



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.22.19.56-TDI

**UMA ARQUITETURA DE COMANDO E CONTROLE  
PARA TELERROBÔS ATRACADOS AOS SEUS ALVOS  
SOB ATRASOS DE TEMPO SIGNIFICATIVO E COM  
MEDIÇÃO DE SUAS DISTÂNCIAS**

Leonam da Silva Direito Pecky

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, orientada pelos Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e Keyvan Hashtrudi-Zaad, aprovada em 20 de setembro de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PG2E5P>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

### **Membros:**

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.22.19.56-TDI

**UMA ARQUITETURA DE COMANDO E CONTROLE  
PARA TELERROBÔS ATRACADOS AOS SEUS ALVOS  
SOB ATRASOS DE TEMPO SIGNIFICATIVO E COM  
MEDIÇÃO DE SUAS DISTÂNCIAS**

Leonam da Silva Direito Pecky

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, orientada pelos Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e Keyvan Hashtrudi-Zaad, aprovada em 20 de setembro de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3PG2E5P>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Pecly, Leonam da Silva Direito.

P338a Uma arquitetura de comando e controle para telerrobôs  
atracados aos seus alvos sob atrasos de tempo significativo e com  
medição de suas distâncias / Leonam da Silva Direito Pecly. – São  
José dos Campos : INPE, 2017.

xxviii + 103 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/08.22.19.56-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia  
Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de  
Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza, e  
Keyvan Hashtrudi-Zaad.

1. Robôs. 2. Controle. 3. Telerrobótica. 4. Atraso de tempo.  
5. Identificação de parâmetros. I.Título.

CDU 007.52:629.7

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

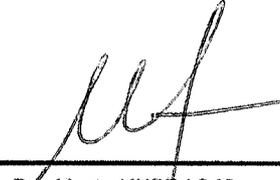
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Leonam da Silva Direito Pecly**

Título: **"UMA ARQUITETURA DE COMANDO E CONTROLE PARA TELERROBÔS ATRACADOS AOS SEUS ALVOS SOB ATRASOS DE TEMPO SIGNIFICATIVO E COM MEDIÇÃO DE SUAS DISTÂNCIAS"**

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica  
Espacial e Controle**

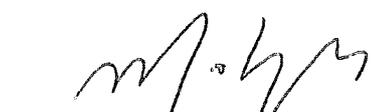
Dr. Mario Cesar Ricci



---

Presidente / INPE / SJC Campos - SP

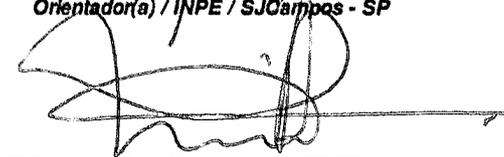
Dr. Marcelo Lopes de Oliveira e Souza



---

Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Paulo Glácomo Milani



---

Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Alexandre Carvalho Leite



---

Convidado(a) / IFF / Campos dos Goytacazes - RJ

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 20 de setembro de 2017



*“The greater our knowledge increases the more our ignorance unfolds”.*

*“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.*

*John F. Kennedy*



*A minha esposa **Amanda**, a meus pais **Magno** e **Nilzete**, a meus irmãos **Leandro** e **Laís**, e às amizades que cultivei durante a minha trajetória no INPE e na Queen's University.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por me proporcionar todas as condições necessárias para alcançar meus objetivos pessoais e profissionais.

A minha esposa Amanda pela amizade, pelo carinho, suporte e conselhos buscando sempre me apoiar durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Magno Silva e Nilzete Pecly, e irmãos, Leandro e Laís, pelo carinho e por estarem sempre ao meu lado.

Ao orientador professor Marcelo Lopes de Oliveira e Souza pela orientação e correção deste trabalho; e pelo apoio e credibilidade desde o início para o desenvolvimento deste projeto em colaboração com outra instituição.

Ao orientador professor Keyvan Hashtrudi-Zaad pela orientação, pela confiança em mim depositada e pelo esforço feito para poder realizar parte deste trabalho na *Queen's University*.

Ao amigo Luiz Marchi e aos outros que de alguma forma colaboraram desde o período de adaptação, e aos colegas de laboratório Chiedu Mokogwu, Ryan Schindeler, Daniel Cleveland, Jordan Marr e outros que contribuíram para um ótimo período de trabalho na *Queen's University*.

Aos professores que contribuíram para a minha formação acadêmica com dedicação, paciência e boa vontade. Aos funcionários do INPE e ao INPE pelo curso disponível; e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES e ao *Department of Foreign Affairs, Trade and Development-DFATD* (Programa ELAP) pela remuneração financeira.

Aos participantes da banca avaliadora pela disponibilidade.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta participaram, de alguma maneira durante o mestrado e no desenvolvimento deste trabalho.



## RESUMO

Atualmente, existe um significativo esforço desempenhado por diversas agências espaciais em desenvolver tecnologias para reabastecer ou reparar **satélites em órbita inativos (alvo+ambiente)** objetivando reutilizá-los até que os mesmos se tornem não reparáveis. Contudo, os atrasos de tempo existentes entre o **robô principal local (mestre, na base de comando)** e o **robô secundário remoto (escravo, no veículo controlado)** comprometem tanto a estabilidade como a transparência de um sistema telerrobótico bilateral. Quando o atraso é grande (tipicamente acima de 0,5 s), as arquiteturas bilaterais tradicionais não funcionam. Neste documento estuda-se uma arquitetura de comando e controle para telerrobôs atracados aos seus alvos sob atrasos de tempo significativos. Esta arquitetura é baseada em impedância reflexiva, na qual o **operador** interage com modelos locais do **escravo** e do **alvo+ambiente** através do **mestre**, e o comando para o **escravo virtual local** também é enviado para o **escravo** real. O importante ponto para o sucesso deste sistema é ter o **escravo virtual local** sincronizado com o **escravo** real. Isto é especialmente importante quando o **escravo** entra em contato com um **alvo+ambiente** rígido, que é quando as forças do contato crescem rapidamente resultando na oscilação do **escravo**. Através de simulações e experimentos com atrasos de tempo de até 3 s (total ida e volta de 6 s) a arquitetura proposta mostra que um contato estável e satisfatório entre o mestre e o escravo é obtido.

Palavras-chave: Robôs. Controle. Telerrobótica. Atraso de Tempo. Identificação de Parâmetros.



# AN ARCHITECTURE OF COMMAND AND CONTROL FOR TELEROBOTS DOCKED IN THEIR TARGETS UNDER SIGNIFICANT TIME DELAY AND WITH MEASUREMENT OF THEIR DISTANCES

## ABSTRACT

Currently, there is significant effort to put in place by various space agencies to develop the technology to refuel or repair **inactive orbiting satellites (target+environment)** aiming to reuse them for a number of more years until they become non-repairable. However, the existing delays between the **main local robot (master, at the command base)** and the **remote robot (slave, at the controlled vehicle)** compromise both the stability and performance of telerobotic systems. When the time delay is large (typically over 0,5 s), the traditional bilateral controllers do not work. In this document, we study a command and control architecture for telerobots docked at their targets under significant time delays. This architecture is based on reflective impedance, in which the **operator** interacts with local models of the **slave** and **target+environment** through the **master**, and the command for the **local virtual slave** is also sent to the actual **slave**. An important key to the success of these systems is to have the **local virtual slave** synchronized with the actual **slave**. This is especially important when the **slave** gets in contact with a rigid **target+environment**, that is, when the force of contact builds up rapidly resulting in oscillation of the **slave**. Through simulations and experiments with time delays of up to 3 s (round-trip delay of 6 s) the proposed architecture shows that a stable and satisfactory contact between the master and the slave is obtained.

Keywords: Robots. Control. Telerobotics. Time Delay. Parameter Identification.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Arquitetura de teleoperação com impedância reflexiva.....	2
Figura 2.1 – Complexidade de tarefas e o tempo de finalização.....	7
Figura 2.2 – Diagrama de um sistema teleoperado com controle unilateral ou bilateral.....	8
Figura 2.3 – Diagrama de rede funcional para um sistema de teleoperação. ....	9
Figura 2.4 – Arquitetura geral com quatro canais de comunicação.....	11
Figura 2.5 – Diagrama da arquitetura F-P com impedância reflexiva.....	13
Figura 2.6 – Diagrama da arquitetura F-P com impedância reflexiva e predição de contato.....	15
Figura 2.7 – Experimento com 1-DOF completo (esquerda) focalizando no escravo e no ambiente (direita). ....	21
Figura 2.8 – Gráfico dos resultados das três arquiteturas: F-P convencional (a,b); F-P com impedância reflexiva (IR) (c,d); F-P com IR e predição de contato (e,f). ....	23
Figura 4.1 – Diagrama de blocos da arquitetura de teleoperação proposta. ....	31
Figura 5.1 – Exemplo comparando sinais transmitidos entre os robôs. ....	34
Figura 5.2 – Diagrama de blocos do mestre e escravos. ....	35
Figura 5.3 – Bloco interno “Robô - Modelo”.....	36
Figura 5.4 – Diagrama de blocos do operador. ....	38
Figura 5.5 – Diagrama para medição da posição do ambiente real. ....	39
Figura 5.6 – Diagrama de blocos do sensor de distância ( <i>range finder</i> ). ....	40
Figura 5.7 – Diagrama de blocos do lado local. ....	41
Figura 5.8 – Diagrama de blocos do canal de comunicação.....	41
Figura 5.9 – Diagrama de blocos do lado remoto.....	42
Figura 5.10 – Caso C1: Arquitetura IR tradicional (esquerda) e proposta (direita). ....	44
Figura 5.11 – Caso C2: Arquitetura IR tradicional (esquerda) e proposta (direita). ....	45

Figura 5.12 – Caso C3: Arquitetura IR tradicional (esquerda) e proposta (direita). .....	45
Figura 5.13 – Caso C4 simulado com a arquitetura IR tradicional. ....	46
Figura 5.14 – Caso C5 simulado com a arquitetura IR tradicional. ....	47
Figura 5.15 – Caso C6 simulado com a arquitetura IR tradicional. ....	48
Figura 5.16 – Caso C4 simulado com a arquitetura proposta. ....	49
Figura 5.17 – Caso C5 simulado com a arquitetura proposta. ....	50
Figura 5.18 – Caso C6 simulado com a arquitetura proposta. ....	51
Figura 5.19 – Caso C7 simulado com a arquitetura proposta. ....	52
Figura 5.20 – Caso C8 simulado com a arquitetura proposta. ....	53
Figura 5.21 – Caso C9 simulado com a arquitetura proposta. ....	53
Figura 5.22 – Caso C10 simulado com a arquitetura proposta. ....	54
Figura 5.23 – Caso C11 simulado com a arquitetura proposta. ....	55
Figura 5.24 – Caso C12 simulado com a arquitetura proposta. ....	55
Figura 6.1 - Foto do ambiente de experimentação utilizado.....	57
Figura 6.2 – Diagrama dos cenários utilizando parte da arquitetura de impedância reflexiva tradicional (A) e da arquitetura proposta (B). ....	59
Figura 6.3 – Resultados %RMSE de força e posição nos cenários (A) e (B). ..	61
Figura 6.4 – Força medida ( <i>FE</i> ) nos cenários A e B, e a virtual ( <i>FVE</i> ).....	62
Figura 6.5 – Experimento do caso C1. ....	64
Figura 6.6 – Experimento do caso C2. ....	64
Figura 6.7 – Experimento do caso C3. ....	65
Figura 6.8 – Experimento do caso C4. ....	66
Figura 6.9 – Experimento do caso C5. ....	67
Figura 6.10 – Experimento do caso C6. ....	67
Figura 6.11 – Experimento do caso C7. ....	68
Figura 6.12 – Experimento do caso C8. ....	69
Figura 6.13 – Experimento do caso C9. ....	69
Figura 6.14 – Experimento do caso C10. ....	70
Figura 6.15 – Experimento do caso C11. ....	71
Figura 6.16 – Experimento do caso C12. ....	71

Figura 6.17 – Resultados %RMSE de força e posição dos doze casos. ....	72
Figura A.1 - Robô mestre ( <i>3DOF Planar Pantograph</i> ).....	83
Figura A.2 - Gráfico das forças <i>FM</i> e <i>FM2</i> . ....	85
Figura A.3 – Posição do robô mestre .....	87
Figura A.4 - Gráfico das forças estimadas de cada modelo. ....	88
Figura B.1 - Robô escravo (a) e os sensores de força e laser (b). ....	89
Figura B.2 – Desenho do suporte com sensores do robô escravo. ....	90
Figura B.3 – Força resultante exercida e posição do robô. ....	94
Figura B.4 – Força de Coulomb estimada. ....	95
Figura B.5 – Identificação com 26 termos. ....	96
Figura B.6 – Posição do robô escravo.....	98
Figura C.1 – Ambiente utilizado nos experimentos reais. Neste caso duas molas estão instaladas (macia e dura). ....	101
Figura C.2 – Molas utilizadas para compor o ambiente. ....	102



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Erro de tempo na predição de contato do escravo. ....	22
Tabela 3.1 – Principais casos realizados. ....	27
Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros utilizados na simulação. ....	37
Tabela 6.1 – Métodos de identificação utilizados no Experimento 1. ....	60
Tabela 6.2 – Rigidez de cada ambiente utilizado. ....	60
Tabela A.1 - Principais características do robô mestre. ....	84
Tabela A.2 – Valores dos parâmetros do modelo M2. ....	85
Tabela A.3 – Características do sinal de referência para o robô mestre. ....	86
Tabela A.4 – Resultados de identificação para os modelos M1 a M4. ....	88
Tabela B.1 – Principais características do robô escravo. ....	90
Tabela B.2 – Valores dos parâmetros da força <i>FCL</i> . ....	94
Tabela B.3 – Resultados %RMSE com relação a quantidade de termos. ....	96
Tabela B.4 – Valores dos parâmetros da força de ondulação. ....	97
Tabela B.5 – Características do sinal de referência para o robô escravo. ....	98
Tabela C.1 – Ambientes utilizados durante os experimentos. ....	102



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

%RMSE	<i>Percentage Root Mean Square Error</i>
BLS	Mínimos Quadrados em Janela ( <i>Block Least Squares</i> )
CSA	Agência Espacial Canadense ( <i>Canadian Space Agency</i> )
DOF	Grau de liberdade ( <i>Degree of Freedom</i> ) (Grau de Liberdade)
EWRLS	<i>Exponentially Weighted Recursive Least Squares</i>
HC	Hunt-Crossley
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IR	Impedância Reflexiva
ISS	<i>International Space Station</i>
KV	Kelvin-Voigt
LTI	Linear Invariante no Tempo ( <i>Linear Time Invariant</i> )
MSE	<i>Mean Square Error</i>
NASA	Agência Espacial Norte Americana ( <i>National Aeronautics and Space Administration</i> )
RLS	Mínimos Quadrados Recursivo ( <i>Recursive Least Squares</i> )
RRM	<i>Robotic Refueling Mission</i>
SID	Serviço de Informação e Documentação
SPG	Serviço de Pós-Graduação
SPRLS	<i>Self-Perturbing Recursive Least Squares</i>
SSCO	<i>Satellite Servicing Capabilities Office</i>
TDI	Teses e Dissertações Internas



## LISTA DE SÍMBOLOS

$B_M$	Coeficiente do atrito viscoso do robô mestre.
$B_S$	Coeficiente do atrito viscoso do robô escravo.
$C_{1...4}$	Funções de transferência utilizadas para controle
$C_m, C_s$	Funções de transferência do controlador do mestre e do escravo.
$C1 \dots C12$	Casos simulados e experimentados.
$D_{ee}$	Distância entre a extremidade do robô escravo e o sensor laser.
$F_h, F_e$	Força do operador no mestre e do escravo no ambiente, respectivamente.
$F_h^*, F_e^*$	Forças internas do operador e do ambiente, respectivamente.
$F_{ve}, F_{ver}$	Forças do ambiente virtual local e remoto, respectivamente.
$F_c$	Saída do controlador.
$F_M$	Força do modelo do robô mestre.
$F_S$	Força do modelo do robô escravo.
$F_{Cl}$	Força de Coulomb presente no robô escravo.
$F_{ripple}$	Força de ondulação presente no robô escravo.
$F_{sp\_k}$	Força referente ao seno com velocidade positiva.
$F_{sn\_k}$	Força referente ao seno com velocidade negativa.
$F_{cp\_k}$	Força referente ao cosseno com velocidade positiva.
$F_{cn\_k}$	Força referente ao cosseno com velocidade negativa.
$K_{KV}, B_{KV}$	Rigidez e amortecimento do ambiente KV, respectivamente.
$K_{HC}, B_{HC}$	Rigidez e amortecimento do ambiente HC, respectivamente.
$K_P, K_D$	Ganhos proporcional e derivativo do controlador.
$K_F$	Ganho de força.
$K_{PV}$	Ganho proporcional da malha entre o escravo real e virtual.
$K_M$	Rigidez do robô mestre.
$M_M$	Massa do robô mestre.
$M_S$	Massa do robô escravo.
$T_d$	Atraso de tempo
$V_h, V_e$	Velocidades do robô mestre e do escravo, respectivamente.
$V_{h\_d}$	Comando do operador atrasado no tempo.

$V_{vsr} / X_{vsr}$	Velocidade/Posição do robô escravo virtual remoto.
$x_p$	Penetração no ambiente da extremidade atuante do robô
$X_e$	Posição absoluta do ambiente quando não há penetração
$\hat{X}_e$	Estimativa da posição absoluta do ambiente.
$\hat{X}_{e-d}$	Estimativa da posição absoluta do ambiente atrasado no tempo.
$X_{e\_last}$	Última medida da posição do ambiente.
$X_{vs}$	Posição do escravo virtual local.
$X_L$	Medida do sensor de distância.
$X, Y, Z$	Eixos do robô mestre real ( <i>Planar Pantograph System</i> ).
$Z_h, Z_e$	Impedância da mão do operador e do ambiente, respectivamente.
$Z_m, Z_s$	Funções de transferência da dinâmica do mestre e do escravo.
$Z_{to}$	Impedância do sistema transmitida para o operador.
$\hat{Z}_{e-d}$	Estimativa da impedância do ambiente real atrasado no tempo.
$\mu_M$	Atrito seco do robô escravo.
<b>F</b>	Vetor de saída de força.
<b>P</b>	Matriz de covariâncias.
<b><math>\Phi</math></b>	Matriz de regressão que relaciona as observações aos parâmetros.
<b><math>\Theta</math></b>	Vetor coluna dos parâmetros dinâmicos do sistema.
PVA	Vetor no Simulink contendo posição, velocidade e aceleração.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Motivação e Justificativa .....	1
1.3. Objetivo.....	2
1.4. Organização.....	3
2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA .....	5
2.1. Definições .....	5
2.2. A missão de reparação de satélites RRM e os atrasos temporais .....	6
2.3. Arquiteturas de sistemas teleoperados .....	8
2.3.1. Representação por rede.....	8
2.3.2. Representação por diagrama de blocos com funções de transferência.....	10
2.4. Modelos de ambientes .....	15
2.5. Métodos de identificação .....	17
2.6. Referência na literatura utilizando impedância reflexiva com a predição de contato.....	20
3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS PARA A SUA SOLUÇÃO .....	25
3.1. Definição do problema .....	25
3.2. Abordagens para a sua solução .....	26
4 ARQUITETURA PROPOSTA E ADOTADA.....	29
4.1. Conceito da arquitetura proposta.....	29
4.2. Descrição da arquitetura proposta .....	31

5	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA ARQUITETURA ADOTADA E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	33
5.1.	Modelagem .....	34
5.1.1.	Mestre e escravo (reais ou virtuais) .....	34
5.1.2.	Operador .....	37
5.1.3.	Ambiente .....	38
5.1.4.	Posição do ambiente .....	39
5.1.5.	Outros blocos .....	40
5.2.	Ambiente de simulação.....	40
5.3.	Simulações e análise dos resultados.....	42
5.3.1.	Casos com atraso de tempo desprezível .....	43
5.3.2.	Casos com atraso de tempo de <b>500 ms</b> .....	46
5.3.3.	Casos com atraso de tempo de <b>1000 ms</b> .....	51
5.3.4.	Casos com atraso de tempo de <b>3000 ms</b> .....	54
5.3.5.	Considerações finais .....	56
6	EXPERIMENTOS REAIS E ANÁLISES DOS RESULTADOS .....	57
6.1.	Robôs e equipamentos utilizados .....	57
6.1.1.	Comunicação bilateral e atraso de tempo .....	58
6.2.	Experimento 1: Interação automática do robô escravo .....	58
6.2.1.	Resultados e análises .....	60
6.3.	Experimento 2: Sistema de teleoperação completo.....	62
6.3.1.	Resultados e análises comparativas com as simulações.....	63
6.4.	Considerações finais.....	73
7	CONCLUSÃO .....	75
7.1.	Sugestões para trabalhos futuros .....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	79
	APÊNDICE A - ROBÔ MESTRE .....	83

A.1	Sobre o robô mestre .....	83
A.2	Modelo linear utilizado para 1DOF.....	84
A.3	Identificação.....	86
APÊNDICE B - ROBÔ ESCRAVO.....		89
B.1	Sobre o robô escravo.....	89
B.2	Modelo completo e linear .....	91
B.3	Identificação.....	93
B.3.1	Estágio 1 .....	93
B.3.2	Estágio 2 .....	95
B.3.3	Estágio 3 .....	98
B.3.4	Problemas encontrados e considerações finais .....	99
APÊNDICE C - AMBIENTE REAL .....		101
C.1	Configurações.....	101



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1. Contexto

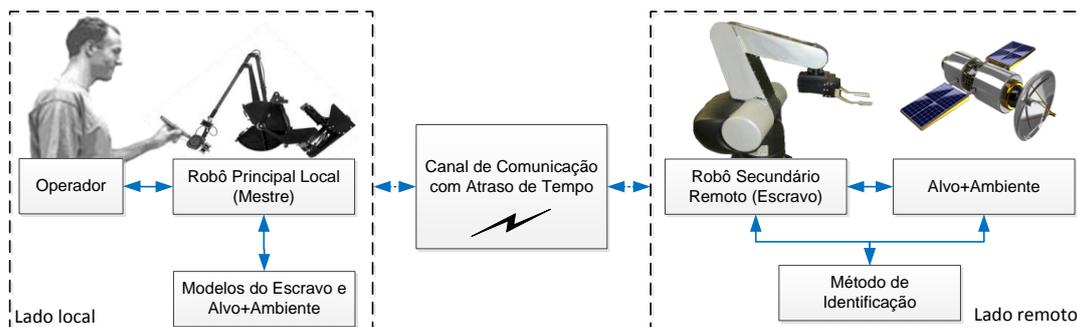
O crescente emprego de sistemas robóticos pelo ser humano deve-se certamente aos benefícios proporcionados por sua utilização. Seu uso permeia diversas áreas e níveis de tecnologia, passando desde tarefas brutas e repetitivas na indústria até delicados movimentos na interação com humanos. A utilização de robôs à distância (=Teleoperação) desempenha um importante papel em tarefas: 1) minuciosas e próximas, como em cirurgias; ou 2) perigosas e distantes como, na exploração espacial. Além de missões robóticas interplanetárias, a utilização de robôs manipuladores no reabastecimento ou manutenção de satélites artificiais inoperantes surge como uma solução para a redução dos custos de operação e dos detritos espaciais orbitando a Terra. No entanto, para a realização de tais missões, diversas agências espaciais (NASA e CSA, por exemplo) têm realizado um enorme esforço no desenvolvimento de tecnologias e soluções que possam maximizar a sensação de manipulação e minimizar os efeitos negativos da distância.

## 1.2. Motivação e Justificativa

A manipulação à distância de robôs tem como principal inconveniente os atrasos de tempo existentes entre o **robô principal local (mestre, na base de controle)** e o **robô secundário remoto (escravo, no veículo controlado)** que comprometem o desempenho de um sistema telerrobótico. Quando o atraso entre o lado local e remoto é grande (tipicamente acima de 0,5 s), as arquiteturas de controles bilaterais tradicionais não funcionam. Uma possível arquitetura para controlar tais sistemas, que pode ser visualizada na Figura 1.1, é baseada na reflexão da impedância do **alvo+ambiente** para o lado local, na qual o **operador** interage com modelos locais do **escravo (escravo virtual local)** e do **alvo+ambiente** através do **mestre**, e o comando de controle para o

**escravo virtual local** é também enviado para o **escravo real**. A impedância do **alvo+ambiente** real deve ser identificada por algum método utilizando informações do robô escravo real e do ambiente, como é mostrado no lado remoto na Figura 1.1.

**Figura 1.1 – Arquitetura de teleoperação com impedância reflexiva.**



Fonte: Próprio autor.

O importante ponto para o sucesso destes sistemas é ter o **modelo local do escravo** sincronizado com o **escravo**. Isso é especialmente importante quando o **escravo** entra em contato com um **alvo+ambiente** rígido, que é quando as forças do contato crescem rapidamente, resultando na oscilação do **escravo**.

Deste ponto em diante, o tratamento do termo **alvo+ambiente** será apenas tratado por **ambiente** (*environment*) visando simplificar a notação e uma vez que este termo é usualmente utilizado na área de teleoperação.

### 1.3. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo propor uma arquitetura de comando e controle para telerrobôs atracados aos seus alvos sob atrasos de tempo significativos e constantes. Esta arquitetura bilateral busca possibilitar um contato satisfatório com o ambiente já que outras arquiteturas bilaterais encontradas na literatura não o permitem; e é analisada sob a ótica da transparência do sistema, ou seja, visa melhorar a percepção do operador.

#### **1.4. Organização**

Este trabalho é composto por dez seções, sendo sete capítulos e três apêndices, e é organizado da seguinte forma:

O Capítulo 1 apresenta o contexto, as motivações e o objetivo deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos e a revisão da literatura.

O Capítulo 3 apresenta a definição do problema e apresenta as abordagens para a solução.

Os Capítulos 4, 5 e 6 apresentam a arquitetura de teleoperação proposta, a modelagem e simulação da mesma, e a experimentação, respectivamente. Ao final dos Capítulos 5 e 6, análises dos resultados obtidos também são realizadas.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho, sugestões para trabalhos futuros e também dificuldades encontradas.

Os Apêndices A, B e C apresentam com detalhes as características do robô mestre, do robô escravo, e do ambiente real e suas variações, respectivamente.



## 2 CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Definições

Com o objetivo de estabelecer um vocabulário comum no contexto deste trabalho, algumas definições são apresentadas nesta Seção.

**Teleoperação** é a atividade em que as capacidades humanas de percepção (sentidos) e manipulação (músculos) são estendidas para um local remoto através de um teleoperador (SHERIDAN, 1989), que é um equipamento eletromecânico (robô) capaz de mensurar, manipular, se locomover e se comunicar através de seus sensores e atuadores artificiais e canais de comunicação (SHERIDAN, 1995).

**Telerrobótica** é uma classe de teleoperação na qual o teleoperador executa tarefas enviadas pelo ser humano baseando-se nos seus sensores, atuadores e inteligência artificial, enquanto o ser humano exerce a função de supervisão ordenando objetivos e analisando os resultados (SHERIDAN, 1989).

**Telepresença** é a função de proporcionar ao operador humano, idealmente de maneira natural, a sensação física de interação do teleoperador com o ambiente, de forma que o operador se sinta presente no local remoto (SHERIDAN, 1989). No presente contexto também é conhecida como **transparência**, que pode ser definida como a correspondência cinemática dos robôs mestre e escravo ou também como a igualdade da impedância do ambiente com a impedância percebida pelo operador (LAWRENCE, 1993).

**Estabilidade** é manter as variáveis do sistema dentro de um padrão predefinido aceitável independentemente do comportamento do operador e do ambiente (HOKAYEM; SPONG, 2006).

**Controle unilateral** é dito quando somente o operador através do robô mestre realiza o controle do teleoperador (escravo), ou seja, a arquitetura de controle permite o fluxo de atuação somente em um sentido do meio de comunicação.

Quando dito **controle bilateral**, o teleoperador ao interagir com o ambiente também atua no operador através do robô mestre, ou seja, a arquitetura de controle permite o fluxo de atuação nos dois sentidos do meio de comunicação (HOKAYEM; SPONG, 2006).

## **2.2. A missão de reparação de satélites RRM e os atrasos temporais**

A missão conjunta *Robotic Refueling Mission-RRM* iniciada em 2009 entre as agências espaciais americana (NASA) e canadense (CSA) visa o desenvolvimento de tecnologias para o reabastecimento e a reparação de satélites em órbita inativos, principalmente os geoestacionários, em que o custo de um novo satélite é altíssimo quando comparado aos de baixa órbita. O escritório de serviços para satélites (SSCO) da NASA estima que mais de trezentos satélites geoestacionários poderiam se beneficiar deste tipo de serviços além de ajudar a reduzir o número de *debris* orbitando a Terra (SSCO-NASA, 2009).

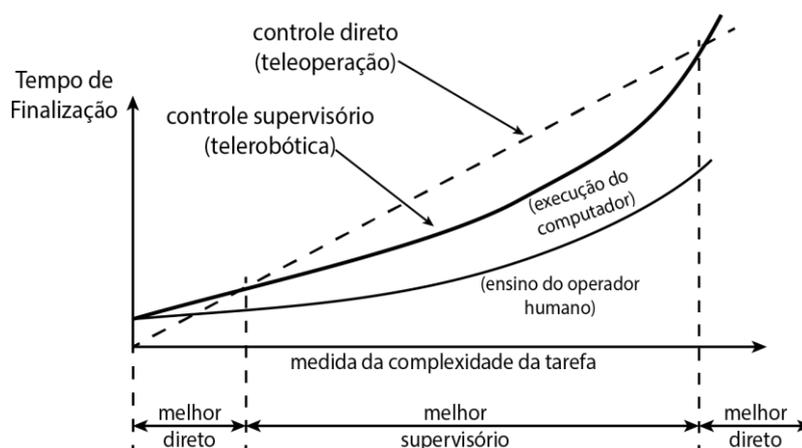
O módulo RRM desenvolvido para simular o reparo de satélites, como a transferência de combustível, está atualmente na Estação Espacial Internacional (ISS) e é operado através dos manipuladores robóticos canadenses CanadArm2 e Dextre, que provêm suporte nas atividades externas de reparação e integração na ISS. Visando simular uma missão de reparo real, o robô Dextre atua como o veículo espacial reparador de satélites e o módulo RRM atua como o satélite inoperante que precisa ser reparado, sendo que ambos estão atracados um ao outro e o robô Dextre é operado e controlado remotamente a partir de estações terrestres (SSCO-NASA, 2015).

Um problema significativo na operação de sistemas espaciais em órbita ou no espaço profundo é o atraso de tempo presente na comunicação devido à distância entre a estação de comunicação e o veículo espacial, e a velocidade da luz. Com comunicação direta, os atrasos de tempo (de ida e volta (*roundtrip time delay*)) são no mínimo de 0,4 s para veículos em baixa órbita e normalmente 3 s para veículos próximos da Lua. No entanto, quando satélites

repetidores são utilizados, por exemplo, na comunicação com a ISS, os atrasos são ao redor de 6 s (SHERIDAN, 1993). Diante dos atrasos de tempo, tanto a estabilidade quanto a transparência de sistemas teleoperados espaciais são gravemente afetadas, conforme mostram alguns trabalhos na literatura (ANDERSON; SPONG, 1989), (HASHTRUDI-ZAAD; SALCUDEAN, 2002), (FITE; GOLDFARB; RUBIO, 2003).

O controle supervísório pode ser empregado nas missões de reabastecimento e reparo de satélites, evitando o atraso de tempo uma vez que o operador somente envia comandos gerais e acompanha a realização da tarefa, como por exemplo, nas tarefas de aproximação (*rendezvous*) e acoplagem (*docking*) com o satélite inoperante (SSCO-NASA, 2015). No entanto, para tarefas de reparação, pode-se ter um problema com relação ao objetivo e tempo de missão, uma vez que os satélites possuam configurações e problemas diferentes, não permitindo utilizar as mesmas tarefas já pré-programadas. Assim, o emprego de sistemas teleoperados provê um menor custo na operação da missão com relação ao tempo de finalização. Um gráfico que pode mostrar esta situação pode ser visualizado na Figura 2.1, em que o tempo de finalização devido à complexidade da missão em atender diferentes satélites é menor através do controle direto (tarefa realizada por um operador humano) que do controle supervísório (SHERIDAN, 1993).

