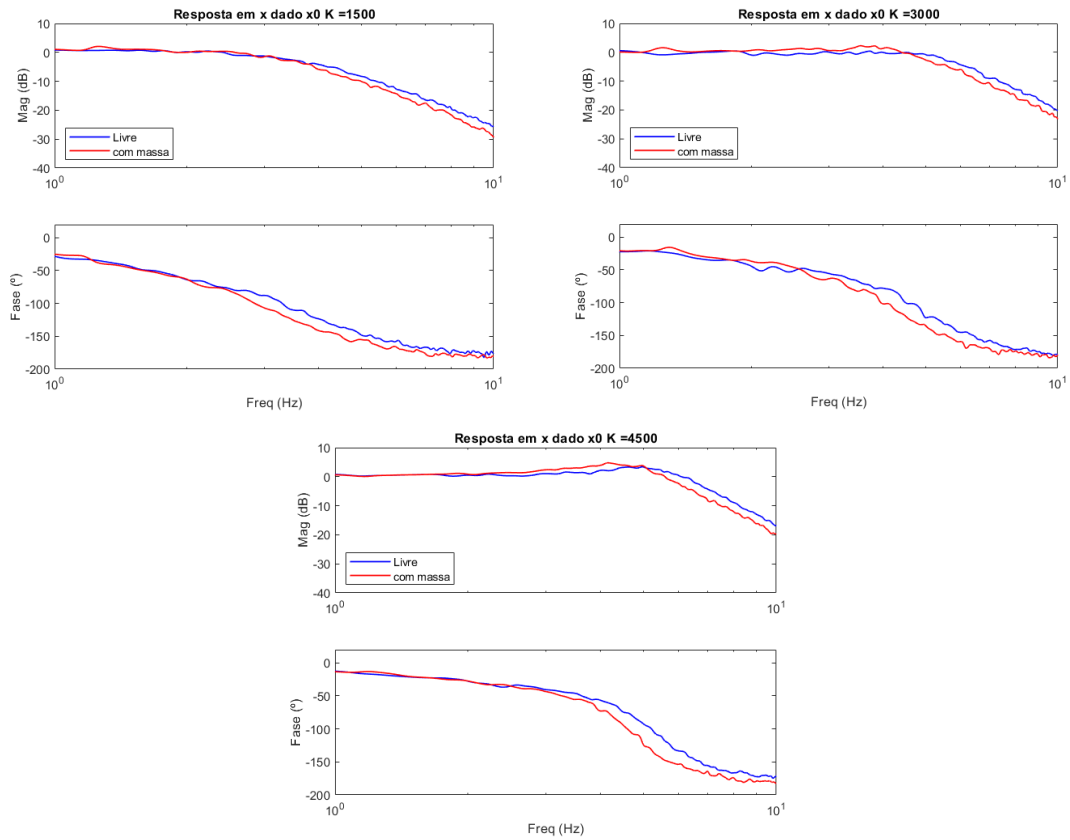


Figura 6.8 - FRF estimada do ensaio livre e do ensaio com massa para os três ensaios de perturbação de posição.

Depois disso, foi subtraída a impedância emulada do robô, calculada no ensaio livre, ao sistema obtido nos ensaios com massa, obtendo assim a contribuição dinâmica da inércia do objeto acoplado. O sistema resultante é descrito pela função de transferência apresentada na equação 5.18. Na figura 6.9 apresenta-se o resultado dessa subtração para cada ensaio, bem como a função de transferência teórica.

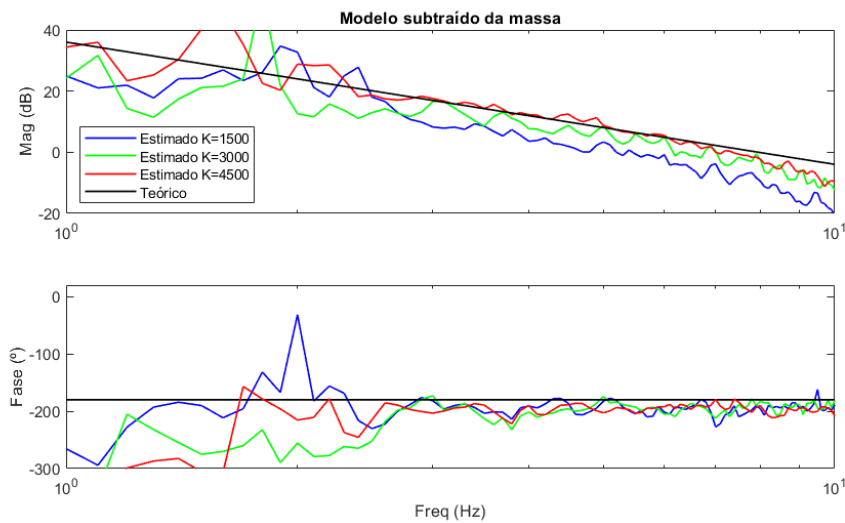


Figura 6.9 – FRF da massa estimado nos três ensaios com o modelo teórico para $K=3000$ N/m.

Nas frequências analisadas, entre 1 e 10 Hz, verifica-se que o modelo de massa estimado tem um declive de aproximadamente -40 dB por década e apresenta fases com valores à volta dos -180° , como é esperado. Considera-se que o modelo estimado através da subtração entre os resultados dos dois ensaios está suficientemente próximo do modelo teórico para concluir que o método de identificação usado é fiável na identificação de sistemas mecânicos. Com isto, foram iniciados os ensaios no braço humano para perturbações de posição.

6.3. Ensaio com o braço com perturbação de posição unidirecional

Nesta fase, foram realizados seis ensaios diferentes: três com o braço do sujeito experimental relaxado e outros três com o braço contraído. Mais uma vez, para os ensaios realizados foram utilizados os mesmos parâmetros do sistema simulado do robô usados para os ensaios anteriores. A rigidez emulada de 1500 N/m, 3000 N/m e 4500 N/m, uma taxa de amortecimento igual a 0.5, com uma amplitude máxima de perturbação de 1 cm de duração igual a 30 segundos. A perturbação é dada na direção x representada na figura 5.1.

Antes do cálculo de modelos do sistema, foram calculadas as funções coerência entre o sinal de perturbação e a posição calculada e, em todos os ensaios, apresentados no Anexo A.1, verificou-se uma coerência acima de 0.8 no domínio de frequências de interesse.

6.3.1. Estimação do modelo não paramétrico

Em primeiro lugar, é feita uma estimativa do modelo do sistema completo pelo robô e pelo braço através da análise em frequência. As figuras 6.10, 6.11 e 6.12 apresentam as respostas em frequência estimadas nos ensaios realizados com o braço relaxado, com o braço contraído e em regime livre, para três valores de rigidez cartesiana diferentes.

Pela equação 5.4, é de esperar que haja um decréscimo do ganho estático, uma vez que este parâmetro depende da rigidez do braço. Esse fenómeno verifica-se, no entanto não se destaca tanto uma vez que a rigidez simulada do robô é mais elevada que a rigidez do braço, sendo mais perceptível no ensaio com uma rigidez simulada igual a 1500 N/m.

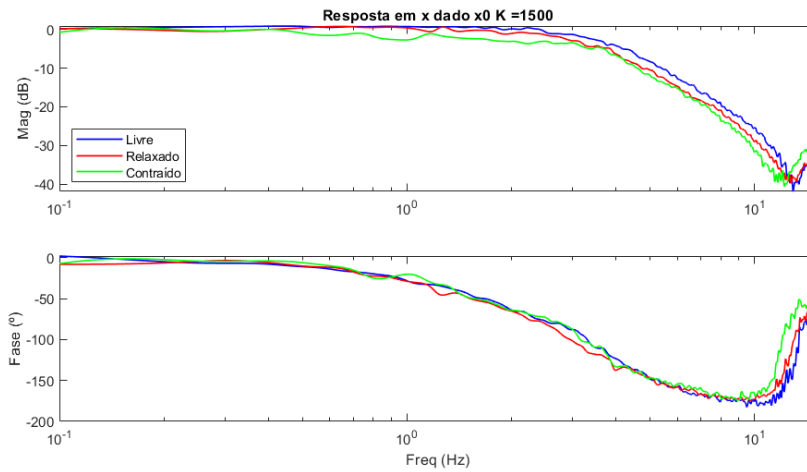


Figura 6.10 – FRF do sistema robô+braço com perturbação de posição K=1500 N/m.

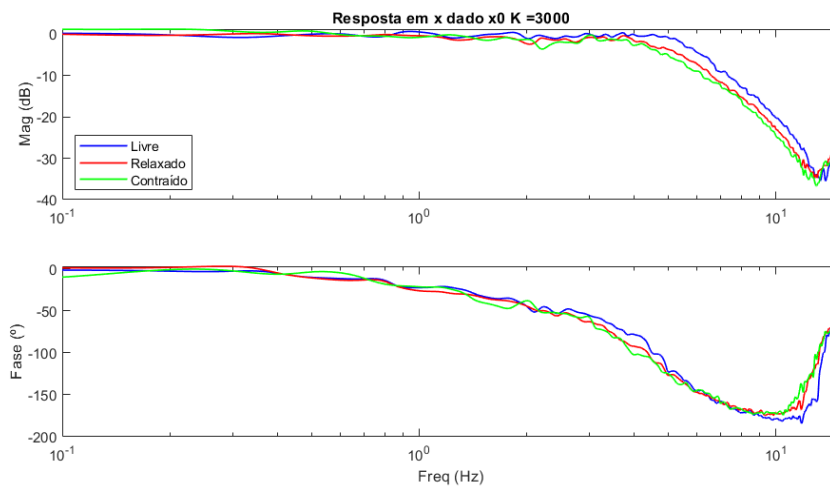


Figura 6.11 - FRF do sistema robô+braço com perturbação de posição K=3000 N/m.

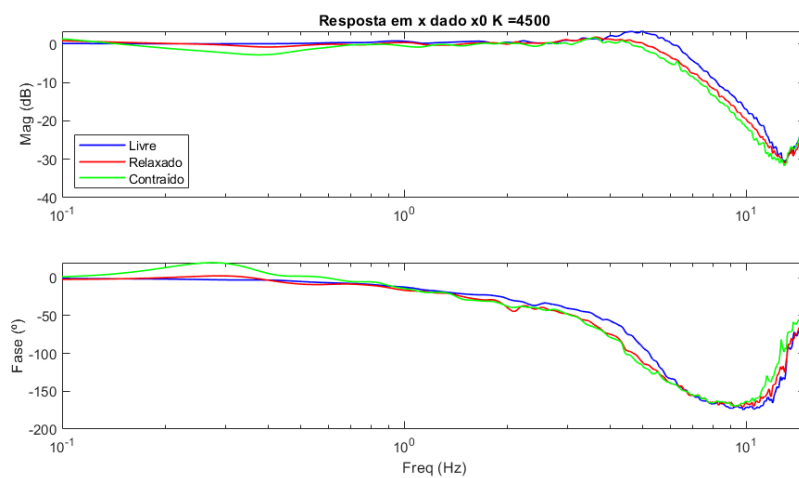


Figura 6.12 FRF do sistema robô+braço com perturbação de posição K=4500 N/m.

Note-se que a frequência de corte desce ligeiramente nos ensaios com o braço, comparativamente aos ensaios em regime livre. Como visto na equação 4.6, a frequência de corte depende da rigidez e da massa total do sistema. Uma vez que a rigidez total do sistema não sofre grandes alterações com o acoplamento do braço, conclui-se que o decréscimo da frequência de corte esteja relacionado com o aumento da inércia do sistema que é mais significativo do que o aumento da rigidez.

