

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA**

**THALLYSON APARECIDO DE SOUZA**

**Estudo de teleoperação bilateral com atraso de comunicação constante e  
desconhecido usando variáveis de onda**

São João da Boa Vista

2023

**Thallyson Aparecido de Souza**

**Estudo de teleoperação bilateral com atraso de comunicação constante e desconhecido usando variáveis de onda**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicação do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicação .

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Wilian Miranda dos Santos

São João da Boa Vista

2023

S729e

Souza, Thallyson Aparecido de

Estudo de teleoperação bilateral com atraso de comunicação constante e desconhecido usando variáveis de onda / Thallyson Aparecido de Souza. -- São João da Boa Vista, 2023

44 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Wilian Miranda dos Santos

1. Robótica. 2. Estabilidade. 3. Sistemas de telecomunicação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO DE TELEOPERAÇÃO BILATERAL COM ATRASO DE COMUNICAÇÃO  
CONSTANTE E DESCONHECIDO USANDO VARIÁVEIS DE ONDA**

Aluno: Thallyson Aparecido de Souza  
Orientador: Prof. Dr. Wilian Miranda dos Santos

Banca Examinadora:

- Wilian Miranda dos Santos (Orientador)
- André Alves Ferreira (Examinador)
- Rafael Abrantes Penchel (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Processo nº 031/2023)

São João da Boa Vista, 05 de dezembro de 2023

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, pelos recursos oferecidos para pesquisa realizada nesta dissertação, por meio do projeto Estudo de teleoperação bilateral com atraso de comunicação constante e desconhecido usando variáveis de onda. Gostaria de agradecer ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Wilian Miranda dos Santos, sem a sua ajuda e participação dedicada em todas as etapas do processo este projeto nunca teria sido concretizado. Gostaria de agradecer também aos professores, Prof<sup>o</sup> Dr. Rafael Abranges Penchel e Prof<sup>o</sup> Dr. André Alves Ferreira pelos ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

*“A persistência é o caminho do êxito.”  
(Charles Chaplin)*

## **RESUMO**

Na área da robótica e das teleoperações, há uma crescente demanda por aprimorar a eficiência e a estabilidade dos sistemas de teleoperação. Os sistemas bilaterais de teleoperação envolvem um operador que envia comandos a um dispositivo remoto para realizar uma tarefa. Atrasos de tempo podem causar sérios problemas nesses sistemas, resultando em ineficiência e instabilidade. Portanto, é essencial melhorar a transparência e a estabilidade desses sistemas. Este trabalho apresenta métodos para alcançar esse objetivo, abordando o atraso de tempo como uma constante. O modelo Matlab/Simulink é utilizado para simular os sistemas de teleoperação bilateral.

**PALAVRAS-CHAVE:** Robótica. Estabilidade. Teleoperação bilateral.

## **ABSTRACT**

In the area of robotics and teleoperations, there is a growing demand to improve the efficiency and stability of teleoperation systems. Bilateral teleoperation systems involve an operator sending commands to a remote device to perform a task. Time delays can cause serious problems in these systems, resulting in inefficiency and instability. Therefore, it is essential to improve the transparency and stability of these systems. This paper presents methods to achieve this goal, approaching time delay as a constant. The Matlab/Simulink model is used to simulate bilateral teleoperation systems.

**KEYWORDS:** Robotics. Stability. Bilateral teleoperation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Sistema de teleoperação bilateral	13
Figura 2	Modelo do dispositivo mestre e subordinado	15
Figura 3	Modelos do controlador PD e do ambiente remoto	16
Figura 4	Transformação de onda básica	17
Figura 5	Reflexões de onda no sistema baseado em ondas	20
Figura 6	Modelo de um sistema de teleoperação com casamento de impedância	22
Figura 7	Modelo de um sistema de teleoperação com filtragem de onda	23
Figura 8	Diagrama em blocos de um sistema de teleoperação bilateral tradicional	25
Figura 9	Resposta do sistema de teleoperação tradicional quando não há atrasos no canal de comunicação.(a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.	26
Figura 10	Resposta do sistema de teleoperação tradicional quando há atrasos de 100ms no canal de comunicação.(a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.	27
Figura 11	Diagrama em blocos de um teleoperador com variável de onda	29
Figura 12	Resposta do sistema de teleoperação com variável de onda quando há atrasos de 100ms no canal de comunicação.(a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.	30
Figura 13	Resposta do sistema de teleoperação com variável de onda quando há atrasos de 500ms no canal de comunicação.(a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.	31
Figura 14	Diagrama em blocos de um sistema de teleoperação com casamento de impedância	33
Figura 15	Resposta do sistema de teleoperação com casamento de impedância quando há atrasos de 100ms. (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.	34
Figura 16	Resposta do sistema de teleoperação com casamento de impedância quando há atrasos de 500ms. (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.	35
Figura 17	Diagrama em blocos de um sistema de teleoperação bilateral com filtragem de onda	37
Figura 18	Resposta do sistema de teleoperação com filtragem de onda quando há atrasos de 100ms. (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.	38
Figura 19	Resposta do sistema de teleoperação com filtragem de onda quando há atrasos de 500ms. (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para a simulação do sistema de teleoperação tradicional . . . . .	24
Tabela 2 – Parâmetros para a simulação do sistema de teleoperação baseado em ondas . . . . .	28
Tabela 3 – Parâmetros para a simulação do sistema de teleoperação com casamento de impe- dância. . . . .	32
Tabela 4 – Parâmetros para a simulação do sistema de teleoperação com filtro de onda. . . . .	36

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_h$	Força do humano operador
$M_m$	Massa inercial do mestre
$B_m$	Coefficiente de amortecimento do mestre
$K_m$	Coefficiente de rigidez do mestre
$x_m$	Posição do mestre
$\dot{x}_m$	Velocidade do mestre
$f_m$	Força do mestre
$f_{md}$	Força desejada do mestre
$s$	Operador Laplace
$M_s$	Massa inercial do subordinado
$B_s$	Coefficiente de amortecimento do subordinado
$K_s$	Coefficiente de rigidez do subordinado
$x_s$	Posição do subordinado
$\dot{x}_s$	Velocidade do subordinado
$\dot{x}_{sd}$	Velocidade desejada do subordinado
$f_s$	Força do subordinado
$f_{sd}$	Força desejada do subordinado
$B$	Coefficiente de amortecimento do controlador PD
$K$	Coefficiente de rigidez do controlador PD
$B_e$	Coefficiente de amortecimento do ambiente
$K_e$	Coefficiente de rigidez do ambiente
$x_e$	Localização do ambiente antes do contato com o subordinado
$f_e$	Força de reação do subordinado para com o ambiente
$T$	Tempo de atraso
$b$	Impedância de onda

$u_m$	Variável de onda $u$ no lado do mestre
$u_s$	Variável de onda $u$ no lado do subordinado
$v_m$	Variável de onda $v$ no lado do mestre
$v_s$	Variável de onda $v$ no lado do subordinado
$D$	Elemento de amortecimento para o dispositivo mestre e subordinado
$R$	Elemento de amortecimento para o controlador PD
$\lambda$	Largura de banda

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Teleoperação Bilateral	13
1.1.1	Estabilidade e transparência	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Organização do texto	14
<b>2</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO</b>	<b>15</b>
2.1	Modelos do dispositivo mestre e do subordinado	15
2.2	Modelos do controlador <i>PD</i> e do ambiente remoto	16
<b>3</b>	<b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	<b>17</b>
3.1	Sistema de teleoperação baseado em ondas	17
3.1.1	Fluxo de energia	18
3.1.2	Condição de passividade	18
3.2	Reflexão de onda	19
3.3	Sistema de teleoperação com casamento de impedância	19
3.4	Sistema de teleoperação com filtragem de onda	21
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>24</b>
4.1	Simulação do sistema de teleoperação bilateral tradicional	24
4.2	Simulação do sistema de teleoperação bilateral baseados em onda	28
4.3	Simulação do sistema de teleoperação com casamento de impedância	32
4.4	Simulação do sistema de teleoperação bilateral com filtragem de onda	36
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>40</b>
5.1	Trabalhos futuros	40
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>41</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de teleoperação já percorreu um longo caminho desde que [Goertz \(1954\)](#) produziu o primeiro dispositivo de teleoperação mestre-subordinado. Os primeiros desenvolvimentos na tecnologia de teleoperação concentraram-se em permitir que máquinas ou equipamentos fossem controlados remotamente para executar tarefas que eram muito perigosas ou difíceis para os humanos. As primeiras máquinas de teleoperação foram desenvolvidas principalmente para utilizações militares. À medida que a tecnologia avançou, vários investigadores começaram a realizar experimentos para compreender o efeito dos atrasos do controle remoto e para propor métodos de controle mais sofisticados.

Os avanços na compreensão da comunicação entre operadores humanos e robôs controlados remotamente têm sido uma importante área de desenvolvimento para a tecnologia de teleoperação. Os cientistas encontraram várias maneiras de melhorar essa comunicação. [Lawrence \(1993\)](#) é um desses pesquisadores que propôs um algoritmo de sistema de teleoperação bidirecional sem atraso de comunicação com uma arquitetura de dois canais que leva em consideração a posição e a força do operador e do ambiente remoto. O algoritmo foi projetado para eliminar atrasos na comunicação e fazer com que os usuários sintam como se estivessem interagindo diretamente com o ambiente remoto. Alcançar esse objetivo requer modelos muito precisos dos robôs mestres e subordinados, e que a impedância transmitida, vista pelo operador, seja igual à impedância do ambiente remoto.

Além disso, outras melhorias assumem que o atraso de comunicação entre as unidades mestre e subordinado pode ser considerado constante e desconhecido. Esta suposição é feita para simplificar o projeto da arquitetura de controle e garantir que o sistema permaneça estável independentemente do atraso. O primeiro estudo proeminente neste cenário de atraso é o de [Niemeyer e Slotine \(2004\)](#), usando uma abordagem baseada em passividade. A arquitetura de controle baseia-se no uso de variáveis de onda em vez de variáveis de potência e o uso de um controlador PD composto por um termo proporcional e derivativo. Nesse modelo, um *feedback* de força do subordinado é enviada para a unidade háptica. A unidade háptica é um dispositivo tecnológico proporciona *feedback* tátil, transmitindo sensações de toque, pressão e textura aos usuários. ([RöSCH; SCHILLING; ROTH, 2002](#))

Os métodos mencionados acima tiveram o potencial para melhorar a eficiência, segurança e acessibilidade em diversas áreas do conhecimento como a exploração espacial ([Cheng et al. \(2021\)](#)), [Liu \(2015\)](#), [Meintel e Larsen \(1983\)](#) a telecirurgia ([Xia e Lu \(2021\)](#), [Larcher et al. \(2023\)](#), [Madhani, Niemeyer e Salisbury \(1998\)](#), [Drobinsky et al. \(2023\)](#) e os sistemas de teleoperação subaquáticos ([Wang, Gao e Xie \(2022\)](#)), [Yoon et al. \(2004\)](#) entre outros de sistema de teleoperação.

A pesquisa neste estudo concentra-se nos efeitos dos atrasos constantes e desconhecidos em sistemas de teleoperação bilateral. Para lidar com esses atrasos, implementamos o método da variável de onda proposto por [Niemeyer e Slotine \(2004\)](#). O Matlab/Simulink é usado para verificar a validade dos parâmetros e realizamos várias simulações e experimentos.

## 1.1 TELEOPERAÇÃO BILATERAL

O termo "teleoperação" pode ser compreendido através de sua etimologia. O prefixo "tele" tem origem grega, "téle", que significa à distância, expressando a ideia de distância, enquanto a palavra "operação" tem origem latina, "operatio", "onis", que se refere ao ato de operar. Portanto, "teleoperação" significa o ato de operar à distância. Isso abre a possibilidade de operar objetos distantes entre si, onde um deles, chamado de dispositivo mestre, recebe comandos do operador humano, e o outro, chamado de dispositivo subordinado, interage com o ambiente remoto e executa as tarefas necessárias.