**Figura 2.1 – Complexidade de tarefas e o tempo de finalização.**



Fonte: Adaptado de Sheridan (1993).

## 2.3. Arquiteturas de sistemas teleoperados

Um sistema teleoperado é principalmente constituído por cinco elementos: um operador humano, um robô principal (mestre), o canal de comunicação, um robô secundário remoto (escravo) e o ambiente. Um diagrama mostrando tais componentes pode ser visualizado na Figura 2.2, onde as setas vermelhas indicam controle unilateral e as azuis indicam controle bilateral.

**Figura 2.2 – Diagrama de um sistema teleoperado com controle unilateral ou bilateral**



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As arquiteturas bilaterais usualmente utilizadas possuem dois ou quatro canais de comunicação, por onde trafegam variáveis representando posição/velocidade e forças. No caso de dois canais, quatro tipos de configuração são possíveis e suas nomações são de acordo com a variável medida e enviada para o lado remoto. Por exemplo, na **arquitetura força-posição (F-P)**, o mestre recebe a força medida na extremidade atuante do escravo e o mestre envia a sua posição para o escravo.

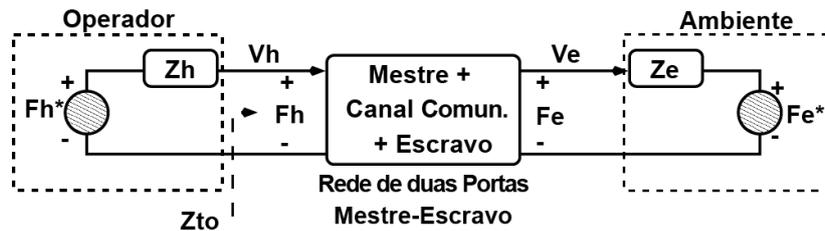
Por inicialmente controlarem as diferenças (pequenas) entre os movimentos (lentos) do mestre e do escravo acoplado ao ambiente, os componentes do sistema presentes neste trabalho serão tratados com modelos dinâmicos lineares invariantes no tempo (LTI), que admitem análogos elétricos como os mostrados a seguir.

### 2.3.1. Representação por rede

Na literatura consultada, sistemas teleoperados são usualmente modelados por blocos de rede de duas portas (*two-port network*), também conhecidos como

quadripolos, uma vez que possibilitam analisar e conhecer características do sistema, como transparência, através da caracterização das impedâncias pela relação entre esforços (tensão ou força) e fluxos (corrente elétrica ou velocidade). A Figura 2.3, exemplifica o modelo por redes de um sistema teleoperado com controle bilateral de um grau de liberdade, em que o mestre, o escravo e o canal de comunicação estão dentro da rede.

**Figura 2.3 – Diagrama de rede funcional para um sistema de teleoperação.**



Fonte: Adaptado de Hashtardi-Zaad e Salcudean (2001).

Neste modelo bilateral de controle, é assumido que o operador e o ambiente estão em contato com o mestre e o escravo, respectivamente, e que suas impedâncias  $Z_h$  e  $Z_e$  são modeladas de acordo com a Equação (2.1):

$$F_h = F_h^* - Z_h V_h; \quad F_e = F_e^* + Z_e V_e \quad (2.1)$$

onde  $V_h, V_e, F_h, F_e, F_h^*, F_e^*$  são as transformadas de Laplace das velocidades do mestre e do escravo, a força do operador no mestre, a força do escravo no ambiente e as forças internas do operador e ambiente, respectivamente (SALCUDEAN *et al.*, 2000). A impedância  $Z_{to}$  é dita como a impedância do sistema transmitida para o operador (ou percebida por ele). As letras subscritas  $h$  e  $e$  remetem à mão (em inglês *hand*) e ao ambiente (em inglês *environment*), respectivamente.

Tais sistemas podem ser representados por diversos modelos matemáticos de rede, como o modelo híbrido (HAYKIN, 1970),

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -V_e \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} V_h \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h \\ F_e \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

em que os parâmetros híbridos  $h_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) são funções da dinâmica do mestre, do escravo, de seus parâmetros de controle e do canal de comunicação.

Além da estabilidade, outro importante fator de desempenho do sistema de teleoperação é a transparência. Pela sua definição, verifica-se que as correspondências  $V_h \equiv V_e$  bem como o casamento da impedância transmitida para o operador e do ambiente ( $Z_{to} = Z_e$ ) devem ser válidas para obter a perfeita transparência. Desta forma, uma maneira de analisar este fator é através da combinação da Equação (2.1) com a Equação (2.2), onde a impedância transmitida para o operador ( $Z_{to}$ ) pode ser obtida e expressa em termos dos parâmetros híbridos como,

$$Z_{to} := \left. \frac{F_h}{V_h} \right|_{F_e^* = 0} = \frac{h_{11} + (h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21})Z_e}{1 + h_{22}Z_e}. \quad (2.3)$$

Considerando que os parâmetros híbridos não são funções das impedâncias do operador e ambiente, a condição de perfeita transparência é satisfeita através do casamento de impedâncias se e somente se:  $h_{11} = h_{22} = 0$  (HANNAFORD, 1989) e  $h_{12} = -h_{21} = 1$  (HASHTRUDI-ZAAD; SALCUDEAN, 2002).

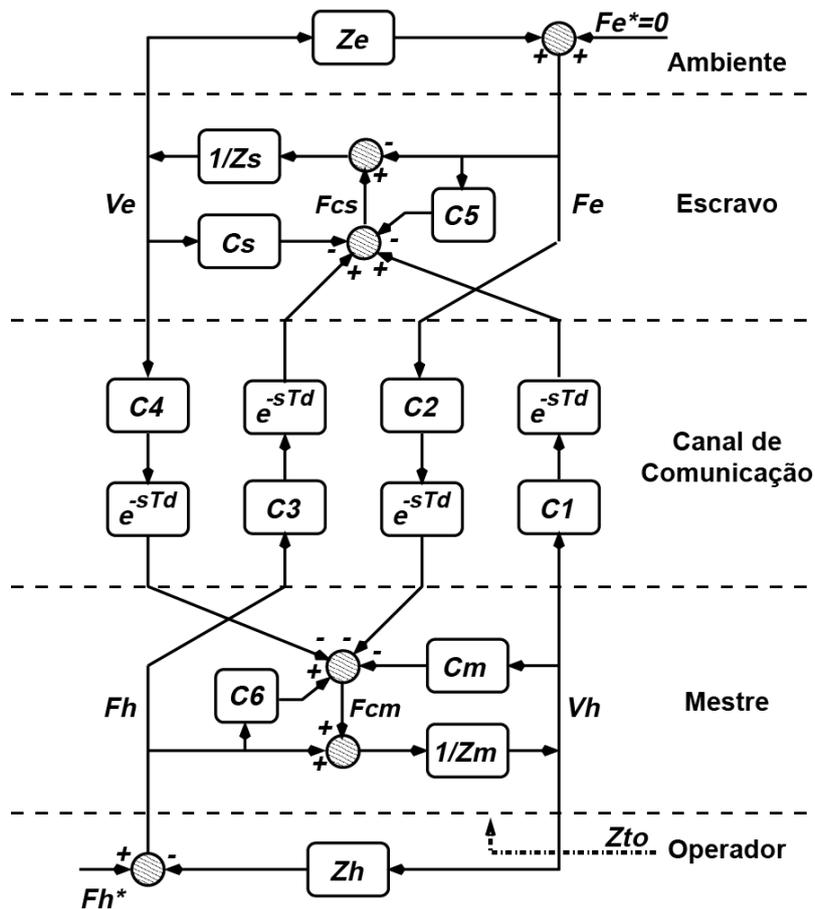
### 2.3.2. Representação por diagrama de blocos com funções de transferência

Outra maneira de representar um sistema teleoperado é através de diagrama de blocos contendo a transformada de Laplace das equações dinâmicas e das variáveis presentes no sistema. Uma arquitetura geral com quatro canais de

comunicação, onde posição e força são enviadas do mestre para o escravo e vice-versa, foi proposta por (LAWRENCE, 1993).

A Figura 2.4 mostra esta arquitetura com dois incrementos, a adição de atraso de tempo ( $e^{-sT_d}$ ) no canal de comunicação e compensadores *feedback* de forças  $C_5$  e  $C_6$  (HASHTRUDI-ZAAD; SALCUDEAN, 2001). Nesta figura, a representação das variáveis  $C_1, \dots, C_4$  são funções de transferência utilizadas para controle,  $C_m$  e  $C_s$  são as funções de transferência do controlador do mestre e do escravo,  $Z_m$  e  $Z_s$  são as funções de transferência da dinâmica do mestre e do escravo, e  $T_d$  é o atraso de tempo existente na comunicação.

Figura 2.4 – Arquitetura geral com quatro canais de comunicação.



Fonte: Adaptada de Hashtrudi-Zaad e Salcudean (2001).

Encontrando os parâmetros híbridos através da Equação (2.2) e do diagrama de blocos da Figura 2.4, pode-se encontrar através da Equação (2.3) a impedância percebida pelo operador mostrada na Equação (2.4), onde  $Z_{cm} = Z_m + C_m$  e  $Z_{cs} = Z_s + C_s$ .

$$Z_{to_{ach}} = \frac{[Z_{cm}Z_{cs} + C_1C_4e^{-2sTd}] + [(1 + C_5)Z_{cm} + C_1C_2e^{-2sTd}]Z_e}{[(1 + C_6)Z_{cs} - C_3C_4e^{-2sTd}] + [(1 + C_5)(1 + C_6) - C_2C_3e^{-2sTd}]Z_e} \quad (2.4)$$

Devido ao atraso de transporte no sistema, tanto a estabilidade quanto a transparência são afetadas, de forma que a perfeita transparência não pode ser alcançada (ANDERSON; SPONG, 1989), (HASHTRUDI-ZAAD; SALCUDEAN, 2002). No entanto, se considerar que o atraso de tempo é desprezível, então a perfeita transparência pode ser em teoria obtida quando (LAWRENCE, 1993), (HASHTRUDI-ZAAD; SALCUDEAN, 2001):

$$\begin{cases} C_1 = Z_{cs} \\ C_2 = 1 + C_6 \\ C_3 = 1 + C_5 \\ C_4 = -Z_{cm} \end{cases} \quad (2.5)$$

Embora matematicamente seja possível a perfeita transparência na arquitetura de quatro canais, do ponto de vista físico e tecnológico é impossível obtê-la, uma vez que é impossível conhecer e medir perfeitamente a dinâmica dos robôs presentes nas variáveis  $C_1$  e  $C_4$ , além de afetar a estabilidade do sistema (SALCUDEAN *et al.*, 2000).

A arquitetura tradicional de dois canais, força-posição (F-P), é um caso especial desta arquitetura geral de quatro canais e pode ser obtida quando  $C_3 = C_4 = C_5 = C_6 = 0$ , ou seja, a força não é transmitida do mestre para o escravo e a posição do escravo não é transmitida para o mestre. Desta forma, a arquitetura de dois canais não permite matematicamente a perfeita transparência, proporcionando então uma transparência menor com relação à arquitetura de quatro canais. Se considerar a inexistência dos compensadores

locais de força ( $C_5 = C_6 = 0$ ), através da Equação (2.4) a impedância percebida pelo operador neste tipo de arquitetura é definida por

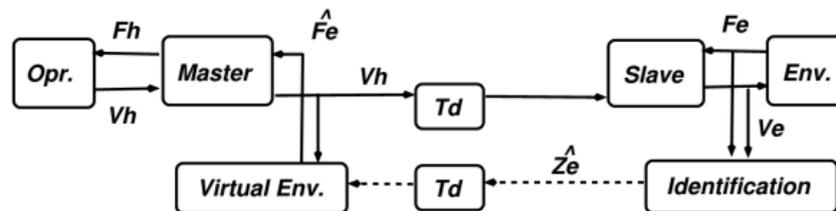
$$Z_{to\_2ch} = Z_{cm} + \frac{Z_{cs}Z_e}{Z_{cs} + Z_e} e^{-2sT_d} . \quad (2.6)$$

Através da Equação (2.6) pode-se perceber que, na arquitetura tradicional de dois canais, o operador não tem somente a percepção do ambiente, mas também a dinâmica do mestre e do escravo com um atraso temporal.

### 2.3.2.1. Arquitetura com impedância reflexiva

Objetivando aumentar a transparência do sistema, uma arquitetura com reflexão da impedância do ambiente baseada no conceito de (HANNAFORD, 1989) propõe ao invés do escravo transmitir força para o mestre, a impedância do ambiente é identificada em tempo real e enviada (refletida) para o lado local; e, através do modelo do ambiente, a força é estimada usando a velocidade do mestre. O diagrama da arquitetura força-posição com impedância reflexiva pode ser visto na Figura 2.5, e modelos de ambientes e métodos para identificação de impedâncias são abordados na seção 2.4.

Figura 2.5 – Diagrama da arquitetura F-P com impedância reflexiva.



Fonte: Mobasser e Hashtrudi-Zaad (2006).

Considerando a correspondência cinemática entre o mestre e o escravo, isto é,  $V_e \simeq V_h$ , pode-se dizer que,

$$\hat{F}_e = \hat{Z}_e V_h \simeq Z_e V_e = F_e \quad (2.7)$$

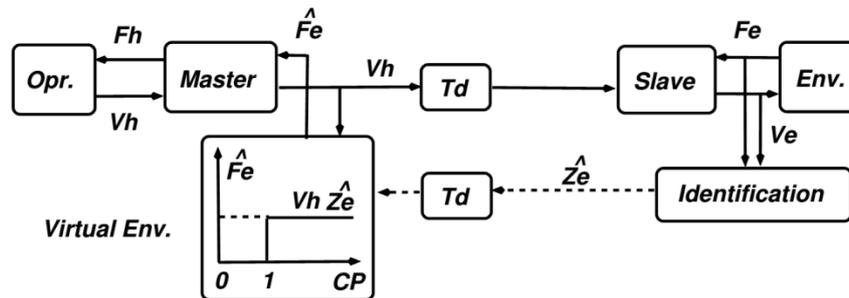
onde  $\hat{Z}_e$  é a impedância do ambiente estimada pelo processo de identificação. Assim, assumindo pequenas variações na impedância do ambiente e convergência no processo de identificação, isto é,  $\hat{Z}_e \simeq Z_e$ , a impedância percebida pelo operador é definida por (MOBASSER; HASHTRUDI-ZAAD, 2007)

$$Z_{to\_2ch\_IR} = Z_{cm} + Z_e . \quad (2.8)$$

Comparando a Equação (2.6) à Equação (2.8), verifica-se que a Equação (2.8) proporciona um aumento de transparência no sistema, uma vez que o operador irá perceber somente a dinâmica do mestre e do ambiente. No entanto, devido ao atraso na transmissão da impedância estimada, quando houver contato do escravo com o ambiente, o operador irá sentir a nova impedância com atraso podendo comprometer e colocar em risco a estabilidade e a transparência do sistema (MOBASSER; HASHTRUDI-ZAAD, 2006).

Uma solução para este problema é apresentada por (MOBASSER; HASHTRUDI-ZAAD, 2007), onde uma lógica de chaveamento no lado local é empregada para alterar a impedância de zero (movimento livre) para a impedância do ambiente uma vez que o contato entre o escravo e o ambiente for acontecer a um atraso de tempo à frente. Esta lógica permite que o operador tenha a conexão virtual com o ambiente no mesmo instante de tempo em que o contato do escravo com ambiente acontece. O diagrama de funcionamento desta arquitetura pode ser visualizado na Figura 2.6 e a previsão de contato realizada por um indicador preditivo será abordada na seção 2.6.

**Figura 2.6 – Diagrama da arquitetura F-P com impedância reflexiva e previsão de contato.**



Fonte: Mobasser e Hashtrudi-Zaad (2007).

A análise da estabilidade de sistemas teleoperados pode ser realizada através de ferramentas de sistemas de controle linear, como os métodos de *Nyquist* ou *Bode*, uma vez que tais sistemas possuem modelos lineares. Estas e outras técnicas para análise de estabilidade, tanto com relação à representação por funções de transferência quanto por representação por redes, não serão abordadas neste documento.

#### 2.4. Modelos de ambientes

A utilização de modelos de ambientes torna-se essencial para análises e simulações de sistemas teleoperados bem como nas arquiteturas de impedância reflexiva, uma vez que as forças de contato do escravo com o ambiente são calculadas através do modelo do ambiente e enviadas ao mestre.

Em diversos sistemas teleoperados, modelos lineares de ambiente são largamente utilizados, tal como o modelo Kelvin-Voigt (KV), onde a relação entre a penetração dos corpos em contato e a força resultante é modelada por uma mola e amortecedor lineares conectados em paralelo. Este modelo, no domínio do tempo, é apresentado na Equação (2.9), onde  $x_p(t)$  representa a penetração no ambiente da extremidade atuante do robô,  $X_e(t)$  a posição absoluta do ambiente quando não há penetração (*threshold* de contato),  $F(t)$  a

força resultante de contato, e os parâmetros de rigidez e amortecimento do ambiente são  $K_{KV}$  e  $B_{KV}$ , respectivamente.

$$F(t) = \begin{cases} K_{KV}x_p(t) + B_{KV}\dot{x}_p(t), & x_p(t) \geq X_e(t) \\ 0, & x_p(t) < X_e(t) \end{cases} \quad (2.9)$$

Embora modelos lineares proporcionem o benefício de identificar mais facilmente seus parâmetros através de diversos métodos lineares, como os mínimos quadrados (*Least Squares*-LS) e seus variantes, tais modelos podem produzir algumas inconsistências físicas em termos de energia durante o contato (HADDADI; HASHTRUDI-ZAAD, 2012), como forças negativas de contato durante o recuo, principalmente em ambientes com grande coeficiente de amortecimento (DIOLAITI; MELCHIORRI; STRAMIGIOLI, 2005).

Modelos não lineares, em contrapartida, conseguem realizar uma melhor representação de ambientes, visto que materiais naturais podem apresentar comportamentos não lineares. Um modelo não linear apresentado por (HUNT; CROSSLEY, 1975), em que a força viscosa depende também do nível de penetração, tem mostrado uma melhor consistência física principalmente com relação a coeficientes de restituição, representando a perda de energia durante os contatos (MARHEFKA; ORIN, 1999). O modelo Hunt-Crossley (HC) é apresentado na Equação (2.10), onde  $K_{HC}x_p^n$  representa a força elástica não linear,  $B_{HC}x_p^n\dot{x}_p$  representa a força viscosa não linear e  $n$  é o parâmetro de caráter não linear, que normalmente varia de um a dois.

$$F(t) = \begin{cases} K_{HC}x_p^n(t) + B_{HC}x_p^n(t)\dot{x}_p(t), & x_p(t) \geq X_e(t) \\ 0, & x_p(t) < X_e(t) \end{cases} \quad (2.10)$$

Embora modelos não lineares permitam maior fidelização das forças de contato e, conseqüentemente, melhores resultados nos sistemas de controle, por outro lado, a identificação dos parâmetros de modelos não lineares pode tornar-se mais trabalhosa, como pode ser visto nos métodos para identificação dos parâmetros do modelo HC propostos por (DIOLAITI; MELCHIORRI;

STRAMIGIOLI, 2005) e (HADDADI; HASHTRUDI-ZAAD, 2012). Isto certamente traz desafios e pode até limitar seu uso em aplicações quando a velocidade de convergência dos parâmetros é crucial, por exemplo, em sistemas de tempo real.

Além da escolha do melhor modelo para representar um ambiente, o método para realizar a identificação de seus parâmetros é igualmente fundamental e importante para obter bons resultados, principalmente quando os parâmetros são utilizados *online* e são de suma importância para a estabilidade e desempenho do sistema. Este assunto será tratado na próxima seção (2.5).

## 2.5. Métodos de identificação

Um sistema dinâmico pode ser linearmente parametrizado e modelado como

$$\mathbf{F} = \Phi \Theta \quad (2.11)$$

em que  $\mathbf{F}[N]$  é o vetor de saída de força,  $\Phi$  é matriz de regressão que relaciona as observações aos parâmetros e  $\Theta$  é o vetor coluna dos parâmetros dinâmicos do sistema. Um método linear largamente utilizado para identificação de tais parâmetros é denominado mínimos quadrados (LS), proposto por Karl Friedrich Gauss em 1875 para minimizar o erro médio quadrático (MSE) entre a saída observada e a saída estimada do sistema. Através do método em lote, que estima os parâmetros utilizando todas as observações em um único passo, as estimativas dos parâmetros podem ser encontradas utilizando a equação

$$\hat{\Theta} = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T \mathbf{F} \quad (2.12)$$

em que  $\hat{\Theta}$  é o vetor coluna dos parâmetros dinâmicos estimados e assume-se que a entrada é rica e persistentemente excitante para  $\Phi^T \Phi$  ser invertível.

Considerando que o método em lote dificulta sua aplicação em sistemas de tempo real devido ao crescente número de observações, uma solução é limitar a quantidade de observações e remover a observação mais antiga quando uma nova observação é disponibilizada. Este método é denominado mínimos quadrados por janela (em inglês *Block Least Squares-BLS*) (JIANG; ZHANG, 2004), (HADDADI; HASHTRUDI-ZAAD, 2008) e o tamanho dessa janela flutuante permite um balanço entre a velocidade de convergência e a imunidade a ruídos das observações. Além disso, este método permite melhores resultados na identificação de parâmetros variantes no tempo, uma vez que as observações antigas não são consideradas. É importante lembrar que a equação do método BLS é também a Equação (2.12), no entanto, o tamanho da matriz e do vetor são limitados.

O método Mínimos Quadrados Recursivo (RLS), proposto através do lema de inversão matricial, permite ser utilizado em aplicações de tempo real sem a necessidade de utilizar todos os dados gerados desde o início da operação. Diversas variantes deste método são utilizadas com o intuito de melhorar o desempenho no processo de identificação, como por exemplo, os métodos *Exponentially Weighted Recursive Least Squares* (EWRLS) e *Self-Pertubing Recursive Least Squares* (SPRLS), principalmente com relação à velocidade de convergência no momento em que muitos dados são processados e a matriz de covariância começa a adquirir valores baixos.

O método EWRLS tem por objetivo ponderar exponencialmente os dados utilizados nos cálculos, de forma que os dados mais recentes possuam maior importância que os dados anteriores e, por consequência, tenham maior influência na estimação dos parâmetros. Esta característica permite uma melhor estimação dos parâmetros de sistemas com propriedades variantes no tempo (GOODWIN; SIN, 2009). As equações recursivas deste método são mostradas na Equação (2.13), em que  $\mathbf{P}$  é a matriz de covariâncias e  $\lambda$  é o parâmetro de ponderação do método, também conhecido como fator de esquecimento. Este fator deve ser  $\leq 1$ , mas normalmente é utilizado entre 0,9 e

0,99, e quando  $\lambda = 1$ , o método Mínimos Quadrados Recursivo (RLS) padrão é encontrado (NELLES, 2001).

$$\begin{aligned}
 \mathbf{G}_k &= \mathbf{P}_{k-1}^T \Phi_k^T (\Phi_k \mathbf{P}_{k-1} \Phi_k^T + \lambda)^{-1} \\
 \mathbf{P}_k &= \frac{1}{\lambda} [(\mathbf{I} - \mathbf{G}_k \Phi_k) \mathbf{P}_{k-1}] \\
 \hat{\Theta}_k &= \hat{\Theta}_{k-1} + \mathbf{G}_k (\mathbf{F}_k - \Phi_k \hat{\Theta}_{k-1})
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

O SPRLS é outro interessante método proposto por (PARK; JUN, 1992), que apresenta um desempenho superior na estimação de parâmetros variantes no tempo na presença de ruídos e distúrbios (HUNT, 1996) e com ambientes constituídos de materiais com diferentes propriedades visco-elásticas (HADDADI; HASHTRUDI-ZAAD, 2012). As equações recursivas deste método são semelhantes ao método EWRLS, com exceção da matriz de covariância que é onde a ação de autoperturbação é realizada com base no resíduo de estimação do instante anterior ( $e_{k-1}$ ). A matriz de covariância é apresentada na Equação (2.14), em que o operador **NINT()** realiza o arredondamento para o inteiro mais próximo, os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$  são escolhidos de acordo com o ruído do sistema, e a matriz identidade **I** tem a mesma dimensão da matriz **P**.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}_k &= \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}_{k-1} - \mathbf{G}_k \Phi_k \mathbf{P}_{k-1} + \beta \mathbf{NINT}(\gamma e_{k-1}^2) \mathbf{I}] \\
 e_{k-1} &= \mathbf{F}_{k-1} - \Phi_{k-1} \hat{\Theta}_{k-1}
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Uma vez que  $\gamma e_{k-1}^2 < 0.5$ , o operador **NINT()** remove a função de perturbação na matriz de covariância, ou seja, o método SPRLS torna a operar como o método EWRLS. Assim, o parâmetro  $\gamma$  atua no método controlando a faixa de erro para a ação de perturbação, ou seja, a zona morta para a rejeição de ruído do sistema. O parâmetro  $\beta$  atua como um ganho proporcional na perturbação, quanto maior for a perturbação desejada, maior deverá ser o valor de  $\beta$ .

Uma maneira de avaliar o desempenho da identificação é certamente através da matriz de covariância. Uma segunda maneira é através da comparação

entre a força resultante estimada e a mensurada por um sensor. Considerando que usualmente em sistemas teleoperados bilaterais o robô escravo possui sensor de força com o intuito de transmitir para o operador a reação do ambiente, esta segunda maneira também torna-se possível.

A quantificação deste desempenho pode ser realizada através da porcentagem da raiz do valor quadrático médio do erro (em inglês *Percentage Root Mean Square Error* (%RMSE)) definida em modo discreto como

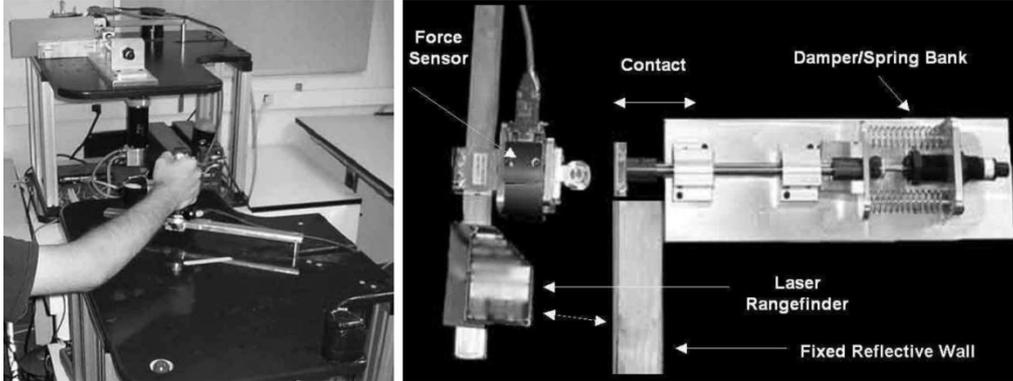
$$\%RMSE = 100 \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (b_k - a_k)^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_k^2}} \quad (2.15)$$

em que  $a$  é o sinal de referência,  $b$  é o sinal a ser analisado e  $N$  é o número de amostras.

## **2.6. Referência na literatura utilizando impedância reflexiva com a predição de contato**

Um trabalho realizado por (MOBASSER; HASHTRUDI-ZAAD, 2007) comparou experimentalmente o funcionamento de telerrobôs sob atrasos de tempo (50 a 200  $ms$ ) nas arquiteturas: força-posição (F-P) convencional, F-P com impedância reflexiva (Figura 2.5) e F-P utilizando a predição de contato (Figura 2.6). A configuração do experimento com um DOF pode ser visualizada na Figura 2.7, em que a foto da esquerda mostra o experimento completo e a foto da direita mostra particularmente o escravo e o ambiente. O ambiente é composto por um banco de molas e amortecedor em paralelo conforme o modelo Kelvin-Voigt (KV) e identificado utilizando o método SPRLS, que serão descritos nas seções 2.4 e 2.5, respectivamente. O escravo possuía um medidor de distância por laser utilizado nos cálculos para a predição de contato, além do sensor de força na extremidade atuante.

**Figura 2.7 – Experimento com 1-DOF completo (esquerda) focalizando no escravo e no ambiente (direita).**



Fonte: Mobasser e Hashtrudi-Zaad (2007).

Naquele trabalho, a predição de contato é realizada através do indicador preditivo por Taylor, que realiza a extrapolação do estado através de uma série de Taylor utilizando o estado e suas derivadas temporais conforme mostra a Equação (2.16), em que  $\hat{\theta}(t)$  é a posição angular estimada do escravo com relação ao ambiente no lado local com um atraso de tempo à frente e  $\theta(t - T_d)$  é a posição angular do escravo com relação ao ambiente recebida no mestre atrasada no tempo.

$$\hat{\theta}(t) = \theta(t - T_d) + \dot{\theta}(t - T_d)T_d + \frac{1}{2}\ddot{\theta}(t - T_d)T_d^2 \quad (2.16)$$

Em conjunto com a predição de contato, existe o mecanismo de chaveamento presente no lado local para trocar a impedância que interage virtualmente com o mestre utilizando a posição angular estimada do escravo através da variável  $CP(t)$ , que assume valores binários de acordo com a Equação (2.17), em que  $\theta_0$  é a posição do ambiente registrada no início da operação do sistema.

$$CP(t) = \begin{cases} 0, & \hat{\theta}(t) < \theta_0 \text{ (fora de contato)} \\ 1, & \hat{\theta}(t) \geq \theta_0 \text{ (em contato)} \end{cases} \quad (2.17)$$

Nos ensaios realizados naquele trabalho, o operador repetidamente realizava o contato do escravo com o ambiente por aproximadamente 2 s e depois parava

o contato por aproximadamente 1,5 s. Os erros na estimação da posição angular do escravo ( $\hat{\theta}(t)$ ) considerando pequenas acelerações foram de até 9% para atrasos de até 200 ms. Os resultados com relação ao erro de tempo na predição de contato do escravo para quatro magnitudes de atrasos de tempo presente no canal de comunicação podem ser visualizados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Erro de tempo na predição de contato do escravo.

<b>Atraso de Tempo (<math>T_d</math>)</b>	<b>50 ms</b>	<b>100 ms</b>	<b>150 ms</b>	<b>200 ms</b>
Erro médio e desvio padrão	1.6 ± 1.2 ms	7 ± 5 ms	8 ± 7 ms	14 ± 12 ms

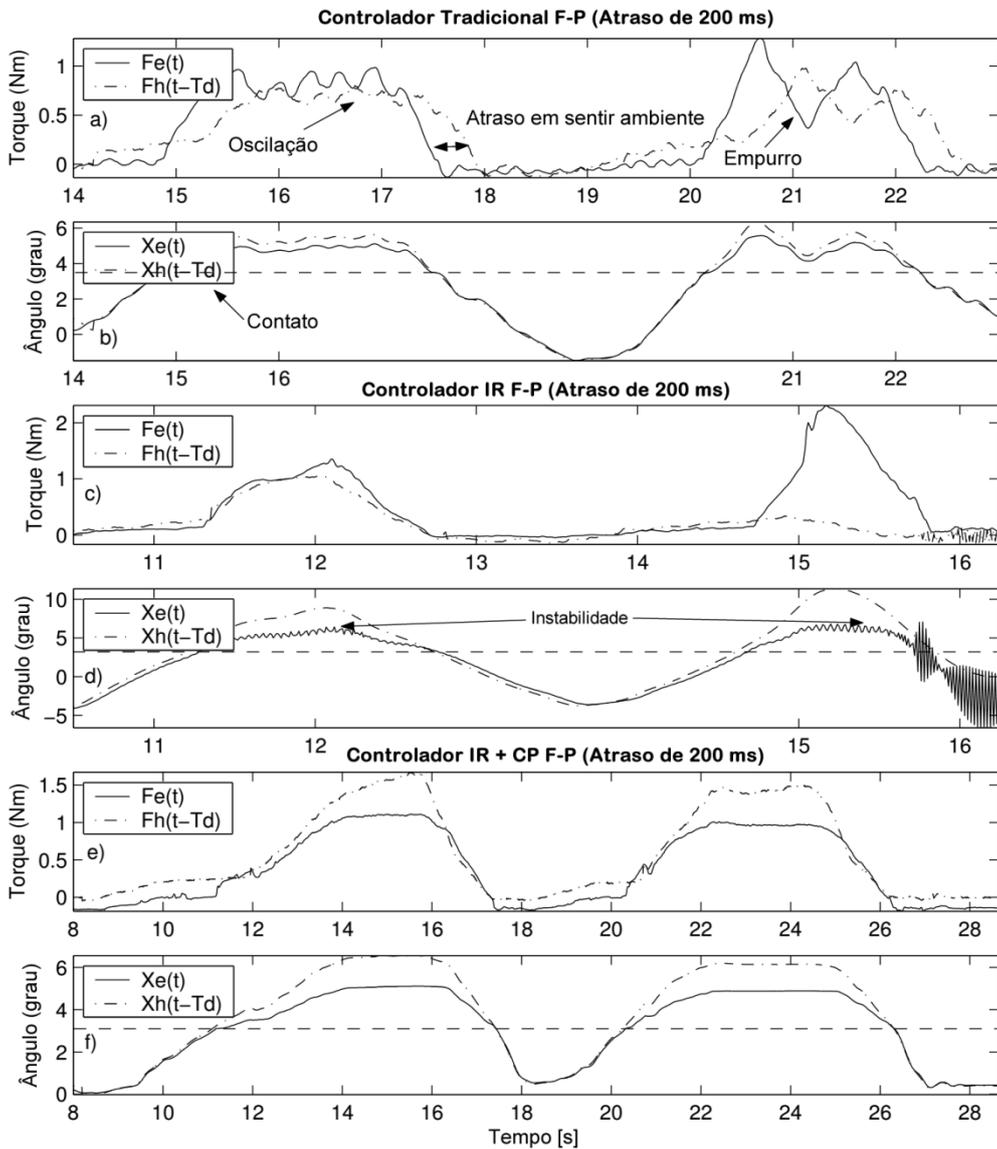
Fonte: Mobasser e Hashtrudi-Zaad (2007).