Verifica-se também que a frequência de corte nos ensaios com o braço contraído também é menor do que nos ensaios com o braço relaxado, podendo-se também concluir que a inércia total do sistema aumenta. Julga-se que o aumento da inércia não esteja apenas relacionado com a massa do braço, pois esta não sofre alteração com a contração do braço visto que implicaria um aumento da massa do braço, mas sim com o comportamento do sujeito experimental. Ou seja, o braço aparenta ter uma maior resistência voluntária ao movimento quando contraído devido ao instinto natural do sujeito de contrariar o movimento da perturbação e daí ser verificada o aumento da inércia.

6.3.2. Estimação do modelo paramétrico

De seguida, foi feita uma aproximação a um sistema de 2ª ordem aos resultados obtidos nos ensaios com o braço. Nas figuras 6.13, 6.14 e 6.15 é apresentado a resposta em frequência dos sistemas estimados através dos ensaios, juntamente com as respetivas aproximações de 2ª ordem. Na tabela 6.2 apresenta-se os parâmetros das aproximações calculados, em conjunto com a qualidade (*%fit*) de cada aproximação.

Tabela 6.2 – Parâmetros da aproximação dos ensaios de perturbação de posição numa direção.

k_r (N/m)	Ensaio	b_0	a_1	a_0	<i>fit</i> (%)
1500	Livre	333.41	21.18	321.72	86.6
	Relaxado	260.87	19.45	274.51	88.2
	Contraído	237.37	20.67	322.57	82.9
3000	Livre	591.19	23.66	687.32	75.0
	Relaxado	474.67	23.98	580.89	79.9
	Contraído	431.45	23.62	546.55	79.5
4500	Livre	792.73	18.83	939.49	79.2
	Relaxado	659.86	21.46	748.44	83.4
	Contraído	589.33	21.01	706.63	83.6

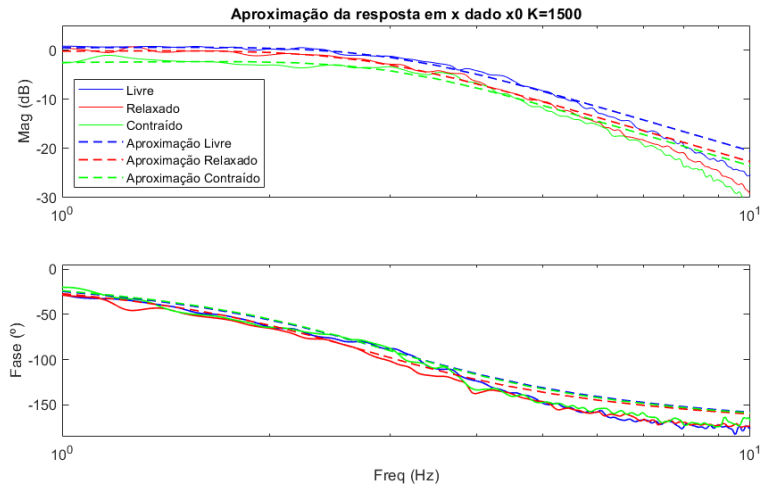


Figura 6.13 – FRF da aproximação do sistema robô+braço com perturbação de posição K=1500 N/m.

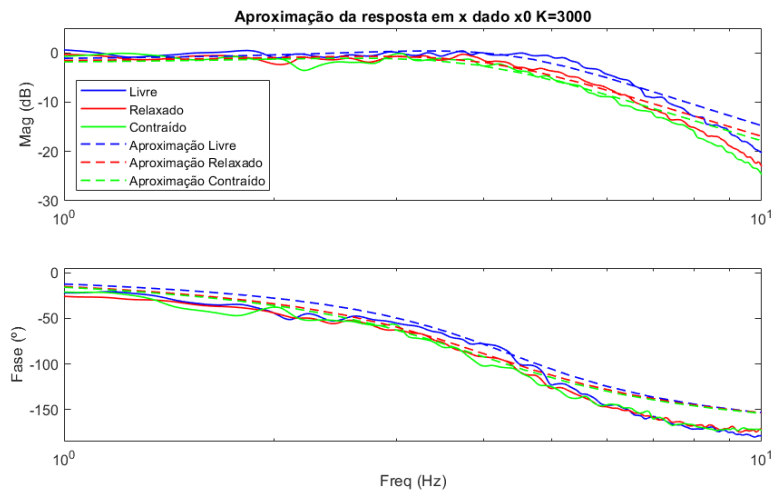


Figura 6.14 - FRF da aproximação do sistema robô+braço com perturbação de posição K=3000 N/m.

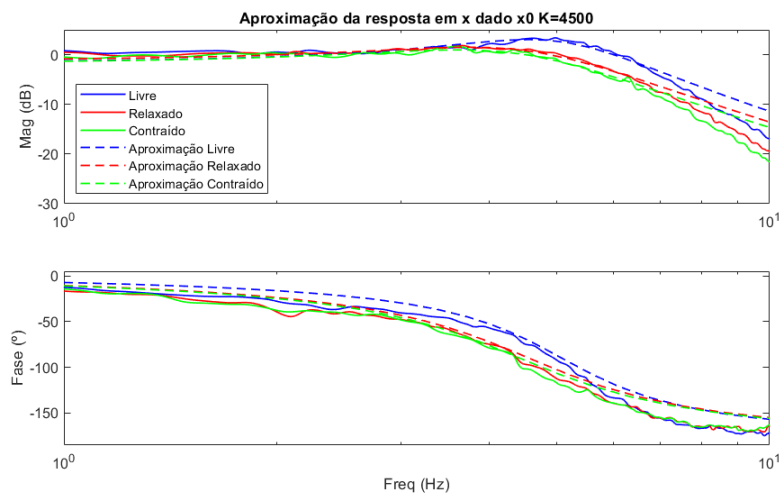


Figura 6.15 - FRF da aproximação do sistema robô+braço com perturbação de posição K=4500 N/m.

De seguida, para extrair os parâmetros que definem a dinâmica do braço, remove-se a dinâmica do robô do modelo total estimado. Para tal, utilizam-se as aproximações de 2ª ordem dos modelos do robô em regime livre e com o braço e, de acordo com a equação 5.18, subtrai-se o modelo aproximado do robô ao modelo aproximado do sistema total. Assim, obtêm-se os valores de massa, rigidez e coeficiente de amortecimento os valores de frequência natural, ganho estático e taxa de amortecimento de cada um dos ensaios.

Na tabela 6.3 são apresentados os parâmetros estimados da dinâmica do braço nos três ensaios para o braço relaxado e contraído, e em seguida apresentam-se as funções de transferência correspondentes, para o braço relaxado, figura 6.16, e para o braço contraído, figura 6.17.

Tabela 6.3 – Parâmetros do braço resultado dos ensaios de perturbação de posição numa direção.

k_r (N/m)	Ensaio	M_b (Kg)	β_b (N s/m)	k_b (N/m)	ω_n (Hz)	ξ	K_0 ($\times 10^{-3}$)
1500	Relaxado	0.912	11.01	65.75	1.35	0.71	15.2
	Contraído	1.389	26.72	451.46	2.87	0.53	2.21
3000	Relaxado	1.752	43.28	601.39	2.95	0.67	1.66
	Contraído	2.319	54.65	716.89	2.80	0.67	1.39
4500	Relaxado	1.657	45.86	493.12	2.75	0.80	2.03
	Contraído	2.323	57.34	731.17	2.82	0.70	1.37

Como esperado, verifica-se um aumento da rigidez do braço do ensaio relaxado para o contraído em todos os valores de rigidez emulada. Em geral, também se verificou um aumento da inércia e do coeficiente de amortecimento, o que poderá ser explicado pelo comportamento do sujeito experimental que tende a contrariar o movimento imposto pela perturbação.

Para ensaios com o braço contraído, é impossível um sujeito experimental manter um nível de contração estável e constante em todos os ensaios, sem qualquer tipo de feedback (como por exemplo o EMG), e assim não se pode comparar a qualidade do método com base nestes ensaios. No entanto, o braço relaxado é um sistema mais constante e, assim, é de esperar que o modelo do braço seja semelhante para todos os ensaios independentemente da rigidez simulada utilizada. É verificado também que os modelos estimados nos ensaios de rigidez emulada iguais a 3000 N/m e 4500 N/m são muito semelhantes entre si, mas divergem do modelo estimado para os ensaios com uma rigidez emulada de 1500 N/m. Visto isto, conclui-se que o método usado é mais consistente para valores de rigidez emuladas mais altas.

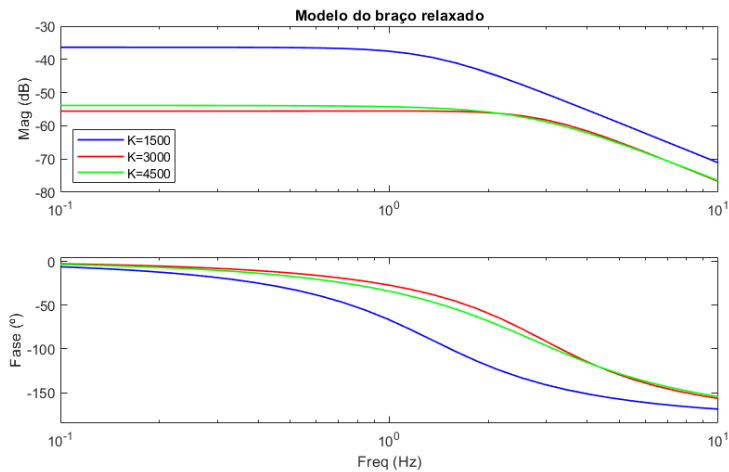


Figura 6.16 - FRF do braço relaxado para os três ensaios de perturbação de posição.

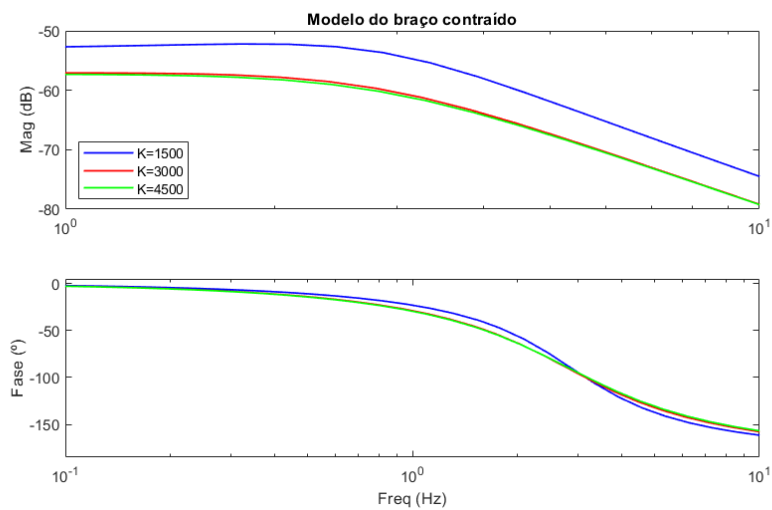


Figura 6.17 – FRF do braço relaxado para os três ensaios de perturbação de posição.

6.4. Ensaio livre com perturbação de força unidirecional com impedância simulada

Para os ensaios de força com uma impedância simulada, foi aplicado o mesmo procedimento que nos ensaios com perturbação de posição numa direção. Em primeiro lugar, é identificado o sistema simulado do robô, de seguida é validada a identificação através dum ensaio com uma massa aplicada no *end effector* e, finalmente, são feitos os ensaios no braço relaxado e contraído.