Da mesma forma, o significado da palavra "bilateral" pode ser entendido através de sua etimologia. Bilateral é uma combinação do prefixo "bi" e da palavra "lateral", o que indica que ambas as partes têm obrigações mútuas. Ou seja, no caso da teleoperação, os dados são trocados em ambas as direções, permitindo um *feedback* imediato do subordinado para o mestre. Dessa forma, o operador sente novamente as forças de reação, resultando em novos movimentos e novos comandos de controle.

O sistema de teleoperação bilateral é apresentado na **Figura 1**. O operador humano envia comandos de movimento para o dispositivo mestre, que são transmitidos ao dispositivo subordinado. Este, por sua vez, interage com o ambiente remoto: se o ambiente é o espaço livre, o subordinado se move, mas se for uma parede, o subordinado para em contato com a parede. Os resultados sobre o estado do subordinado são então enviados de volta ao operador humano como um *feedback* de força para que possa identificar a tarefa que está sendo executada pelo subordinado.

Figura 1 – Sistema de teleoperação bilateral



Fonte: Produção do autor

### 1.1.1 Estabilidade e transparência

Ao projetar um sistema teleoperação, a estabilidade e a transparência devem ser priorizadas em detrimento do alto desempenho. No entanto, surgem algumas dificuldades em equilibrar estabilidade e transparência, uma vez que o aumento da transparência leva à perda da estabilidade e vice-versa (HOKAYEM; SPONG, 2006). A transparência do sistema dá aos operadores uma sensação de interação direta com as tarefas remotas (LAWRENCE, 1993). A estabilidade de um sistema se refere à capacidade do sistema de manter um comportamento controlado e previsível durante a operação. Uma maneira de melhorar a estabilidade de um sistema em malha fechada é através do método de passividade discutido em Niemeyer e Slotine (2004), já que sistemas de variáveis de ondas são resistentes à atrasos constantes arbitrários ou a defasagens de fase.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo geral avaliar as estratégias de controle de teleoperação baseadas em variáveis de onda utilizadas para garantir a estabilidade do sistema mesmo em condições adversas de atraso.

Os objetivos específicos a serem alcançados são:

- Modelagem e formulação do problema de controle para dois dispositivos hápticos conectados através de um canal de comunicação com atrasos de tempo.
- Desenvolvimento e implementação da estratégia de teleoperação bilateral por meio de simulações computacionais, utilizando o *software* Matlab/Simulink.
- Análise da estabilidade e transparência do sistema de controle bilateral na presença de atrasos de tempo constantes arbitrários.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho é dividido em cinco capítulos e segue a seguinte estrutura. No Capítulo 1 foi apresentados os conceitos básicos do sistema teleoperação bilateral e o objetivo do trabalho. Capítulo 2 aborda a modelagem de cada componente do sistema de teleoperação. No Capítulo 3, é descrita o objeto de estudo, a definição do problema e algumas abordagens para a solução. No No Capítulo 4, são apresentadas as simulações, experimentos e análises dos resultados. Por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões deste trabalho, bem como as dificuldades encontradas.

## 2 MODELO MATEMÁTICO

### 2.1 MODELOS DO DISPOSITIVO MESTRE E DO SUBORDINADO

Segundo Anderson e Spong (1988), o dispositivo mestre e o dispositivo subordinado podem ser representados por dois elementos passivos, um elemento inercial  $M$  correspondente à massa e um elemento amortecedor  $B$  correspondente ao *feedback* de velocidade. Estes dispositivos é modelado pelas equações 2.1 e 2.2 (ANDERSON; SPONG, 1988):

$$M_m \dot{v}_m(t) + B_m v_m(t) = f_h(t) - f_{md}(t) \quad (2.1)$$

$$M_s \dot{v}_s(t) + B_s v_s(t) = f_s(t) - (1 + \alpha_f) f_e(t) \quad (2.2)$$

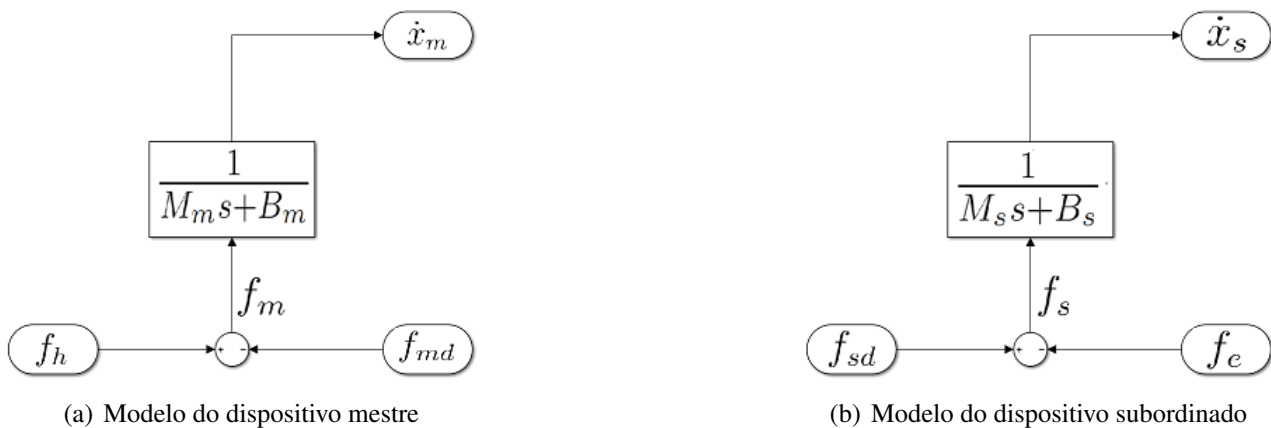
onde  $M_m$ ,  $B_m$ , e  $f_{md}$  são a massa, o coeficiente de amortecimento e a velocidade desejada do mestre, respectivamente;  $M_s$ ,  $B_s$  e  $f_s$  são a massa, o coeficiente de amortecimento e a força do subordinado, respectivamente;  $f_h(t)$  é a força do humano operador e  $f_e(t)$  é a força de reação do ambiente. Usando 2.1 e 2.2, a função de transferência entre velocidade e força no lado mestre e subordinado pode ser escrita da seguinte forma usando a transformada de Laplace:

$$\frac{\mathcal{L}(v)}{\mathcal{L}(F_h - F_{md})} = \frac{1}{M_m s + B_m} \quad (2.3)$$

$$\frac{\mathcal{L}(v)}{\mathcal{L}(F_s - (1 + \alpha_f) F_e)} = \frac{1}{M_s s + B_s} \quad (2.4)$$

A partir de 2.3 e 2.4, o comando de força  $F_m$  é definido como a entrada do sistema e o comando de velocidade  $\dot{x}_m$  é definido como a saída do sistema. Além disso, a força do mestre vale  $f_m = f_h - f_{md}$  e o ambiente considerado é o espaço livre, portanto,  $f_e = 0$ . No Matlab/Simulink, o dispositivo mestre e o dispositivo subordinado podem ser representada pelo bloco de função de transferência, (ALISE, 2007), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo do dispositivo mestre e subordinado



Fonte: Produção do autor

## 2.2 MODELOS DO CONTROLADOR PD E DO AMBIENTE REMOTO

Tanto o mestre quanto o subordinado podem ter um controlador PD, (NIEMEYER; SLOTINE, 1997). Porém, neste trabalho, apenas o controlador do lado subordinado é utilizado. No controlador PD do subordinado, dois ganhos, um para posição ( $K$ ) e outro para velocidade ( $B$ ), são definidos com o propósito de forçar o dispositivo subordinado a seguir a velocidade desejada.  $\dot{x}_{sd}$ , (SUN; NAGHDY; DU, 2014). Esses ganhos são usadas para ajustar a entrada de controle com base no sinal de erro  $e$ , o ganho de velocidade controla a taxa de variação da saída e o ganho de posição controla o erro de estado estacionário. O controlador PD pode ser definido como:

$$f_{sd} = -B(\dot{x}_s - \dot{x}_{sd}) - K(x_s - x_{sd}) \quad (2.5)$$

Usando a equação 2.5, a função de transferência de malha fechada do controlador PD pode ser escrita da seguinte forma usando a transformada de Laplace (NIEMEYER; SLOTINE, 2004):

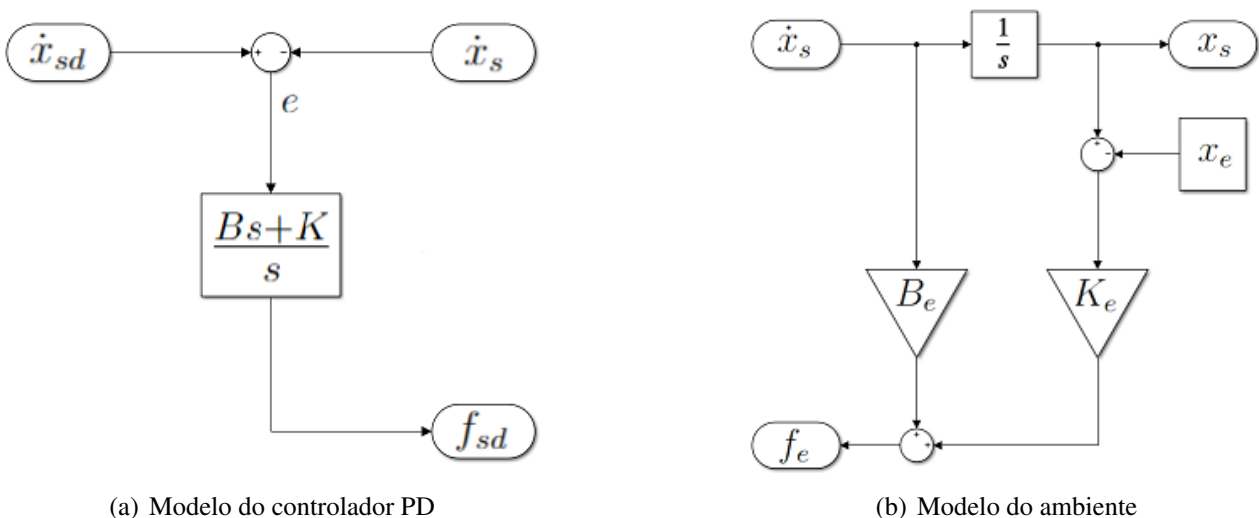
$$\frac{\mathcal{L}(\dot{X}_{sd} - \dot{X}_s)}{\mathcal{L}(F_{sd})} = \frac{Bs + K}{s} \quad (2.6)$$

Já modelagem do ambiente é feita usando impedância e força, onde uma mola e amortecedor são referido como impedância. Quando o manipulador entra em contato com o ambiente, uma força de reação pode ser expressa como (ERICKSON; WEBER; SHARF, 2003):

$$f_e = -B_e \dot{x}_s - k_e(x_e - x_s) \quad (2.7)$$

No Matlab/Simulink, o modelo do controlador PD pode ser representado pelo bloco de função de transferência ilustrado na Figura 3-a e o modelo do ambiente pode ser representado por blocos de ganhos de posição  $K_e$  e de velocidade  $B_e$ , como mostrado na Figura 3-b, onde  $f_e$  representa a força de reação do ambiente e  $x_e$  representa a localização do ambiente antes do contato com o subordinado.