Os resultados de torque e ângulo dos ensaios com atraso de 200 ms nas três arquiteturas são mostrados na Figura 2.8, em que, visando facilitar a visualização da transparência, os sinais de força e posição do escravo foram deslocados por um período de atraso de tempo. Na arquitetura força-posição (F-P) convencional (Figura 2.8 nos gráficos a,b), pode-se verificar que o operador sente oscilações tanto fora de contato ou em contato com o ambiente e empurrões para trás quando o escravo penetra no ambiente. Além disso, o operador sente a força com um atraso. Na arquitetura força-posição (F-P) com impedância reflexiva (Figura 2.8 nos gráficos c,d), pode-se perceber que o sistema torna-se instável depois do contato do escravo com o ambiente, que é devido à impedância do novo ambiente chegar com atraso no lado local. Na arquitetura força-posição (F-P) com impedância reflexiva e predição de contato (Figura 2.8 nos gráficos e,f), verifica-se que o sistema é estável e que a força e posição do mestre e escravo seguem uma à outra bem próxima. Isto se deve ao sincronismo entre o mestre e o escravo realizado pelo mecanismo de chaveamento com indicador preditivo presente no lado local.

Embora a solução proposta no trabalho de (MOBASSER; HASHTRUDI-ZAAD, 2007) apresente ganhos satisfatórios com relação à arquitetura F-P tradicional,

a mesma aparentemente provou-se eficaz apenas para atrasos de tempo de até 200 ms, ou seja, 400 ms para ida e volta.

Figura 2.8 – Gráfico dos resultados das três arquiteturas: F-P convencional (a,b); F-P com impedância reflexiva (IR) (c,d); F-P com IR e previsão de contato (e,f).



Fonte: Adaptado de Mobasser e Hashtrudi-Zaad (2007).



### **3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E ABORDAGENS PARA A SUA SOLUÇÃO**

#### **3.1. Definição do problema**

Neste trabalho propõe-se e analisa-se uma arquitetura de comando e controle para telerrobôs atracados aos seus alvos sob atrasos de tempo significativos. Considera-se atraso de tempo significativo valores tipicamente acima de 0,5 s, uma vez que arquiteturas tradicionais (por exemplo, força-posição) não permitem uma operação contínua de teleoperação.

Para este fim, este trabalho utiliza como base a arquitetura de impedância reflexiva apresentada na seção 2.3.2 composta por componentes lineares e invariantes no tempo. A arquitetura bilateral proposta é analisada sob a ótica da transparência, ou seja, visa melhorar a percepção do operador durante a manipulação do alvo (ambiente) com atraso de tempo constante na comunicação.

Este trabalho não irá abordar a análise da estabilidade da arquitetura uma vez que: (a) baseia-se em arquiteturas já apresentadas na literatura com tal análise (HANNAFORD, 1989), (HASHTRUDI-ZAAD; SALCUDEAN, 2001), (HASHTRUDI-ZAAD; SALCUDEAN, 2002), (b) as mudanças realizadas não alteram quais são as informações que são atrasadas no tempo (principal causador da instabilidade), e (c) as mudanças realizadas aumentam o sincronismo entre o escravo real e virtual, portanto diminuindo a fonte de instabilidade como relatado por (MOBASSER; HASHTRUDI-ZAAD, 2007).

Embora o título da proposta de dissertação incluísse a predição de contato, baseando-se em parte na arquitetura apresentada na seção 2.6, verificou-se a não necessidade do mesmo devido a uma mudança realizada na concepção da arquitetura que é apresentada no Capítulo 4. Portanto, sugere-se que o novo título seja: Uma arquitetura de comando e controle para telerrobôs atracados aos seus alvos sob atrasos de tempo significativos e com medição de suas distâncias.

### **3.2. Abordagens para a sua solução**

Sabe-se que para a solução de um problema de engenharia as seguintes três abordagens podem ser adotadas: (a) teoria e análise, (b) modelagem e simulação e (c) observação e experimentação. Neste trabalho essas três abordagens são adotadas e descritas nos Capítulos 4, 5 e 6, respectivamente.

A teoria e análise conceitual da solução proposta encontra-se no Capítulo 4, onde o conceito e o funcionamento esperado da arquitetura são apresentados. Neste capítulo também é apresentado o modelo geral (diagrama de blocos esquemático) da arquitetura e a descrição dos seus principais componentes.

A modelagem e simulação encontra-se no Capítulo 5, em que o modelo de cada componente utilizado na arquitetura é apresentado bem como o ambiente de simulação, suas características e os diagramas de blocos utilizados na simulação.

A experimentação encontra-se no Capítulo 6, em que a arquitetura proposta é testada utilizando robôs e ambientes reais. Dois tipos de experimentos foram realizados em que o robô escravo entra em contato com o ambiente: (1) automático utilizando somente o lado remoto da arquitetura (o escravo), e (2) utilizando a arquitetura de teleoperação completa, ou seja, a trajetória do robô escravo é definida por um humano através do robô mestre.

Com relação aos casos simulados e/ou experimentados neste trabalho, considerou-se que a magnitude do atraso de tempo e a impedância do ambiente são os aspectos mais importantes para verificar o funcionamento de uma arquitetura de teleoperação, uma vez que: (a) o atraso de tempo, conforme mencionado ao longo deste documento, é inerente a aplicações espaciais e arquiteturas bilaterais tradicionais não podem ser utilizadas; e (b) ambientes rígidos propiciam a instabilidade do sistema uma vez que as forças de contato crescem rapidamente causando oscilações no robô escravo.

Portanto, este trabalho simulou e experimentou a arquitetura proposta completa para doze casos, utilizando quatro magnitudes de atrasos de tempo (ida e volta de até 6 s) e três impedâncias para o ambiente (de ambiente macio (baixa rigidez), a médio (média rigidez), até duro (alta rigidez)). Os doze casos podem ser visualizados na Tabela 3.1, em que as características de cada ambiente são apresentadas na Tabela C.1. Devido à limitação de equipamentos disponíveis para a experimentação, a impedância do ambiente não era alterada durante o experimento. Buscando uma equivalência entre os resultados das simulações e dos experimentos, a impedância do ambiente real também foi mantida constante durante as simulações. Os mesmos casos também foram simulados para a arquitetura com impedância reflexiva tradicional. Por limitação de tempo a mesma não pôde ser experimentada; no entanto, baseado tanto nas simulações quanto nos experimentos presentes na literatura, pode-se ter conhecimento da limitação de sua funcionalidade.

Tabela 3.1 – Principais casos realizados.

<b>Atraso \ Ambiente</b>	<b>N° 2 (macio)</b>	<b>N° 4 (médio)</b>	<b>N° 5 (duro)</b>
<b>15 ms</b>	C1	C2	C3
<b>500 ms</b>	C4	C5	C6
<b>1000 ms</b>	C7	C8	C9
<b>3000 ms</b>	C10	C11	C12

Fonte: Próprio autor.

Com relação ao atraso de tempo, consideram-se tais casos representativos uma vez que: (1) os casos de C1 até C3 permitem validar a arquitetura quando o atraso de tempo é desprezível e podem ser utilizados como referência do funcionamento normal da arquitetura; (2) os casos de C4 até C6, permitem comparar com a arquitetura tradicional que não funciona; (3) os casos de C7 até C9 permitem verificar se a arquitetura proposta ainda funciona; e (4) os casos de C10 até C12 permitem verificar se a arquitetura proposta funciona com atraso de tempo similar a aplicações espaciais (atraso de ida e volta de

6 s). Nas simulações, tais atrasos de tempo em conjunto com a trajetória do operador apresentada na Seção 5.1.2, torna-se possível também verificar o desempenho das arquiteturas quando a impedância é recebida durante o primeiro contato entre escravo e ambiente (nos casos de C4 até C6) e quando a impedância é recebida após o primeiro contato (nos casos de C7 até C9).

Com relação aos ambientes, os casos mais representativos (e também piores) são C3, C6, C9 e C12, uma vez que o ambiente n° 5 equivale a uma parede, fazendo com que as forças de contato cresçam rapidamente.

## **4 ARQUITETURA PROPOSTA E ADOTADA**

Esta seção apresenta a arquitetura proposta neste trabalho para a teleoperação bilateral com atrasos de tempo constantes e significativos presentes no canal de comunicação entre os lados local (mestre) e remoto (escravo).

### **4.1. Conceito da arquitetura proposta**

A nova arquitetura proposta é baseada no conceito de impedância reflexiva (Seção 2.3.2), uma vez que o ambiente em que o operador esta interagindo é na verdade um ambiente virtual (simulado) baseado na modelagem e identificação do ambiente real com o qual o robô escravo entra em contato ao comando do operador. Ao longo desta Seção haverá menção a três tipos robôs escravos, sendo: (1) o robô escravo real que fica no lado remoto (detalhado no Apêndice B); (2) o robô escravo virtual local, que é constituído pelo modelo do escravo real e está presente no lado local; e (3) robô escravo virtual remoto, que também é constituído pelo modelo do escravo real, porém, está presente no lado remoto.

Nesta nova arquitetura, é proposta uma sincronização, entre o robô escravo real e o escravo virtual local, em malha aberta de forma que o atraso de tempo no canal de comunicação não interfira no sincronismo entre os dois robôs e, conseqüentemente, no desempenho da arquitetura. Esta sincronização é realizada ao colocar o escravo real em malha fechada com realimentação do seu próprio modelo no lado remoto (robô escravo virtual remoto), ou seja, um controle por modelo de referência é realizado. Este robô virtual remoto também interage com um ambiente virtual assim como o escravo virtual local, e assim requerendo que os modelos dos escravos e ambientes virtuais sejam idênticos em ambos os lados.

Desta forma, o controle ativo presente no escravo real estará rastreando ambos os comandos do operador atrasado e a saída (velocidade/posição) do seu próprio modelo, possibilitando então que o escravo real esteja em sincronia com o seu modelo virtual no lado local, melhorando a transparência e a estabilidade do sistema de teleoperação. Uma vez que o comando do operador chega com atraso no lado remoto, as outras informações utilizadas no robô virtual remoto devem ser atrasadas por dois períodos de tempo. Além deste benefício, é importante dizer que esta arquitetura permite que os erros na modelagem e identificação do robô escravo real sejam mitigados, uma vez que o escravo real estará rastreando o seu modelo e, de certa maneira, imitando-o.

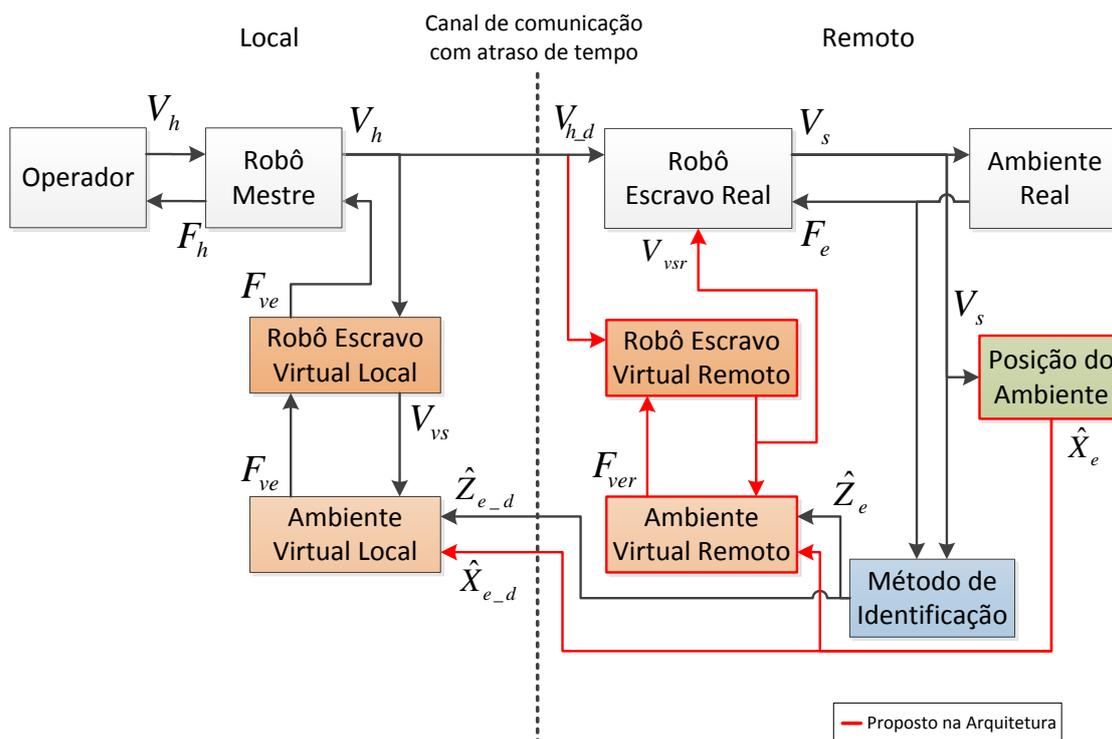
Referente aos ambientes virtuais, duas proposições com relação à impedância e à posição são realizadas. A impedância do ambiente deve ser saturada evitando que instabilize o robô mestre. Tal instabilidade é proveniente da limitação física e tecnológica do robô não poder simular para o operador toda e qualquer impedância, como por exemplo, simular valores infinitos de rigidez e de amortecimento. É proposto também que, quando a impedância do ambiente real ainda é desconhecida, o ambiente virtual desempenhe a impedância de saturação (ambiente duro). Isto é proposto uma vez que a mudança de impedância de alta para baixa é menos prejudicial no desempenho do sistema que o inverso, uma vez que as forças de contato irão diminuir e não irá surpreender o operador quando a impedância do ambiente for conhecida. Com relação à posição absoluta do ambiente virtual, propõe-se que a posição absoluta do ambiente seja calculada no lado remoto e enviada para o lado local, permitindo que a interação entre o escravo virtual e ambiente virtual local aconteça conforme entre o escravo real e ambiente real. O conhecimento da posição do ambiente real deve ser obtido a priori através de algum sensor de medição de distância, como câmeras estereoscópicas ou a laser. Estas proposições alteram como o ambiente virtual é simulado e se comporta, diferindo com relação ao método de predição de contato proposto em (MOBASSER; HASHTRUDI-ZAAD, 2007) e descrito na Seção 2.6, que altera a

impedância do ambiente virtual de livre para a estimada quando o contato com o ambiente for acontecer.

## 4.2. Descrição da arquitetura proposta

A arquitetura utilizada neste trabalho é composta por dois canais (Força-Posição) de comunicação, porém o mesmo conceito pode ser aplicado para a comunicação com quatro canais entre o robô mestre e o robô escravo virtual. O diagrama de blocos funcional da arquitetura desenvolvida para dois canais pode ser visualizado na Figura 4.1.

**Figura 4.1 – Diagrama de blocos da arquitetura de teleoperação proposta.**



Fonte: Próprio autor.

Através da Figura 4.1, observa-se, no lado local, que o operador e o robô mestre estão em malha fechada somente com o robô escravo virtual local. O robô escravo virtual local então, a comando do operador (via o robô mestre),

interage com o ambiente virtual local, que recebe estimativas com atraso da posição absoluta do ambiente ( $\hat{X}_{e_d}$ ) e da impedância do ambiente real ( $\hat{Z}_{e_d}$ ). A letra subscrita “e” refere-se à primeira letra da palavra ambiente em inglês (*environment*) e a letra “d” refere-se a atraso em inglês (*delay*). Igualmente como acontece na arquitetura base, a posição do mestre também é enviada para o lado remoto a ser utilizada como referência de trajetória, ou seja, é a malha de comando (*feedforward*) para o robô escravo.

No lado remoto, pode-se observar que o robô escravo real recebe comando da saída (velocidade/posição) do seu próprio modelo ( $V_{vsr}$ ) além do comando do operador atrasado no tempo ( $V_{h_d}$ ) que, dependendo da trajetória designada, pode ou não entrar em contato com o ambiente real. Quando em contato, o ambiente real então é identificado utilizando a força do ambiente ( $F_e$ ) e a posição do escravo ( $V_s$ ) através de algum método de identificação. Alguns métodos utilizados na literatura são apresentados no Capítulo 2.

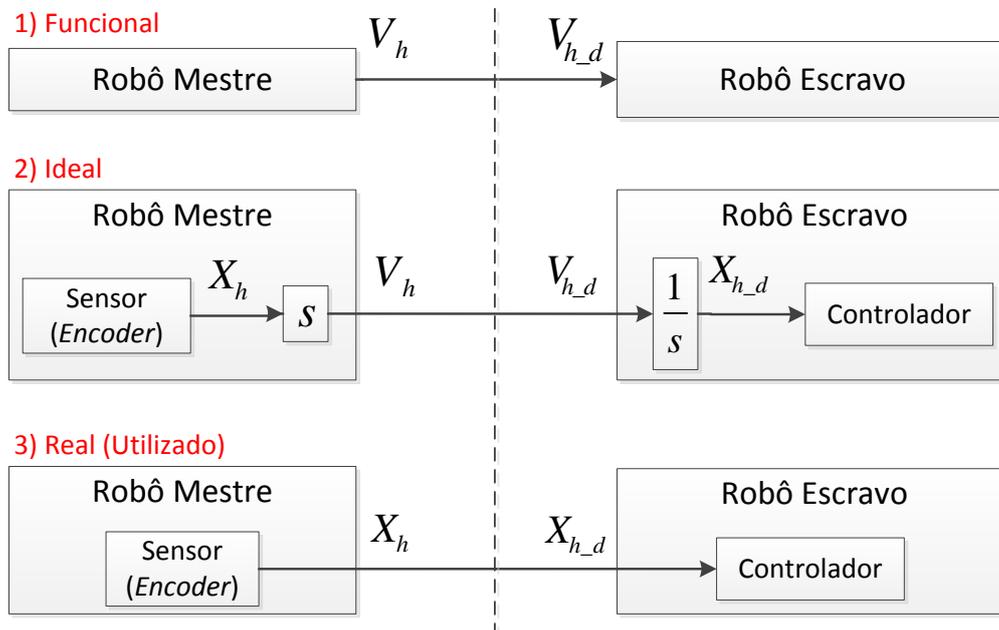
O bloco denominado “Posição do Ambiente” realiza a estimação da posição absoluta do ambiente ( $\hat{X}_e$ ) a priori utilizando principalmente as informações do sensor de distância ( $X_L$ ) e da posição do escravo real ( $V_s$ ). Mais informações sobre este bloco são apresentadas no próximo capítulo na Seção 5.1.4.

## 5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA ARQUITETURA ADOTADA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A modelagem e simulação apresentada neste capítulo tem como base o diagrama de blocos funcional da Figura 2.4, porém adaptando-o para a arquitetura proposta mostrada na Figura 4.1 no capítulo anterior.

Nos diagramas funcionais de arquiteturas de teleoperação o fluxo entre os robôs é um sinal de velocidade (e indiretamente posição e aceleração) como mostrado na Figura 5.1 no item 1, no entanto, durante a operação real da arquitetura tal sinal é, na verdade, posição como mostrado na Figura 5.1 no item 3. Idealmente deveria ser utilizado como mostrado na Figura 5.1 no item 2, em que operações de derivada e integração seriam realizadas, porém, dois problemas são encontrados: (1) robôs são usualmente equipados com sensores de posição (por exemplo: *encoder*) e a estimação de velocidade introduz ruídos, principalmente em baixas velocidades, uma vez que as operações de derivada são aproximações; e (b) ao utilizar velocidade se torna necessário realizar a operação de integração no lado remoto para poder realizar o controle de posição, ou seja, é introduzido mais ruídos no sistema de controle. Portanto, objetivando reduzir tais ruídos e não causar problemas de deriva (*drift*) entre os robôs, o sinal de posição ( $X$ ) é utilizado. Desta forma, buscando retratar a realidade, a partir de agora os sinais de velocidade ( $V$ ), encontrados nos Capítulos 2 e 4, serão considerados posições ( $X$ ).

**Figura 5.1 – Exemplo comparando modos de transmitir sinais entre os robôs.**



Fonte: Próprio autor.

## 5.1. Modelagem

Nas seguintes subseções são descritos os modelos utilizados de cada bloco do diagrama mostrado na Figura 4.1. Também são apresentados os diagramas de blocos que compõem o diagrama completo de simulação apresentado na Seção 5.2. Vale ressaltar que os modelos são baseados na literatura ou na modelagem dos objetos reais disponíveis que poderiam ser utilizados na etapa de experimentação.

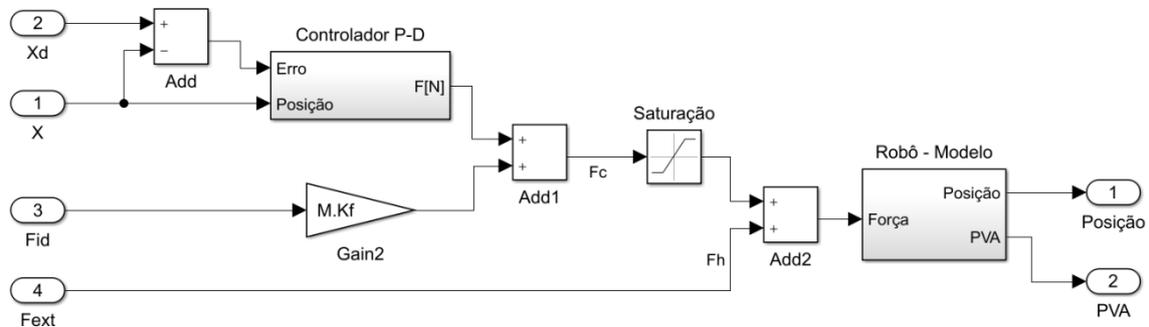
### 5.1.1. Mestre e escravo (reais ou virtuais)

Os blocos mestre e escravo (reais ou virtuais) são constituídos da mesma forma, contendo principalmente o modelo linear do robô e a malha de controle que abrange o controle de posição utilizando um controlador P-D (proporcional-derivativo) e a força desejada. O controlador é modelado como

$$F_c = K_p(X_D - X) - K_D\dot{X} + K_F F_{ID} \quad (5.1)$$

em  $F_c[N]$  é a saída do controlador,  $X[m]$  é a posição atual do robô,  $X_D[m]$  é a posição desejada,  $K_p$  é o ganho proporcional,  $K_D$  é o ganho derivativo,  $K_F$  é o ganho de força e  $F_{ID}[N]$  é uma força adicional que se deseja que o robô execute. Como utiliza-se a configuração de arquitetura força-posição, o mestre utiliza somente a parte da força e o escravo o controle de posição. O diagrama de blocos da parte interna desses blocos pode ser visualizado na Figura 5.2.

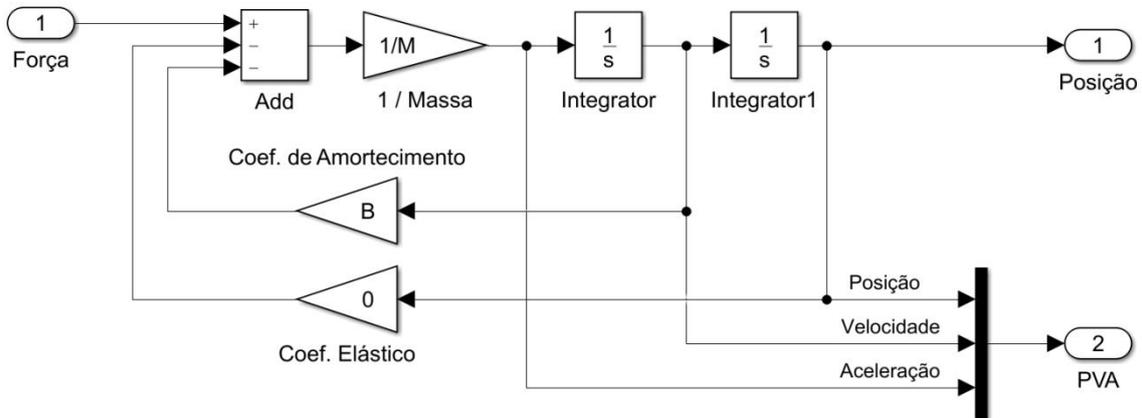
**Figura 5.2 – Diagrama de blocos do mestre e escravos.**



Fonte: Próprio autor.

O bloco interno de saturação é utilizado para simular o limite de força que cada robô pode fornecer, sendo para o mestre igual a 2,3 N e para o escravo 8,4 N. O bloco denominado “Robô – Modelo” contém de fato o modelo do robô e é composto como ilustrado na Figura 5.3, ao invés de um bloco pronto de função de transferência. Isto é realizado para obter as variáveis internas (velocidade e aceleração) sem precisar realizar a operação de derivada e assim evitando a adição de erros sem necessidade. A saída denominada “PVA” refere-se a um vetor contendo posição, velocidade e aceleração; que é utilizada pelo bloco ambiente apresentado na Seção 5.1.3.

**Figura 5.3 – Bloco interno “Robô - Modelo”.**



Fonte: Próprio autor.

No caso do escravo real, existe a particularidade que o controlador também leva em consideração a posição do escravo virtual presente no lado remoto; portanto, o modelo do controlador do escravo real é dado por

$$F_{CS} = K_P(X_D - X) - K_D\dot{X} + K_F F_I + K_{PV}(X_{vsr} - X) \quad (5.2)$$

em que  $X_{vsr}$  é a posição do robô escravo virtual no lado remoto e  $K_{PV}$  é o ganho de controle proporcional da malha entre o escravo real e virtual. Os valores dos ganhos utilizados podem ser vistos na Tabela 5.1 bem como os valores de cada parâmetro referentes aos modelos dos robôs mestre e escravo. Para maiores detalhes referentes aos modelos dos robôs, verificar os Apêndices A e B. Os valores dos ganhos dos controladores foram encontrados experimentalmente com os robôs reais visando realizar um controle de rastreo satisfatório para a operação de um sistema de teleoperação bilateral.

Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros utilizados na simulação.

	<b>Parâmetro</b>	<b>Mestre</b>	<b>Escravo</b>	<b>Escravos Virtuais</b>
<b>Controlador</b>	$K_P$	0	800	800
	$K_D$	0	40	40
	$K_F$	1	0	0
	$K_{PV}$	-	4000	-
<b>Modelo</b>	Massa	0,27	1,57	1,57
	Amortecimento	0,23	0,2	0,2

Fonte: Próprio autor.

### 5.1.2. Operador

O bloco operador, conforme apresentado na Figura 2.4, é composto por uma trajetória ( $F_h^*$ ) desejada a ser imposta no robô mestre e pela impedância ( $Z_h$ ) da mão do operador, conforme pode ser visualizado na Figura 2.4. O modelo de impedância representativo da mão do operador utilizado neste trabalho é (KAZEROONI; TSAY; HOLLERBACH, 1993)

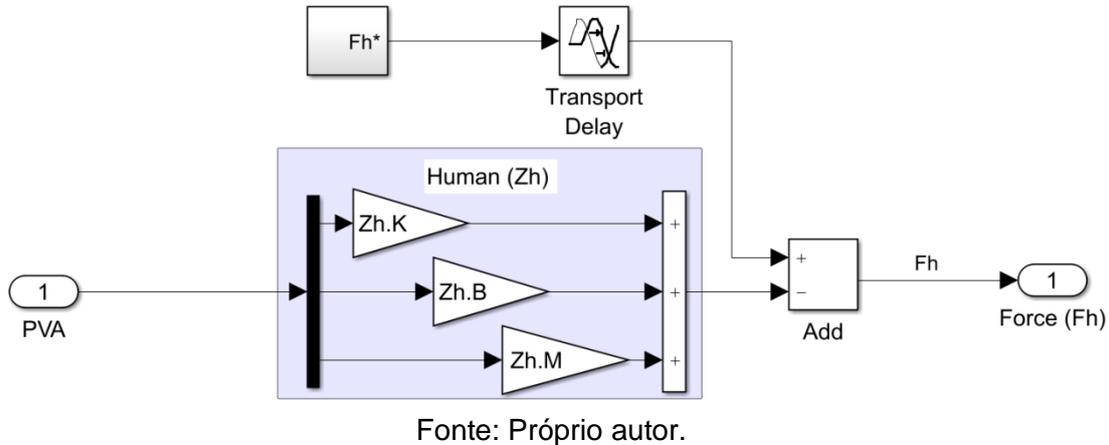
$$Z_h = 0.5 \ddot{X} + 70 \dot{X} + 2000 X. \quad (5.3)$$

A força realizada pelo operador é definida por

$$F_h^* = 7,5 \times 10^{-3} \text{ sen}(1,2 t) * 2000 \quad (5.4)$$

com saturação mínima em zero. Esta é composta da trajetória desejada a ser seguida em conjunto com a rigidez da mão do operador. Seus parâmetros são definidos visando que, nas simulações, ao menos dois contatos com o ambiente sejam realizados durante um período de dez segundos. O diagrama de blocos do operador pode ser visualizado na Figura 5.4 e, como pode ser notado, tal força é atrasada por um período de atraso de tempo com o objetivo de a posição do ambiente ser recebida no lado local antes que o primeiro contato aconteça.

**Figura 5.4 – Diagrama de blocos do operador.**



Fonte: Próprio autor.

Considerando que no mundo real a interação entre a mão do operador e o robô mestre é analógica e não digital, as variáveis posição, velocidade e aceleração utilizadas para calcular a força produzida pela mão são provenientes do vetor PVA do bloco robô mestre.

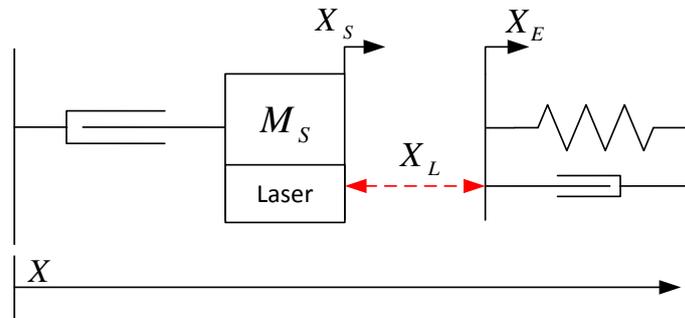
### 5.1.3. Ambiente

Este trabalho utiliza o modelo de ambiente linear Kelvin-Voigt que é descrito pela equação (2.9), uma vez que os ambientes reais disponíveis a serem utilizados nos experimentos reais são modelados como lineares, conforme mostrado no Apêndice C. Considerando que a interação entre o ambiente e o respectivo robô é analógica e não digital, a velocidade do robô é proveniente do vetor PVA, e não estimada a partir da posição. Durante as simulações considera-se que o ambiente esteja localizado em  $4\text{ mm}$ . Nos casos simulados neste capítulo, são considerados os coeficientes de rigidez e de amortecimento dos ambientes reais mostrados na Tabela C.1.