Nesta fase, os ensaios foram feitos para um valor de rigidez simulada de 3000 N/m, uma taxa de amortecimento igual a 0.5 e uma amplitude de perturbação máxima igual a 30 N com uma

duraco de 30 segundos. Este ensaios so anlogos aos ensaios com perturbao de posio com rigidez simulada de 3000 N/m, mudando apenas o tipo de perturbao. Note-se que a perturbao de fora de 30 N  equivalente  perturbao de posio de 0.01 m com 3000 N/m de rigidez.

A resposta deste ensaio foi comparada  resposta do ensaios com perturbao de posio, na figura 6.18. Pelas equaoes 4.3 a 4.8, verifica-se que as funoes de transferncia, quando considerando como entrada a fora ou o deslocamento, apenas diferem de um ganho igual a $1/k$. Assim sendo, retirou-se esse ganho da resposta em frequncia obtida no ensaio com perturbao de fora e sobreps-se  resposta em frequncia obtida no ensaio com perturbao de posio.

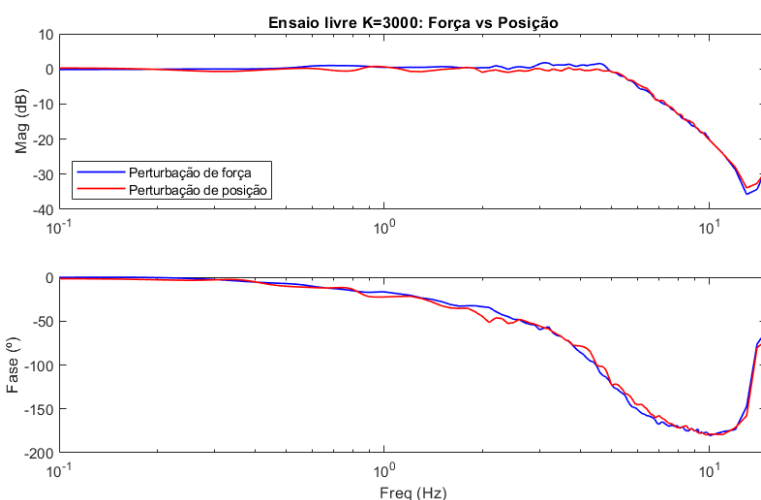


Figura 6.18 – Sobreposio da resposta em frequncia do ensaio livre com perturbao de fora e de posio.

Verifica-se que as repostas em frequncia nos dois tipos de perturbao so muito semelhantes. Assim,  de esperar que o modelo do sistema resultantes das experincias do brao sejam igualmente semelhantes.

De seguida, fez-se uma comparao do sistema pedido pelo utilizador com o modelo estimado do sistema. Na figura 6.19 so apresentados o modelo estimado obtido em sobreposio com a aproximao a um sistema de 2^a ordem e o modelo do sistema pedido pelo utilizador. Na tabela 6.4, apresenta-se os parmetros do modelo aproximado M_a , ξ_a e k_a em relao com o modelo pedido M_p , ξ_p e k_p .

Tabela 6.4 – Parmetros pedidos e aproximados da estimativa do ensaio livre com perturbao de fora.

M_p (Kg)	K_p (N/m)	ξ_p	M_a (Kg)	K_a (N/m)	ξ_a	fit (%)
3.91	3000	0.5	4.94	3196	0.41	81.3

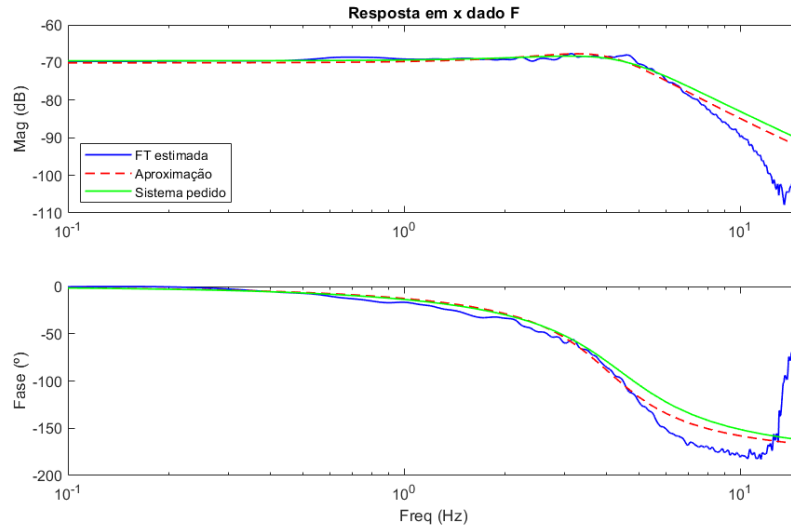


Figura 6.19 – FRF estimada, aproximada e pedida do ensaio livre com perturbação de força.

Como acontece nos ensaios de perturbação de posição, verifica-se mais uma vez que, a partir dos 6-8 Hz, o ganho do sistema tem um declive maior do que -40 dB por década. No entanto, considera-se a aproximação a um sistema de 2ª ordem aceitável para análise dos ensaios com uma massa e com o braço.

6.5. Ensaio com massa com perturbação de força unidirecional com impedância simulada

Após o ensaio livre, foi realizado o mesmo ensaio, mas com a presença duma massa, de forma a poder validar o método de identificação utilizado, à semelhança do que foi feito nos subcapítulo 6.2 para os ensaios com perturbação de posição.

Na figura 6.20 é apresentada a resposta em frequência do ensaio livre em sobreposição com a resposta no ensaio com massa.

É verificado uma descida da frequência de corte e é mantido o ganho estático, como esperado pela equação 4.6. As conclusões tiradas por observação da figura podem ser as mesmas tiradas no subcapítulo 6.2 por observação da figura 6.8, uma vez que os resultados são muito semelhantes. Verifica-se que a frequência de corte do sistema diminui ligeiramente do ensaio livre para o ensaio com massa e que a taxa de amortecimento não sofreu alterações significativas uma vez que as curvas têm praticamente a mesma oscilação na zona da frequência de corte.

De seguida, foi realizada a subtração ao modelo feito no ensaio com a massa do modelo do ensaio livre e obtiveram-se os resultados apresentados na figura 6.21

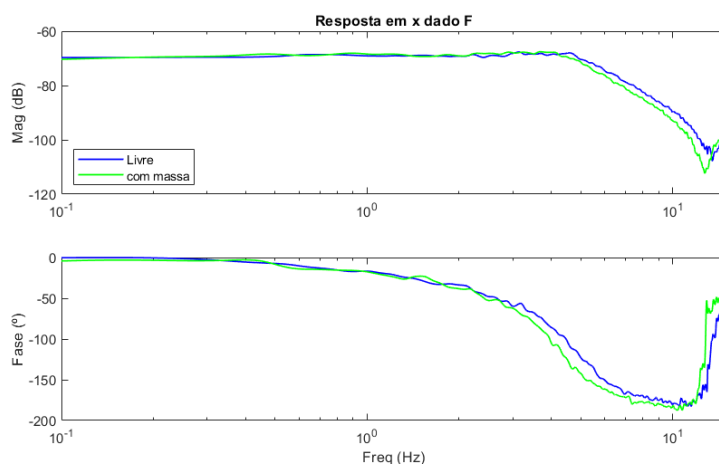


Figura 6.20 - FRF estimada do ensaio livre e do ensaio com massa para perturbação de força.

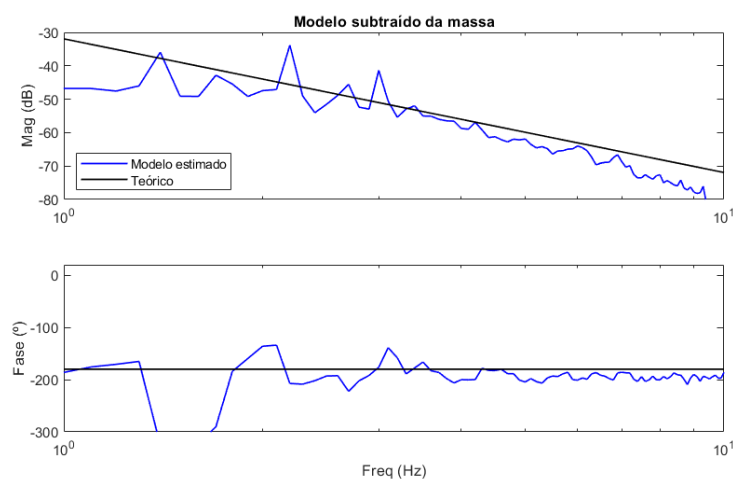


Figura 6.21 – FRF da massa estimado no ensaio de força com o modelo teórico.

Considera-se, mais uma vez, que a massa está corretamente identificada pelo método usado na gama de frequências entre 1 e 10 Hz, uma vez que a resposta à frequência estimada é muito semelhante à teórica, validando assim o método usado para identificar a dinâmica do braço na gama de frequências analisada de frequências analisada.

6.6. Ensaio com braço com perturbação de força unidirecional com impedância simulada

Nesta fase foram realizados dois ensaios: um deles com o braço relaxado e o outro com o braço contraído. Foram utilizadas as mesmas condições dos dois ensaios anteriores: a impedância emulada do robô tem uma rigidez de 3000 N/m e uma taxa de amortecimento de 0.5 e é aplicada uma perturbação de força com amplitude máxima de 30 N durante 30 s. Foi

verificado se a coerência entre o sinal de entrada e o de saída se manteve acima de 0.8, apresentada no anexo A.2, desta forma conclui-se, mais uma vez, que existe uma relação linear entre eles. Como nos ensaios com o braço com perturbação de posição, em primeiro lugar é feita a estimação do modelo paramétrico e de seguida é feita a parametrização do sistema.

6.6.1. Estimação do modelo não paramétrico

Na figura 6.22, são apresentados os modelos estimados sobrepostos do ensaio livre e dos ensaios com o braço relaxado e contraído.

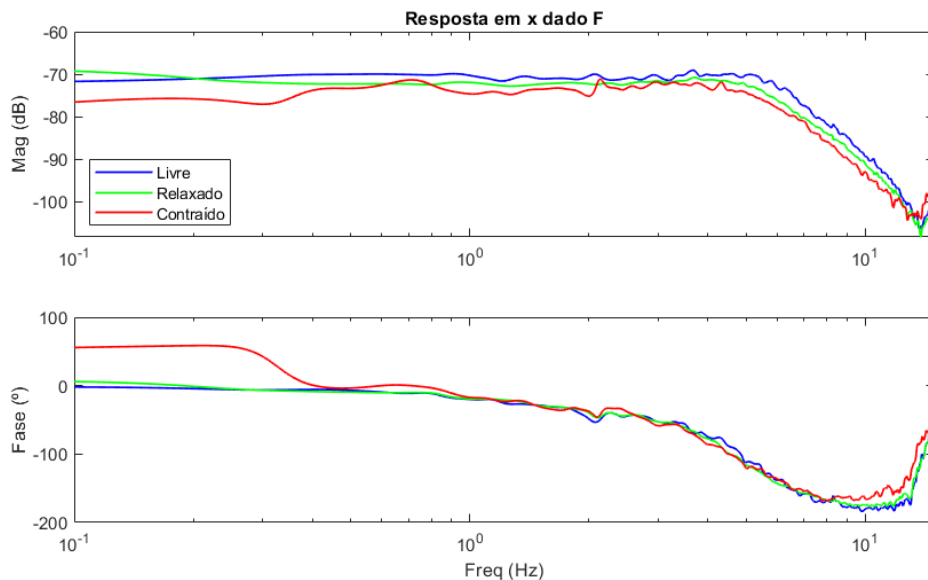


Figura 6.22 – FRF do sistema robô+braço com perturbação de força.