Figura 3 – Modelos do controlador PD e do ambiente remoto



Fonte: Produção do autor

### 3 EMBASAMENTO TEÓRICO

#### 3.1 SISTEMA DE TELEOPERAÇÃO BASEADO EM ONDAS

Com base na noção de variáveis de espalhamento (ANDERSON; SPONG, 1988), uma modificação ou ampliação da teoria da passividade, com o conceito de variáveis de onda e energia, é apresentada por Niemeyer e Slotine (1997), para lidar com instabilidades causadas por atrasos constantes e desconhecidos na teleoperação bilateral. Isto é conseguido codificando as variáveis de potência ( $F, \dot{x}$ ) em variáveis de onda ( $u, v$ ). As transformações de onda implementadas para o lado mestre e para o lado subordinado estão escritas nas equações 3.1 e 3.2.

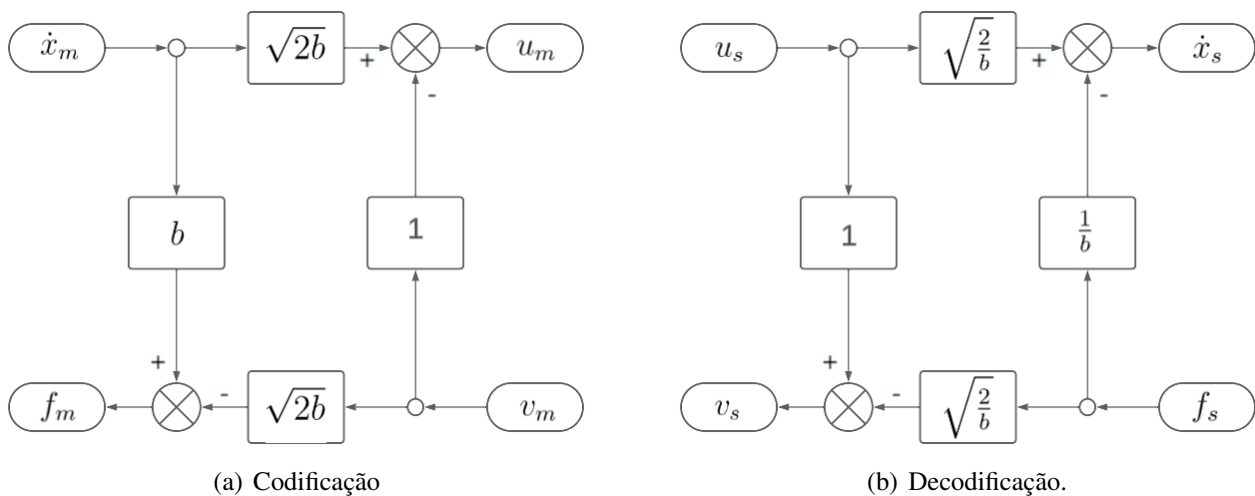
$$u_m = \frac{b \cdot \dot{x}_m + F_m}{\sqrt{2b}} \quad \text{e} \quad v_m = \frac{b \cdot \dot{x}_m - F_m}{\sqrt{2b}} \quad (3.1)$$

$$u_s = \frac{b \cdot \dot{x}_s + F_s}{\sqrt{2b}} \quad \text{e} \quad v_s = \frac{b \cdot \dot{x}_s - F_s}{\sqrt{2b}} \quad (3.2)$$

onde  $F_m$  e  $\dot{x}_s$  são variáveis de potência, força e velocidade, recebidos do lado mestre e do subordinado, respectivamente,  $u$  é a onda que se propaga do dispositivo mestre para o dispositivo subordinado,  $v$  é a onda que se propaga do dispositivo subordinado para o dispositivo mestre e  $b$  é a impedância de onda que atua como parâmetro ajustável para o amortecimento do sistema, (NIEMEYER; SLOTINE, 1997).

As equações 3.1 e 3.2 são usadas para projetar as arquiteturas de codificação e decodificação de variáveis de onda, respectivamente. Os comandos de velocidade  $\dot{x}_m$  e de força  $F_m$  são codificados como  $u_m$  e  $v_m$ , conforme mostrado na Figura 4-a. Ao passar pela linha de transmissão, essas variáveis de onda são renomeadas como  $u_s$  e  $v_s$ , e então decodificadas novamente em comandos de velocidade  $\dot{x}_s$  e de força  $F_s$ , como mostrado na Figura 4-b. Essas transformações entre variáveis de potência e variáveis de onda são realizadas sem perda de informação (NIEMEYER; SLOTINE, 1997).

Figura 4 – Transformação de onda básica



Fonte: Produção do autor

### 3.1.1 Fluxo de energia

No contexto das ondas, o fluxo de energia é a taxa na qual a energia é transferida de um componente de um sistema para outro. Portanto, além das informações de movimento, as variáveis de onda também devem transmitir energia necessária para realizar a ação desejada, (NIEMEYER; SLOTINE, 1997). O fluxo de energia no canal de comunicação representado por variáveis das ondas pode ser escrito como

$$P = \dot{x}_m^T F_m - \dot{x}_s^T F_s = \frac{1}{2}(u^T u - v^T v) \quad (3.3)$$

Niemeyer e Slotine (1997) definiu a variável de onda  $u$  como a onda que fornece energia ao sistema, enquanto  $v$  é definido como uma onda que dissipa energia do sistema.

### 3.1.2 Condição de passividade

A relação entre variáveis de onda e passividade é crucial para a análise do sistema. A passividade é definida como a incapacidade de um sistema de produzir energia, e esta condição de passividade é expressa dentro do domínio das variáveis das ondas, pois garante que o sistema permaneça estável e robusto contra um atraso arbitrário, (NIEMEYER; SLOTINE, 2004). A análise de passividade pode ser feita no domínio do potência, sendo expressa por:

$$\int_0^t P_{in} d\tau = \int_0^t \dot{x}^T F d\tau \geq -E_{store}(0) \quad \forall t \geq 0 \quad (3.4)$$

onde  $P_{in}$  é a potência de entrada e  $E_{store}$  é a energia armazenada no instante inicial. Ou pode ser feita no domínio da onda, sendo expressa em termos de variáveis de onda  $u$  e  $v$ , escrita como

$$\int_0^t \frac{1}{2} v^T v d\tau \leq \int_0^t \frac{1}{2} u^T u d\tau + E_{store}(0) \quad \forall t \geq 0 \quad (3.5)$$

Segundo Niemeyer e Slotine (2004), o primeiro termo  $\int_0^t \frac{1}{2} u^T u$  representa a energia na onda que entra no sistema, enquanto o segundo termo  $\int_0^t \frac{1}{2} v^T v$  representa a energia na onda que sai do sistema. Portanto, para atender à condição de passividade, a energia que sai do sistema deve ser limitada pela energia que entra no sistema, somada à energia inicialmente armazenada que é calculada como:

$$E_{store}(0) = \int_{t-T}^t \frac{1}{2} u^T u d\tau \quad (3.6)$$

que significa que a é energia armazenada durante o atraso de tempo  $T$ .

As variáveis de onda atendem a essa condição de passividade (NIEMEYER; SLOTINE, 2004). Assim, o canal de comunicação é considerado passivo. Conseqüentemente, os atrasos de tempo também são considerados passivos e podem ser expressos da seguinte maneira:

$$u_s(t) = u_m(t - T) \quad (3.7)$$

$$v_m(t) = v_s(t - T) \quad (3.8)$$

### 3.2 REFLEXÃO DE ONDA

O sistema de teleoperação pode experimentar reflexões de onda quando as impedâncias dos componentes dentro ou entre subsistemas não são casados, (NIEMEYER; SLOTINE, 2004). Os exemplos incluem um sistema mestre que depende da interação com um operador humano e um sistema subordinado que depende da interação com um ambiente virtual, respectivamente, (TANNER; NIEMEYER, 2005). A Figura 5 mostra uma arquitetura padrão de teleoperação baseada em ondas, destacando a ocorrência de três reflexões de onda. Em (1), a interação entre o operador e o subsistema mestre resulta em um sinal de *feedback* na forma de amortecimento. Em (2), a reflexão ocorre durante a transformação das ondas, com as ondas  $u_s$  e  $v_m$  refletidas no canal de comunicação como um *loop*, em vez de serem codificadas e decodificadas. Em (3), o operador envia um sinal ao subordinado, mas parte desse sinal é retornado ao chegar no controlador PD e não leva em consideração a interação entre o subordinado, resultando em erro de rastreamento. Essas reflexões das ondas pode tornar o sistema instável, criando ondas estacionárias que interferem na onda original e amplificam certas frequências e atenuam outras, fazendo com que o sistema se comporte de maneira irregular.

Para resolver esses problemas de alteração de impedância em sistemas teleoperação baseados em onda, Niemeyer e Slotine (2004) adaptou filtros de onda para restringir a largura de banda do sistema, o que ajuda a minimizar o impacto das alterações de impedância. Outra técnica sugerida por Niemeyer e Slotine (2004) é usar casamento de impedância na qual a impedância de onda  $b$  é usada entre os subsistemas mestre e subordinado. PD

### 3.3 SISTEMA D TELEOPERAÇÃO COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA

O sistema de teleoperação com casamento de impedância proposto por Niemeyer e Slotine (2004) visa combinar a impedância do mestre com a do subordinado. Para isso, elementos de amortecimento denominados  $D$  foram adicionados em paralelo ao mestre e ao subordinado, e o elemento de amortecimento denominado  $R$  foi adicionado em paralelo ao controlador PD, conforme mostrado na Figura 6. Assim, as impedâncias do mestre e do subordinado atuam como um amortecedor simples para as transformações de onda, dissipando a energia excedente do sistema. Esses elementos de amortecimento e parâmetros do controlador PD são expressos da seguinte forma:

$$D = \lambda m \quad B = \lambda m \quad K = \lambda^2 m \quad R = b - \lambda m \quad (3.9)$$

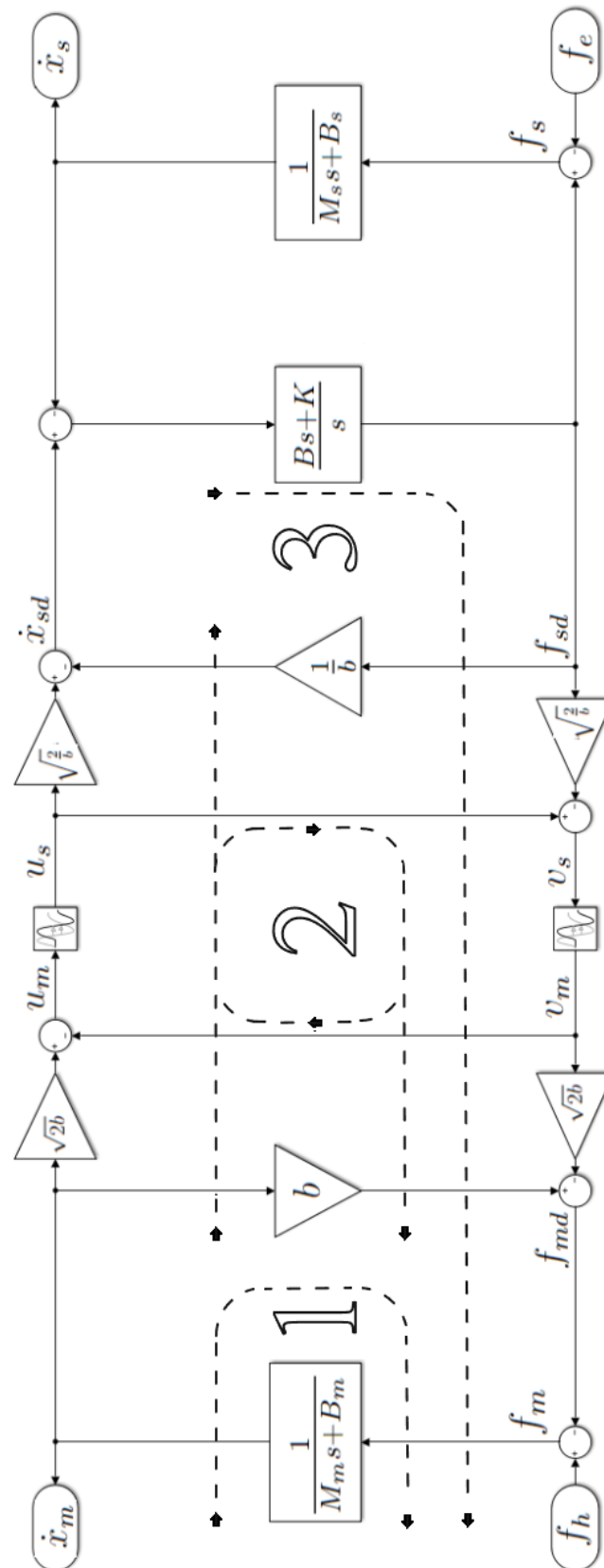
onde  $\lambda$  é a largura de banda do sistema.