#### 5.1.4. Posição do ambiente

Este bloco realiza a estimação da posição absoluta do ambiente ( $\hat{X}_e$ ) a priori utilizando as informações do sensor de distância ( $X_L$ ), da posição do escravo real ( $V_s$ ), a última medida da posição do ambiente ( $X_{e\_last}$ ), e da distância ( $D_{ee}$ ) entre a sua extremidade (em inglês *end-effector*) e o sensor laser. A Figura 5.5 mostra um diagrama de como a medição da posição absoluta do ambiente é realizada. O cálculo da posição ( $X_e$ ) é apresentado na Equação (5.5) e o sinal é filtrado com um filtro passa-baixa de primeira ordem com frequência de corte de 1 Hz.

**Figura 5.5 – Diagrama para medição da posição do ambiente real.**

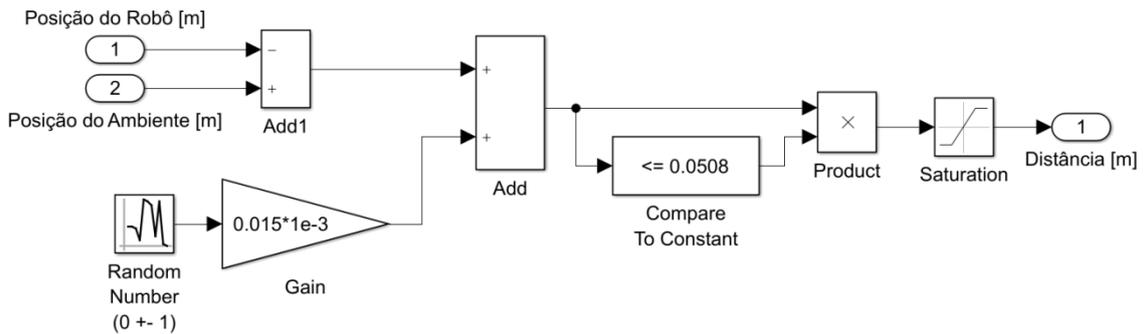


Fonte: Próprio autor.

$$X_e = \begin{cases} X_s + X_L - D_{ee}, & \text{para } X_s \geq (X_{e\_last} - 2 \times 10^{-3}) \\ X_{e\_last}, & \text{para } X_s < (X_{e\_last} - 2 \times 10^{-3}) \end{cases} \quad (5.5)$$

Neste trabalho, considera-se que a informação de distância ( $X_L$ ) é provida pelo sensor medidor de distância modelo AR200-50, conforme descrito no Apêndice B. O seu modelo por diagrama de blocos utilizado durante as simulações pode ser visualizado na Figura 5.6. O cálculo é baseado nas posições do robô e do ambiente e o sinal de saída ( $X_L$ ) é saturado em  $50,8 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

**Figura 5.6 – Diagrama de blocos do sensor de distância (*range finder*).**



Fonte: Próprio autor.

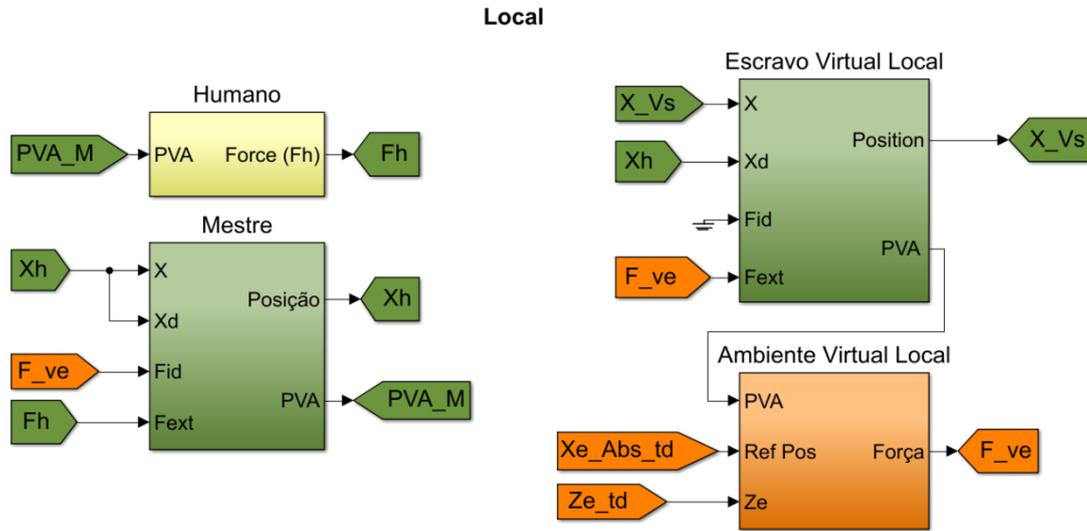
### 5.1.5. Outros blocos

O bloco denominado identificação contém o método de identificação RLS, que é descrito na Seção 2.5 através da Equação (2.13), em que  $\lambda = 1$ . Este utiliza a força do ambiente e a posição do robô escravo. No método de identificação, o modelo KV é utilizado, conforme apresentado na Seção 5.1.3.

## 5.2. Ambiente de simulação

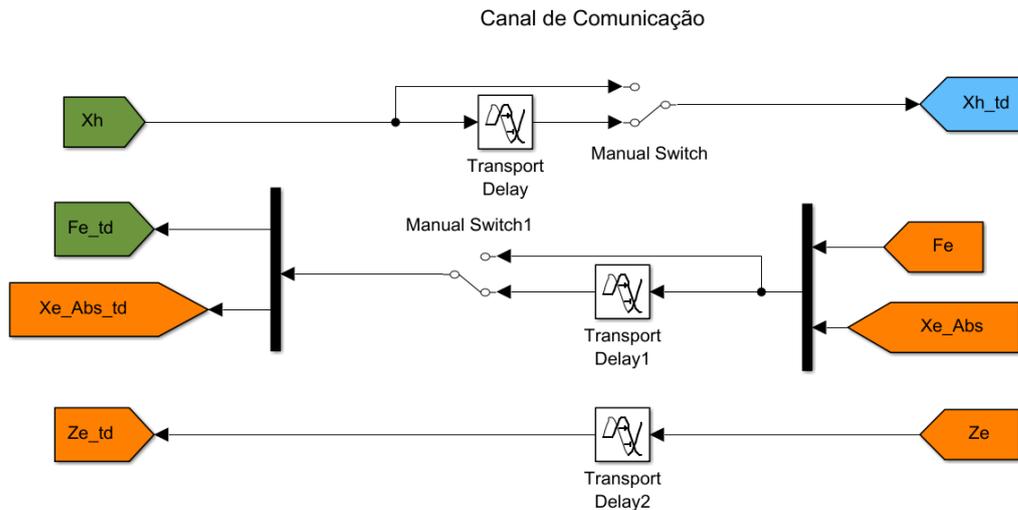
A simulação da arquitetura é realizada através do software MATLAB<sup>®</sup> utilizando a ferramenta Simulink<sup>®</sup>. O integrador configurado é o "ode45 (Dormand-Prince)" de passo variável com tamanho máximo de  $5 \times 10^{-4}$  s, e tolerâncias relativa e absolutas de  $1 \times 10^{-6}$  e  $1 \times 10^{-12}$ , respectivamente. O diagrama de blocos completo da simulação, contendo os blocos apresentados na seção anterior, separado em lado local, canal de comunicação e lado remoto pode ser visualizado na Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9, respectivamente.

**Figura 5.7 – Diagrama de blocos do lado local.**



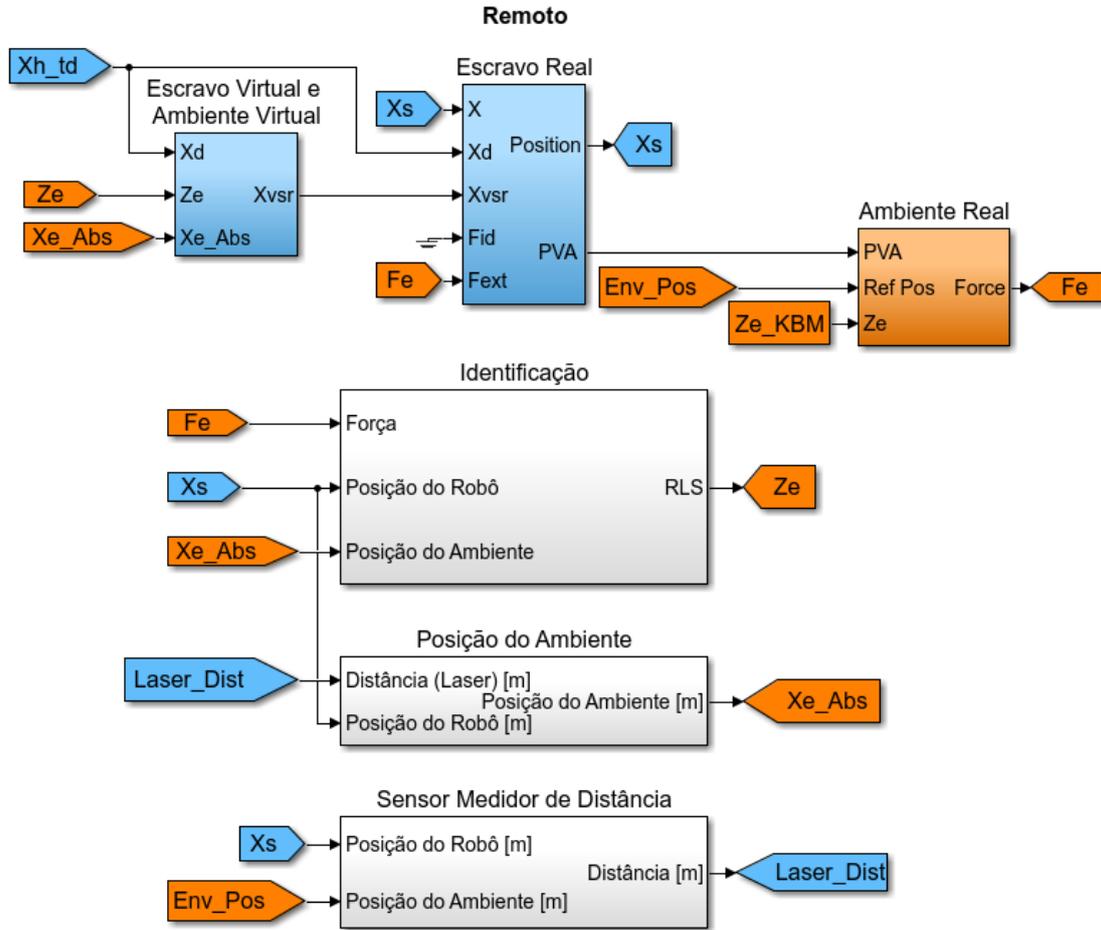
Fonte: Próprio autor.

**Figura 5.8 – Diagrama de blocos do canal de comunicação.**



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.9 – Diagrama de blocos do lado remoto.



Fonte: Próprio autor.

### 5.3. Simulações e análise dos resultados

Os casos simulados nesta seção foram apresentados no Capítulo 3 e podem ser visualizados na Tabela 3.1. Em todas as simulações, o ambiente real se encontra na posição de  $4\text{ mm}$ . As figuras com os resultados de cada caso possuem quatro gráficos, nas quais: os gráficos (a) e (c) mostram as posições do mestre/operador ( $X_h$ ), do escravo virtual local ( $X_{vs}$ ), do escravo virtual remoto ( $X_{vsr}$ ) e do escravo real ( $X_s$ ); e os gráficos (b) e (d) mostram as forças do ambiente virtual local ( $F_{ve}$ ), virtual remoto ( $F_{ver}$ ) e real ( $F_e$ ).

Os gráficos (a) e (b) visam facilitar o entendimento das arquiteturas mostrando os sinais no tempo em que, de fato, acontecem; e, objetivando facilitar a comparação dos sinais, nos gráficos (c) e (d) tanto as posições do mestre/operador ( $X_h$ ) e do escravo virtual local ( $X_{ve}$ ), quanto à força do ambiente virtual local ( $X_{ve}$ ) são atrasadas por um período de tempo. É importante lembrar que na arquitetura com impedância reflexiva tradicional, não existe o escravo e/ou ambientes virtuais remotos; portanto, a posição e a força dos mesmos não são mostradas nos gráficos dessa arquitetura.

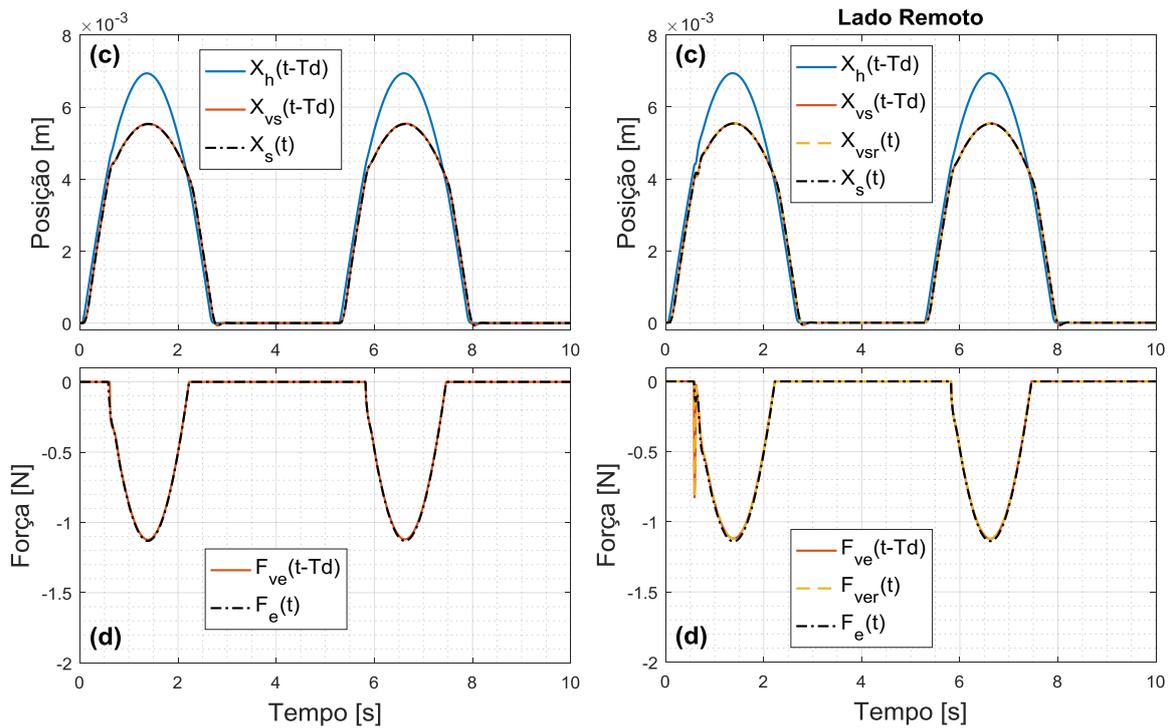
### **5.3.1. Casos com atraso de tempo desprezível**

Conforme mencionado anteriormente, estes casos permitem verificar o funcionamento das arquiteturas sem o efeito do atraso de tempo. Uma vez que o conteúdo dos gráficos (a) e (b) são visualmente iguais a (c) e (d), respectivamente; somente os gráficos (c) e (d) são mostrados.

Os resultados das arquiteturas para os casos C1 (ambiente macio), C2 (ambiente médio) e C3 (ambiente duro) podem ser visualizados na Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12, respectivamente. Pode-se observar que para todos os ambientes, as arquiteturas funcionaram dentro do padrão como deveriam. Isto é esperado uma vez que o atraso de tempo é de apenas 15 *ms*, ou seja, pode ser considerado desprezível uma vez que afeta pouco o desempenho do sistema. Observa-se também que os escravos reais e virtuais estão sincronizados um com o outro e todos seguindo a trajetória do operador/mestre bem próxima até o momento de contato com o ambiente na posição 4 *mm*, que é de se esperar para um arquitetura bilateral de dois canais. Durante o contato, é normal a não sincronização em posição entre o mestre e os escravos, uma vez que as arquiteturas não são de quatro canais e as forças comandadas pelo controle dos escravos não são maiores que as forças exercidas pelos ambientes.

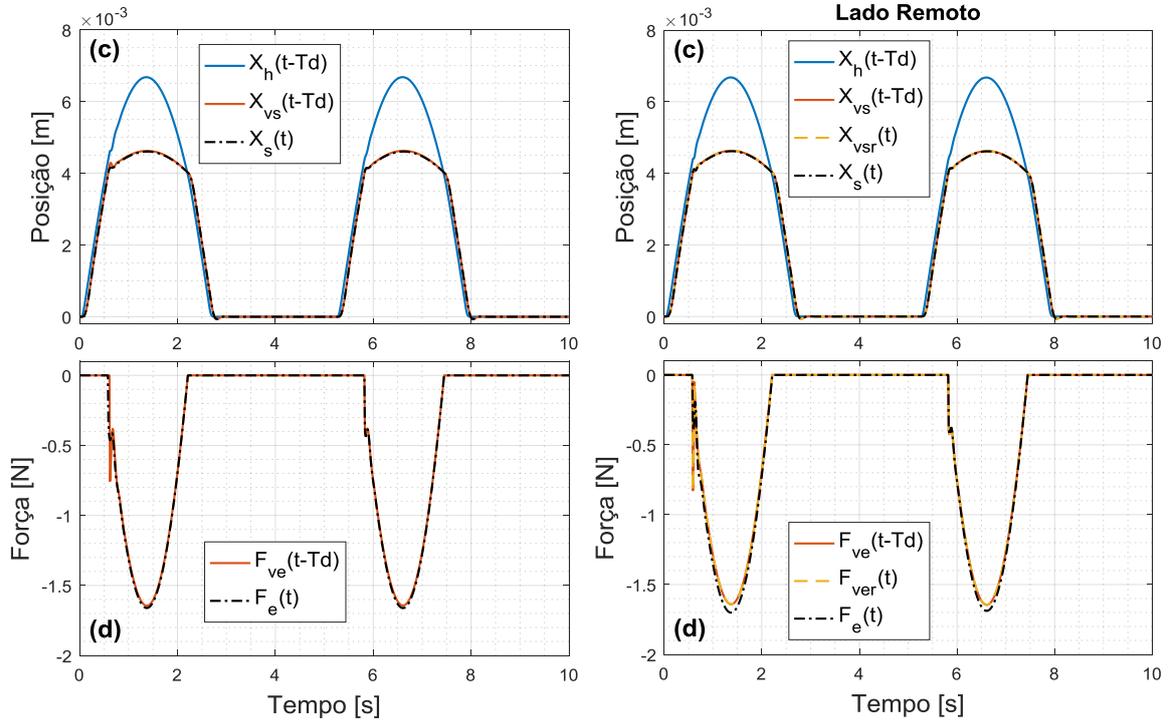
Devido aos diferentes ambientes em cada caso, a menor força de contato é no caso C1 e a maior no caso C3. As pequenas diferenças entre as forças virtuais e a força real certamente é referente ao erro de estimação do ambiente real e também à pequena diferença entre as posições dos escravos virtuais e a do real.

**Figura 5.10 – Caso C1: Arquitetura IR tradicional (esquerda) e proposta (direita).**



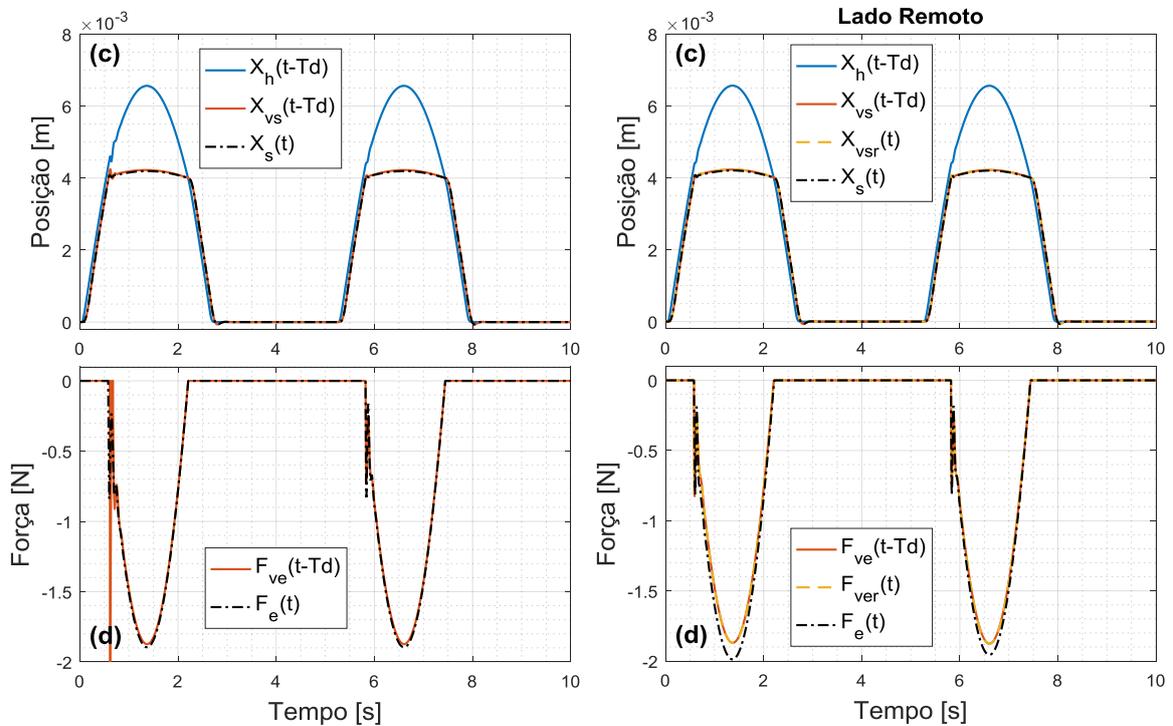
Fonte: Próprio autor.

**Figura 5.11 – Caso C2: Arquitetura IR tradicional (esquerda) e proposta (direita).**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 5.12 – Caso C3: Arquitetura IR tradicional (esquerda) e proposta (direita).**

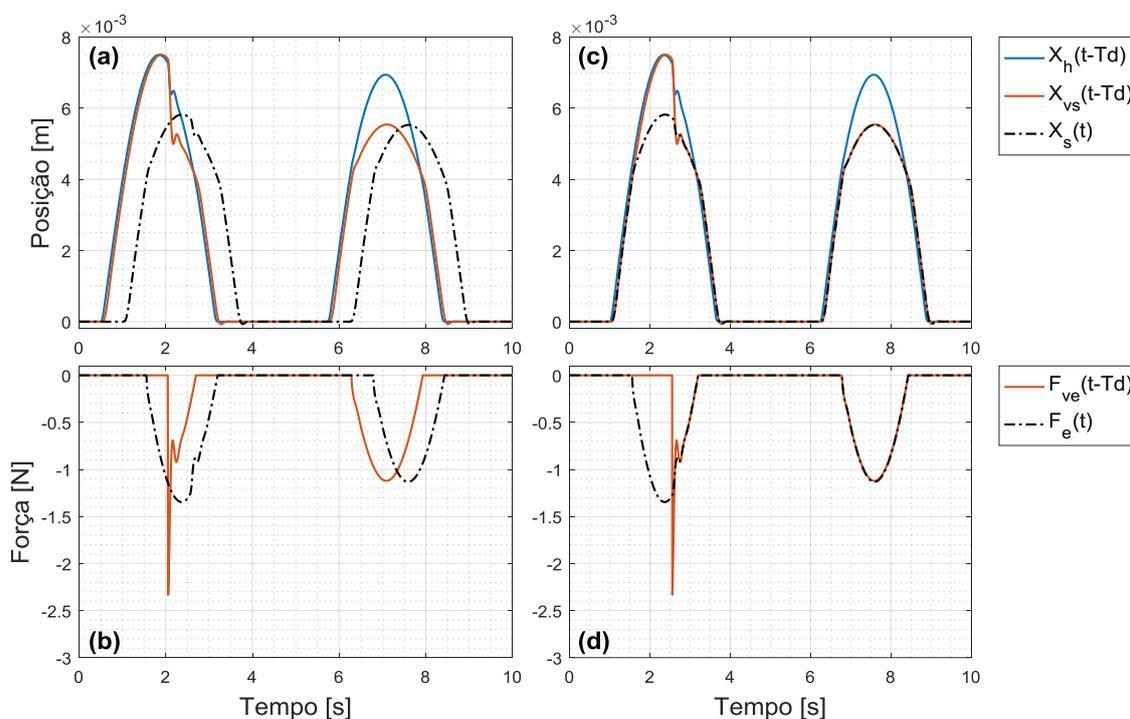


Fonte: Próprio autor.

### 5.3.2. Casos com atraso de tempo de 500 ms

Os casos apresentados nesta seção, em conjunto com a trajetória descrita na Seção 5.1.2, permitem verificar o desempenho das arquiteturas quando a impedância é recebida durante o primeiro contato entre o escravo e o ambiente. Os resultados dos casos C4, C5 e C6 para a arquitetura com impedância reflexiva (IR) tradicional podem ser visualizados na Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15, respectivamente. Os resultados de tais casos para a arquitetura proposta podem ser visualizados na Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18, respectivamente.

Figura 5.13 – Caso C4 simulado com a arquitetura IR tradicional.

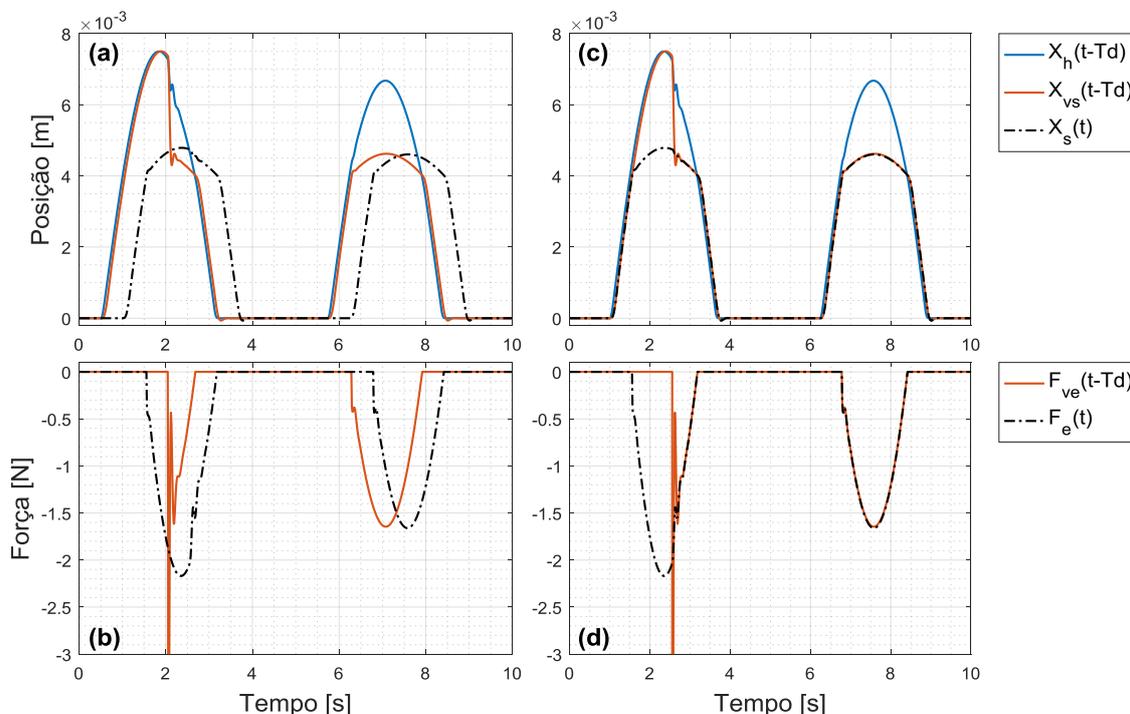


Fonte: Próprio autor.

Através das figuras apresentadas pode-se perceber que, nos gráficos (a) e (b) ocorre uma importante mudança na posição e na força virtual quando  $t \cong 2$  s. Esta mudança é quando a impedância estimada do ambiente real é recebida no lado local, que é aproximadamente 1 s após o mestre passar pela posição 4 mm (lembrando que o escravo real recebe o comando para tal posição com

atraso de 500 ms e a impedância estimada irá atrasar mais 500 ms até chegar ao lado local).

**Figura 5.14 – Caso C5 simulado com a arquitetura IR tradicional.**



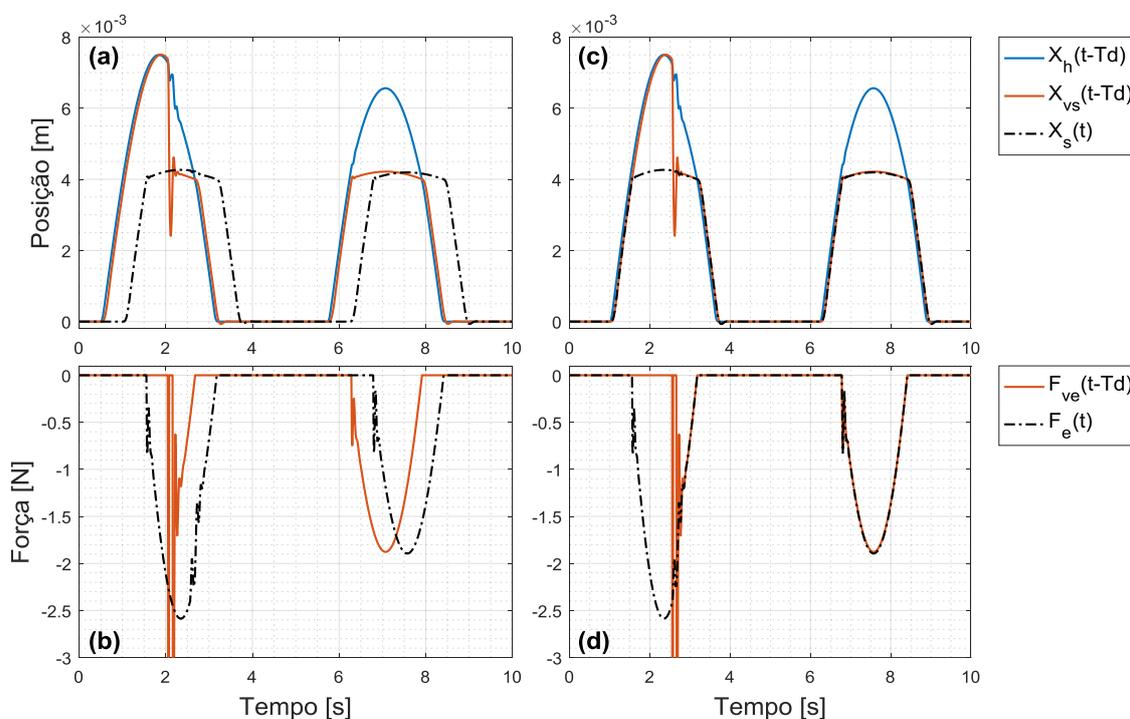
Fonte: Próprio autor.

Nos resultados da arquitetura IR tradicional, pode-se notar que o escravo virtual mantém-se seguindo o mestre mesmo após a posição do ambiente. Devido a isto, nenhuma força é transmitida para o operador dando a falsa sensação que ainda realiza o movimento sem nenhum contato. Quando a impedância é recebida, o operador recebe de surpresa forças que por consequência, causam oscilações na posição do escravo virtual e mudanças na trajetória do operador.

A intensidade de tais oscilações é proporcional à rigidez do ambiente, como pode ser visualizado nos resultados. Embora para ambientes macios (Figura 5.13) as oscilações ainda possam ser toleradas, quando um ambiente com alta rigidez é encontrado (Figura 5.15), tais oscilações não são aceitáveis para um contato e/ou manipulação segura. Como pode ser visto na Figura 5.15, tal

oscilação causou o não contato do escravo virtual com o ambiente, fazendo com que as forças oscilassem de zero a centenas de newtons quando se reestabelece o contato. É importante lembrar que, nas simulações, foi considerado que a impedância da mão do operador é constante durante todo o movimento, o que na realidade não é sempre verdade. Num momento que o operador encontra-se mais relaxado, tais oscilações podem ser muito maiores, degradando seriamente a transparência do sistema e causando muito mais instabilidade no sistema de teleoperação e, portanto não permitindo sua operação.