Como acontece com os ensaios de perturbação de posição, a frequência de corte diminui do ensaio livre para o ensaio com o braço relaxado e desce mais uma vez para o ensaio com o braço contraído. Ocorre também uma descida no ganho estático, como esperado pela equação 5.3.

6.6.2. Estimação do modelo paramétrico

De seguida, fez-se um aproximação das respostas em frequência dos ensaios de força a sistemas de 2ª ordem. A figura 6.23 apresenta as respostas em frequência dos ensaios em sobreposição com as respetivas aproximações e na tabela 6.5 estão apresentados os parâmetros da aproximação pela equação 5.9.

Tabela 6.5 – Parâmetros da aproximação dos ensaios de perturbação de força.

Ensaio	b_0	a_1	a_0	fit (%)
Livre	0.195	22.65	785.3	81.3
Relaxado	0.151	21.51	717.1	80.9
Contraído	0.129	21.76	690.1	82.9

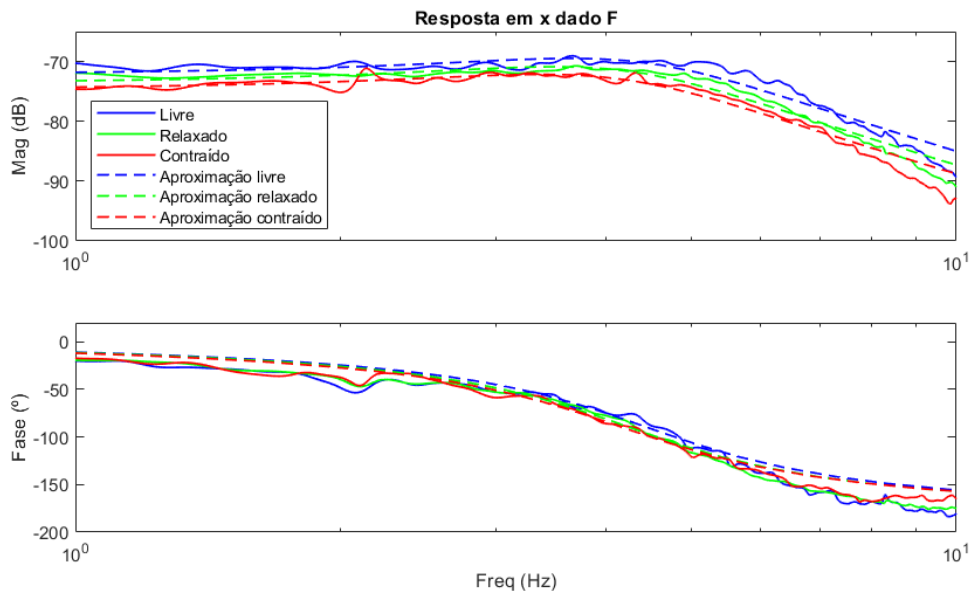


Figura 6.23 – FRF da aproximação do sistema robô+braço com perturbação de posição.

Os parâmetros da impedância braço são obtidos através da equação 5.18, subtraindo a função de transferência de 2ª ordem da dinâmica do robô em regime livre, à função de transferência da dinâmica do sistema total. Na tabela 6.6 apresentam-se os parâmetros da dinâmica do braço estimados e na figura 6.24 estão apresentados os modelos da dinâmica do braço obtidos para o braço relaxado e contraído.

Tabela 6.6 – Parâmetros do braço resultado dos ensaios de perturbação de posição numa direção

Ensaio	M_b (Kg)	β_b (N s/m)	k_b (N/m)	ω_n (Hz)	ξ	K_0 ($\times 10^{-3}$)
Relaxado	1.493	26.32	720.9	3.50	0.40	1.39
Contraído	2.654	53.23	1343.7	3.58	0.44	0.74

Verifica-se mais uma vez uma subida da rigidez, do coeficiente de amortecimento e da inércia do braço contraído em relação ao braço relaxado. No entanto, a frequência natural e a taxa de amortecimento nos dois ensaios são muito semelhantes, uma vez que se verifica uma subida de rigidez, do amortecimento e da inércia de forma proporcional do braço relaxado para o braço contraído.

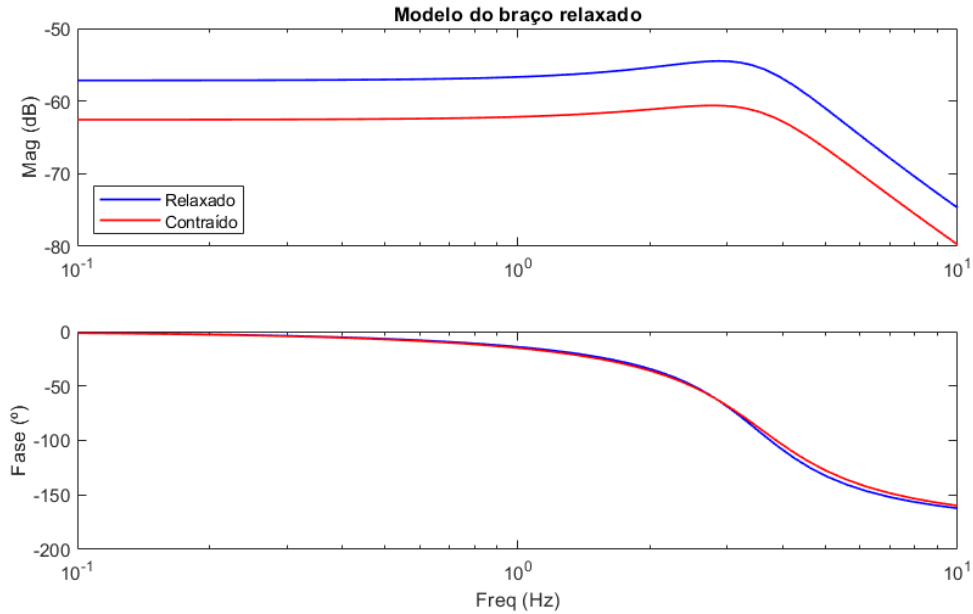


Figura 6.24 – FRF do braço relaxado e contraído para ensaios de perturbação de força com impedância

6.7. Ensaios com braço com perturbação unidirecional de força sem impedância simulada

Os próximos ensaios foram realizados com perturbação de força, mas sem uma impedância simulada do robô. Isto é, o robô foi colocado num modo de compensação gravítica e, a partir daí, foi aplicada a perturbação de força no braço do sujeito experimental. O modo de compensação gravítica não compensa por completo a inércia do robô e o atrito nas juntas, no entanto estas componentes podem ser desprezadas na análise do modelo. Assim, nesta situação, a força é aplicada diretamente no braço e é obtido o modelo do braço diretamente sem haver necessidade de subtrair o modelo simulado do robô.

Quando o robô se encontra em compensação gravítica, é necessário que o sujeito exerça alguma força para manter o braço fixo. Assim, não é possível manter o braço completamente relaxado nestes ensaios. Desta forma, foram realizados dois ensaios nesta fase de ensaios: um deles com uma amplitude de perturbação igual a 10 N, que implica um nível de contração médio do sujeito experimental, e o outro com uma amplitude de 20 N, onde foi pedido uma contração máxima do sujeito. Para efeitos de apresentação dos resultados, os ensaios são denominados “semi-contraído” e “contraído” respetivamente.

6.7.1. Estimação do modelo não paramétrico

Depois de realizados os ensaios, foram verificadas as funções de coerência de cada um deles, apresentadas no anexo A.3. Ambos apresentavam valores de coerência aceitáveis para a análise realizada. De seguida, realizada a estimação do modelo na resposta em frequência. A figura 6.25 apresenta a estimação feita para os dois ensaios.

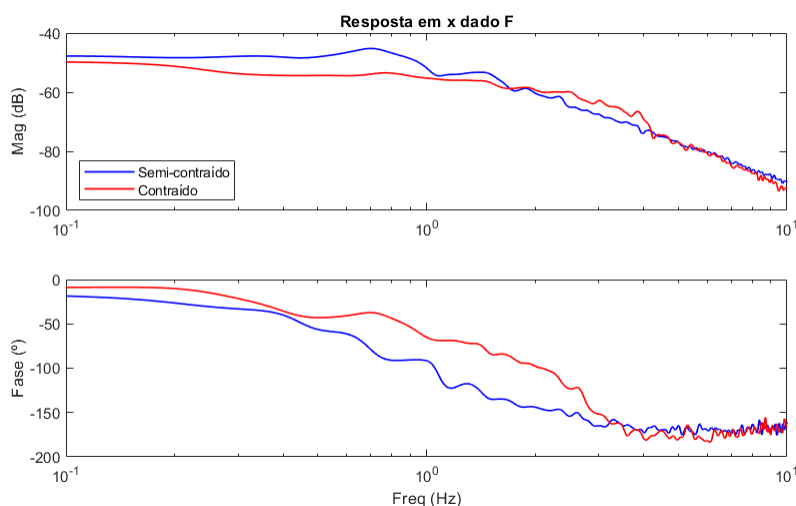


Figura 6.25 – FRF do braço no ensaio de perturbação de força sem impedância.

Neste ensaio, verifica-se que o modelo estimado do braço é muito semelhante a um sistema de 2ª ordem, validando, assim, a hipótese inicial de aproximar o modelo do braço a este tipo de sistema. Desta forma, seria de esperar que a frequência de corte aumentasse e o ganho estático diminuísse com o aumento da rigidez provocado pelo aumento do nível de contração do braço. Por observação da figura 6.25, verifica-se que estes dois fenómenos se confirmam nos ensaios realizados.

6.7.2. Estimação do modelo paramétrico

Com o modelo não paramétrico obtido, foi realizada a aproximação a um sistema de 2ª ordem dos modelos dos dois ensaios. Nas figuras 6.26 e 6.27, são apresentadas as aproximações de cada um dos ensaios e, na tabela 6.7, são apresentadas a qualidade da aproximação e os parâmetros do sistema aproximado (massa, coeficiente de amortecimento e rigidez).

Tabela 6.7 – Resultados da aproximação dos ensaios de perturbação de força sem impedância.

Ensaio	M_b (kg)	β_b (Ns/m)	k_b (N/m)	ω_n (Hz)	ξ	K_0 ($\times 10^{-3}$)	fit (%)
Semi-contraído	7.887	52.63	227.8	0.85	0.62	4.39	78.4
Contraído	4.424	75.07	442.8	1.59	0.84	2.26	77.4

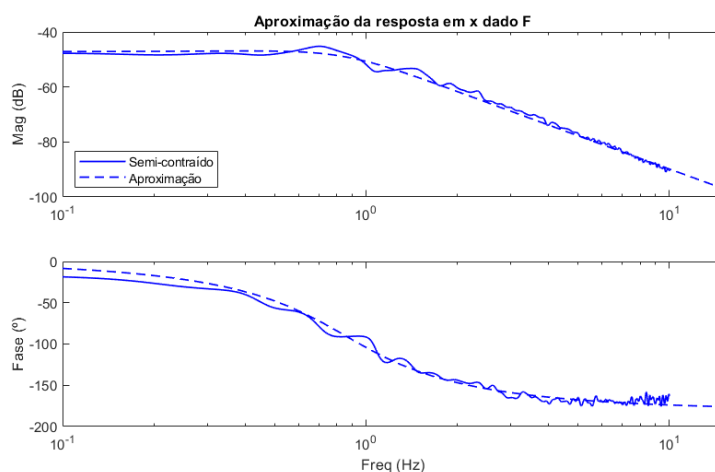


Figura 6.26 – FRF aproximada do braço semi-contraído no ensaio com perturbação de força sem impedância.