Além disso, Niemeyer e Slotine (2004) definiu o limite inferior para a impedância de onda como:

$$b \geq B = D = \lambda m \quad (3.10)$$

Assim, usando 3.9 e 3.10, os elementos de amortecimento e os parâmetros do controlador PD podem ser determinados com base na impedância de onda..

Figura 5 – Reflexões de onda no sistema baseado em ondas



Fonte: Produção do autor

### 3.4 SISTEMA DE TELEOPERAÇÃO COM FILTRAGEM DE ONDA

A filtragem de ondas é um outro método proposto por Niemeyer e Slotine (2004) para reduzir as reflexões das ondas que ocorrem no sistema de teleoperação. Nesse método, um filtro passa-baixas linear de primeira ordem

$$G(s) = \frac{\lambda}{1 + \lambda} \quad (3.11)$$

é introduzido no caminho da onda  $u_s$ , conforme mostrado em Figura 7. Segundo Niemeyer e Slotine (1997), a largura de banda  $\lambda$  pode ser determinado por

$$\lambda = \frac{1}{T} \quad (3.12)$$

O objetivo é suavizar o comportamento do sistema, eliminando os componentes de alta frequência presentes nas reflexões das ondas. Isso corrige a incompatibilidade de impedância do sistema, mas aumenta o erro de rastreamento entre os dispositivos mestre e subordinado.

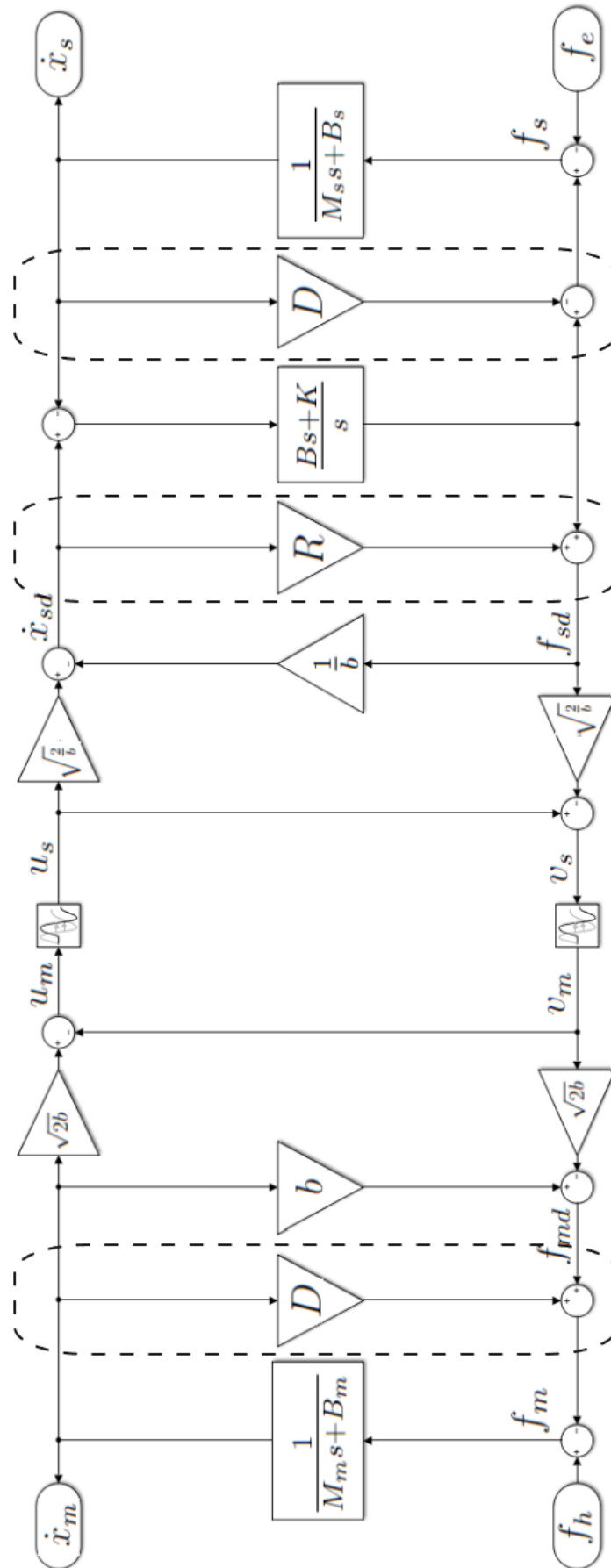
Diferentemente do método de casamento de impedância, o filtro não consegue distinguir entre a reflexão da onda e o sinal original do sistema. Como resultado, parte do sinal de *feedback* que o operador deveria receber também é eliminada, como demonstrado pelos parâmetros do sistema.

$$\begin{aligned} M &= M_m + bT + \frac{b}{\lambda} + M_n \\ B &= 2b \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$K^{-1} = K_m^{-1} \frac{b}{T} + (b\lambda)^{-1} + K_s^{-1}$$

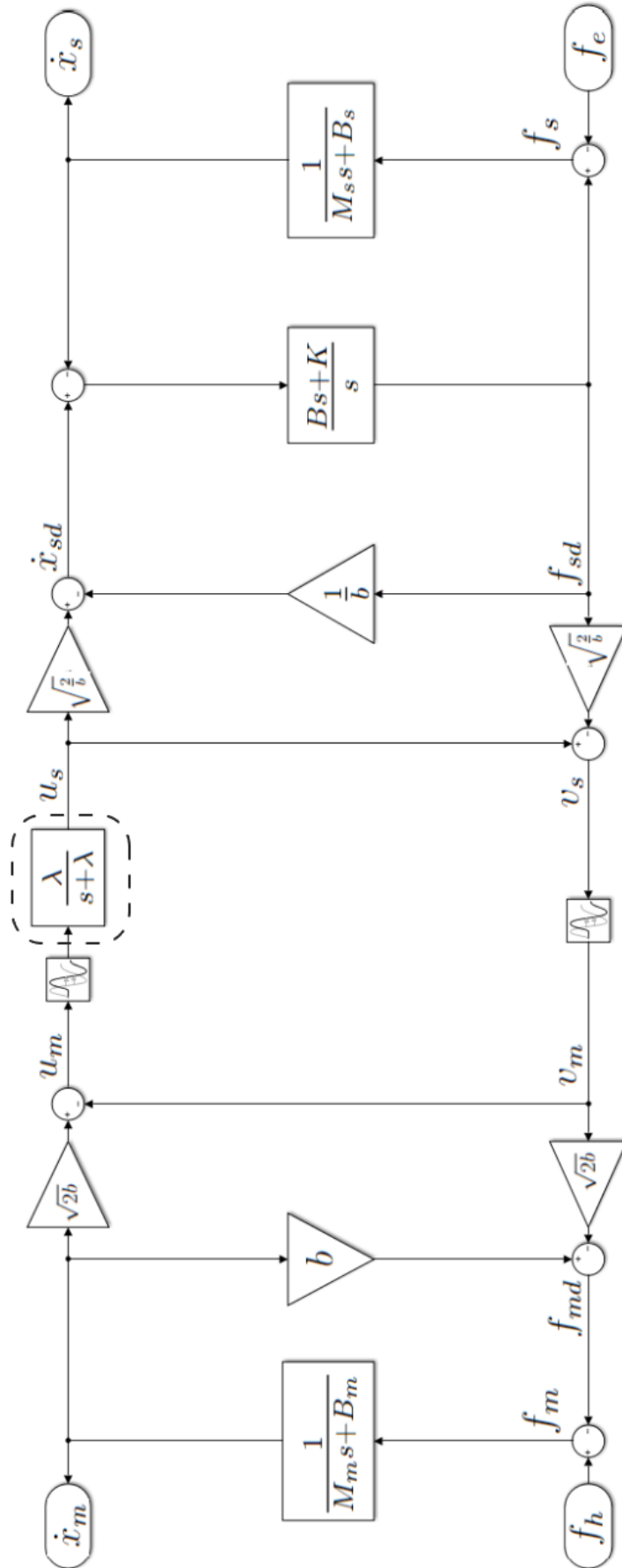
Uma maneira de recuperar os dados de alta frequência perdidos devido à filtragem de ondas é usando sensores auxiliares, como sensores auditivos ou táteis. Os sensores auditivos podem fornecer *feedback* sonoro ao operador, permitindo que eles percebam a distância, direção ou outros parâmetros do ambiente em que o dispositivo está operando. Enquanto isso, os sensores táteis podem fornecer *feedback* tátil ao operador, permitindo que eles sintam a textura, temperatura ou pressão de objetos ou superfícies (SZABÓ; VESZPRÉMI; SCHMIDT, 2017).

Figura 6 – Modelo de um sistema de teleoperação com casamento de impedância



Fonte: Produção do autor

Figura 7 – Modelo de um sistema de teleoperação com filtragem de onda



Fonte: Produção do autor

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TELEOPERAÇÃO BILATERAL TRADICIONAL

O sistema de teleoperação bilateral tradicional é composto por cinco elementos: o operador humano, o dispositivo mestre, o canal de comunicação, o dispositivo subordinado e o ambiente remoto, como mostrado na [Figura 8](#). Para analisar o comportamento do sistema, foram realizados dois testes: um sem atraso no canal de comunicação, ou seja,  $T_d = 0s$ , e outro com atraso de  $100ms$ . Os parâmetros e ganhos utilizados neste estudo são os mesmos aplicados por [Tanner e Niemeyer \(2005\)](#) em seus experimentos e simulações. Esses parâmetros estão listados na Tabela [1](#).

A primeira simulação, ilustrada na [Figura 9](#), apresenta os seguintes resultados: em relação aos comandos de movimento, a [Figura 9-a](#) mostra as velocidades dos dispositivos mestre e subordinado aumentando igualmente ao longo do tempo, na forma de função de primeiro grau, indicando que o dispositivo subordinado está se movendo livremente de forma acelerada, o que também pode ser comprovado na [Figura 9-c](#) onde as posições dos dispositivos mestre e subordinado aumentam na forma de função de segundo grau. Já a [Figura 9-b](#) e a [Figura 9-d](#) mostram que as velocidades e posições dos dispositivos mestre e subordinado estão estáveis em torno de  $\dot{x}_m = \dot{x}_s = 0m/s$  e de  $x_m = x_s = 0,1m$ , respectivamente, o que indica que o subordinado está parado e sua posição é igual à do ambiente remoto  $x_e$ . Em relação às curvas de torque, a [Figura 9-e](#) e [Figura 9-f](#) mostram que as forças desejadas dos dispositivos mestre e subordinado estão estáveis em torno de  $f_{md} = f_{sd} = 0,5N$  para o subordinado em movimento livre e em torno de  $f_{md} = f_{sd} = 1N$  para o subordinado em movimento restrito ao ambiente, indicando que as impedâncias do sistema estão casadas e que o dispositivo subordinado está transmitindo uma força de *feedback* ao operador humano sobre seu contato com o ambiente remoto.