**Figura 5.15 – Caso C6 simulado com a arquitetura IR tradicional.**

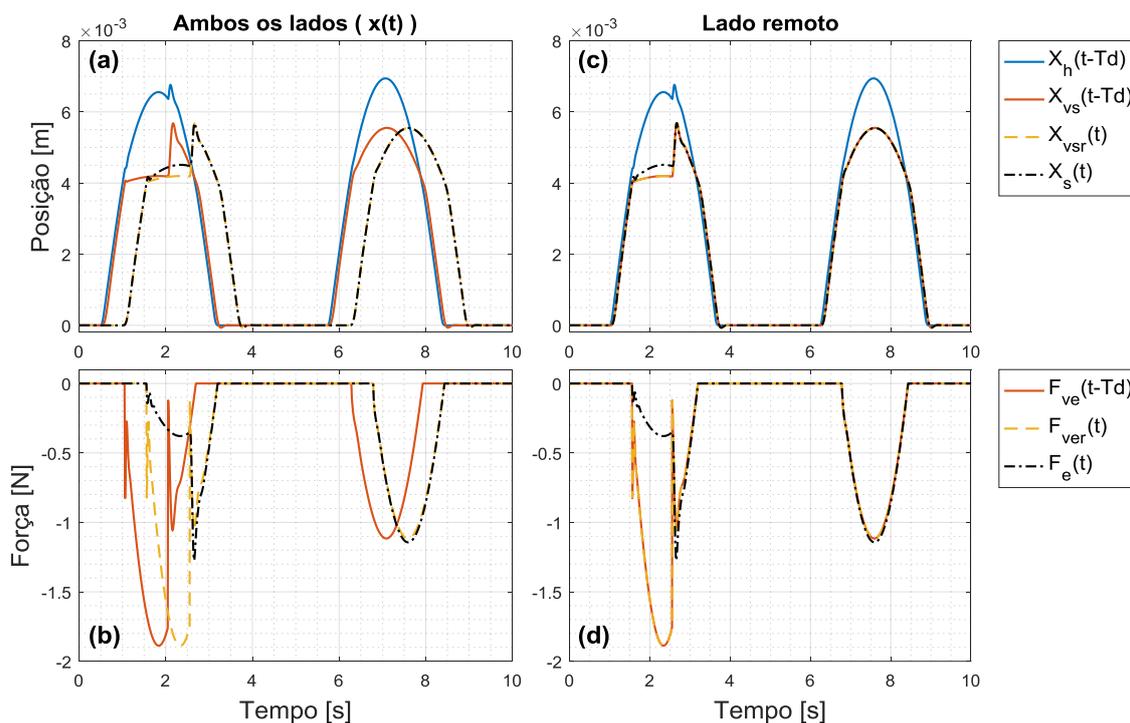


Fonte: Próprio autor.

Nos resultados da arquitetura proposta, pode-se notar que o escravo segue o mestre bem próximo quando acontece o movimento livre, mas não quando o mestre encontra-se após a posição do ambiente. Isto permite que o operador tenha a percepção que existe um ambiente naquela posição. Até a impedância ser recebida no lado local, o operador tem a percepção de um ambiente com

alta rigidez. Embora tal fato possa ser verdade (caso C6) ou não (casos C4 e C5), isto faz com que a força com que o escravo real pressiona o ambiente real seja igual ou menor que a sentida pelo operador, ou seja, permitindo que ele controle a força máxima exercida no ambiente e assim não o colocando em risco.

**Figura 5.16 – Caso C4 simulado com a arquitetura proposta.**



Fonte: Próprio autor.

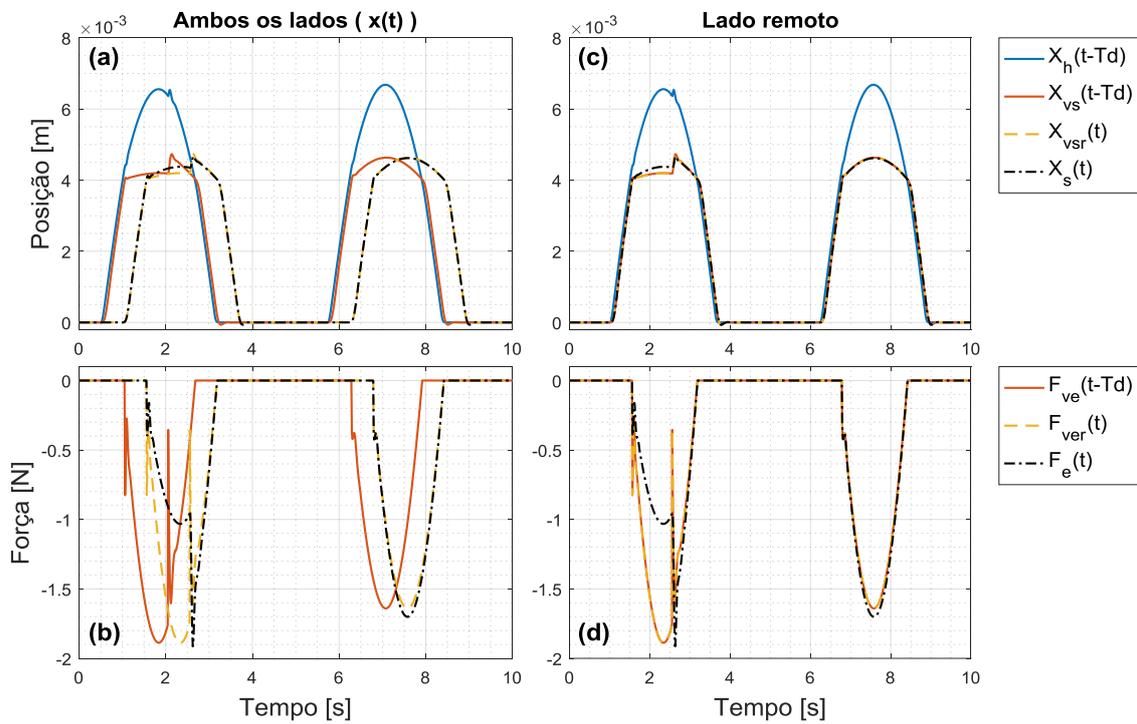
Com relação à oscilação da força, nota-se que a intensidade é muito menor que na arquitetura IR tradicional e não ultrapassa os valores já conhecidos pelo operador. Também é possível verificar que o escravo virtual não realizou nenhuma oscilação agressiva a ponto de, por algum momento, parar o contato com o ambiente virtual.

Com relação à posição dos escravos, pode-se perceber através do gráfico (c) que durante todo o tempo das simulações os mesmos se mantiveram em sincronia um com o outro. A exceção é apenas quando a impedância dos ambientes virtuais não é a estimada do ambiente real e, assim, a posição final

do escravo real é um balanço entre rastrear a posição do mestre e a posição do modelo dele.

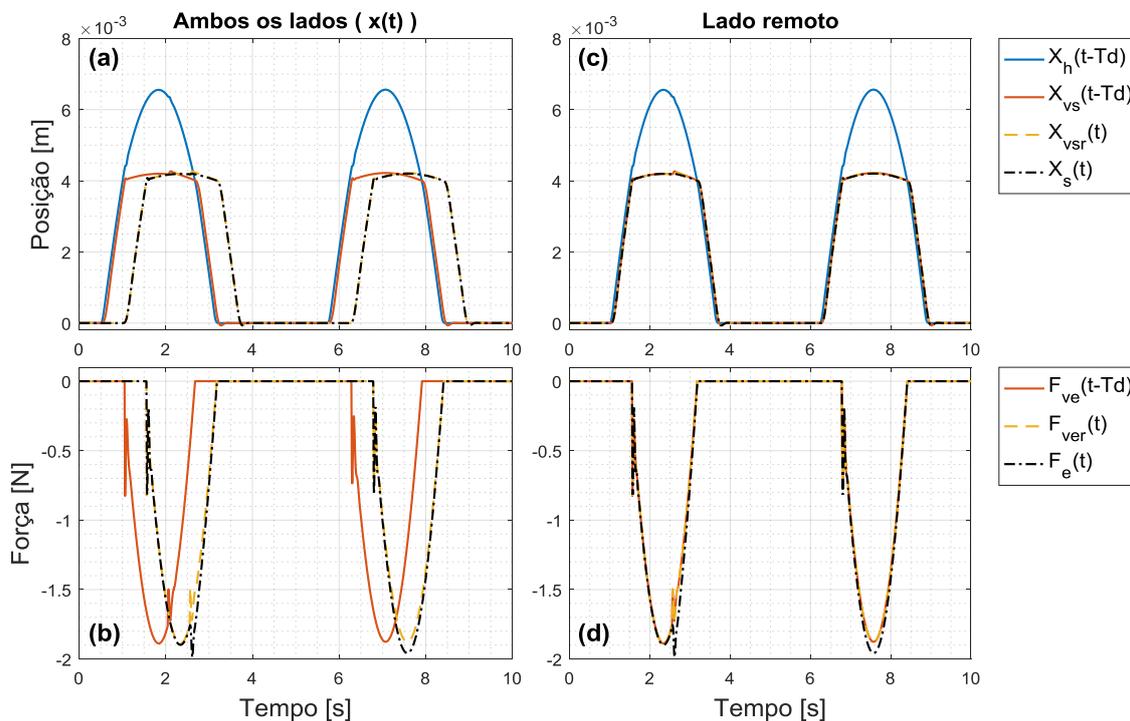
Desta forma, pode-se concluir que a arquitetura proposta aumenta a transparência do sistema de teleoperação com relação à arquitetura tradicional com o atraso de tempo de  $500\text{ ms}$  além de permitir uma operação estável, principalmente com ambientes com alta rigidez.

**Figura 5.17 – Caso C5 simulado com a arquitetura proposta.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 5.18 – Caso C6 simulado com a arquitetura proposta.**



Fonte: Próprio autor.

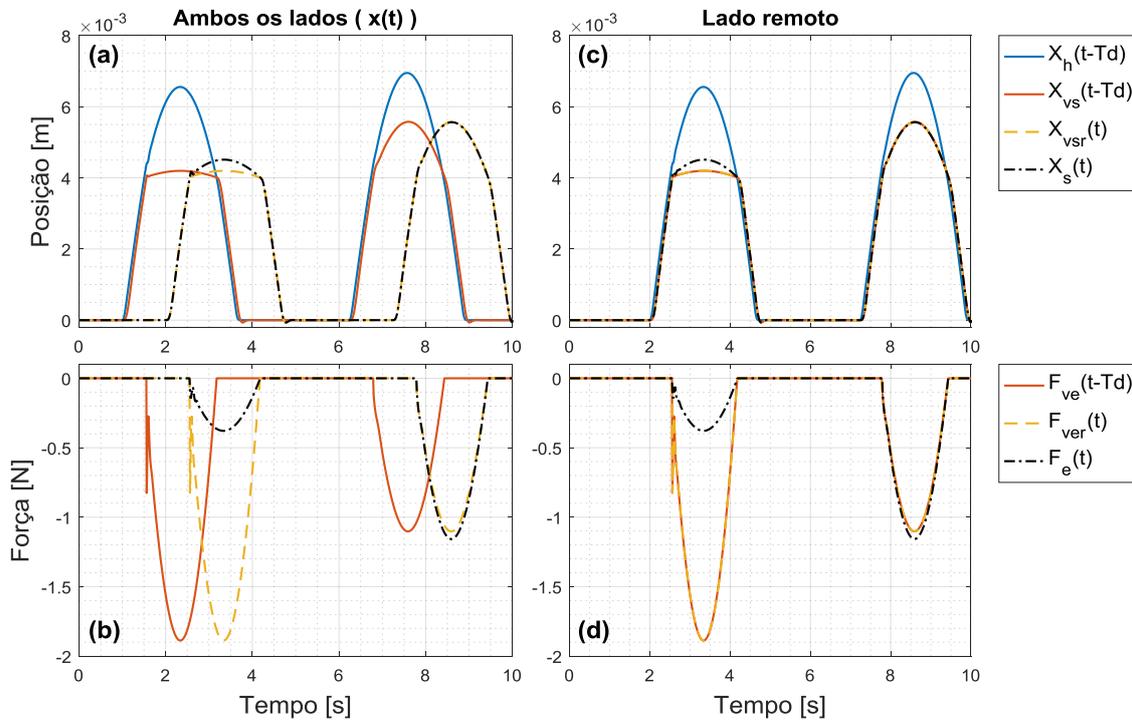
### 5.3.3. Casos com atraso de tempo de 1000 ms

Os casos apresentados nesta seção permitem verificar o desempenho da arquitetura proposta com atraso de tempo de 1000 ms, e que em conjunto com a trajetória do operador apresentada na Seção 5.1.2, a impedância do ambiente é recebida após o primeiro contato. Isto acontece devido ao período do contato ser menor que 2 s e a impedância ser recebida no lado local 2 s após o mestre passar pela posição do ambiente (4 mm). Os resultados dos casos C7, C8 e C9 utilizando a arquitetura proposta podem ser visualizados na Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21, respectivamente.

Embora durante o primeiro contato o operador sinta uma força que possa ser próxima (caso C9) ou não (casos C7 e C8) à força exercida pelo ambiente real, o mesmo tem a percepção que existe um ambiente naquela posição. Isto aumenta a transparência do sistema em relação à arquitetura tradicional, sendo que, em tal situação, o operador estaria tendo a sensação de movimento livre

e, no entanto, no lado remoto um contato entre o escravo e o ambiente iria acontecer.

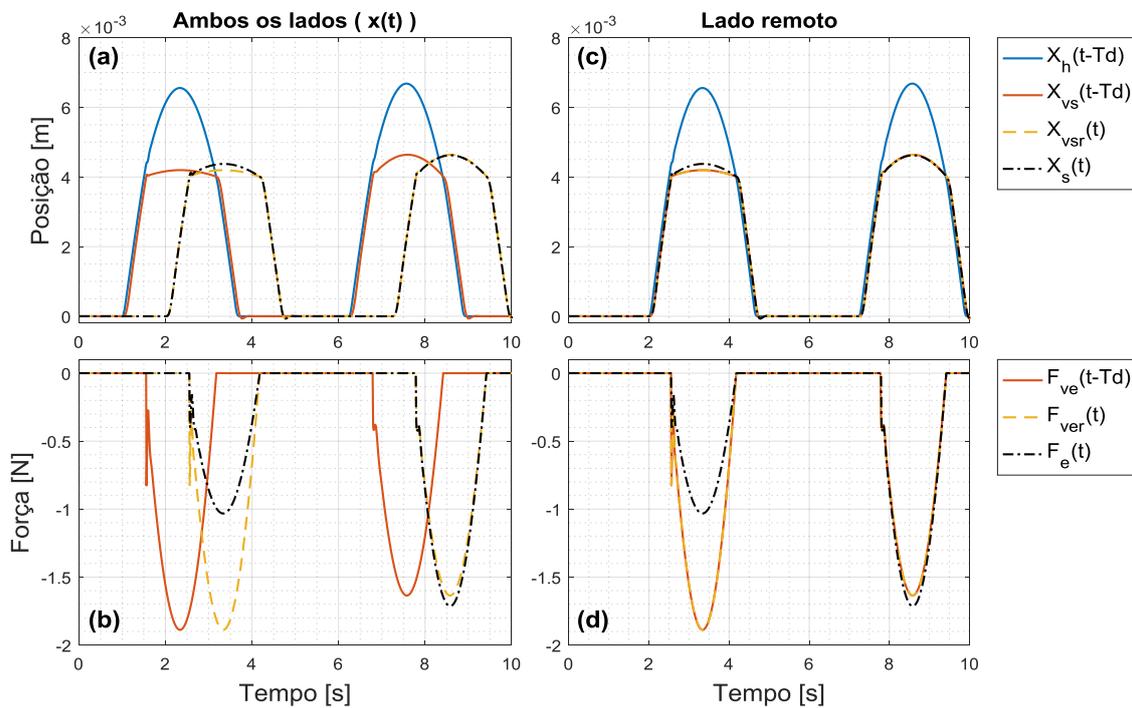
**Figura 5.19 – Caso C7 simulado com a arquitetura proposta.**



Fonte: Próprio autor.

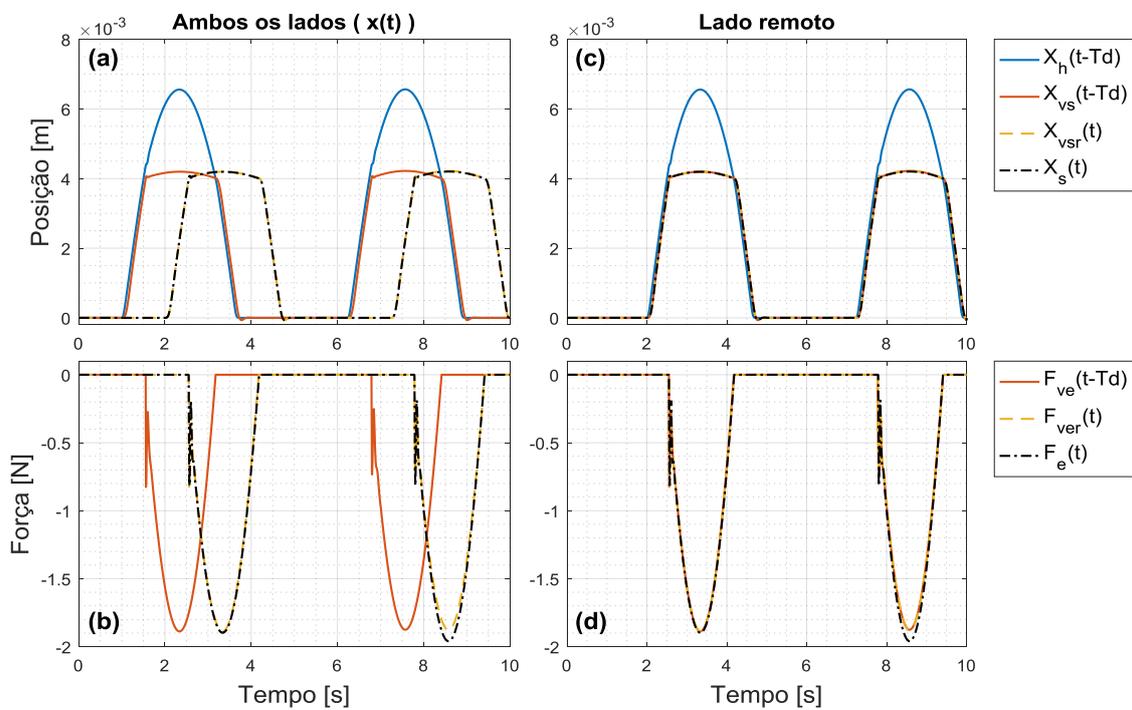
Após o recebimento da impedância do ambiente no lado local, verifica-se que a arquitetura também funcionou conforme o esperado uma vez que: os escravos ficaram em sincronia (executaram o mesmo trajeto) e a força recebida pelo operador ( $F_{ve}$ ) é bem próxima da força exercida pelo ambiente real ( $F_e$ ).

Figura 5.20 – Caso C8 simulado com a arquitetura proposta.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.21 – Caso C9 simulado com a arquitetura proposta.



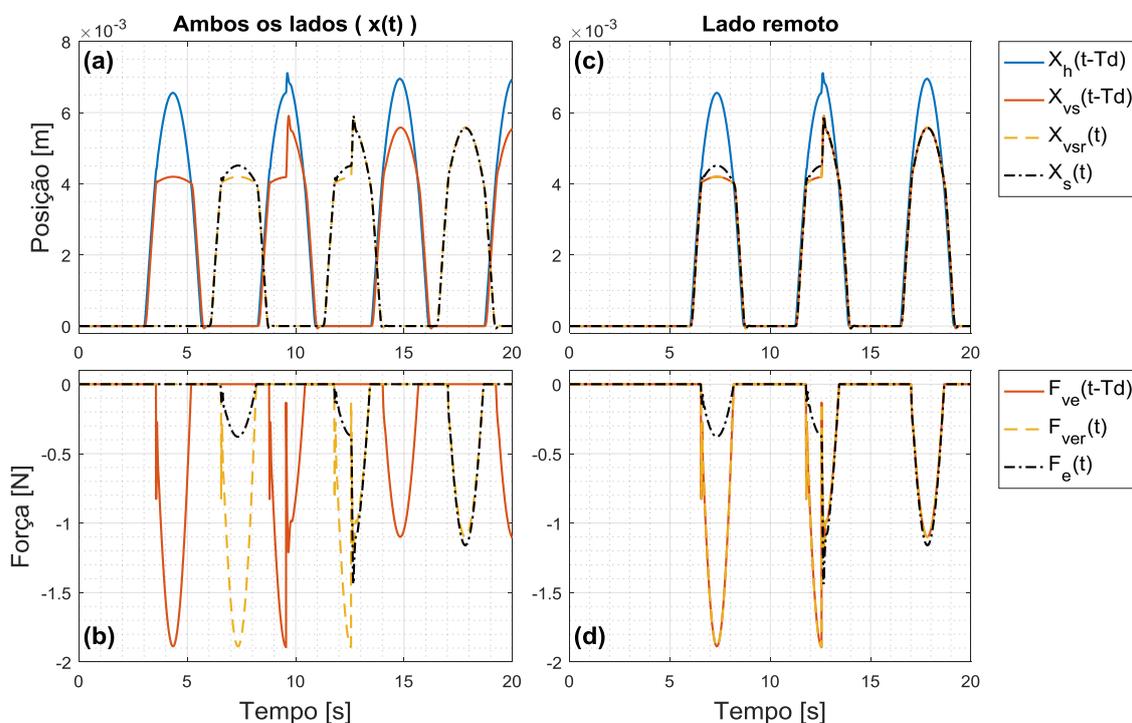
Fonte: Próprio autor.

### 5.3.4. Casos com atraso de tempo de 3000 ms

Os resultados dos casos C10, C11 e C12 podem ser visualizados na Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24, respectivamente. Devido ao grande atraso de tempo inserido no sistema, tais casos foram simulados para um período de 20 s.

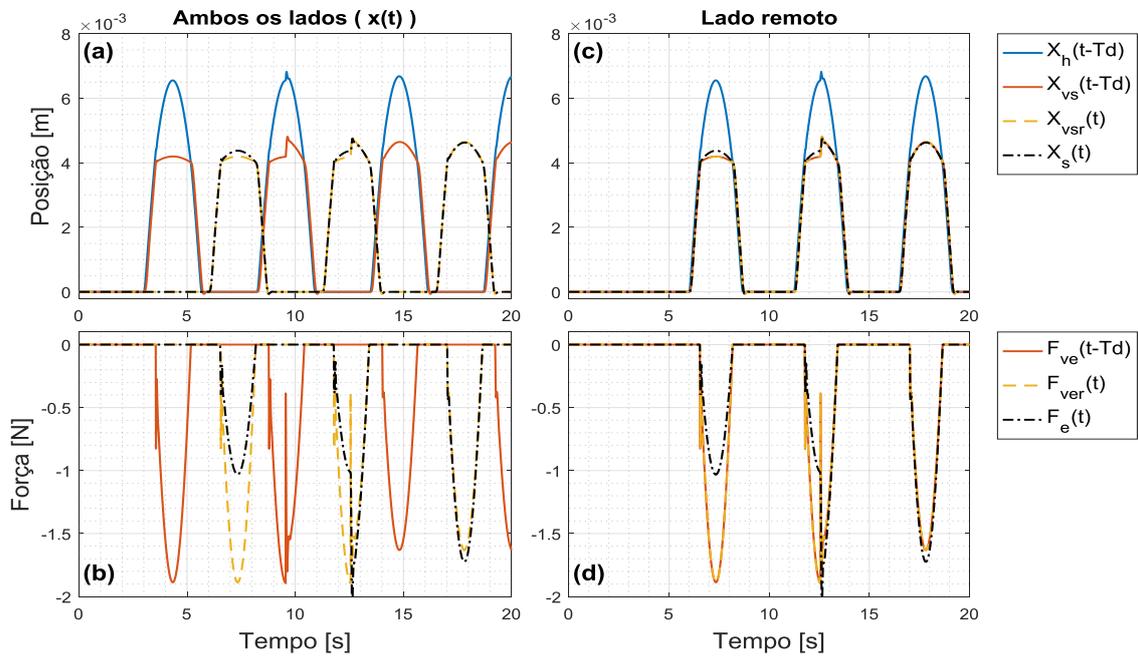
Através dos resultados pode-se verificar que tais casos apresentam comportamentos semelhantes aos casos com atraso de 500 ms e 1000 ms, em que, no primeiro contato, ainda não se conhece a impedância do ambiente; e a mesma somente é recebida enquanto acontece o (segundo) contato. De modo semelhante aos casos anteriores, após a identificação e convergência da impedância do ambiente, as forças percebidas pelo operador são bem próximas da exercida pelo ambiente real. Desta forma, pode-se dizer que a arquitetura proposta funciona com magnitudes de atrasos de tempo similares aos encontrados em aplicações espaciais.

Figura 5.22 – Caso C10 simulado com a arquitetura proposta.



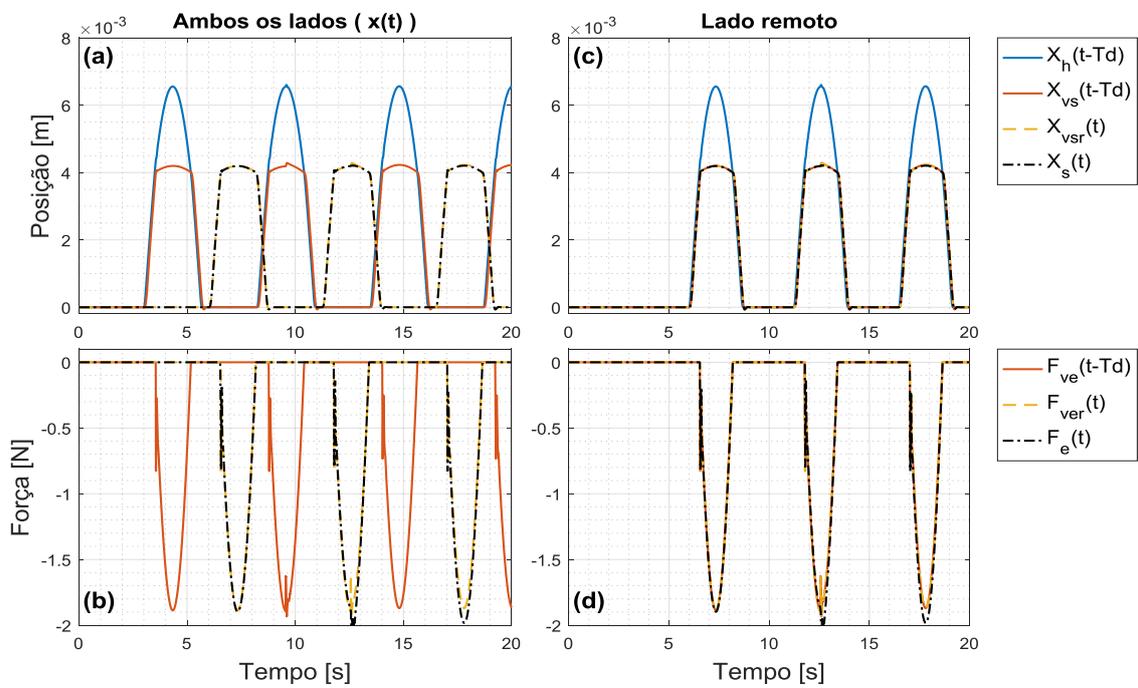
Fonte: Próprio autor.

**Figura 5.23 – Caso C11 simulado com a arquitetura proposta.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 5.24 – Caso C12 simulado com a arquitetura proposta.**



Fonte: Próprio autor.

### **5.3.5. Considerações finais**

Diante dos resultados expostos nas subseções anteriores, pode-se verificar que arquitetura proposta funciona conforme o esperado e dentro das características apresentadas no Capítulo 4. Vale ressaltar que mesmo variando a rigidez do ambiente (de macio até duro), o desempenho do sistema não se degradou como acontece nas arquiteturas bilaterais tradicionais com atraso de tempo.

Comparando os resultados obtidos neste capítulo com os resultados de experimentos reais apresentado na Seção 2.6 da referência bibliográfica (MOBASSER; HASHTRUDI-ZAAD, 2007) que considera o atraso de tempo de 200 *ms*, pode-se dizer que a arquitetura proposta apresenta melhores resultados uma vez que permite trabalhar com atrasos de tempo muito maiores mantendo uma transparência e estabilidade adequada para o funcionamento de um sistema de teleoperação bilateral.

## 6 EXPERIMENTOS REAIS E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Esta seção apresenta os experimentos reais realizados e seus resultados para uma validação complementar da solução proposta no Capítulo 4 e analisada por simulações no Capítulo 5. Os experimentos foram realizados no laboratório de robótica do departamento de engenharia elétrica e computação na universidade canadense *Queen's University*.

### 6.1. Robôs e equipamentos utilizados

Os experimentos foram realizados com um grau de liberdade utilizando dois robôs reais como mestre e escravo que são apresentados em detalhes nos Apêndices A e B, respectivamente. Cada robô estava instalado em um computador separado como pode ser visualizado na Figura 6.1.

**Figura 6.1 - Foto do ambiente de experimentação utilizado.**



Fonte: Próprio autor.

A programação da arquitetura é realizada no software MATLAB<sup>®</sup> utilizando a ferramenta Simulink<sup>®</sup> em conjunto com o software de tempo real QUARC<sup>®</sup> do

fabricante Quanser. O laço (*loop*) do algoritmo bem como a taxa de amostragem dos sinais dos robôs são configurados para 1 *kHz*.

### **6.1.1. Comunicação bilateral e atraso de tempo**

A comunicação entre os computadores foi realizada através da rede Ethernet em que os computadores estão conectados. Optou-se pelo uso do protocolo de comunicação UDP uma vez que no caso de perda de pacotes, o receptor não faz requisição do reenvio do pacote perdido e assim evita o aumento do atraso de tempo real na comunicação (OBOE, 2001).

A mensuração do atraso de tempo real na comunicação é realizada enviando o valor do relógio do computador mestre para o computador escravo e retornando para o computador mestre. O valor recebido no mestre é então subtraído do valor atual e assim o dobro do atraso de tempo resultante é obtido. Foi detectado um atraso de tempo máximo de 15 *ms* quando os dois robôs estão ativos e, se por algum motivo este valor é ultrapassado durante o experimento, o mesmo é abortado. Considerando que é necessário validar a arquitetura com diferentes atrasos de tempo na comunicação, blocos discretos de atrasos de tempo são utilizados para aumentar a magnitude do atraso para a desejada. Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho, apenas atrasos de tempo constantes são considerados.

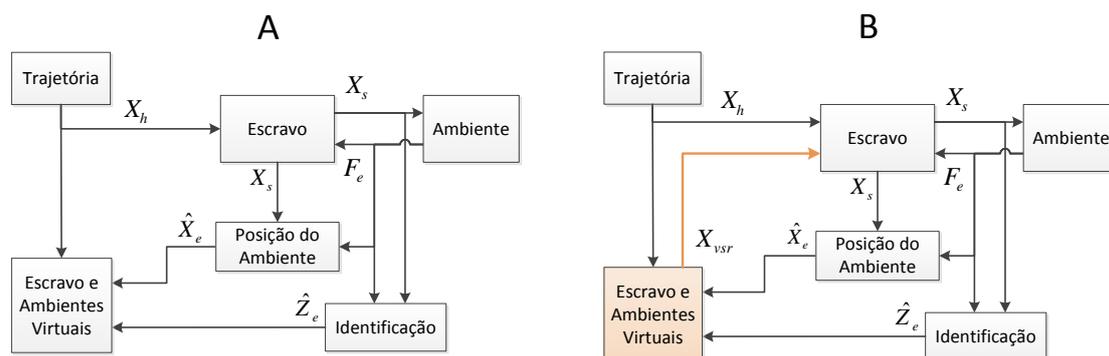
### **6.2. Experimento 1: Interação automática do robô escravo**

Neste tipo de experimento objetiva-se verificar o desempenho da sincronização entre os escravos da arquitetura proposta, principalmente devido ao modelo escravo utilizado não abranger totalmente suas não linearidades conforme explicado no Apêndice B. Visando comparar com a arquitetura impedância reflexiva (IR) tradicional e obter repetitividade do movimento do robô escravo sem a interferência de um ser humano, o robô escravo é comandado para penetrar o ambiente através de dois cenários: (A) utilizando parte da arquitetura IR tradicional e (B) utilizando parte da arquitetura proposta no

Capítulo 4. O diagrama de blocos para os dois cenários é mostrado na Figura 6.2 e a trajetória padrão a ser seguida pelos escravos (sinal  $X_h$  na saída do bloco “Trajetória”) é

$$V_h = 1 \times 10^{-3} (|32 \text{sen}(0,2\pi t)| + 4 \text{sen}(2,6\pi t) + 3 \text{sen}(3,4\pi t + 2\pi)). \quad (6.1)$$

Figura 6.2 – Diagrama dos cenários utilizando parte da arquitetura de impedância reflexiva tradicional (A) e da arquitetura proposta (B).