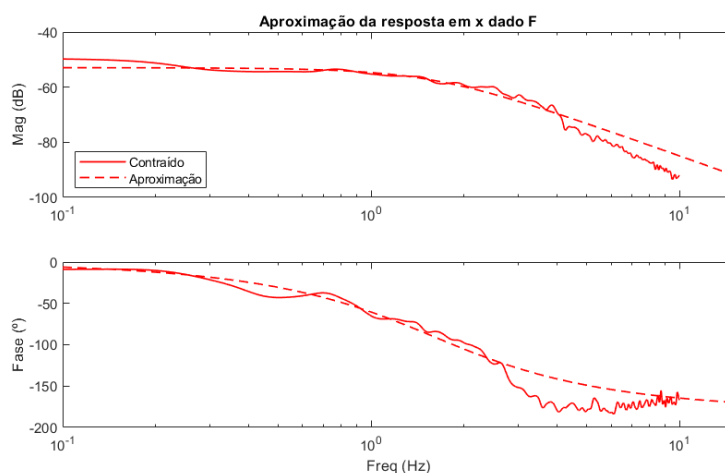


Figura 6.27 – FRF aproximada do braço contraído no ensaio com perturbação de força sem impedância.

Para ambos os ensaios, tendo em conta o valor %fit, é considerado que a aproximação a um sistema de 2ª ordem é aceitável. Verifica-se um aumento da rigidez e do amortecimento entre os dois ensaios, como seria de esperar. No entanto, também é verificada uma descida da inércia do braço do ensaio semi-contraído para o ensaio contraído. Se for subtraída a massa aparente do robô na configuração do ensaio (3.91 Kg), verifica-se uma proximidade entre os resultados obtidos nos ensaios com o braço contraído, seja com uma perturbação de força sem impedância, ou com uma perturbação de posição com uma rigidez emulada de 1500 N/m.

6.8. Resumo dos ensaios unidirecional

Tendo obtido todos os resultados, foram organizados todos os modelos obtidos do braço relaxado, ou, no caso do ensaio de perturbação de força sem impedância simulada, semi-contraído, e os modelos do braço contraído numa tabela e dois diagramas de bode. Na tabela 6.8 são apresentados os parâmetros dos modelos. Nas figuras 6.28 e 6.29 apresentam-se os modelos num diagrama de bode: a azul, verde e vermelho representam-se os modelos dos ensaios com perturbação de posição e, a laranja e a roxo, representam-se os modelos estimados a partir dos ensaios com perturbação de força com e sem impedância do robô, respetivamente.

Tabela 6.8 – Parâmetros dos modelos do braço estimados.

Ensaio			M_b (Kg)	β_b (N s/m)	k_b (N/m)	ω_n (Hz)	ξ	K_0 ($\times 10^{-3}$)
Perturbação de posição	K =1500 N/m	Relaxado	0.912	11.01	65.75	1.35	0.71	15.2
		Contraído	1.389	26.72	451.46	2.87	0.53	2.21
	k=3000 N/m	Relaxado	1.752	43.28	601.39	2.95	0.67	1.66
		Contraído	2.319	54.65	716.89	2.80	0.67	1.39
	K=4500 N/m	Relaxado	1.657	45.86	493.12	2.75	0.80	2.03
		Contraído	2.323	57.34	731.17	2.82	0.70	1.37
P. de força	K=3000 N/m	Relaxado	1.493	26.32	720.9	3.50	0.40	1.39
		Contraído	2.654	53.23	1343.7	3.58	0.44	0.74
	K=0 N/m	Semi-contraído	7.887	52.63	227.8	0.85	0.62	4.39
		Contraído	4.424	75.07	442.8	1.59	0.84	2.26

Uma vez que é impossível, por parte do sujeito experimental, manter um nível de contração durante o todo ensaio e para diferentes ensaios, sem algum tipo de feedback, não é possível avaliar os métodos usados com base nos resultados obtidos para o braço contraído. No entanto, é possível fazer uma análise relativa entre o modelo do braço relaxado com o modelo do braço contraído, uma vez que é de esperar que a dinâmica do braço relaxado não varie muito com a alteração do método utilizado.

Os métodos mais coerentes entre si são os de perturbação de posição com rigidez simulada de 3000 e 4500 N/m. Ambos os modelos do braço relaxado e contraído, estimado através destes métodos, são muito semelhantes, sendo quase indistinguíveis no caso dos modelos do braço contraído. Por observação dos diagramas de bode, verifica-se que se obtém modelos da dinâmica do braço semelhantes através dos ensaios com perturbação de força com uma impedância do robô.

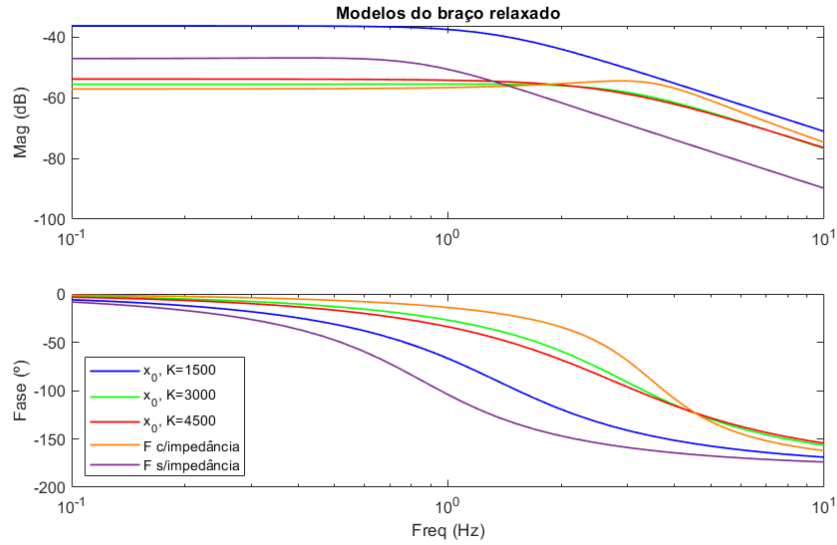


Figura 6.28 – FRF estimadas do braço relaxado.

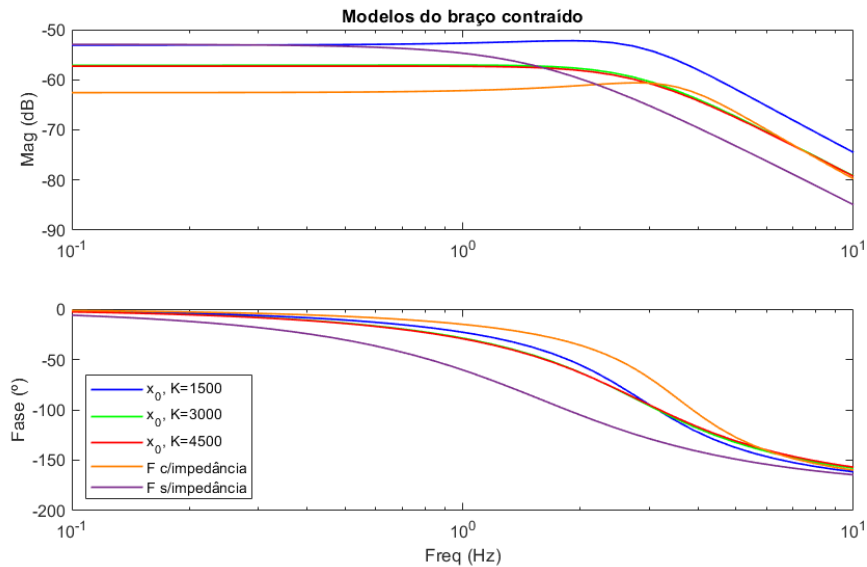


Figura 6.29 – FRF estimadas do braço contraído.

Como é de esperar, em quase todos os métodos usados verifica-se um aumento da inércia, do coeficiente de amortecimento e da rigidez do modelo de braço relaxado para o contraído. A exceção ocorre no ensaio de perturbação de força sem impedância simulada pelo robô, onde a inércia estimada foi superior no modelo do braço semi-contraído. Nos modelos de perturbação de posição com rigidez simulada de 3000 e 4500 N/m e no ensaio de perturbação de força com impedância simulada, verifica-se que a frequência natural e a taxa de amortecimento mantêm valores próximos entre o modelo de braço relaxado e contraído. Nos outros dois métodos, este fenómeno não é verificado.

6.9. Ensaio com perturbação de posição tridimensional

Por fim, foram realizados ensaios com três perturbações de posição diferentes nas três direções cartesianas. Como nos primeiros ensaios realizados, foi feito um ensaio em regime livre e dois ensaios com o braço, um deles relaxado e o outro contraído. A rigidez simulada nestes ensaios foi de 3000 N/m, a taxa de amortecimento igual a 0.5, a perturbação tinha uma amplitude máxima de 1 cm nas três direções cartesianas e uma duração de 30 segundos.

A coerência do sinal da posição de referência com a posição real nestes ensaios, apresentado na figura 6.30, tem valores mais baixos em relação aos ensaios com perturbação numa direção, tendo um valor médio de 0.7 no intervalo de frequências analisado. Isto deve-se ao facto de o controlo cartesiano do robô emular o sistema pedido para as três direções em simultâneo, ou seja, as impedâncias nas direções cartesianas estão acopladas entre elas e dependendo também da configuração do robô. Na figura 6.30 são apresentadas as funções coerência do ensaio livre nas três direções cartesianas.

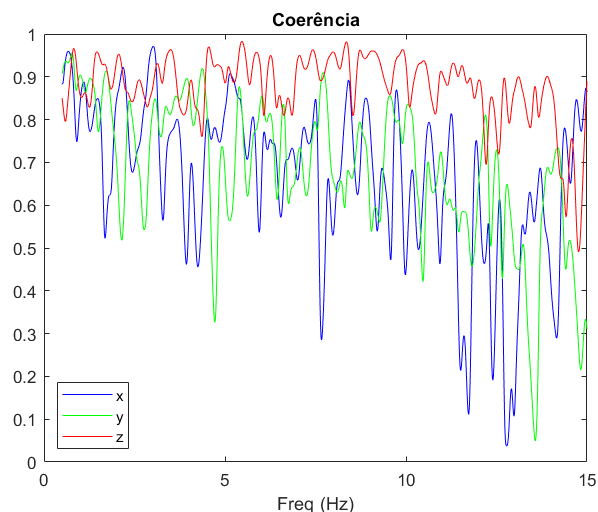


Figura 6.30 – Coerência entre a posição de referência e a posição real nas três direções cartesianas

Com isto, foi calculado a rigidez numa forma semelhante ao método usado nos ensaios de perturbação de posição numa direção. Foi feita a estimação do modelo não paramétrico do ensaio livre e dos ensaios com braço, estes modelos foram aproximados a um sistema de 2ª ordem sem zeros e foi subtraído o sistema do robô ao sistema total dos ensaios com o braço. Este processo foi repetido para calcular a rigidez do braço para várias direções, onde o sinal de entrada e o sinal de saída das várias direções é calculado com base nos dados de entrada e de saída das três direções cartesianas.

A figura 6.31 apresenta a rigidez direcional do sistema total no plano $z = 0$, segundo o referencial da figura 5.1, calculada para os ensaios livre, com braço relaxado e contraído, onde a rigidez numa direção é dada pela distância da origem do gráfico ao ponto do gráfico

correspondente a essa direção. As figuras 6.32, 6.33 e 6.34 são apresentadas a representação desta rigidez no espaço tridimensional.