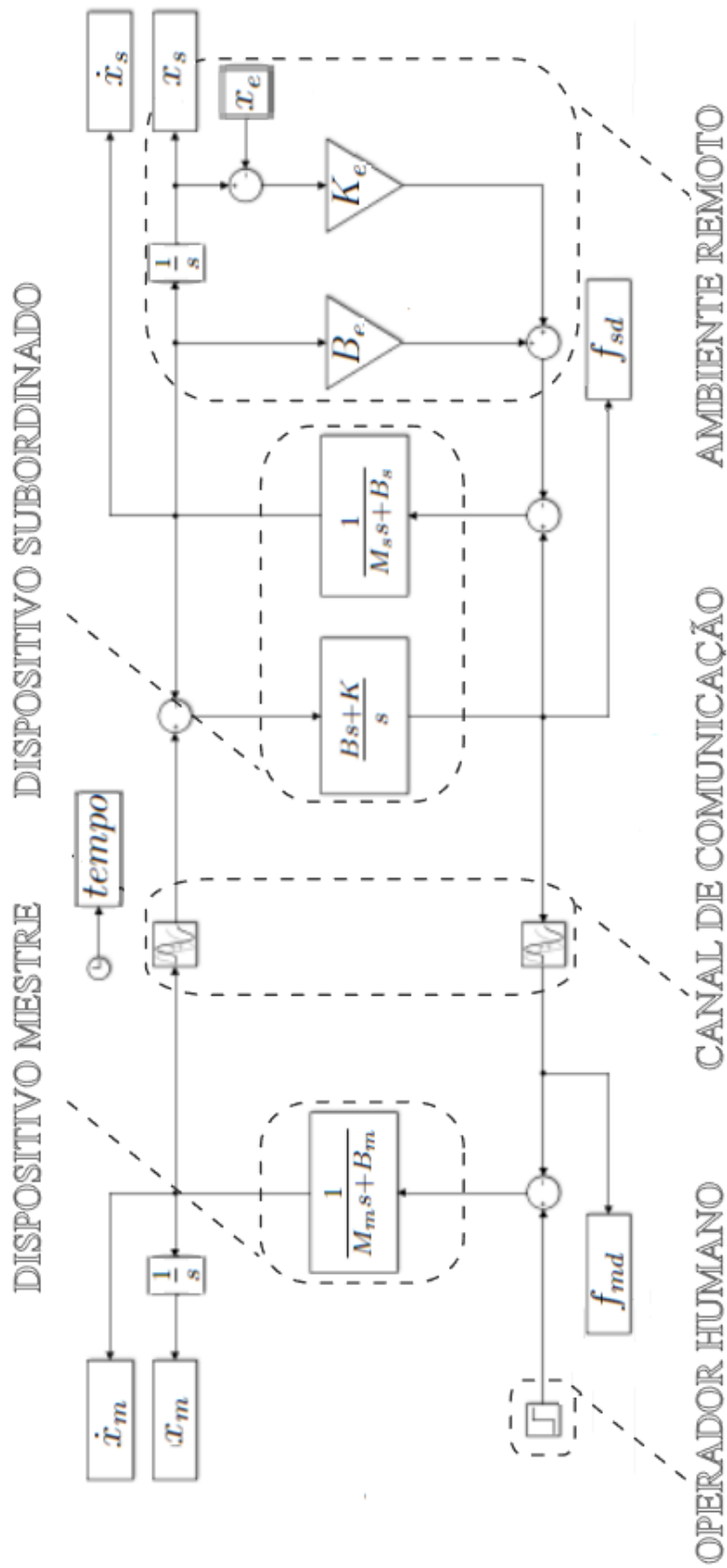
A segunda simulação com o sistema de teleoperação tradicional foi realizado considerando um atraso de  $100ms$  no canal de comunicação. Os resultados deste teste são exibidos na [Figura 10](#) na qual mostram que independentemente de o subordinado se mover livremente ou estar em contato com o ambiente remoto, o sistema torna-se completamente instável.

Tabela 1 – Parâmetros para a simulação do sistema de teleoperação tradicional

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
$T_m$	Tempo de amostragem	10	$s$
$f_h$	Força do operador humano	1	$N$
$B_e$	Amortecimento do ambiente	5000	$Nm^{-1}$
$K_e$	Rigidez do ambiente	5	$Nsm^{-1}$
$X_e$	Localização do ambiente	0,1	$m$
$M_m$	Massa inercial do mestre	0,1	$Kg$
$M_s$	Massa inercial do subordinado	0,1	$Kg$
$K$	Ganho proporcional PD	370	$Nm^{-1}$
$B$	Ganho derivativo PD	2,5	$Nsm^{-1}$
$T_d$	Tempos de atraso usados nas simulações	0 e 100	$ms$

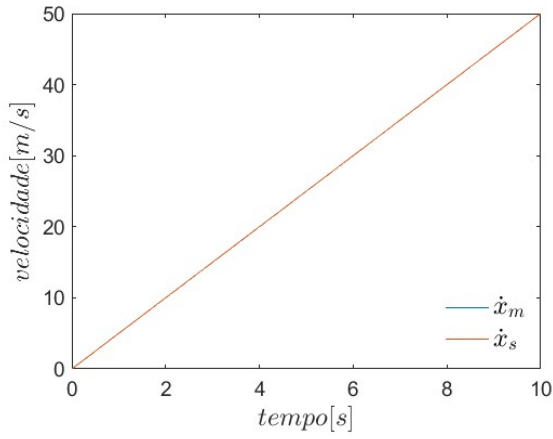
Fonte: Produção do autor

Figura 8 – Diagrama em blocos de um sistema de teleoperação bilateral tradicional

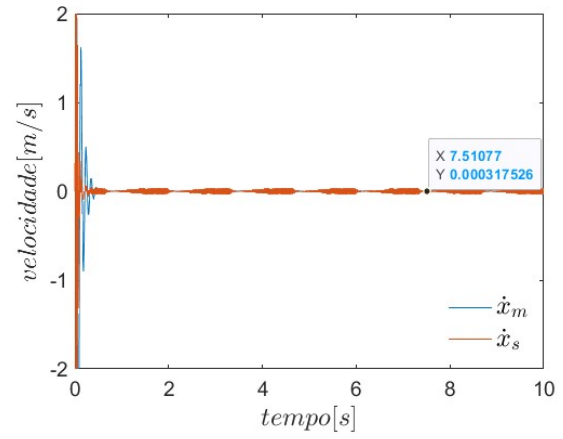


Fonte: Produção do autor

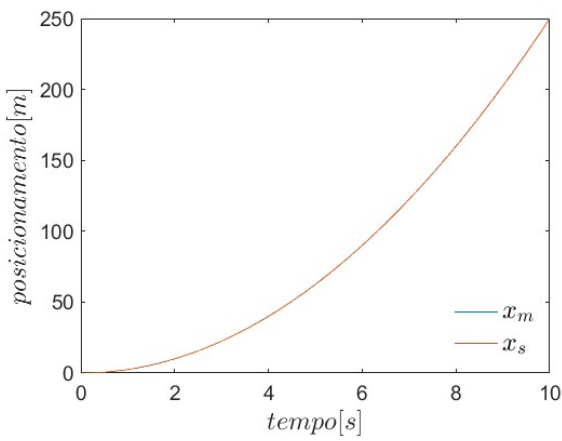
Figura 9 – Resposta do sistema de teleoperação tradicional quando não há atrasos no canal de comunicação. (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.



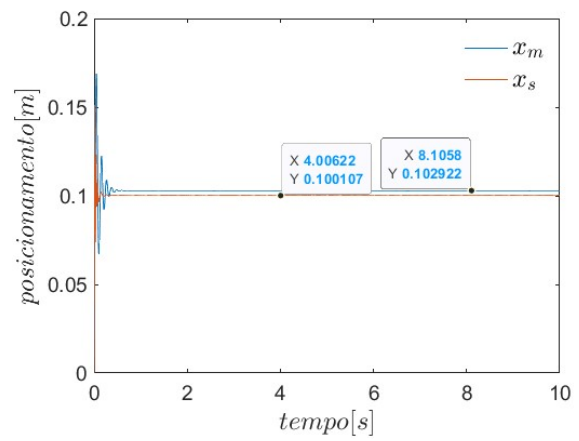
(a)



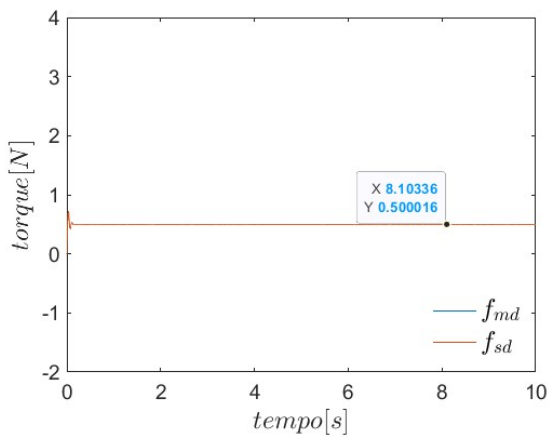
(b)



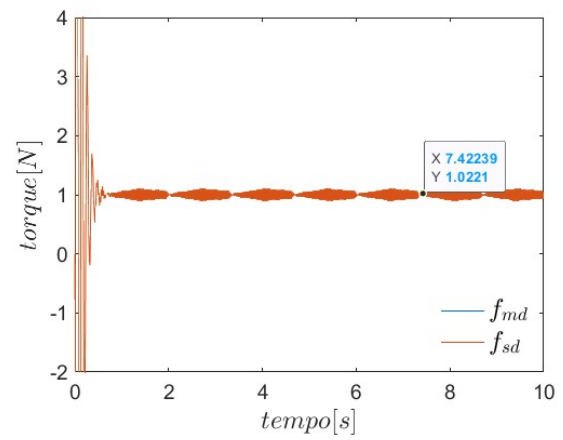
(c)



(d)