Fonte: Próprio autor.

Através deste experimento também é possível verificar o desempenho do método de identificação para os ambientes disponíveis para serem utilizados nos experimentos, principalmente com relação à sua ativação que pode ser através da força (-f) recebida pelo robô (maior que um valor limite) ou pela posição (-p) do mesmo (extremidade após a última posição estimada do ambiente). Uma vez que os ambientes reais são lineares e não variantes no tempo, são considerados os métodos de mínimos quadrados recursivo (RLS) e por janela (BLS) e, portanto, existem quatro possibilidades que são mostradas na Tabela 6.1. Os ambientes utilizados e suas características podem ser visualizados na Tabela C.1, que, por conveniência, será mostrado parcialmente na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Métodos de identificação utilizados no Experimento 1.

Método	Ativação	Nome
LS por Janela	Força	BLS-f
LS por Janela	Posição	BLS-p
LS Recursivo	Força	RLS-f
LS Recursivo	Posição	RLS-p

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6.2 – Rigidez de cada ambiente utilizado.

Número do Ambiente	Rigidez [N/m]
1	370
2	740
3	1850
4	2750
5	Saturada em 10000

Fonte: Próprio autor.

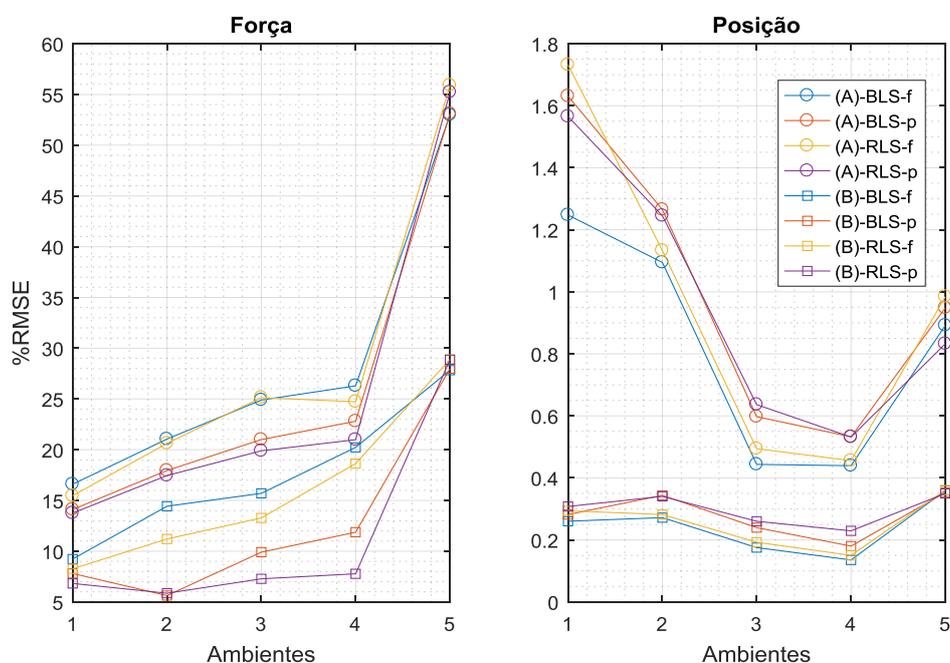
### 6.2.1. Resultados e análises

Os resultados são avaliados do ponto de vista da transparência, portanto as variáveis virtuais de força ( $F_{ve}$ ) e de posição ( $V_{vs}$ ) são comparadas com as respectivas reais ( $F_e$  e  $V_s$ ) através da métrica %RMSE mostrada na Equação (2.16). Os resultados de %RMSE são os valores médios baseados em cinco ensaios para cada ambiente e cada método; portanto 200 ensaios foram realizados. Os resultados para força e posição são apresentados na Figura 6.3.

Percebe-se que, tanto para força quanto para a posição, os resultados obtidos com a arquitetura proposta são melhores, independentemente do método de identificação utilizado. Também é possível visualizar que o método RLS-p apresenta os melhores resultados para a força, com exceção no ambiente n° 2 no cenário B. Por exemplo, utilizando o método RLS-p, a arquitetura proposta apresenta um erro entre 6% e 8%, ao passo que utilizando arquitetura

convencional o erro está acima de 13 % e alcança até 21 %; com exceção do ambiente n°5 em que a impedância virtual foi limitada.

**Figura 6.3 – Resultados %RMSE de força e posição nos cenários (A) e (B).**



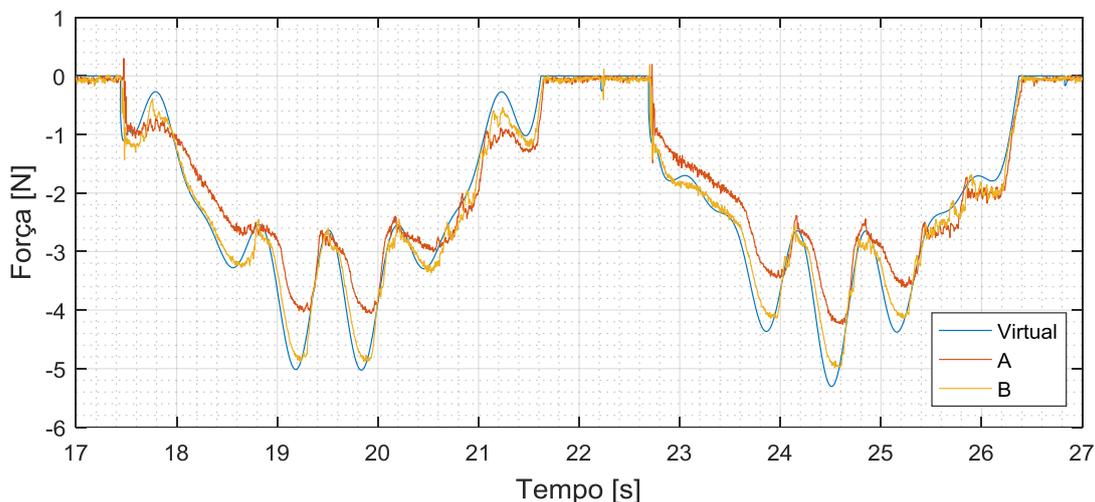
Fonte: Próprio autor.

Portanto, ao utilizar a arquitetura proposta, a força sentida pelo operador é mais fidedigna com a recebida pelo robô escravo real que, utilizando a arquitetura tradicional, aumentando assim a transparência do sistema. Isto também pode ser visto através da Figura 6.4, que mostra as forças reais ( $F_e$ ) de cada cenário e a virtual ( $F_{ve}$ ) sentida pelo operador, durante um ensaio com o ambiente n° 4. Nota-se que a força real do cenário B está mais próxima da força virtual que a força real proveniente do cenário A (arquitetura tradicional).

Com relação à posição, pode-se ver que as diferenças absolutas entre os resultados de cada método são muito menores que na força, mas é clara a melhora ao utilizar a arquitetura proposta (erro menor que 0,4 % para todos os ambientes). Isto significa que o robô escravo virtual está mais sincronizado com

o robô escravo real que na arquitetura tradicional, o que é de se esperar, uma vez que o robô real está rastreando também a posição do robô virtual.

**Figura 6.4 – Força medida ( $F_E$ ) nos cenários A e B, e a virtual ( $F_{VE}$ ).**



Fonte: Próprio autor.

### 6.3. Experimento 2: Sistema de teleoperação completo.

Neste tipo de experimento objetiva-se verificar o desempenho da arquitetura completa proposta, em que a trajetória do robô escravo é definida pelo operador através do robô mestre e o operador percebe a força de contato entre o robô escravo e o ambiente virtual.

A tarefa designada para o operador foi: manusear o robô mestre até entrar em contato com ambiente; e, enquanto estiver em contato, tentar realizar algumas oscilações no movimento. Após algum tempo de contato, o operador deveria recuar o robô para desfazer o contato e depois repetir o contato. Antes de iniciar o movimento o operador deveria aguardar pelo menos o atraso de tempo, de modo que a posição estimada do ambiente real pudesse chegar ao lado local. Embora, durante os experimentos, o robô escravo estivesse no campo de visão do operador devido ao ambiente disponível para experimentação, o mesmo somente poderia olhar para a tela do computador mestre, ou seja, ter conhecimento das seguintes variáveis: (a) posição do robô

mestre, (b) força de contato do robô escravo virtual local com o ambiente virtual local, e (c) posição absoluta do ambiente real com atraso. Com relação aos doze casos experimentados, suas características foram apresentadas na Tabela 3.1.

### **6.3.1. Resultados e análises comparativas com as simulações**

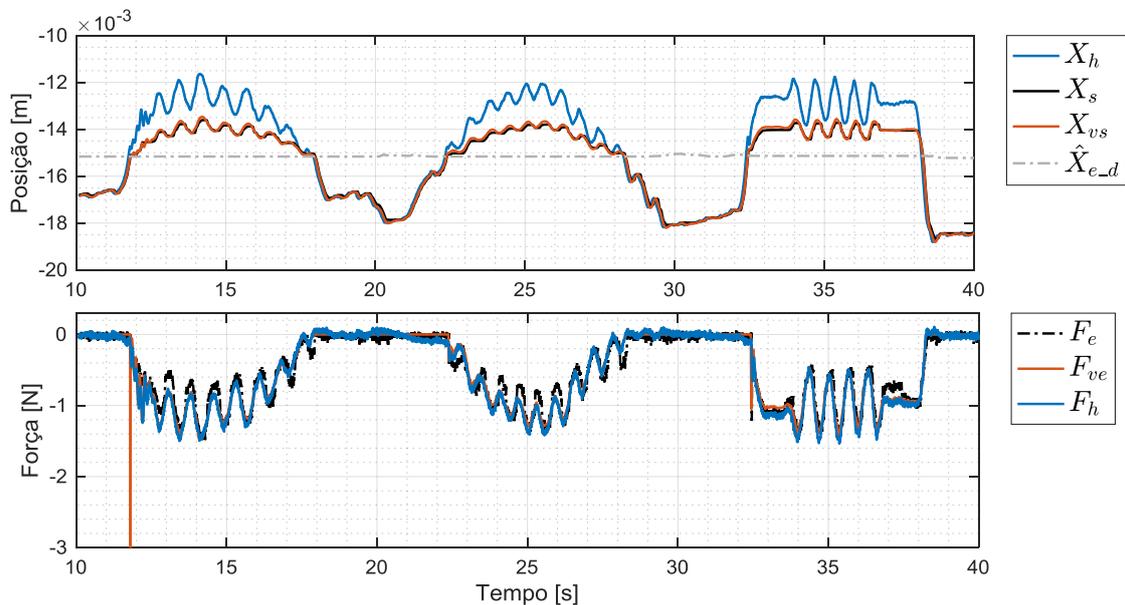
As figuras nas próximas seções com os resultados de cada caso possuem dois gráficos, nos quais: o gráfico superior mostra as posições do mestre/operador ( $X_h$ ), do escravo virtual local ( $X_{vs}$ ), do escravo real ( $X_s$ ) e a posição estimada do ambiente recebida no lado local ( $\hat{X}_{e_d}$ ); e o gráfico inferior mostram as forças do ambiente virtual local ( $F_{ve}$ ), a força do ambiente real ( $F_e$ ) e a força de fato sentida pelo operador ( $F_h$ ) proveniente do sensor de força instalado no robô mestre.

#### **6.3.1.1. Casos com atraso de tempo desprezível**

Os resultados experimentais dos casos C1 (ambiente macio), C2 (ambiente médio) e C3 (ambiente duro) podem ser visualizados na Figura 6.5, Figura 6.6 e Figura 6.7, respectivamente.

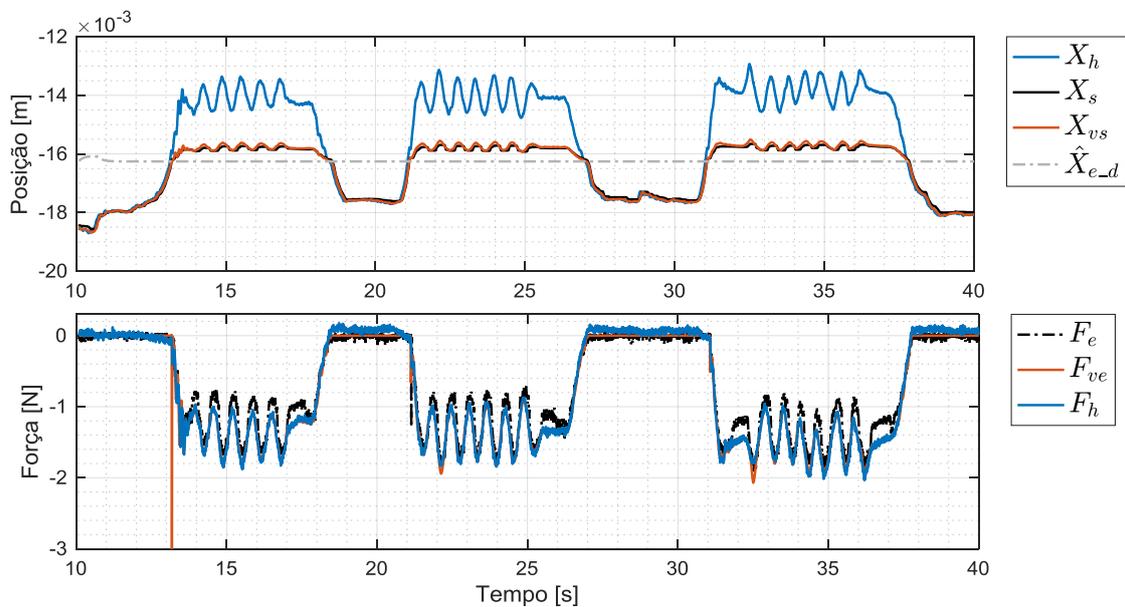
Pode-se observar que a arquitetura apresentou resultados bons dentro do esperado e semelhante às simulações apresentadas na Seção 6.3.1.1, uma vez que: o escravo real rastreou o comando do operador adequadamente; a força percebida pelo operador está muito próxima da força exercida pelo ambiente real e medida pelo escravo real; e, desde o primeiro contato, não houve degradação da transparência ou instabilidade.

Figura 6.5 – Experimento do caso C1.



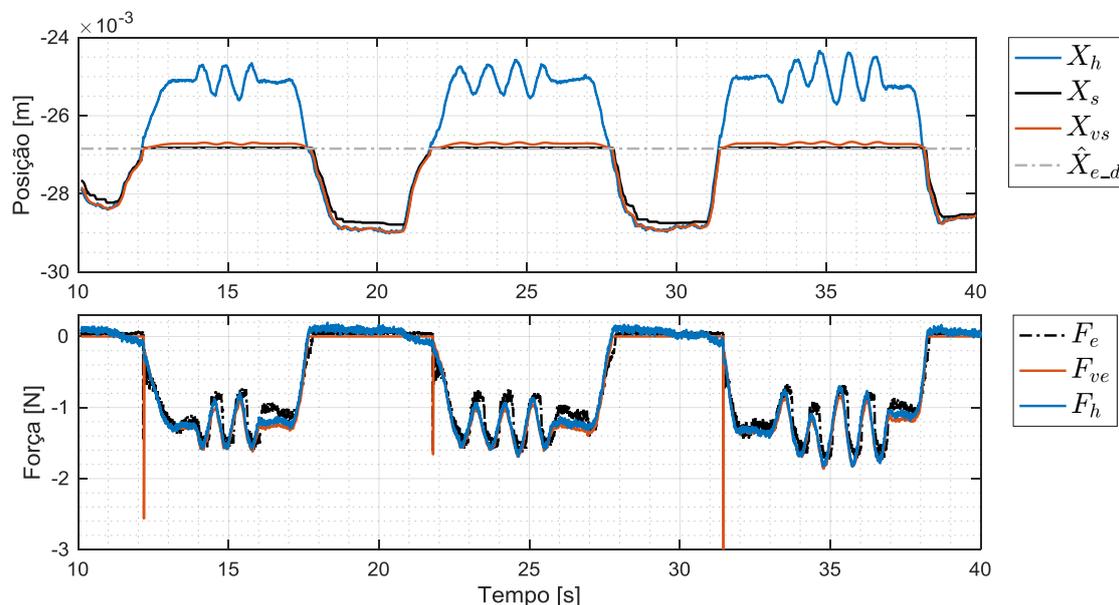
Fonte: Próprio autor.

Figura 6.6 – Experimento do caso C2.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 6.7 – Experimento do caso C3.**



Fonte: Próprio autor.

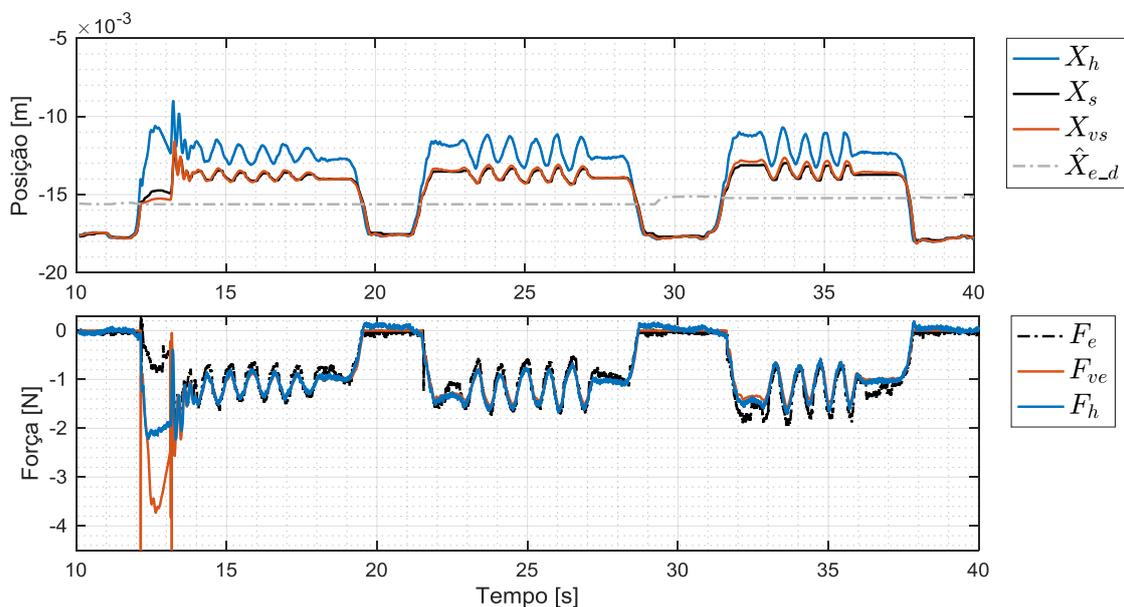
### 6.3.1.2. Casos com atraso de tempo de 500 ms

Os resultados experimentais dos casos C4, C5 e C6 podem ser visualizados na Figura 6.8, Figura 6.9 e Figura 6.10, respectivamente. Para os três casos pode-se observar que a arquitetura proposta apresentou resultados bons dentro do esperado e de acordo com o seu funcionamento descrito no Capítulo 4. Não é detectada nenhuma característica de funcionamento da arquitetura diferente dos resultados das simulações, ou seja, as mesmas já discutidas no Capítulo 5.

Particularmente no caso C4 experimental (Figura 6.8), a impedância é recebida no lado local ainda durante o primeiro contato, igualmente ao caso simulado C4 (Figura 5.13 e Figura 5.16). Conforme já mencionado na análise de tal resultado simulado, observa-se também no experimental que até a impedância ser recebida no lado local, o operador tem a percepção de um ambiente com alta rigidez. Embora tal fato possa ser verdade (caso C6) ou não (casos C4 e

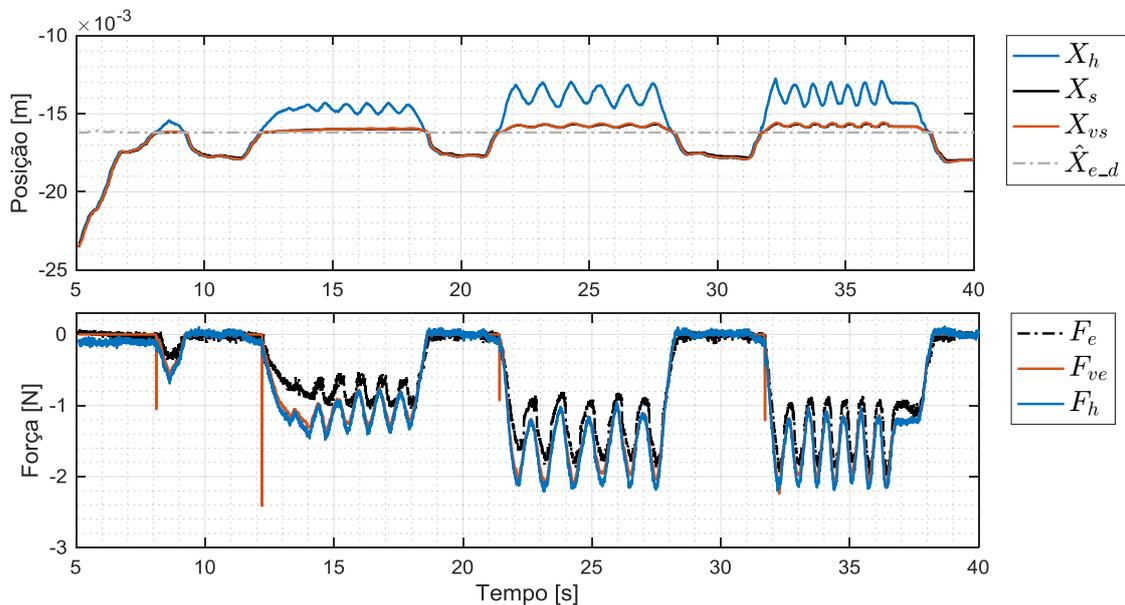
C5), isto faz que a força com que o escravo real pressiona o ambiente real seja igual ou menor que a sentida pelo operador, ou seja, permitindo que ele controle a força máxima exercida no ambiente e assim não o coloca em risco. Após a mudança de impedância, percebe-se uma pequena oscilação amortecida de pequena duração, isto é o período que o operador leva para adaptar-se à nova impedância. Após esse período de transição, pode-se notar que todo o movimento acontece conforme o esperado, ou seja, muito semelhante ao resultado sem atraso de tempo. Este evento não ocorreu nos casos C5 (Figura 6.9) e C6 (Figura 6.10) experimentais uma vez que o período do primeiro contato não foi longo o suficiente; no entanto, pode-se dizer que o comportamento seria semelhante e de menor intensidade, uma vez que a diferença entre as impedâncias reais e a saturada é menor que no caso C4.

**Figura 6.8 – Experimento do caso C4.**



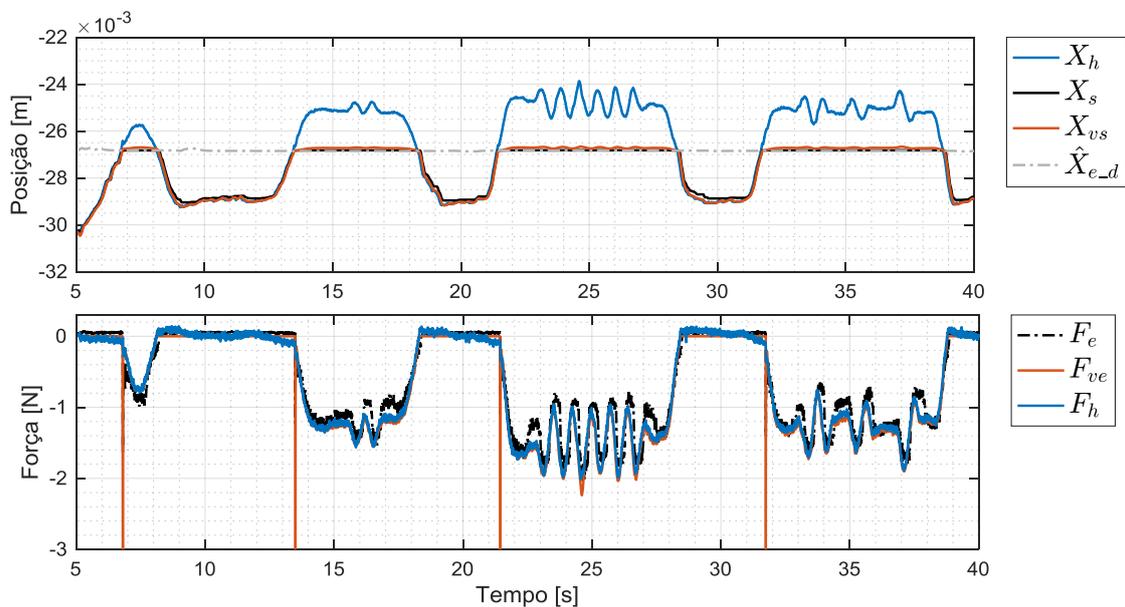
Fonte: Próprio autor.

**Figura 6.9 – Experimento do caso C5.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 6.10 – Experimento do caso C6.**

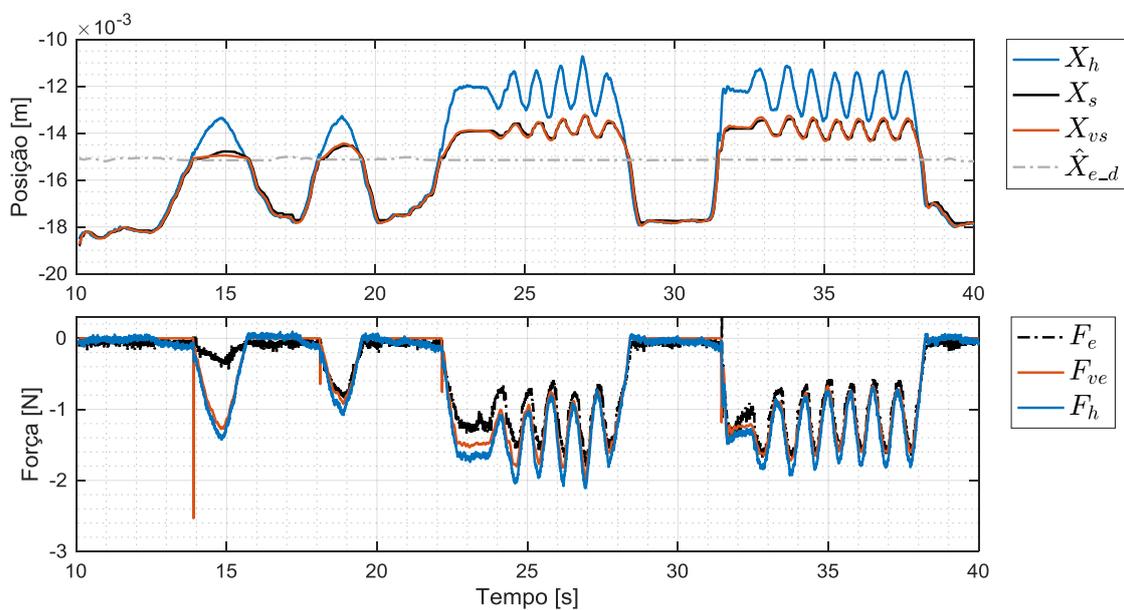


Fonte: Próprio autor.

### 6.3.1.3. Casos com atraso de tempo de 1000 ms

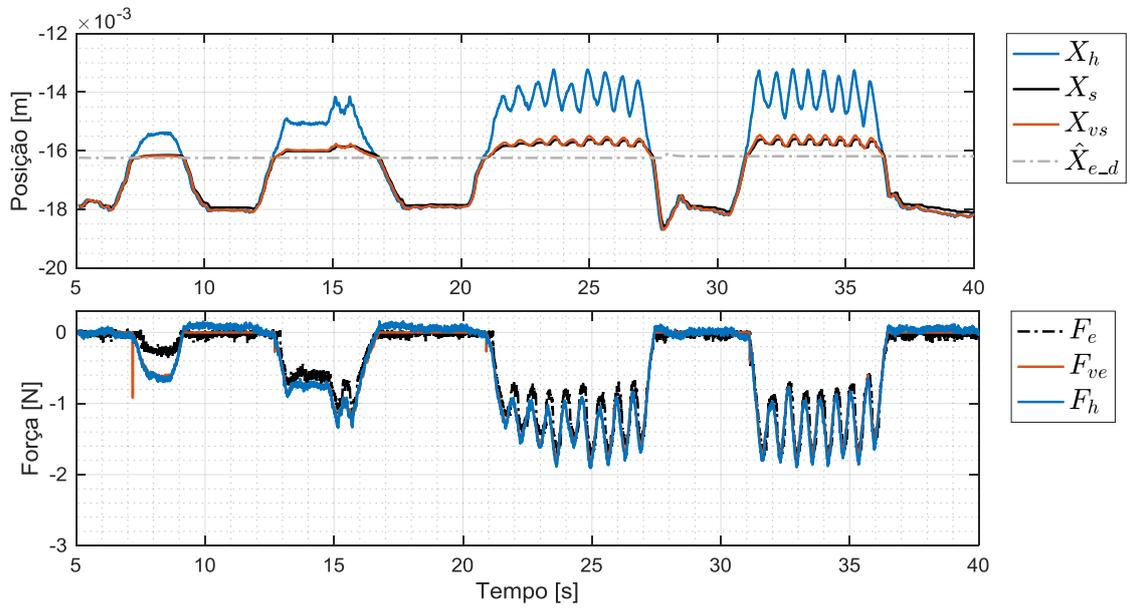
Os resultados experimentais dos casos C7, C8 e C9 podem ser visualizados na Figura 6.11, Figura 6.12 e Figura 6.13, respectivamente. Similarmente aos resultados simulados, nos três casos a impedância foi recebida no lado local após ser realizado o primeiro contato. Desta forma, durante o primeiro contato, o operador percebe um ambiente duro (impedância de saturação); no entanto, já no segundo contato a força percebida por ele é bem próxima da exercida pelo ambiente real, ou seja, garantindo uma boa transparência. Pode-se notar que as forças estão mais próximas no final do segundo contato do que no início do mesmo; isto certamente se deve a convergência da identificação do ambiente real. De fato, no terceiro contato, as forças estão próximas durante todo o período de contato.

Figura 6.11 – Experimento do caso C7.



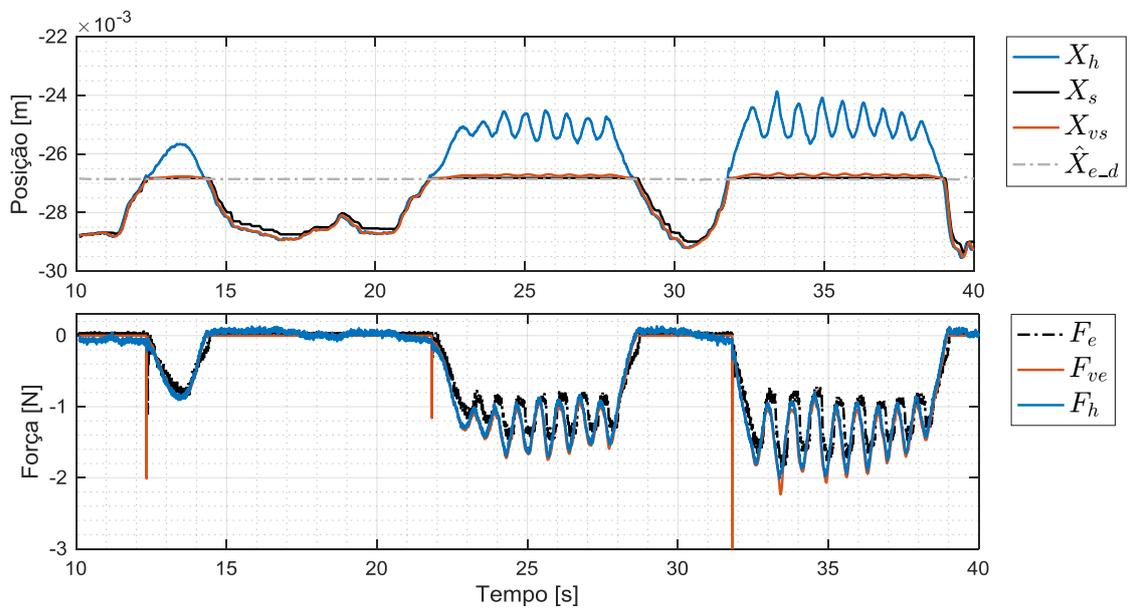
Fonte: Próprio autor.