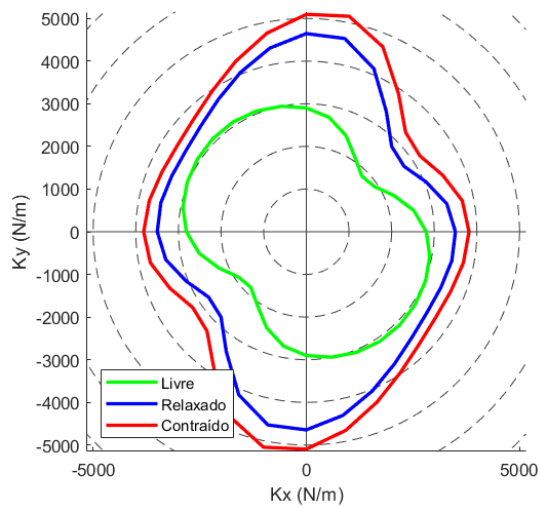


Figura 6.31 – Rigidez direcional do modelo do robô+braço nos três ensaios no plano $z = 0$.

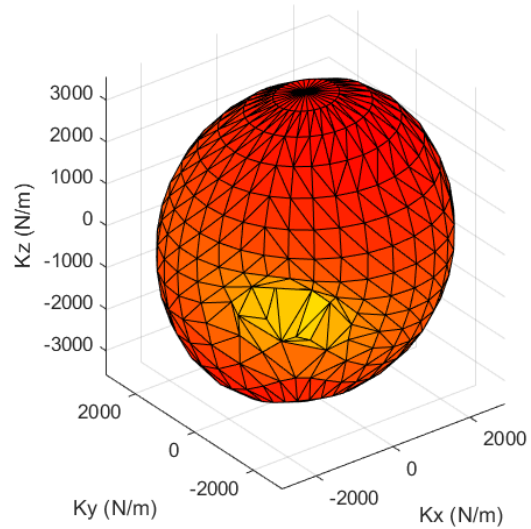


Figura 6.32 – Rigidez direcional do modelo do robô no ensaio livre no espaço tridimensional.

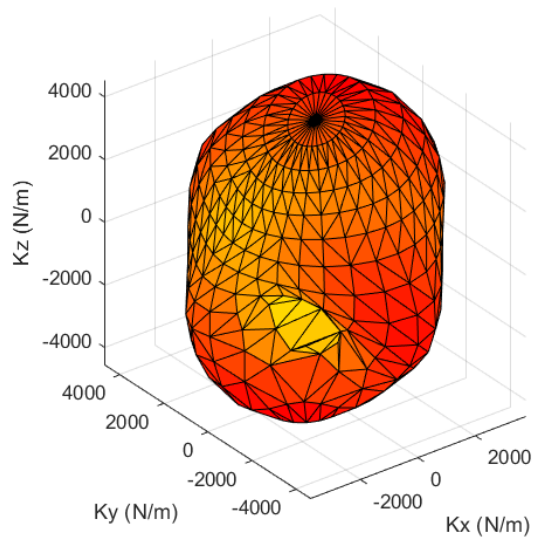


Figura 6.33 – Rigidez direcional do modelo robô+braço no ensaio com braço relaxado no espaço tridimensional.

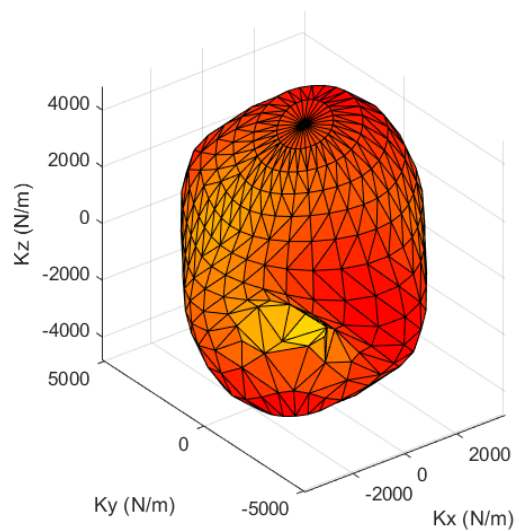


Figura 6.34 – Rigidez direcional do modelo robô+braço no ensaio com braço contraído no espaço tridimensional.

Tendo em conta o sistema definido pelo utilizador, seria de esperar que a rigidez direcional do sistema simulado do robô no ensaio livre tivesse uma forma esférica. No entanto, a forma verificada na figura 6.32 não é exatamente esférica, assemelhando-se mais a uma elipse,

sendo maior na direção vertical. Isto deve-se ao facto de a qualidade do controlo de impedância do LWR depender da configuração do robô, ou seja, tendo em conta a posição das juntas, o robô pode ter maior ou menor facilidade em seguir uma trajetória, nunca podendo ser totalmente rigorosa em todas as direções numa configuração. Assim, pela figura 6.31, verifica-se que o sistema simulado segue a rigidez definida de 3000 N/m em algumas direções, mas para outras direções já apresenta uma rigidez mais baixa. Verifica-se também nesta figura e nas figuras 6.33 e 6.34, como é esperado, que a rigidez do sistema total no ensaio com o braço contraído é maior que a rigidez calculada no ensaio com o braço relaxado.

Para o cálculo da rigidez direcional do braço, é subtraída a rigidez estimada nos ensaios com o braço com a rigidez calculada no ensaio livre. Na figura 6.35 apresenta-se a representação da rigidez direcional calculada do braço relaxado e do braço contraído no plano $z = 0$. Nas figuras 6.36 e 6.37 apresentam-se a mesma rigidez no espaço tridimensional, onde é adicionada cor vermelha nas zonas de máxima rigidez, amarelo nas zonas médias e verde nas zonas de mínima rigidez.

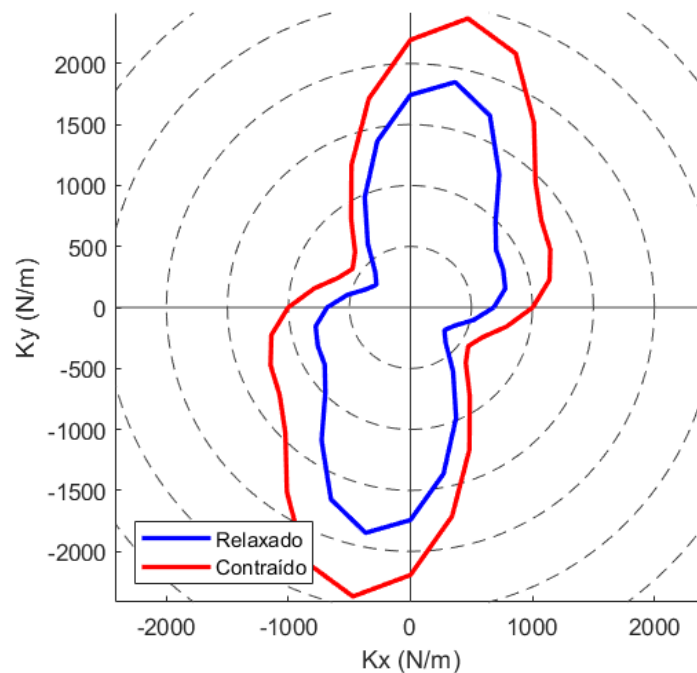


Figura 6.35 – Rigidez direcional do modelo do braço relaxado e contraído no plano $z = 0$.

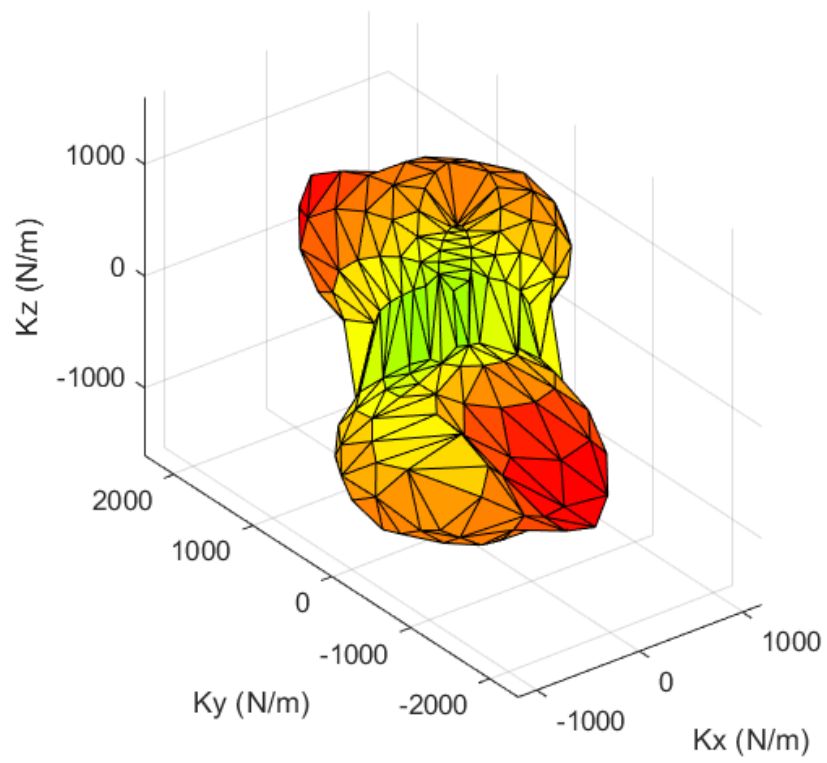


Figura 6.36 – Rigidez direcional do braço relaxado no espaço tridimensional.

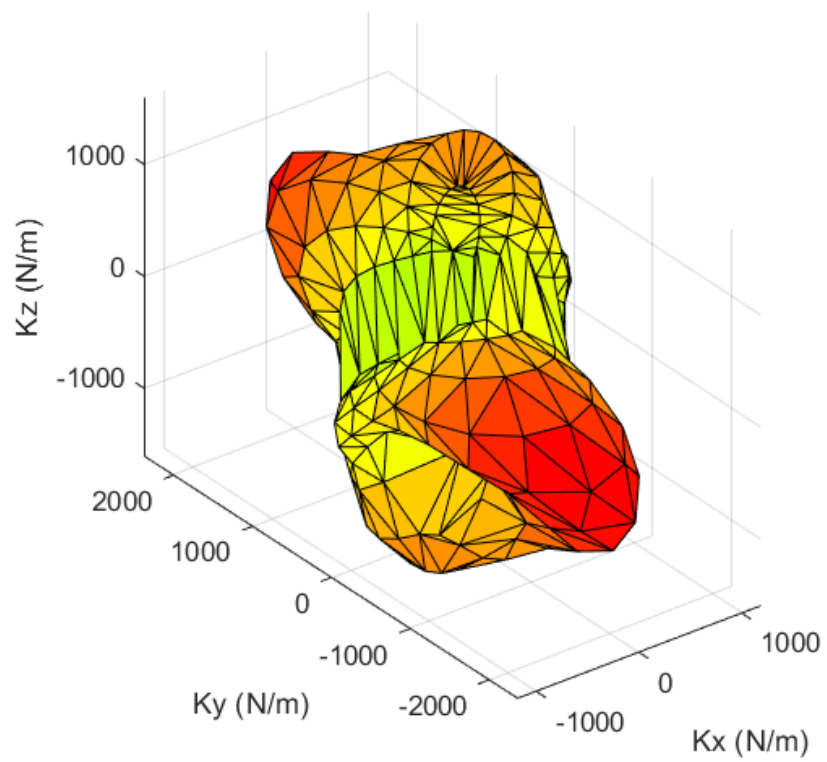


Figura 6.37 – Rigidez direcional do braço contraído no espaço tridimensional

Pela figura 6.35, não é observada uma elipse de rigidez, mas verificou-se uma direção máxima da rigidez e, praticamente numa direção perpendicular à direção de máxima rigidez, uma direção de rigidez mínima, formando assim uma forma semelhante à forma de um “amendoim”. Apesar de a forma da rigidez obtida não ser igual às estimadas noutros estudos, a direção de máxima rigidez coincide com as obtidas em [8]. No entanto, os valores de rigidez obtidos são muito mais elevados do que os valores obtidos em estudos anteriores. Nas figuras 6.36 e 6.37 é igualmente verificada esta forma de “amendoim” no espaço tridimensional. Note-se também que a rigidez do braço aumenta em todas as direções com a sua contração, tendo um maior aumento da rigidez nas direções de maior rigidez.