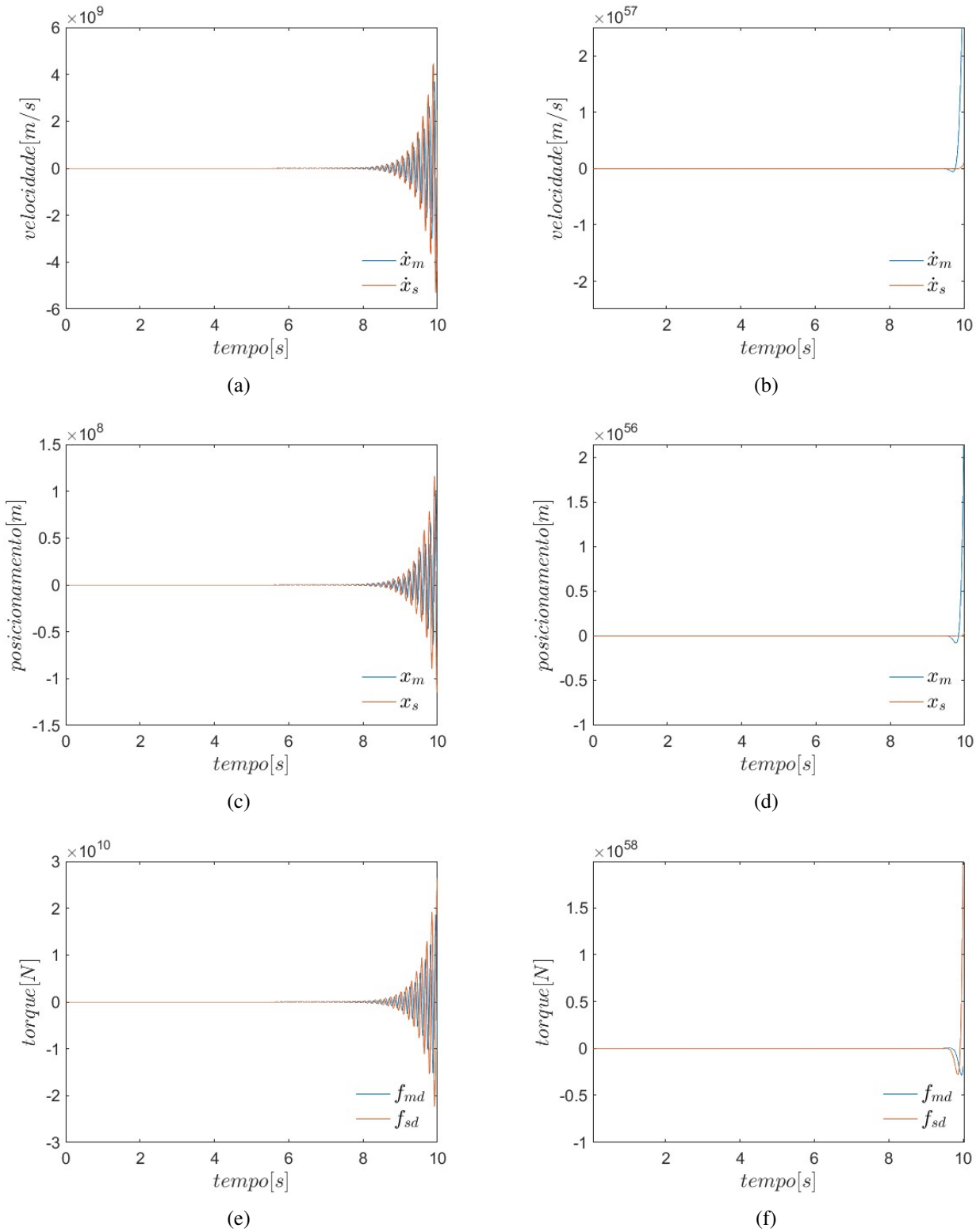
(e)



(f)

Fonte: Produção do autor

Figura 10 – Resposta do sistema de teleoperação tradicional quando há atrasos de  $100\text{ms}$  no canal de comunicação. (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.



Fonte: Produção do autor

## 4.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TELEOPERAÇÃO BILATERAL BASEADOS EM ONDA

Niemeyer e Slotine (2004) propôs utilizar a transformações de onda no canal de comunicação como mostrado na Figura 11, com o objetivo de resolver o problema de estabilidade que ocorre quando há atraso no canal de comunicação. Para analisar o comportamento do sistema de teleoperação bilateral baseado em onda quando há atrasos no canal de comunicação, foram realizados dois testes: um com atraso de  $100ms$  e outro com atraso de  $500ms$ . Os parâmetros e ganhos utilizados nesta simulação são os mesmos da simulação anterior, com exceção dos tempos de atraso. O parâmetro de impedância de onda  $b$  também são adicionados ao sistema conforme mostrado na Tabela 2.

O teste inicial com o sistema de teleoperação bilteral usando variáveis de onda é ilustrado na Figura 11. A Figura 12-a mostra as velocidades dos dispositivos mestre  $\dot{x}_m$  e subordinado  $\dot{x}_s$  aumentando ao longo do tempo, de acordo com uma função de primeiro grau, a Figura 12-c mostra as posições dos dispositivos mestre  $x_m$  e subordinado  $x_s$  aumentando ao longo do tempo, de acordo com uma função de segundo grau, e a Figura 12-e mostra as forças desejadas do mestre  $f_{md}$  e do subordinado  $f_{sd}$  estabilizadas em torno de  $0,5N$ . Essas informações de velocidade de posição e de força indicam que o subordinado está se movendo no espaço livre e as impedâncias do sistema estão casadas. De maneira análoga, a Figura 12-b mostra as velocidades dos dispositivos mestre  $\dot{x}_m$  e subordinado  $\dot{x}_s$  estabilizada em torno de  $0m/s$ , a Figura 12-d mostra a posição do mestre  $x_m$  estabilizada em torno de  $0,15m$  e a posição do subordinado  $x_s$  estabilizada em torno de  $0,1m$ , respectivamente, e a Figura 12-f mostra as forças desejadas do mestre  $f_{md}$  e do subordinado  $f_{sd}$  estabilizadas em torno de  $1N$ . Essas informações de velocidade de posição e de força indicam que o subordinado está em contato com o ambiente remoto e que há um erro de rastreamento de  $\Delta x = 0,5m$ .

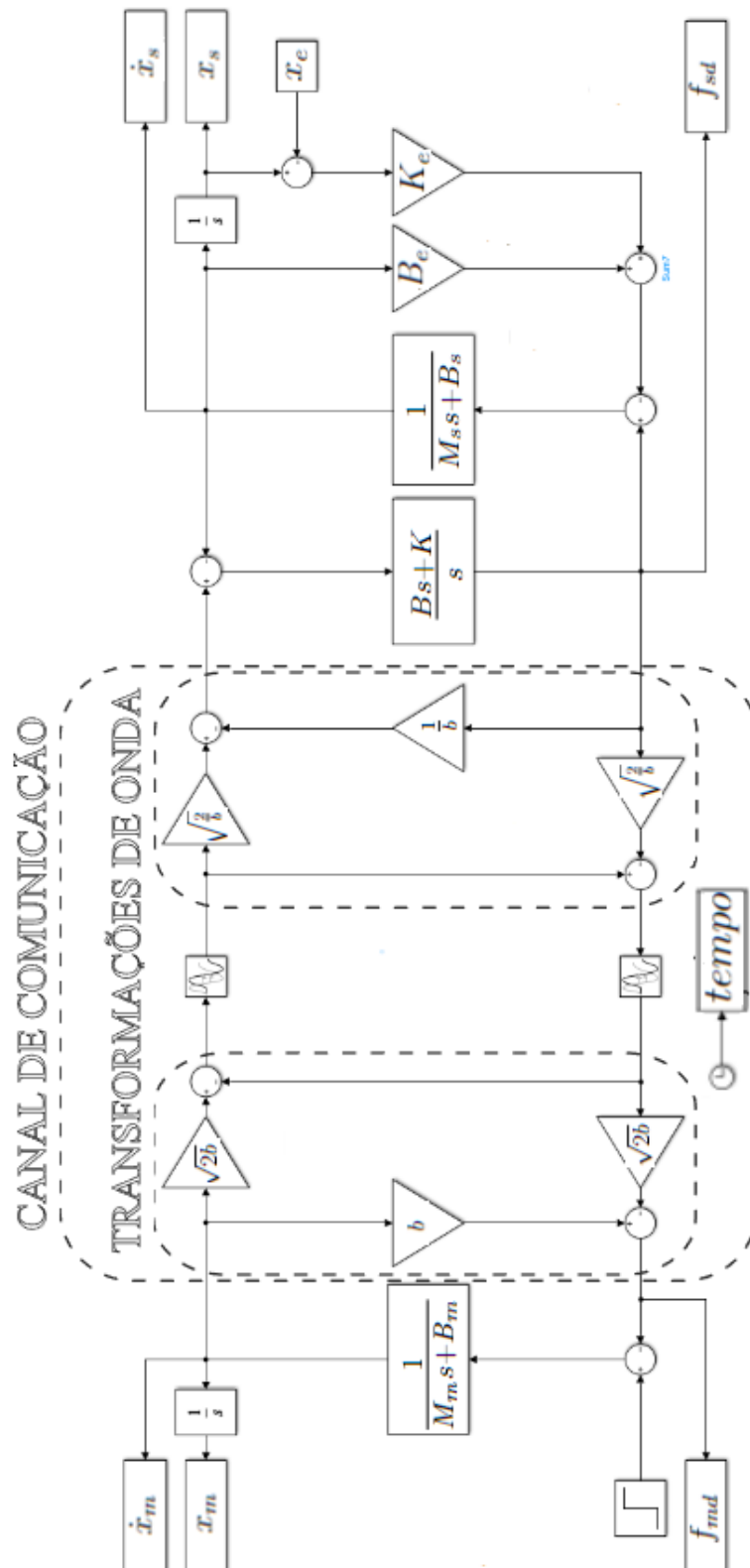
Foi realizado um teste adicional com o sistema de teleoperação baseado em ondas, considerando atraso de  $500ms$ . Os resultados estão apresentados na Figura 13. Ao comparar as seções Figura 12-a, Figura 12-c e Figura 12-e do primeiro teste com as seções Figura 13-a, Figura 13-c e Figura 13-e do segundo teste, observou-se que o aumento do atraso resulta em diminuição das velocidades e posições do mestre e do subordinado, e em um maior descompasso das impedâncias do sistema. Da mesma forma, ao comparar as seções Figura 12-b, Figura 12-d e Figura 12-f do primeiro teste com as seções Figura 13-b, Figura 13-d e Figura 13-f do segundo teste, observou-se que o erro de rastreamento aumenta com o aumento do atraso, evidenciando um sistema menos instável e transparente.

Tabela 2 – Parâmetros para a simulação do sistema de teleoperação baseado em ondas

Símbolo	Parâmetros	Valor	Unidade
$T_m$	Tempo de amostragem	100	$s$
$b$	Impedância de onda	2,5	$Nsm^{-1}$
$T_d$	Tempo de atraso (primeiro teste)	100	$ms$
$T_d$	Tempo de atraso (segundo teste)	500	$ms$

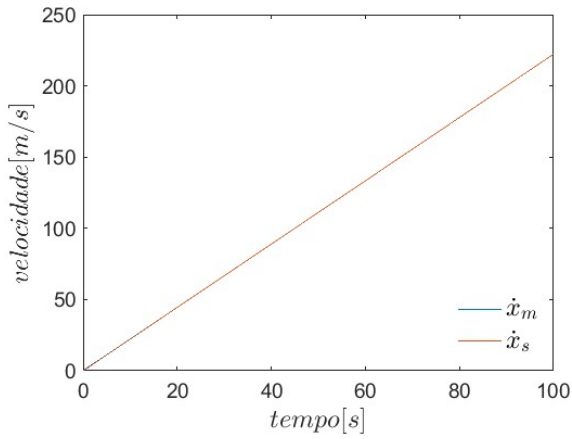
Fonte: Produção do autor

Figura 11 – Diagrama em blocos de um teleoperador com variável de onda

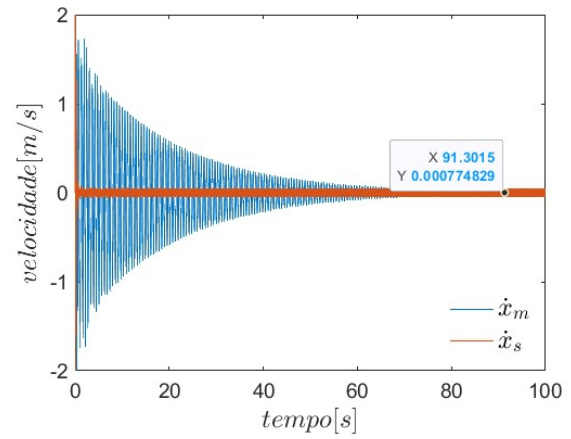


Fonte: Produção do autor

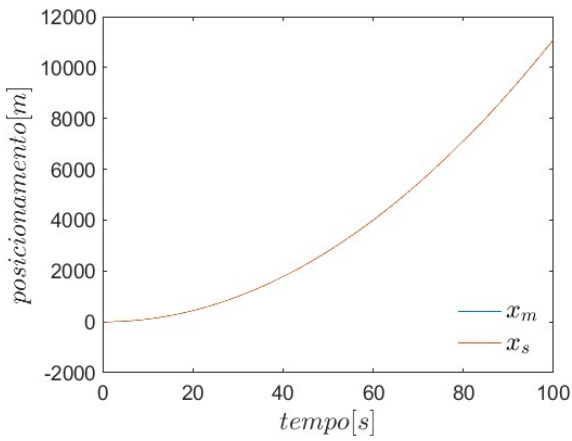
Figura 12 – Resposta do sistema de teleoperação com variável de onda quando há atrasos de  $100ms$  no canal de comunicação. (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.