Figura 6.12 – Experimento do caso C8.



Fonte: Próprio autor.

Figura 6.13 – Experimento do caso C9.



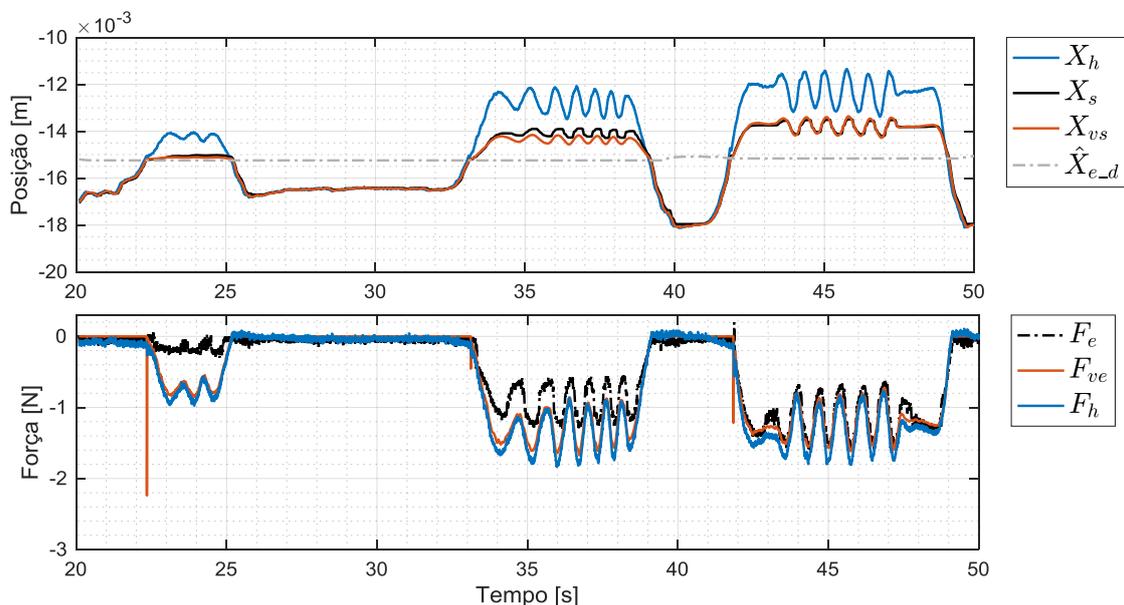
Fonte: Próprio autor.

#### 6.3.1.4. Casos com atraso de tempo de 3000 ms

Os resultados experimentais dos casos C10, C11 e C12 podem ser visualizados na Figura 6.14, Figura 6.15 e Figura 6.16, respectivamente. Através dos resultados pode-se verificar que eles apresentam comportamentos semelhantes aos casos com atraso de 500 ms e 1000 ms, em que, no primeiro contato, ainda não se conhece a impedância do ambiente, com exceção do caso C12 em que o período de contato é de aproximadamente 9 s. Para todos os três casos, os resultados são semelhantes aos resultados de simulação.

No caso C10 (Figura 6.14), nota-se que o primeiro contato não permitiu que a impedância pudesse ser completamente estimada, uma vez que, no segundo contato, a força percebida pelo operador é um pouco maior que a proveniente do ambiente real; no entanto, no terceiro contato, tais forças já estão bem próximas uma da outra.

Figura 6.14 – Experimento do caso C10.

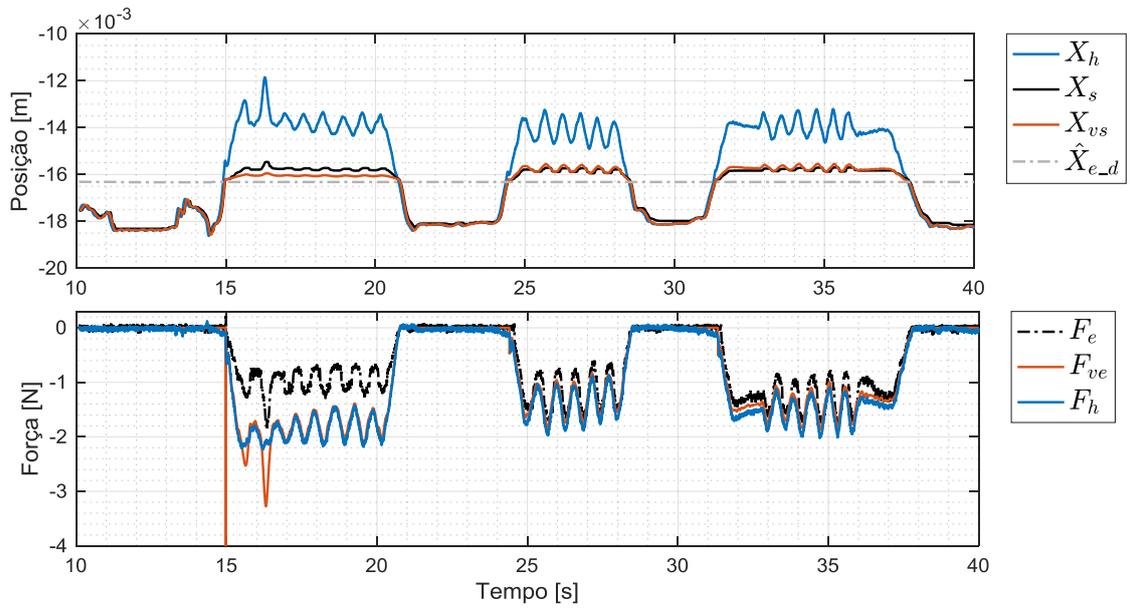


Fonte: Próprio autor.

No caso C11 (Figura 6.15), nota-se que existe um vale acentuado próximo do instante de 16 s na força virtual ( $F_{ve}$ ) devido à maior penetração do operador,

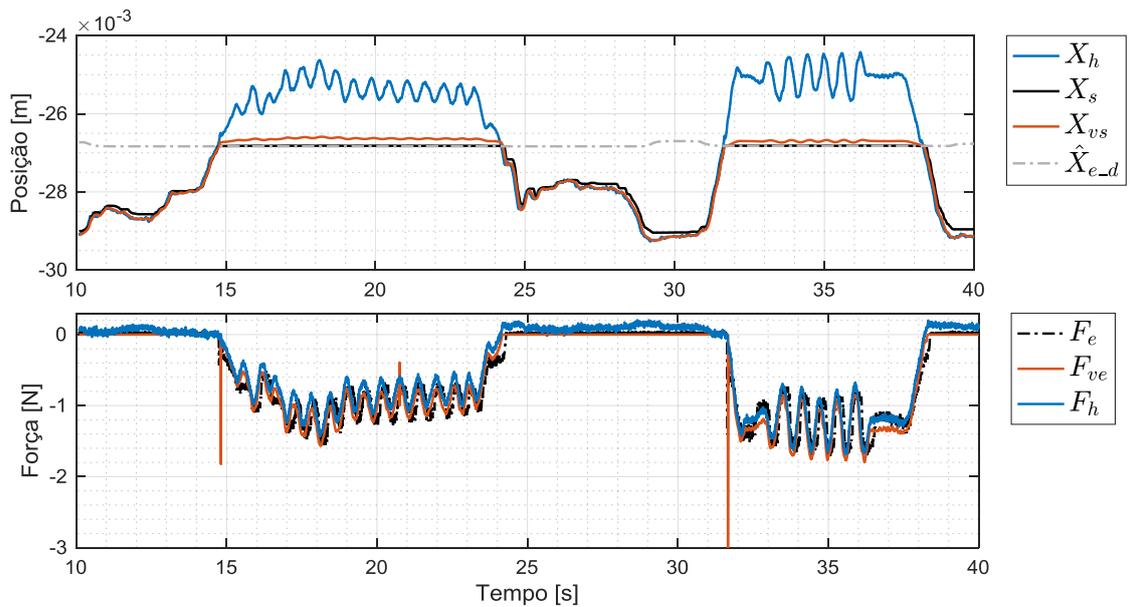
no entanto, isto não é notado na força percebida pelo operador ( $F_h$ ). Esta diferença deve-se ao fato que o robô mestre não consegue realizar uma força maior que  $\sim 2,3 \text{ N}$  conforme mostra a Tabela A.1 no Apêndice A.

**Figura 6.15 – Experimento do caso C11.**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 6.16 – Experimento do caso C12.**



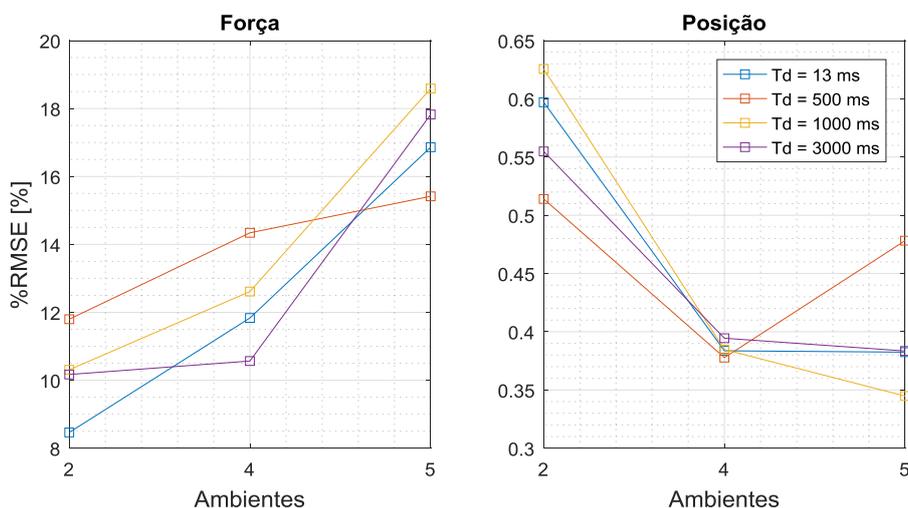
Fonte: Próprio autor.

### 6.3.1.5. Resultados gerais

Igualmente ao experimento anterior (tipo 1 (Seção 6.2)), nesta Seção, os resultados também são avaliados através da métrica %RMSE mostrada na Equação (2.16). Visando manter um padrão nos cálculos dos resultados e remover qualquer influência da convergência do método de estimação, o cálculo do %RMSE utiliza dados com período de dez segundos coletados após o terceiro contato.

Os resultados %RMSE para força ( $F_{ve}$  e  $F_e$ ) e posição ( $X_{vs}$  e  $X_s$ ) dos doze casos podem ser visualizados na Figura 6.17. Com relação ao erro de força, nota-se que o erro apresentado encontra-se dentro de uma faixa aceitável, uma vez que tal erro representa influências não somente referente à arquitetura, mas também aos erros de medição, estimação, modelagem e identificação. Também é possível perceber que, independentemente da magnitude do atraso de tempo presente no canal de comunicação, os resultados são similares e não possuem um padrão.

Figura 6.17 – Resultados %RMSE de força e posição dos doze casos.



Fonte: Próprio autor.

Na verdade o padrão encontra-se no tipo de ambiente utilizado, apresentando maiores erros para ambientes mais duros. Isto pode ser devido às forças de

contato que crescem rapidamente e ao erro na estimação da impedância, uma vez que a penetração é muito menor quando comparada à de um ambiente macio.

Com relação à posição, nota-se que os robôs escravo real e o virtual local apresentam um sincronismo muito bom, uma vez que o erro esteve menor que 0,65 % para todos os atrasos de tempo e ambientes. É possível também notar que os resultados são semelhantes aos obtidos no experimento do tipo 1 (Seção 6.2), ou seja, pode-se dizer que a arquitetura proposta proporciona um maior sincronismo entre os escravos. Percebe-se também que, em geral quanto maior foi a rigidez do ambiente, mais síncronos eles ficaram, o que pode ser atribuído à menor movimentação dos robôs ao estar em contato com o ambiente duro.

#### **6.4. Considerações finais**

Diante dos resultados expostos nas subseções anteriores, pode-se verificar que arquitetura proposta funciona conforme o esperado e dentro das características apresentadas no Capítulo 4. Vale ressaltar que mesmo variando a rigidez do ambiente (de macio até duro), o desempenho do sistema não se degradou, como acontece nas arquiteturas bilaterais tradicionais com atraso de tempo.

Comparando os resultados obtidos neste capítulo com os resultados das simulações apresentadas no Capítulo 5, pode-se verificar que os resultados são semelhantes uns com o outros. Desta forma, é possível afirmar que a simulação apresentada é válida, e os modelos e parâmetros utilizados representam os dispositivos reais.



## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo propor uma arquitetura de comando e controle para telerrobôs atracados aos seus alvos sob atrasos de tempo significativos, considerando o contexto de missões espaciais que buscam a utilização de robôs manipuladores no reabastecimento ou manutenção de satélites artificiais inoperantes. O desenvolvimento de tal arquitetura foi motivado pelas deficiências das arquiteturas tradicionais encontradas na literatura, e por se almejar uma solução que possa maximizar a sensação de manipulação e minimizar os efeitos negativos da distância entre a estação de comando e o robô remoto.

A arquitetura de teleoperação bilateral proposta foi apresentada no Capítulo 4 através de teoria e análise conceitual, e seus principais elementos foram analisados pela abordagem de modelagem e simulação no Capítulo 5. Através de tal abordagem, foi possível validar a arquitetura com diferentes atrasos de tempo, apresentando resultados coerentes com o projeto; e melhores em relação ao estado da arte disponível na literatura. Além disso, foi possível conhecer melhor cada elemento bem como o funcionamento de arquiteturas de teleoperação servindo de grande base à etapa de experimentação.

A solução proposta também foi analisada pela abordagem da experimentação no Capítulo 6, na qual todos os elementos da arquitetura eram reais colocando à prova o funcionamento da arquitetura. Corroborando os resultados das simulações, foi possível validar o funcionamento da arquitetura para diversos casos representativos e compatíveis com o contexto de aplicação. Além disto, esta abordagem permitiu validar indiretamente as simulações e os modelos adotados, o que certamente poderá servir de base para próximos estudos na área uma vez que tal nível de detalhamento não foi encontrado na literatura pesquisada e quando a realização de experimentos não for possível.

Frente ao exposto ao longo deste documento e neste capítulo, considera-se que o principal objetivo do presente trabalho foi alcançado. Além disso, este

trabalho foi de grande valia uma vez que proporcionou aplicar e ampliar os conhecimentos adquiridos durante o primeiro ano do programa de mestrado, principalmente no que tange à Modelagem, Identificação e Robótica.

### **7.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Visando verificar e melhorar o desempenho da arquitetura proposta em outros cenários, sugere-se que sejam realizados e/ou testados:

- Outras arquiteturas entre o robô mestre e o robô escravo virtual, como a de quatro canais, por exemplo;
- Ambientes com impedância e/ou atrasos de tempo variantes no tempo;
- Modelos de contato mais representativos;
- Estimação da posição do ambiente por algum método estocástico;
- Incluir ganho derivativo na malha de controle entre o robô escravo real e o virtual remoto;
- Utilizar o método de estimação BLS ao invés do método RLS mesmo com ambientes invariantes no tempo, uma vez que, se o primeiro contato não excitar muito o sistema, o tempo de convergência irá aumentar substancialmente;
- Transmitir e utilizar a impedância identificada após a detecção que houve convergência na identificação; e
- Modelar a arquitetura utilizando análogos elétricos e simular utilizando ambiente Spice ao invés de simulação por blocos (Simulink).

Com relação ao robô escravo utilizado, sugere-se que:

- O robô escravo seja identificado com a força de ondulação também dependente da corrente elétrica visando reduzir imperfeições do modelo.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, R. J.; SPONG, M. W. Bilateral control of teleoperators with time delay. **IEEE Transactions on Automatic Control**, p. 494-501, 1989.

ANORAD CORPORATION. **LE Series Linear Motor Systems, Motor Integration Manual LEA, LEB, LEC & LEM Linear Motors**. 2009. Anorad Corporation, [S.I.].

DIOLAITI, N.; MELCHIORRI, C.; STRAMIGIOLI, S. Contact impedance estimation for robotic systems. **IEEE Transactions on Robotics**, p. 925-935, 2005.

FITE, K. B.; GOLDFARB, M.; RUBIO, A. Transparent telemanipulation in the presence of time delay. In: IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE IN ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS, 2003, Kobe, Japan. **Proceedings...** IEEE/ASME, 2003. p. 254-259

GOODWIN, G. C.; SIN, K. S. **Adaptive filtering prediction and control**. [S.I.]: Courier Corporation, 2009.

HADDADI, A.; HASHTRUDI-ZAAD, K. Online contact impedance identification for robotic systems. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2008, Nice, France. **Proceedings...** IEEE, 2008 p. 974-980

HADDADI, A.; HASHTRUDI-ZAAD, K. Real-time identification of Hunt–Crossley dynamic models of contact environments. **IEEE Transactions on Robotics**, p. 555-566, 2012.

HANNAFORD, B. A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, p. 426-434, 1989.

HASHTRUDI-ZAAD, K.; SALCUDEAN, S. E. Analysis of control architectures for teleoperation systems with impedance/admittance master and slave manipulators. **The International Journal of Robotics Research**, p. 419-445, 2001.

HASHTRUDI-ZAAD, K.; SALCUDEAN, S. E. Transparency in time-delayed systems and the effect of local force feedback for transparent teleoperation. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, p. 108-114, 2002.

- HAYKIN, S. **Active network theory**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1970.
- HOKAYEM, P. F.; SPONG, M. W. Bilateral teleoperation: An historical survey. **Automatica**, p. 2035-2057, 2006.
- HUNT, K. H.; CROSSLEY, F. R. E. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact. **Journal of applied mechanics**, p. 440-445, 1975.
- HUNT, T. H. A comparative study of system identification techniques in the presence of parameter variation, noise, and data anomalies. In: IEEE MIDWEST SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS, 1996, Ames, IA, USA. **Proceedings...** IEEE, 1996. p. 593-596
- JIANG, J.; ZHANG, Y. A novel variable-length sliding window blockwise least-squares algorithm for on-line estimation of time-varying parameters. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, v. 18, p. 505-521, 2004.
- KAZEROONI, H.; TSAY, T.-I.; HOLLERBACH, K. A controller design framework for telerobotic systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, p. 50-62, 1993.
- KHADEMIAN, B. **3DOF Planar Pantograph - Report**. 2008. Queen's University, Kingston.
- LAWRENCE, D. Stability and transparency in bilateral teleoperation. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, p. 624-637, 1993.
- MARHEFKA, D. W.; ORIN, D. E. A compliant contact model with nonlinear damping for simulation of robotic systems. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans**, p. 566-572, 1999.
- MOBASSER, F.; HASHTRUDI-ZAAD, K. Predictive teleoperation using laser rangefinder. In: CANADIAN CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 2006, Ottawa, Ont., Canada. **Proceedings...** IEEE, 2006 p. 1279-1282
- MOBASSER, F.; HASHTRUDI-ZAAD, K. Stable impedance reflecting teleoperation with online collision prediction. In: IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 2007, San Diego, CA, USA. **Proceedings...** IEEE, 2007 p. 476-482

NELLES, O. **Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models.** [S.I.]: Springer Science & Business Media, 2001.

OBOE, R. Web-interfaced, force-reflecting teleoperation systems. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 48, p. 1257-1265, 2001.

PARK, D. J.; JUN, B. E. Selfperturbing recursive least squares algorithm with fast tracking capability. **Electronics Letters**, v. 28, p. 558-559, 1992.

PRIMATICS. PLG110 Series Linear Positioning Stages, 2011. Disponível em: <[http://primatics.com/datasheets/plg110\\_datasheet.pdf](http://primatics.com/datasheets/plg110_datasheet.pdf)>. Acesso em: 18 maio 2016.

QUANSER. 3-DOF PLANAR PANTOGRAPH, 2004. Disponível em: <<http://home.catv.ne.jp/dd/pid/images/3dofhap.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

ROHRIG, C.; JOCHHEIM, A. Identification and compensation of force ripple in linear permanent magnet motors. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 2001, Arlington, VA, USA. **Proceedings... IEEE**, 2001 p. 2161-2166

ROHRIG, C.; JOCHHEIM, A. Motion control of linear permanent magnet motors with force ripple compensation. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LINEAR DRIVES FOR INDUSTRY APPLICATIONS, 2001. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LINEAR DRIVES FOR INDUSTRY APPLICATIONS, 2001, Nagano, Japan. **Proceedings... IEE Japan**, 2001

SALCUDEAN, S. E.; ZHU, M.; ZHU, W. H.; HASHTRUDI-ZAAD, K. Transparent bilateral teleoperation under position and rate control. **The International Journal of Robotics Research**, n. 12, p. 1185-1202, 2000.

SHERIDAN, T. B. Telerobotics. **International Federation of Automatic Control**, p. 487-507, 1989.

SHERIDAN, T. B. Space teleoperation through time delay: review and prognosis. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, p. 592-606, 1993.

SHERIDAN, T. B. Teleoperation, telerobotics and telepresence: A progress report. **Control Engineering Practice**, p. 205-214, 1995.

SMITH, A.; MATINFAR, M. **Twin Pantograph Robotic Manipulator.** 2004. Queen's University, [S.I.].

SSCO-NASA. Robotic Refueling Mission-RRM. **Satellite Servicing Capabilities Office**, 2009. Disponível em: <[http://ssco.gsfc.nasa.gov/robotic\\_refueling\\_mission.html](http://ssco.gsfc.nasa.gov/robotic_refueling_mission.html)>. Acesso em: 23 out. 2015.

SSCO-NASA. Quick Facts - RRM. **Satellite Servicing Capabilities Office**, 2015. Disponível em: <<http://ssco.gsfc.nasa.gov/quickfacts.html#rrm>>. Acesso em: 7 nov. 2015.

VAN DEN BRAEMBUSSCHE, P.; SWEVERS, J.; VAN BRUSSEL, H.; VANHERCK, P. Accurate tracking control of linear synchronous motor machine tool axes. **Mechatronics (Elsevier)**, p. 507-521, 1996.

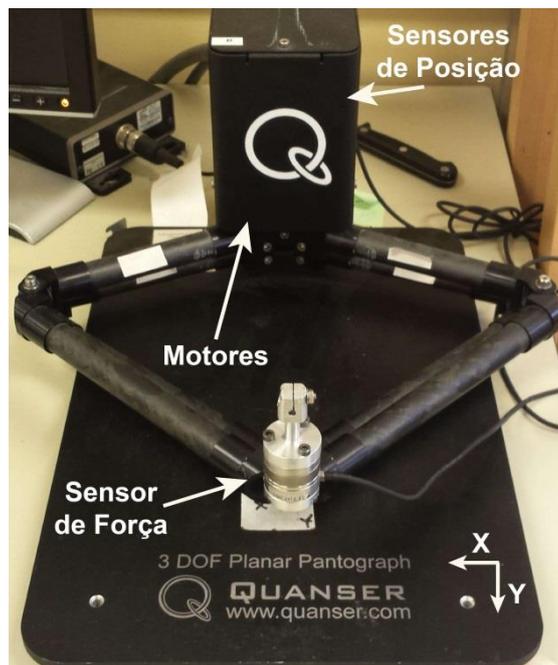
## APÊNDICE A - ROBÔ MESTRE

Esta seção apresenta os principais aspectos do robô utilizado como mestre nos experimentos reais realizados neste trabalho bem como o seu modelo utilizado e a identificação de seus parâmetros. Este equipamento pertence ao laboratório de robótica do departamento de engenharia elétrica e computação da universidade canadense *Queen's University*.

### A.1 Sobre o robô mestre

O robô utilizado é um duplo pantógrafo planar (denominado em inglês *3DOF Planar Pantograph System*) fabricado pela empresa Quanser. Este robô possui três graus de liberdade (X, Y e rotação em Z) e é considerado um sistema *haptic*. O robô pode ser visualizado na Figura A.1.

Figura A.1 - Robô mestre (*3DOF Planar Pantograph*).



Fonte: Próprio autor.

O duplo pantógrafo possui quatro sensores de posição do tipo *encoder* e quatro motores de corrente contínua com potência de 90 W, modelo RE35(285787) do fabricante Maxon. Estes são conectados com o computador através do

amplificador de potência QPA-L4-E e da placa *hardware-in-the-loop* Quanser Q8. Além destes componentes, na sua extremidade (em inglês *end-effector*) tem instalado um sensor de força e torque, modelo Nano25 do fabricante ATI, com seis graus de medição. As principais características destes componentes podem ser vistas na Tabela A.1.

Tabela A.1 - Principais características do robô mestre.

<b>Parâmetro</b>	<b>Eixo X</b>	<b>Eixo Y</b>
Máxima força contínua	3,1 N	2,3 N
Translação	-75 até 135 mm	± 135 mm
Resolução (Ponto de calibração)	1,2 x 10 <sup>-5</sup> m	

Fonte: Fabricante (QUANSER, 2004) e próprio autor.

## **A.2 Modelo linear utilizado para 1DOF**

Em vista da utilização do robô mestre para experimentos com somente um grau de liberdade, o modelo geral apresentado em (SMITH; MATINFAR, 2004) e (KHADEMIAN, 2008) pode ser reduzido para um modelo representativo de menor complexidade, por exemplo, um modelo linear invariante no tempo. A utilização efetiva de somente um grau de liberdade pode ser realizada através do bloqueio dos outros graus de liberdade (translação em X e rotação em Z) por controle regulatório ativo (proporcional mais derivativo) no plano cartesiano.

Considerando que o robô mestre possui uma mecânica com baixo coeficiente de atrito, um possível modelo é obtido somente considerando massa ( $M_M$ ) e atrito viscoso ( $B_M$ ). No entanto, visando encontrar o melhor modelo que o representa, quatros modelos (M1 a M4) foram testados durante o processo de identificação considerando atrito viscoso, atrito seco ( $\mu_M$ ) e rigidez ( $K_M$ ). As forças resultantes de tais modelos são mostradas na equação (A.1).

$$\begin{aligned}
 F_{M1} &= M_{M1}\ddot{X} \\
 F_{M2} &= M_{M2}\ddot{X} + B_{M2}\dot{X} \\
 F_{M3} &= M_{M3}\ddot{X} + B_{M3}\dot{X} + \mu_{M3} \text{SIGN}(\dot{X}) \\
 F_{M4} &= M_{M4}\ddot{X} + B_{M4}\dot{X} + \mu_{M4} \text{SIGN}(\dot{X}) + K_{M4}X
 \end{aligned}
 \tag{A.1}$$

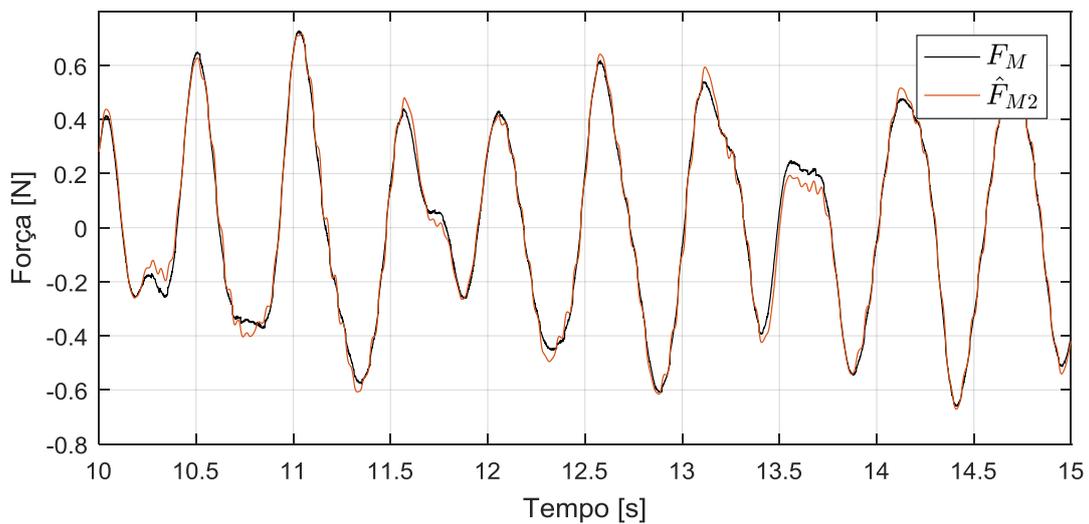
O modelo escolhido foi o M2, em que somente massa e atrito viscoso são considerados. A análise da escolha, os resultados e as características do processo de identificação são apresentados na próxima seção. Os valores de cada parâmetro do modelo M2 são apresentados na Tabela A.2 e as forças  $F_M$  e  $\hat{F}_{M2}$  são apresentadas na Figura A.2.

Tabela A.2 – Valores dos parâmetros do modelo M2.

Modelo	$M_M$ [kg]	$B_M$ [Ns/m]	RMSE ( $F_M - \hat{F}_{M2}$ ) [%]
M2	$0,2768 \pm 0,0018$	$0,2334 \pm 0,015$	10,5785

Fonte: Próprio autor.

Figura A.2 - Gráfico das forças  $F_M$  e  $\hat{F}_{M2}$ .



Fonte: Próprio autor.

Desta forma, o modelo representativo do robô mestre considerando apenas um grau de liberdade (eixo Y) é:

$$F_{M2} = 0,27 \ddot{X} + 0,23 \dot{X} \quad (A.2)$$

### A.3 Identificação

Esta seção descreve as características do processo de identificação para obtenção do modelo representativo do robô mestre considerando somente um grau de liberdade (eixo cartesiano Y). Conforme mencionado anteriormente, os outros graus de liberdade são “travados” utilizando um controlador P-D com valor de referência igual a zero. Os ganhos do controlador podem ser visualizados na Tabela 5.1 (do Capítulo 5 sobre Modelagem e Simulação).

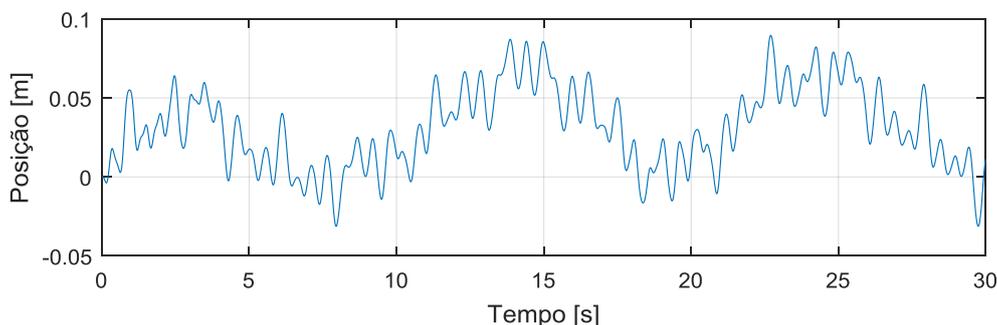
Visando produzir um sinal de excitação rico no eixo Y, o sinal de referência enviado para o controlador é composto por um somatório de ondas senoidais com diferentes frequências e fases, que são mostradas na Tabela A.3. Tais valores foram escolhidos visando não conter frequências harmônicas que pudessem causar uma aceleração significativa e que permitissem um trajeto na faixa central de movimento do robô. A posição do robô mestre com este sinal pode ser visualizada na Figura A.3.

Tabela A.3 – Características do sinal de referência para o robô mestre.

<b>Componentes</b>	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
<b>Amplitude [mm]</b>	40	30	6	7	9	8	9
<b>Frequência [rad/s]</b>	$\pi/38$	$2\pi/11$	0,9	2,3	4,9	8,4	12,1
<b>Fase [rad]</b>	0	0	0	0	$\pi$	0	$\pi$

Fonte: Próprio autor.

**Figura A.3 – Posição do robô mestre**



Fonte: Próprio autor.

Para a identificação dos parâmetros dos modelos descritos na equação (A.1), o experimento foi realizado por um período de 30 segundos e os dados (posição e força) foram amostrados a uma taxa de 1 kHz. A velocidade e aceleração foram obtidas posteriormente em modo *off-line* através do método de diferenças finitas para trás (*backwards difference*) e filtradas com um filtro passa-baixa de quarta ordem com cancelamento de atraso de fase. A frequência de corte foi de 50 Hz para velocidade e 20 Hz para aceleração.