7. Conclusão

No início da realização deste projeto, foi definido o objetivo principal de desenvolver e validar o método de identificação do braço através da aplicação duma força na mão através do KUKA LWR. Assim, a primeira fase do projeto passou por preparar a configuração experimental para os ensaios: estabelecer a ligação do robô a um computador exterior, desenvolver um ficheiro *simulink* de controlo do robô, explorar as técnicas de controlo disponíveis, construir a peça de ligação do braço ao robô e definir o procedimento dos ensaios.

Com a configuração experimental preparada, foram definidos os ensaios experimentais a fazer com o objetivo de criar um modelo do braço, verificar se a aproximação do braço a um sistema de 2ª ordem é viável e verificar a elipsoide de rigidez do braço identificada em [6] e [8]. Assim, foram feitos ensaios de perturbação de posição em uma e nas três direções e ensaios de perturbação de força numa direção.

Com o objetivo de validar a identificação, foram feitos ensaios com um acréscimo duma massa com o propósito de identificar a massa adicionada. A identificação foi considerada aceitável para a gama de frequências estudada de 0.1 a 10 Hz para os ensaios de perturbação de posição e de força.

Nos ensaios de perturbação de posição numa direção, foram estudados os efeitos da variação da rigidez do sistema simulado pelo robô no modelo estimado do braço, assim, foram realizados ensaios com três perturbações diferentes. Verificou-se que, para valores de rigidez mais elevados, o modelo do braço estimado tornava-se mais constante.

De seguida, foram realizados ensaios com perturbação de força com e sem impedância emulada pelo robô. No ensaios com impedância, foi feito um ensaio análogo aos ensaios de perturbação de posição. Desta forma, seria de esperar que os resultados dos ensaios de perturbação de força sem impedância fossem semelhantes aos de perturbação de posição. Verificou-se uma proximidade entre os resultados dos ensaios com os dois tipos de perturbação e concluiu-se que ambas as perturbações são válidas na identificação do braço.

Nos ensaios de perturbação de força sem impedância, a força comandada é aplicada diretamente no braço e, assim, não existe a necessidade de subtrair uma dinâmica emulada do robô e obtém-se diretamente a dinâmica do braço. Por observação dos resultados destes ensaios, concluiu-se que a aproximação do braço a um sistema de 2ª ordem é viável para a gama de valores analisados. No entanto, os resultados obtidos a partir deste método não foram tão coerentes como os métodos anteriores. Isto pode dever-se ao facto de ter sido desprezado a inércia e o atrito do robô.

Os últimos ensaios foram realizados com perturbação de posição em três direções em simultâneo. Estes ensaios tinham o objetivo de estimar a elipse de rigidez, ou uma elipsoide no

caso tridimensional. Assim, foi aplicado o método usado nos primeiros ensaios para calcular o modelo do braço em várias direções. No plano $z = 0$, não se identificou uma elipse de rigidez, mas sim uma rigidez em forma de “amendoim”, com uma direção máxima de rigidez e uma direção perpendicular com a rigidez mínima. O mesmo se pôde observar no espaço tridimensional.

Os resultados obtidos nos ensaios em contração apresentam uma maior variabilidade, visto que não foi usado nenhum método para obter o nível de contração do braço e, sendo assim, não foi possível garantir as mesmas condições entre ensaios.

Foram encontrados alguns problemas relacionado com o robô. O primeiro foi o facto do sistema simulado pelo robô não ser exatamente igual a um sistema de 2ª ordem, como é possível observar em alguns ensaios, em que o declive era maior do que -40 dB por década na magnitude para altas frequências. Outro problema é a dependência da qualidade do sistema emulado na configuração do robô. Em alguns casos, as impedâncias cartesianas nas diferentes direções estão acopladas, mais verificado no ensaio de perturbação nas três direções, onde os valores da função coerência foram, no geral, mais baixas. Estes dois problemas estão relacionados com as limitações do algoritmo de controlo interno do robô.

7.1. Trabalho futuro

Neste subcapítulo são deixadas algumas sugestões para a continuação deste projeto.

A configuração experimental deve ser melhorada. Nesta tese, a medição de força externa é dada pelos sensores de binário nas juntas e o modelo do robô, não sendo então tão fiável. Assim, deve ser adicionada um sensor de força no *end effector* e pode ser usado o sinal de força medida para estimar o modelo do braço diretamente, verificando se a medição de força por esta via é mais exata. Podem ainda ser melhoradas o método de prender a mão no *end effector* e de manter imóvel o tronco, mais especificamente a omoplata, do sujeito experimental.

A animação desenvolvida deve ser utilizada como feedback visual de posição na realização de experiências onde o sujeito experimental tenta manter uma posição fixa, como os ensaios feitos nesta tese, mas também em ensaios em movimento, semelhantes aos ensaios feitos em [9, 10]. Pode ser ainda utilizada a animação como feedback de força, onde é pedido ao sujeito experimental para aplicar uma força específica, medindo assim o efeito da aplicação da força na impedância do braço.

No tratamento e análise de dados, o sistema simulado do robô e o braço humano podem ser aproximados a sistemas de ordens superiores, como sistemas de 3ª ordem, podendo ainda ser

acrescentado zeros, e pode ser estudado o efeito da mudança ordem da aproximação na qualidade do modelo estimado.

O uso de eletromiografia para controlar o nível de contração do braço pode ser utilizado para estudar com mais detalhe o efeito do nível de contração na dinâmica do braço.

Pode ainda ser explorado com mais detalhe os ensaios com perturbação tridimensional, investigando o efeito dos tipos de perturbação nos resultados, como foi feito neste trabalho para o caso unidimensional. Deverá também ser estudado também o efeito da postura do braço na elipsoide de rigidez.

Bibliografia

- [1] Winters, J. M., Stark, L., Muscle Models: What Is Gained and What Is Lost by Varying Model Complexity, *Biological Cybernetics*, 55: 403-420, 1987.
- [2] Winters, J. M., Hill-based muscle models: a systems engineering perspective. *Multiple muscledsystems*, Springer 69–93, 1990.
- [3] Hill., A., The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *The Royal Society of London, Series B, Biological Sciences*, 126(843):136–195, 1938.
- [4] Hoffman, B. W., Lichtwark, G. A., Carroll, T.J., Cresswell, A. G., A comparison of two Hill-type skeletal muscle models on the construction of medial gastrocnemius length-tension curves in humans in vivo, *Journal of Applied Physiology*, 113: 90–96, 2012.
- [5] Huxley, A. F., Muscle structure and theories of contraction. *Progress in Biophysics and Biophysical Chemistry*, 7: 255-318, 1957.
- [6] Mussa-Ivaldi, F. A., Hogan, N., Bizzi, E., Neural, mechanical, and geometric factors subserving arm posture in humans, *The Journal of Neuroscience*, 5: 2732–2743, 1985.
- [7] Burdet, E., Franklin, D. W., Milner, T. E., *Human Robotics: Neuromechanics and Motor Control*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2013, ISBN 978-0-262-01953-8.
- [8] Perreault, E.J., Kirsch, R.F., Crago, P.E. Multijoint dynamics and postural stability of the human arm. *Experimental brain research*, 157: 507–517, 2004.
- [9] Gomi, H., Kawato, M. Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement, *Biological cybernetics*, 76: 163-171, 1997.
- [10] Tee, K., Burdet, E., Chew, C., A model of force and impedance in human arm movements. *Biological cybernetics*, 90: 368-375, 2004.
- [11] Tortora, G. J., Derrickson, B., *Principles of Anatomy & Physiology*, 13^a edição, John Wiley & Sons, USA, 2012, ISBN 13 978-0470-56510-0.
- [12] Gans, C., Gaunt, A. S., Muscle architecture in relation to function, *Journal of Biomechanics*, 24: 53-65, 1991.
- [13] Maganaris, C. N., Paul, J.P., Tensile properties of the in vivo human gastrocnemius tendon, *Journal of Biomechanics*, 35(12): 1639-1946, 2002.
- [14] Kearney, R. E., Hunter, I. W., System identification of human joint dynamics. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 18(1): 55-87, 1990.
- [15] KUKA System Technology, *KUKA system software 5.6 Ir – operating and programming instructions for system integrators*, 2010.

- [16] KUKA System Technology, KUKA Fast Research Interface 1.0 – For KUKA System Software 5.6 Ir, 2011.
- [17] KUKA System Technology, KR C2 Ir – Specification, 2012.
- [18] KUKA System Technology, Lightweight Robot 4+ – Specification, 2012.
- [19] R. Bischoff, J. Kurth, G. Schreiber, R. Koeppel, A. Albu-Schaffer, A. Beyer, O. Eiberger, S. Haddadin, A. Stemmer, G. Grunwald and G. Hirzinger, The KUKA-DLR lightweight robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing, ISR 2010, ROBOTIK 2010, pp. 1-8, 2010.
- [20] Žlajpah, L., Petrič, T., FRI-xPC server for KUKA FRI controller, IJS Technical report 11546, “Jožef Stefan” Institute Ljubljana, Eslovénia, 2014.
- [21] Bendat, S. J., Piersol, A. G., Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4^a edição, Wiley, USA, 1971, ISBN 978-0-470-24877-5
- [22] Tejado, I., Valério, D., Pires, P., Martins, J., Fractional order human arm dynamics with variability analyses, *Mechatronics*, 23(7): 805-812, 2013.
- [23] Welch, P. D., The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms., *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2): 70–73, 1967.
- [24] <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/tfestimate.html>, consultado a setembro de 2021.
- [25] <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/pwelch.html>, consultado a setembro de 2021.
- [26] <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/mscohere.html>, consultado a setembro de 2021.
- [27] Jubien, A., Gautier, M., Janot, A., Dynamic identification of the Kuka LightWeight robot: Comparison between actual and confidential Kuka's parameters, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 483-488, 2014.
- [28] Gaz, C., Flacco, F., De Luca, A., Identifying the dynamic model used by the KUKA LWR: A reverse engineering approach, 2014 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 1386-1392, 2014.
- [29] Gomi, H., Osu, R., Task-Dependent Viscoelasticity of Human Multijoint Arm and Its Spatial Characteristics for Interaction with Environments, *Journal of Neuroscience* 1 November 1998, 18(21): 8965-8978, 1998.
- [30] van der Smagt, P., Castellini, C., Urbanek, H., Human Arm Impedance and EMG in 3D, *Proceedings. SKILLS, International Conference on Multimodal Interfaces for Skills Transfer*, 15-16 Dez. 2009.