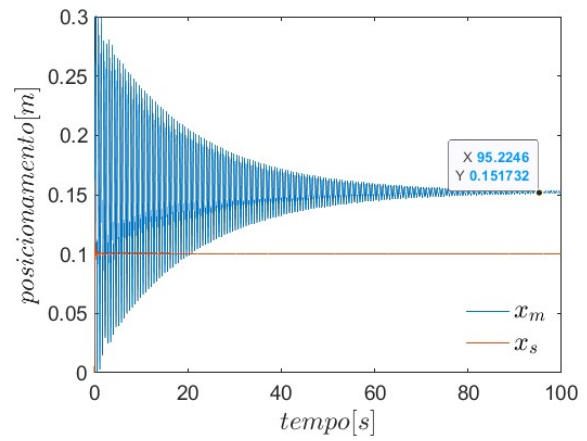
(a)



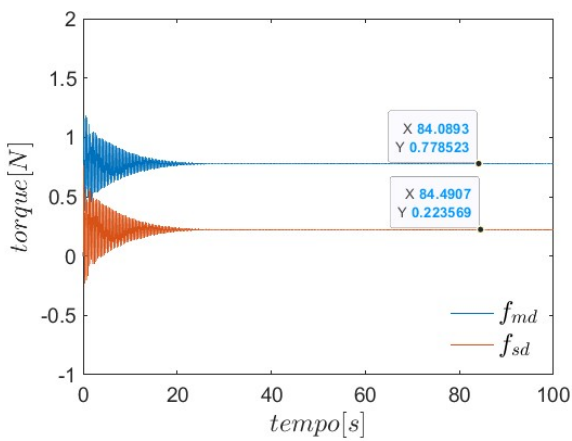
(b)



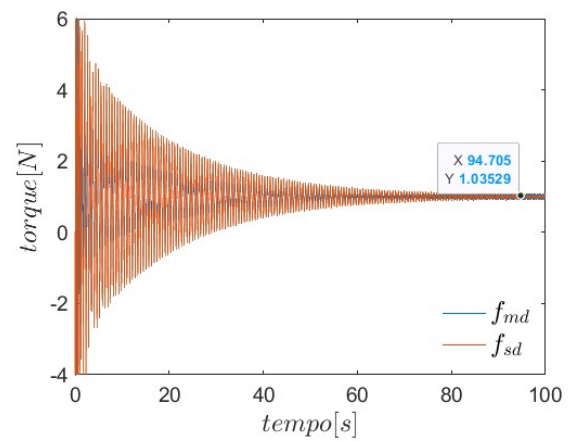
(c)



(d)



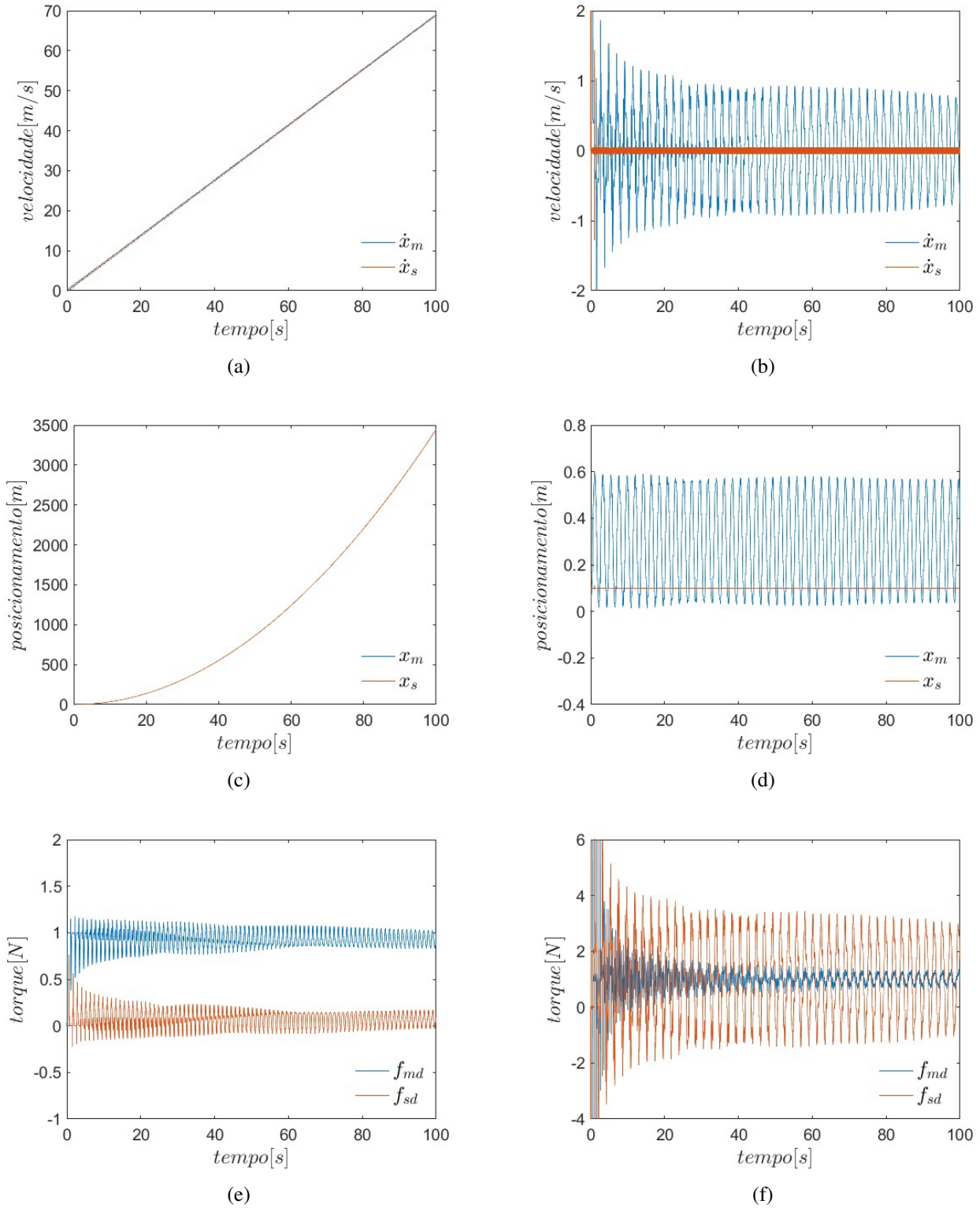
(e)



(f)

Fonte: Produção do autor

Figura 13 – Resposta do sistema de teleoperação com variável de onda quando há atrasos de  $500ms$  no canal de comunicação. (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.



Fonte: Produção do autor

### 4.3 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TELEOPERAÇÃO COM CASAMENTO DE IMPEDÂNCIA

O sistema de teleoperação com casamento de impedância tem como objetivo combinar as impedâncias do dispositivo mestre, do controlador PD e do dispositivo subordinado de acordo com a impedância de onda  $b$ . Para alcançar esse objetivo, elementos de amortecimento  $D$  são adicionados em paralelo ao dispositivo mestre e subordinado, e o elemento de amortecimento  $R$  é adicionado em paralelo ao controlador PD, conforme mostrado na [Figura 14](#). Para analisar o comportamento desse sistema, foram realizados dois testes: um com atraso de  $100ms$  e outro com atraso de  $500ms$  no canal de comunicação. Os parâmetros e ganhos utilizados nesta simulação são os mesmos da simulação anterior, com exceção dos ganhos do controlador PD. Os novos parâmetros  $B$  e  $K$ , e dois elementos de amortecimento,  $D$  e  $R$ , foram calculados com base na equação [3.9](#) e estão listados na Tabela [3](#)

O teste inicial com o sistema de teleoperação com casamento de impedância é ilustrado na [Figura 15](#). A [Figura 15-a](#) mostra as velocidades dos dispositivos mestre  $\dot{x}_m$  e subordinado  $\dot{x}_s$  estabilizada em torno de  $2m/s$ , a [Figura 15-c](#) mostra as posições alcançadas pelos dispositivos mestre  $x_m$  e subordinado  $x_s$  aumentando ao longo do tempo, e a [Figura 15-e](#) mostra as forças desejadas do mestre  $f_{md}$  e do subordinado  $f_{sd}$  estabilizadas em torno de  $0,5N$ . Essas informações de velocidade de posição e de força indicam que o subordinado está se movendo no espaço livre e as impedâncias do sistema estão casadas. De maneira análoga, a [Figura 15-b](#) mostra as velocidades dos dispositivos mestre  $\dot{x}_m$  e subordinado  $\dot{x}_s$  estabilizada em torno de  $0m/s$ , a [Figura 15-d](#) mostra a posição do mestre  $x_m$  estabilizada em torno de  $16cm$  e a posição do subordinado  $x_s$  estabilizada em torno de  $10cm$ , respectivamente, e a [Figura 15-f](#) mostra as forças desejadas do mestre  $f_{md}$  e do subordinado  $f_{sd}$  estabilizadas em torno de  $1N$ . Essas informações de velocidade de posição e de força indicam que o subordinado está em contato com o ambiente remoto e que há um erro de rastreamento de  $\Delta x = 6cm$