A identificação é realizada através do método LS em lote e a escolha de qual modelo adotar, dentre os modelos testados (Equação (A.1)), é baseada no %RMSE da força estimada de cada modelo ( $\hat{F}_{M1...4}$ ) considerando como referência o sinal de saída do controlador P-D, isto é, a força aplicada no robô ( $F_M$ ). Através dos resultados apresentados na Tabela A.4, pode-se verificar que o modelo M3 proporciona o menor %RMSE. No entanto, considerando que a diferença entre M2 e M3 é pequena, prefere-se o uso do modelo M2 uma vez que se evita o uso de modelos não lineares e, conseqüentemente, se evita a compensação de tal linearidade na malha de controle. Deve-se notar que a estimativa de velocidade é altamente ruidosa, principalmente em baixa velocidade e com alta taxa de amostragem. Desta forma, conforme mencionado na seção anterior, o modelo escolhido para representar o robô mestre é o M2.

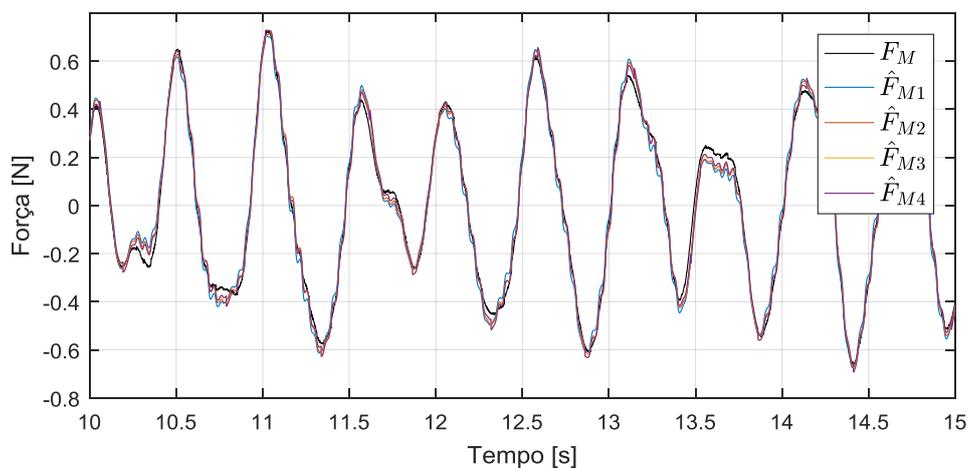
Tabela A.4 – Resultados de identificação para os modelos M1 a M4.

Modelos	M [kg]	B [N.s/m]	$\mu_1$	K [N/m]	%RMSE [%]
M1	0,2770 $\pm 0,018$	-	-	-	12,65
M2	0,2768 $\pm 0,018$	0,2334 $\pm 0,015$	-	-	10,57
M3	0,2764 $\pm 0,018$	0,0761 $\pm 0,025$	0,0220 $\pm 0,002$	-	9,98
M4	0,2764 $\pm 0,018$	0,0762 $\pm 0,025$	0,0219 $\pm 0,002$	-0,0030 $\pm 0,012$	9,99

Fonte: Próprio autor.

A força aplicada no robô ( $F_M$ ) e as forças estimadas de cada modelo podem ser visualizadas na Figura A.4.

Figura A.4 - Gráfico das forças estimadas de cada modelo.



Fonte: Próprio autor.

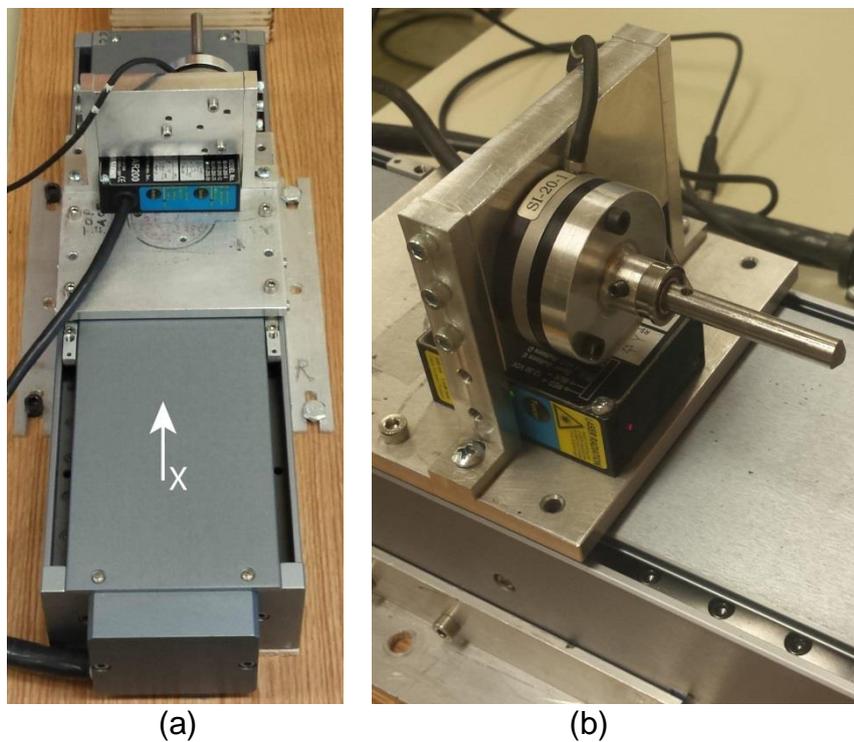
## APÊNDICE B - ROBÔ ESCRAVO

Esta seção apresenta os principais aspectos do robô utilizado como escravo nos experimentos reais realizados neste trabalho bem como o seu modelo utilizado e a identificação de seus parâmetros. Este equipamento pertence ao laboratório de robótica do departamento de engenharia elétrica e computação da universidade canadense *Queen's University*. Vale ressaltar que a modelagem e a identificação deste motor foram realizadas pela primeira vez durante a realização deste trabalho.

### B.1 Sobre o robô escravo

O robô utilizado foi montado durante a realização deste trabalho, sendo composto principalmente por um atuador linear, um sensor de distância a laser, e um sensor de força e torque. O robô pode ser visualizado na Figura B.1.

Figura B.1 - Robô escravo (a) e os sensores de força e laser (b).



Fonte: Próprio autor.

O atuador, modelo PLG 110 fabricado pela empresa Primatics, é composto por um motor linear trifásico sem escovas e um sensor de posição linear do tipo *encoder*. No carrinho do atuador está instalado o sensor de força e torque, modelo Mini40 do fabricante ATI que possui seis graus de medição; e o sensor de distância do fabricante Acuity modelo AR200-50. As principais características do robô podem ser visualizadas na Tabela B.1.

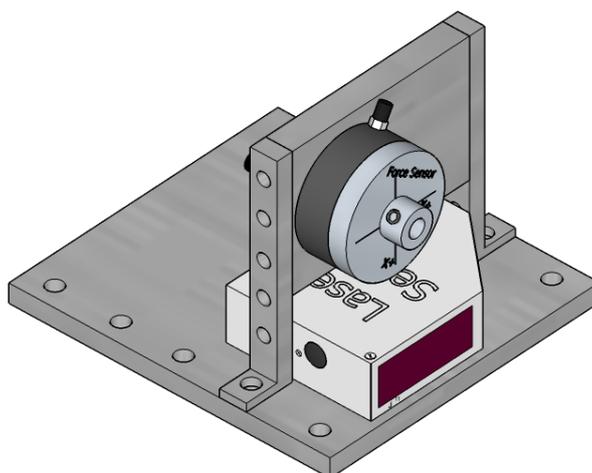
Tabela B.1 – Principais características do robô escravo.

Parâmetro	Valor
Máxima força contínua	8,4 N
Faixa de movimento	204 mm
Resolução do <i>encoder</i>	$1 \times 10^{-6} m$
Faixa de medição do sensor laser	50,8 mm
Frequência de amostragem dos sensores	1 kHz

Fonte: Fabricante (PRIMATICS, 2011).

O suporte utilizado para os sensores foi projetado durante este trabalho utilizando o *software* SketchUP e usinado na oficina mecânica da *Queen's University*. O desenho do mesmo pode ser visualizado na Figura B.2.

Figura B.2 – Desenho do suporte com sensores do robô escravo.



Fonte: Próprio autor.

## B.2 Modelo completo e linear

O motor linear sem escovas é construído basicamente por: (a) um carrinho que desliza em uma guia linear de esferas, (b) um conjunto de bobinas trifásico fixado ao carrinho e (c) um estator construído de ímãs permanentes em que o conjunto de bobina passa entre os ímãs. Devido ao aspecto construtivo deste tipo de motor, o mesmo apresenta usualmente dois tipos de distúrbios dependentes da posição e periódicos durante o seu movimento (ROHRIG; JOCHHEIM, 2001): (1) a força de *cogging*, que é devido à interação magnética entre os ímãs e o carrinho; e (2) a força de ondulação (*ripple*) eletromagnética devido à energização das bobinas que é também dependente da força exercida pelo motor, ou seja, da sua corrente elétrica. Se o carrinho é constituído de material não ferroso, a força de *cogging* pode ser considerada desprezível (ANORAD CORPORATION, 2009).

Assim, neste trabalho somente a força de ondulação será considerada uma vez que o material do carrinho do motor utilizado é de alumínio. Embora a força de ondulação seja dependente de ambos da posição e da corrente, neste trabalho foi considerada somente a dependência com a posição e a força (corrente) constante necessária para movimentar o carrinho, devido à restrição de equipamento e de tempo.

Desta forma, neste trabalho o motor linear é modelado como

$$F_S = M_S \ddot{X} + B_S \dot{X} + F_{Cl} + F_{ripple} \quad (\text{B.1})$$

onde  $M_S [kg]$  representa a massa do carrinho e dos sensores fixados nele,  $B_S [Ns/m]$  o atrito viscoso,  $F_{Cl}$  a força do atrito de Coulomb e  $F_{ripple}$  a força de ondulação. Devido às forças de atrito de Coulomb e de ondulação serem altamente não lineares, neste trabalho tais forças são modeladas de acordo com o sentido do movimento. Além disso, como a força de Coulomb não é

constante durante todo o percurso do movimento, a mesma também é modelada com relação à posição do carrinho e é descrita na seguinte equação

$$F_{Cl} = C_b * \text{sign}(\dot{X}) + C_p * X * \frac{\text{sign}(\dot{X}) + 1}{2} + C_N * X * \frac{\text{sign}(\dot{X}) - 1}{2} \quad (\text{B.2})$$

em que  $C_b$  é o atrito fixo para qualquer sentido (*bias*), e  $C_p$  e  $C_N$  são os coeficientes do atrito dependente da posição do motor quando o movimento está no sentido positivo e negativo, respectivamente. O operador de sinal ( $\text{sign}()$ ) é utilizado para identificar o sentido do movimento. Através de testes experimentais foi detectado que o atrito seco era aproximadamente de mesma intensidade do atrito de Coulomb, portanto não são considerados distintos.

Conforme apresentado em (ROHRIG; JOCHHEIM, 2001) e (VAN DEN BRAEMBUSSCHE *et al.*, 1996), a força de ondulação é composta por sinais senoidais/cossenoidais e suas harmônicas, com frequências determinadas pela posição do carrinho e espaçamento dos ímãs. Considerando sua não linearidade, neste trabalho a mesma também é modelada dependente do sentido do movimento e é apresentada na seguinte equação

$$F_{ripple} = \sum_{k=1}^{K_{ripple}} \left( F_{sp,k} \sin \frac{2\pi X_s k}{Passo} + F_{cp,k} \cos \frac{2\pi X_s k}{Passo} \right) \frac{\text{sign}(\dot{X}_s) + 1}{2} + \sum_{k=1}^{K_{ripple}} \left( F_{sn,k} \sin \frac{2\pi X_s k}{Passo} + F_{cn,k} \cos \frac{2\pi X_s k}{Passo} \right) \frac{\text{sign}(\dot{X}_s) - 1}{2} \quad (\text{B.3})$$

em que  $F_{sp,k}$  e  $F_{sn,k}$  são as forças referente ao seno,  $F_{cp,k}$  e  $F_{cn,k}$  são as forças referente ao cosseno,  $Passo$  é a distância entre os ímãs ou múltiplo dela,  $X_s[m]$  é a posição do motor e  $k$  é o índice da frequência.

Considerando que as forças não lineares  $F_{Cl}$  e  $F_{ripple}$  podem ser compensadas *online* na malha de controle do robô, o modelo completo pode ser reduzido a um modelo linear. Desta forma, após a identificação e compensação *online*

apresentada na próxima seção, o seguinte modelo linear invariante no tempo é utilizado neste trabalho nas simulações e na criação dos robôs virtuais:

$$F_S = 1,57 \ddot{X} + 0,2 \dot{X} . \quad (\text{B.4})$$

### B.3 Identificação

Uma vez que o modelo é composto por diferentes tipos de forças não lineares, a identificação é realizada em estágios de modo que em cada estágio somente alguns dos parâmetros presentes no modelo do motor são estimados. Depois de estimados, compensações são realizadas para permitir calcular outros parâmetros no próximo estágio. Os estágios para a identificação do modelo são:

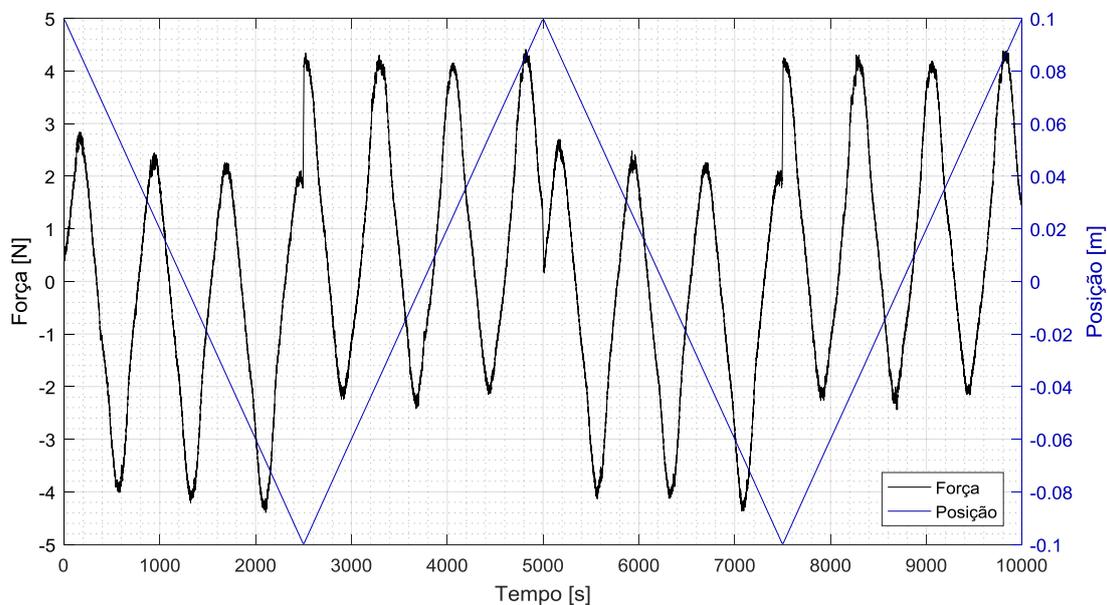
- 1) Identificação do atrito de Coulomb (equação (B.2)) e compensar em modo *off-line* a força exercida,
- 2) Identificar os termos da força de ondulação e compensar *online* o atrito de Coulomb e a força de ondulação, e
- 3) Identificar a massa e o atrito viscoso.

#### B.3.1 Estágio 1

Para a realização do primeiro estágio, foi designado ao motor percorrer toda a faixa operacional do motor duas vezes (ida e volta) com velocidade constante de aproximadamente de  $0,08 \text{ mm/s}$ . Isto foi obtido realizando um controle de posição proporcional com trajetória triangular como referência. Desta forma, com uma velocidade constante e muito baixa, a massa do carrinho e o atrito viscoso não interferem nos cálculos. A Figura B.3 mostra a posição do carrinho e a força resultante exercida para movimentar o carrinho, ou seja, a força contendo as forças  $F_{Cl}$  e  $F_{ripple}$  durante o experimento. O primeiro movimento

de ida e volta é utilizado para a estimação dos parâmetros e o segundo para a sua validação.

**Figura B.3 – Força resultante exercida e posição do robô.**



Fonte: Próprio autor.

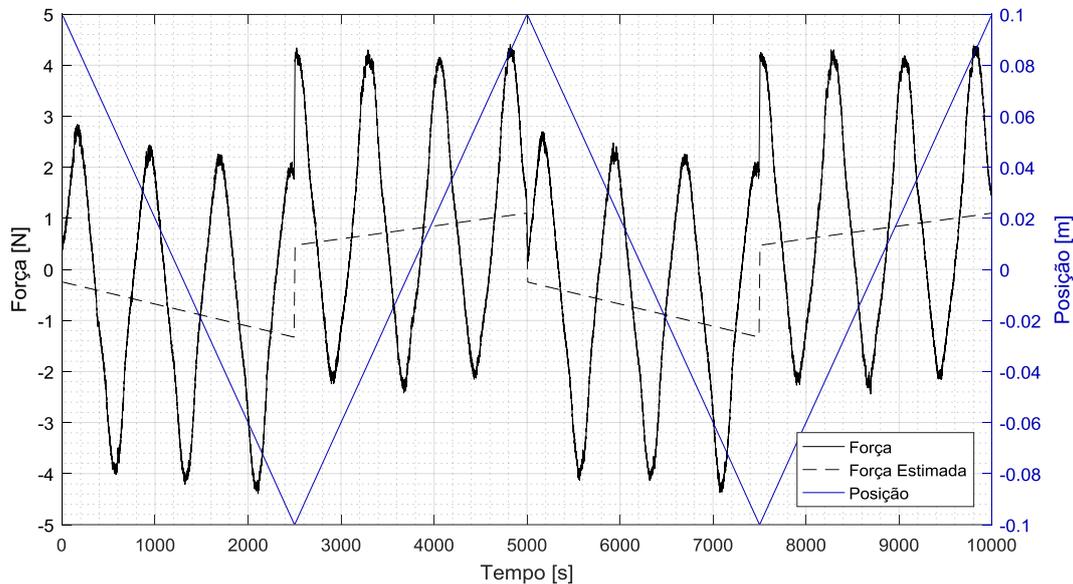
A partir dos dados coletados de posição e força, os parâmetros da força de Coulomb ( $F_{cl}$ ) foram identificados através do método de mínimos quadrados em lote utilizando como modelo a Equação (B.2). Os valores de cada parâmetro podem ser visualizados na Tabela B.2 e o resultado da força estimada na Figura B.4.

**Tabela B.2 – Valores dos parâmetros da força  $F_{cl}$ .**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
$C_b$	0,787143
$C_P$	3,153125
$C_N$	-5,416323

Fonte: Próprio autor.

**Figura B.4 – Força de Coulomb estimada.**



Fonte: Próprio autor.

De posse dos valores de cada parâmetro, a força resultante exercida é compensada *off-line*, ou seja, subtrai-se dela a força de atrito de Coulomb resultando somente na força de ondulação que será utilizada no próximo estágio.

### **B.3.2 Estágio 2**

Durante o processo de identificação, foi observado que a força não era composta apenas pela frequência principal e suas harmônicas, mas também subharmônicas. Isto certamente é devido ao fato que todos os imãs não são perfeitamente distanciados entre si ao longo do atuador, assim criando frequências menores que a considerada principal (distância entre os imãs). Desta forma, o valor do parâmetro *Passo* não foi considerado como a distância entre os imãs, mas sim o seu quádruplo. Assim, apenas aumentando o valor de  $k$  na Equação (B.3) é possível abranger tanto a frequência principal quanto as harmônicas e subharmônicas.

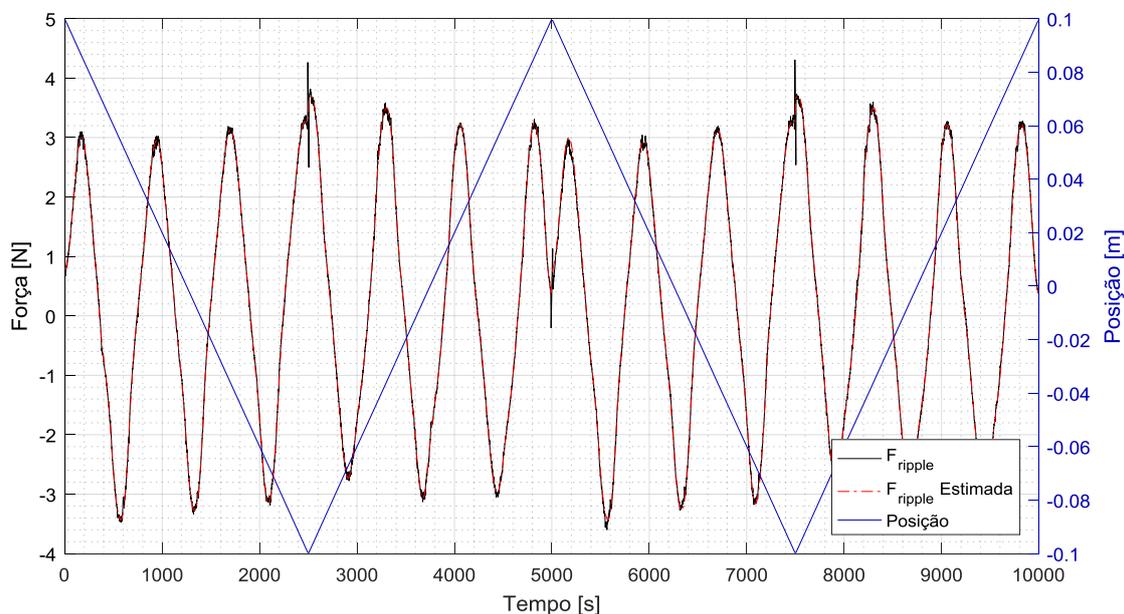
A quantidade de termos da Equação (B.3), ou seja, as frequências consideradas foram alteradas a fim de obter melhores resultados de estimação. Os resultados %RMSE podem ser visualizados na Tabela B.3. Como o melhor resultado foi com 26 termos, este foi escolhido. As forças de ondulação real e estimada podem ser visualizadas na Figura B.5 e os valores dos parâmetros na Tabela B.4.

Tabela B.3 – Resultados %RMSE com relação a quantidade de termos.

Quantidade de termos ( $K_{ripple}$ )	%RMSE Estimação	%RMSE Validação
6	11,93	12,06
10	9,41	9,52
16	2,75	3,42
20	2,62	3,38
26	1,95	2,97

Fonte: Próprio autor.

Figura B.5 – Identificação com 26 termos.



Fonte: Próprio autor.

Tabela B.4 – Valores dos parâmetros da força de ondulação.

$k$	$F_{sp\_k}$	$F_{cp\_k}$	$F_{sn\_k}$	$F_{cn\_k}$
1	0,130345	-0,236222	46,545981	-28,757927
2	-0,901828	1,118593	-90,281138	55,659975
3	2,090495	-2,678967	129,446137	-79,759663
4	-0,976937	1,883424	-163,794620	101,480927
5	4,872320	-6,143640	187,075777	-115,190920
6	-6,552912	8,191913	-203,192582	125,008337
7	8,093068	-9,965950	210,489270	-129,379424
8	-9,279958	11,432545	-209,716151	128,395407
9	10,095814	-12,274380	201,222754	-123,295952
10	-10,504981	12,626873	-186,896290	114,348269
11	10,470733	-12,419253	168,142569	-102,657682
12	-10,224783	11,883964	-146,953202	89,631554
13	9,346304	-10,706820	124,110683	-75,461655
14	-8,310598	9,343588	-101,710358	61,678084
15	7,118968	-7,817912	80,699361	-48,756237
16	-5,932737	6,345409	-61,875886	37,248130
17	4,678905	-4,847996	45,781882	-27,426194
18	-3,550551	3,571767	-32,573306	19,403964
19	2,585374	-2,480828	22,214916	-13,133080
20	-1,787243	1,612771	-14,437545	8,474544
21	1,174451	-0,983013	8,873879	-5,138328
22	-0,726297	0,547837	-5,093595	2,919890
23	0,404898	-0,242344	2,679517	-1,524105
24	-0,186275	0,146172	-1,303483	0,682765
25	0,084188	-0,037949	0,513038	-0,270106
26	-0,021975	0,003544	-0,151442	0,072062

Fonte: Próprio autor.

De posse dos parâmetros do atrito de Coulomb e da força de ondulação, pode-se compensar tais forças na malha de controle do robô visando que o robô se torne linear do ponto de vista externo. Tal compensação *online* foi realizada levando em consideração a posição e velocidade do motor quando o mesmo está em movimento, e quando parado considerando o sinal do controlador P-D ao invés da velocidade.

### B.3.3 Estágio 3

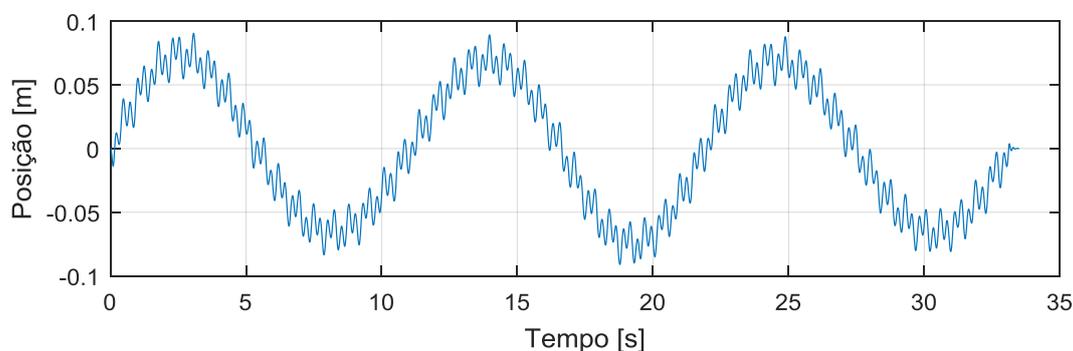
Neste estágio, a massa do robô e o atrito viscoso presente no mesmo são identificados de forma similar ao processo realizado na Seção A.3 para o robô mestre. A trajetória (sinal) de referência designada para o robô é composta por ondas senoidais. Seus parâmetros são mostrados na Tabela B.5. A posição do robô escravo no tempo pode ser visualizada na Figura B.6.

Tabela B.5 – Características do sinal de referência para o robô escravo.

Componentes	S1	S2	S3	S4
Amplitude [mm]	70	5	8	9
Frequência [rad/s]	$2\pi/11$	0,9	9,8	24,2
Fase [rad]	0	0	$\pi$	$\pi$

Fonte: Próprio autor.

Figura B.6 – Posição do robô escravo.



Fonte: Próprio autor.

Utilizando o método de mínimos quadrados em lote, os valores médios e os desvios padrão dos parâmetros de massa e atrito viscoso encontrados para cinco ensaios são de  $1,57 \pm 0,006 \text{ kg}$  e  $0,2 \pm 0,036 \text{ N.s/m}$ , respectivamente. O %RMSE encontrado foi de  $16,24 \pm 0,32 \%$ .

#### **B.3.4 Problemas encontrados e considerações finais**

Após a realização dos procedimentos de identificação e alguns testes de controle, percebeu-se que os atritos no atuador mudavam ao longo do tempo. Acredita-se que isto era devido o mesmo ter sido fabricado há mais de vinte anos e as guias lineares de esferas não terem a correta lubrificação. Devido a isto, certamente os parâmetros encontrados neste trabalho não são os mesmos atualmente. Outro evento que pode contribuir para tal situação é a intensa vibração que o mesmo sofre ao ser inicializado pelo servo-amplificador para referenciar o motor na posição *home* e “zerar” o contador do *encoder*, assim mudando o torque de aperto dos parafusos do carrinho e, portanto alterando os coeficientes de atritos.

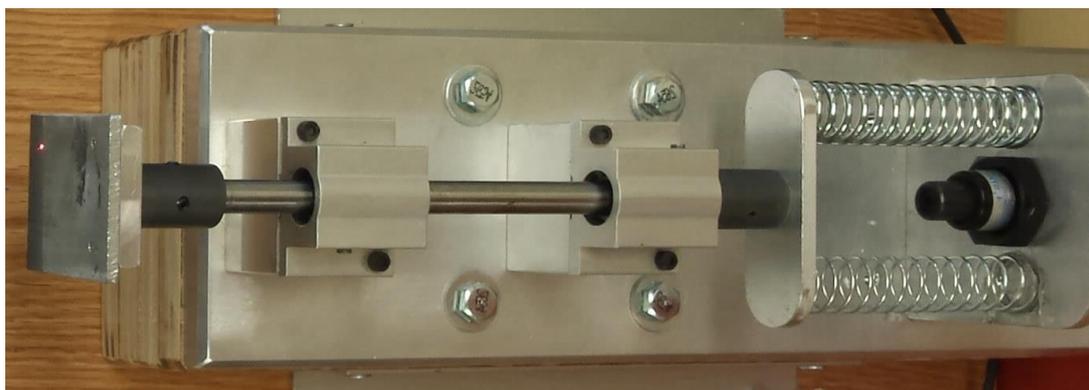
Além destes problemas, vale ressaltar que o modelo aqui apresentado não é completo uma vez que a força de ondulação não é dependente da corrente elétrica do motor. No entanto, uma vez que as principais não linearidades foram identificadas e compensadas, e a arquitetura proposta contribui para que as diferenças entre o modelo real e o identificado (/virtual) sejam parcialmente compensadas, isto não impossibilitou a utilização do mesmo.



## APÊNDICE C - AMBIENTE REAL

Esta seção mostra o aparato mecânico utilizado como ambiente durante os experimentos reais para que o robô escravo possa interagir, bem como suas configurações e componentes. O ambiente linear invariante no tempo com um grau de liberdade pode ser visualizado na Figura C.1.

**Figura C.1 – Ambiente utilizado nos experimentos reais. Neste caso duas molas estão instaladas (macia e dura).**



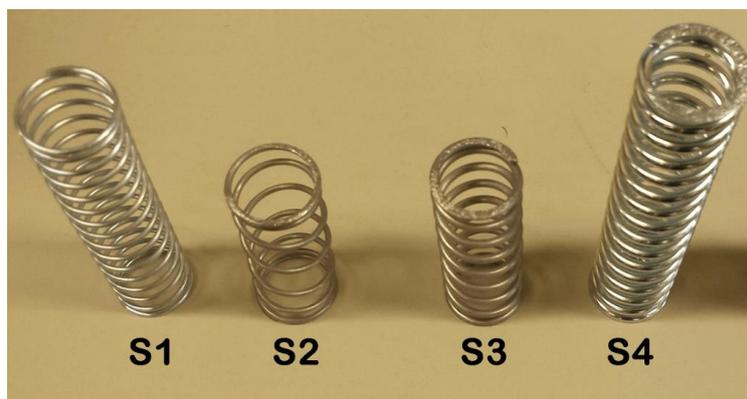
Fonte: Próprio autor.

### C.1 Configurações

Embora apenas um aparato seja utilizado, o mesmo permite a inclusão ou troca das molas alterando a impedância total do ambiente possibilitando então ensaios com diferentes ambientes. As molas utilizadas podem ser vistas na Figura C.2, onde S1 e S4 possuem o menor e o maior coeficiente de elasticidade, respectivamente.

As configurações adotadas neste trabalho são listadas na Tabela C.1, bem como as molas utilizadas e os valores resultantes dos coeficientes de elasticidade e de amortecimento, que foram estimados durante a execução dos Experimentos do tipo 1, apresentado no Capítulo 6.

**Figura C.2 – Molas utilizadas para compor o ambiente.**



Fonte: Próprio autor.

**Tabela C.1 – Ambientes utilizados durante os experimentos.**

<b>Número do Ambiente</b>	<b>Molas utilizadas (  significa paralelo)</b>	<b>Rigidez [N/m]</b>	<b>Coef. de amortecimento [N.s/m]</b>
1	S1	370	7
2	S1   S1	740	8
3	S1   S2   S1	1850	28
4	S1   S3   S1	2750	36
5	S1   S4	50000*	36

\*Embora este seja o valor real, tal valor é saturado em 10000, uma vez que a rigidez virtual é limitada.

Fonte: Próprio autor.



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São as sequências de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.