Anexos

A. Funções de coerência

A.1. Ensaios de perturbação de posição unidirecional

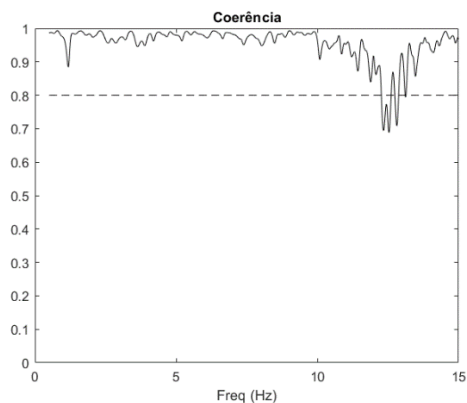


Figura A.1 – Coerência do ensaio com massa de perturbação de posição $K=1500$

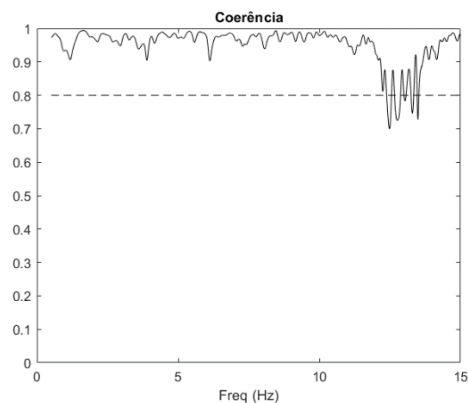


Figura A.2 – Coerência do ensaio com massa de perturbação de posição $K=3000$

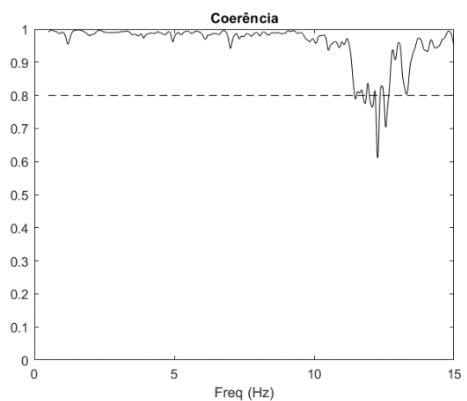


Figura A.3 – Coerência do ensaio com massa de perturbação de posição $K=4500$

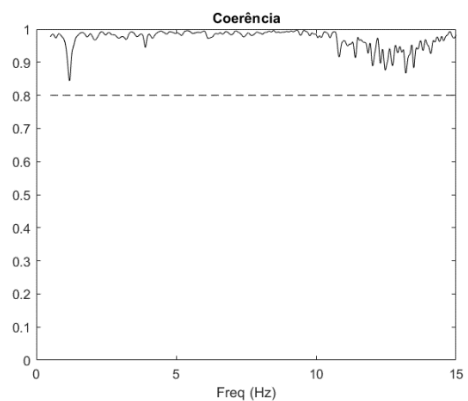


Figura A.4 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de posição $K=1500$

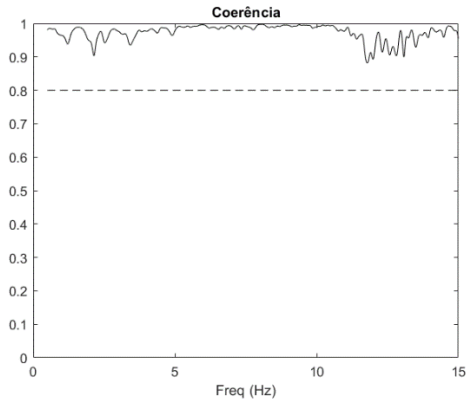


Figura A.5 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de posição K=3000

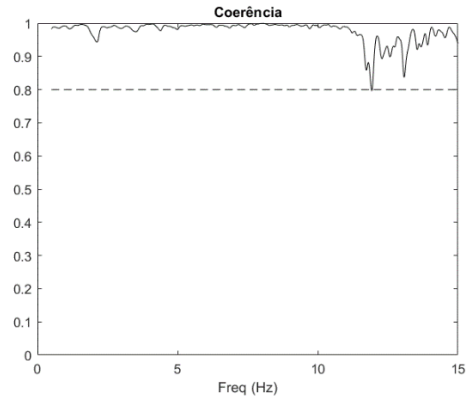


Figura A.6 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de posição K=4500

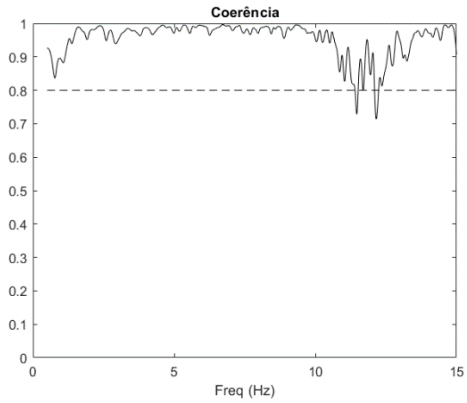


Figura A.7 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de posição K=1500

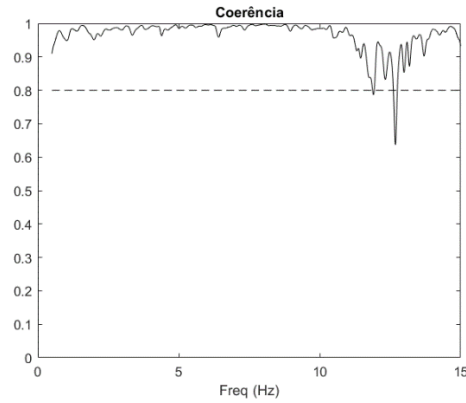


Figura A.8 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de posição K=3000

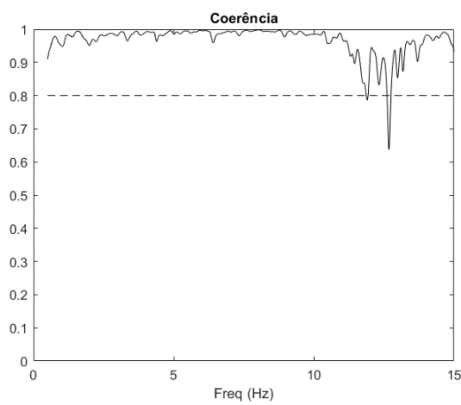


Figura A.9 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de posição K=4500

A.2. Ensaios de perturbação de força unidirecional com impedância

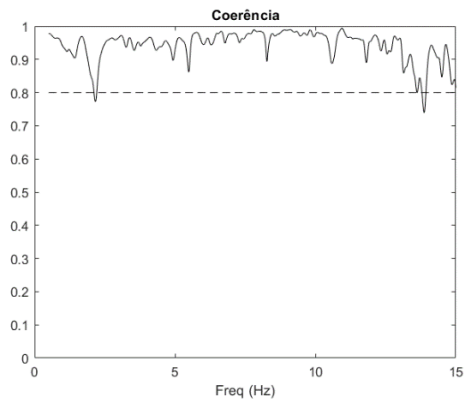


Figura A.10 – Coerência do ensaio livre de perturbação de força com impedância

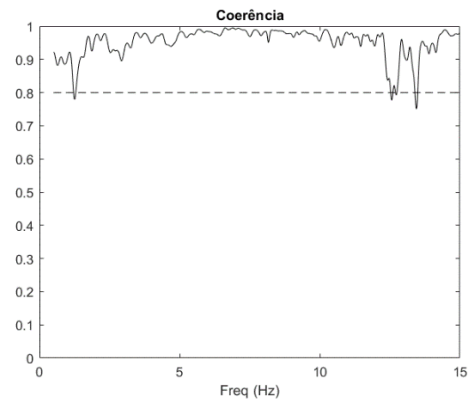


Figura A.11 – Coerência do ensaio com massa de perturbação de força com impedância

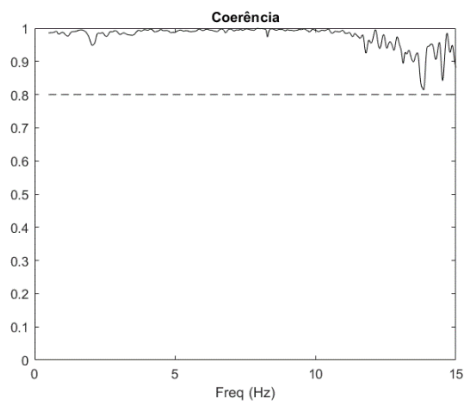


Figura A.12 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de força com impedância

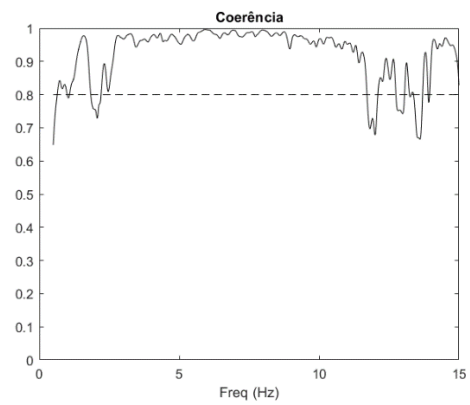


Figura A.13 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de força com impedância

A.3. Ensaios de perturbação de força com impedância

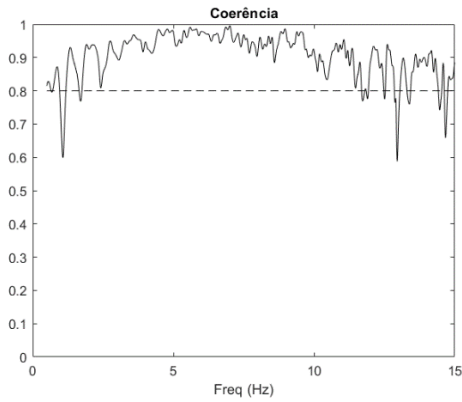


Figura A.14 – Coerência do ensaio com braço semi-contraído de perturbação de força sem impedância

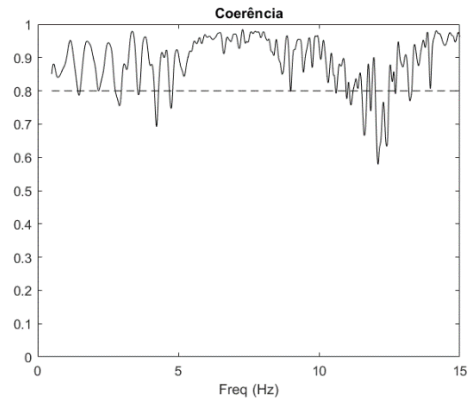


Figura A.15 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de força sem impedância

A.4. Ensaios de perturbação de posição tridimensional

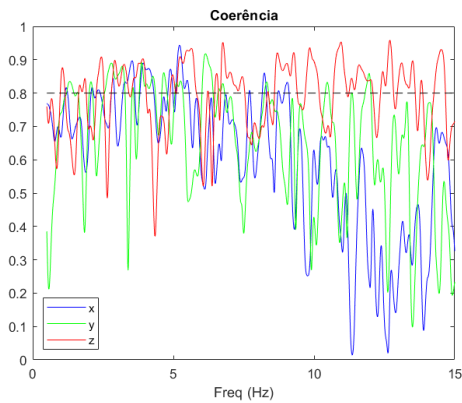


Figura A.16 – Coerência do ensaio com braço relaxado de perturbação de posição tridimensional

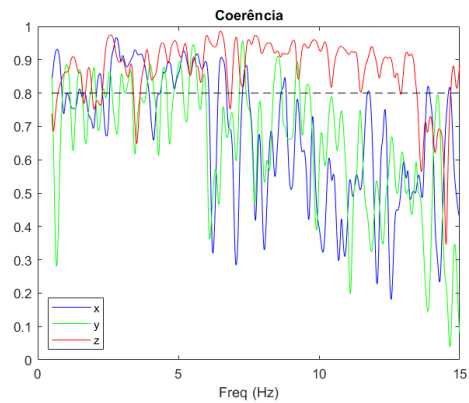


Figura A.17 – Coerência do ensaio com braço contraído de perturbação de posição tridimensional