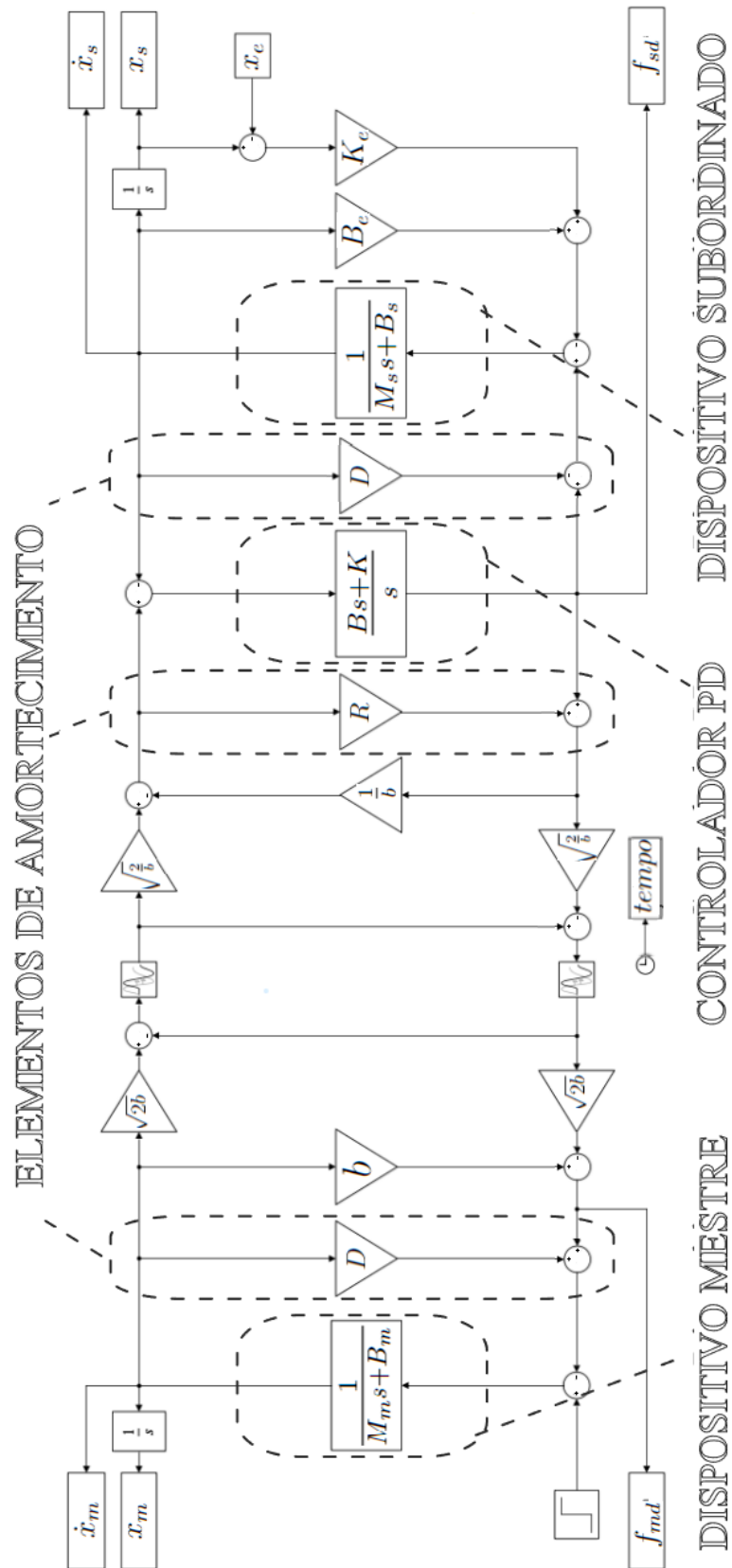
Foi realizado um teste adicional com o sistema de teleoperação baseado em ondas considerando atraso de  $500ms$ . Os resultados estão apresentados na [Figura 16](#). Ao comparar a [Figura 15-a](#), a [Figura 15-c](#) e a [Figura 15-e](#) do primeiro teste com a [Figura 16-a](#), a [Figura 16-c](#) e a [Figura 16-e](#) do segundo teste, observou-se ao aumento o atraso, o sistema continuou casado, mas aumentou o erro de rastreamento. Da mesma forma, ao comparar a [Figura 15-b](#), a [Figura 15-d](#) e a [Figura 15-f](#) do primeiro teste com a [Figura 16-b](#), a [Figura 16-d](#) e a [Figura 16-f](#) do segundo teste, observou-se novamente que o erro de rastreamento aumenta com o aumento do atraso.

Tabela 3 – Parâmetros para a simulação do sistema de teleoperação com casamento de impedância.

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
$T_m$	Tempo de amostragem	10	$s$
$D$	Elemento de amortecimento (mestre e subordinado)	2,5	$Nms^{-1}$
$R$	Elemento de amortecimento (controlador PD)	0	$Nsm^{-1}$
$K$	Ganho proporcional PD	62,5	$Nm^{-1}$
$B$	Ganho derivativo PD	2,5	$Nsm^{-1}$
$T_d$	Tempo de atraso	100 e 500	$ms$

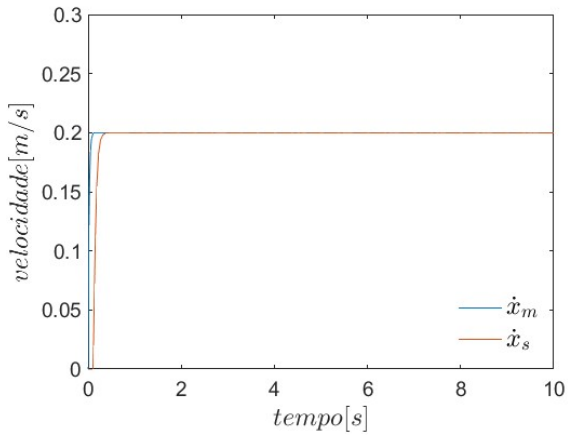
Fonte: Produção do autor

Figura 14 – Diagrama em blocos de um sistema de teleoperação com casamento de impedância

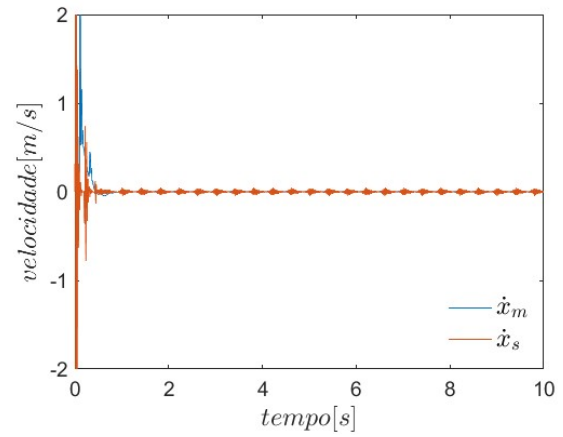


Fonte: Produção do autor

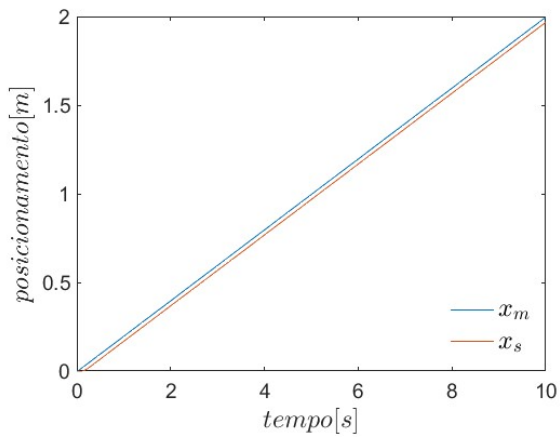
Figura 15 – Resposta do sistema de teleoperação com casamento de impedância quando há atrasos de  $100ms$ . (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.



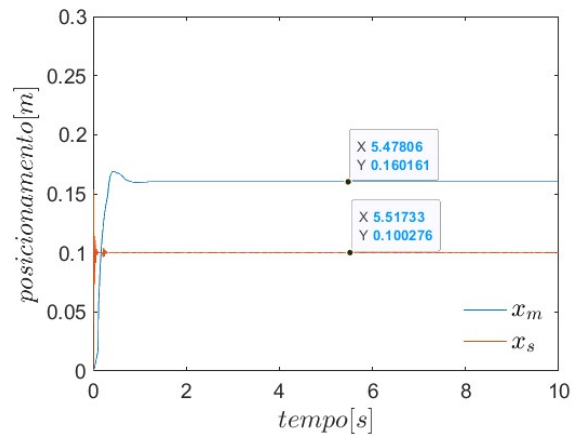
(a)



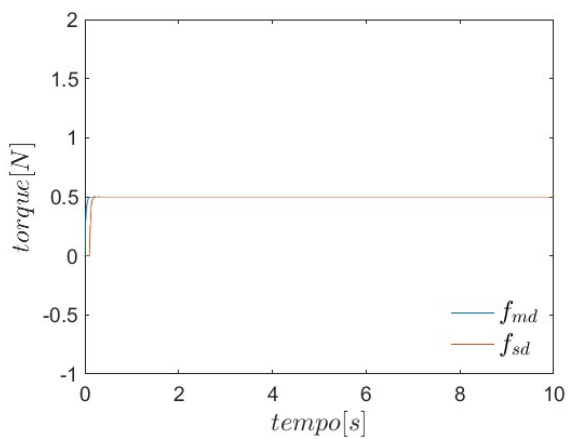
(b)



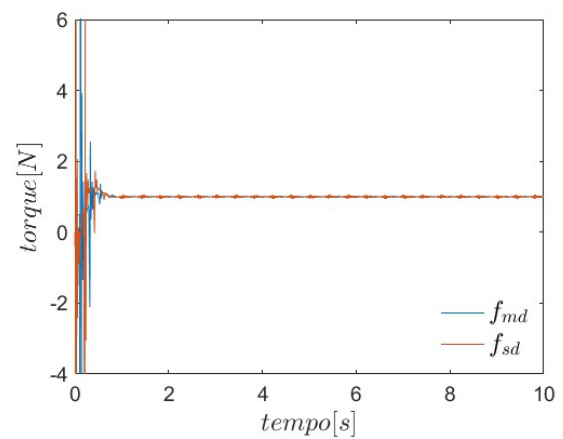
(c)



(d)



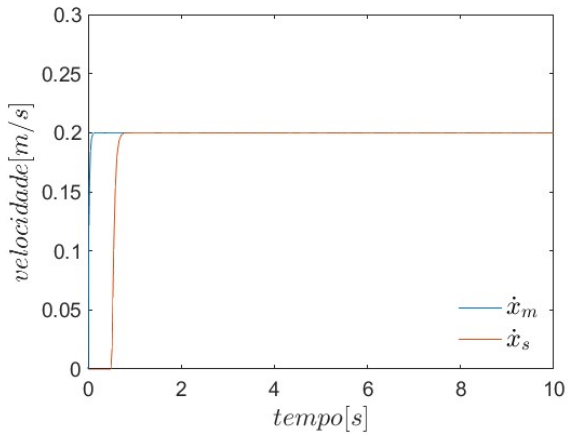
(e)



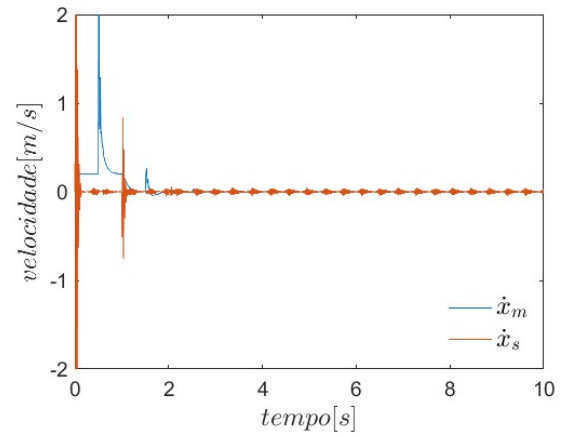
(f)

Fonte: Produção do autor

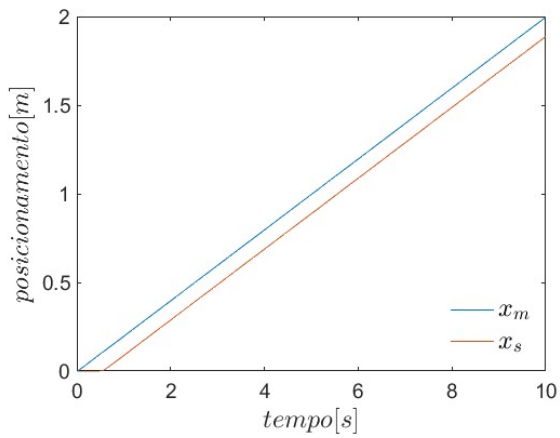
Figura 16 – Resposta do sistema de teleoperação com casamento de impedância quando há atrasos de  $500ms$ . (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.



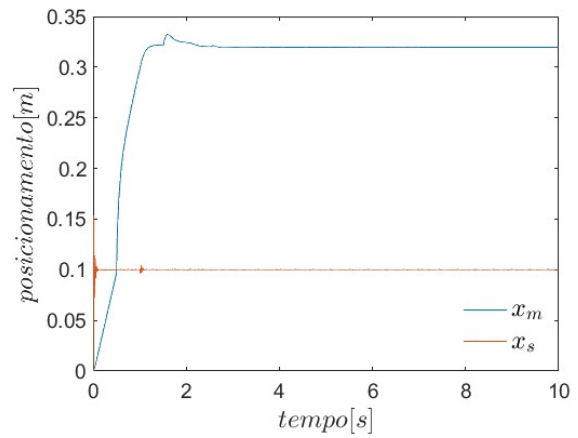
(a)



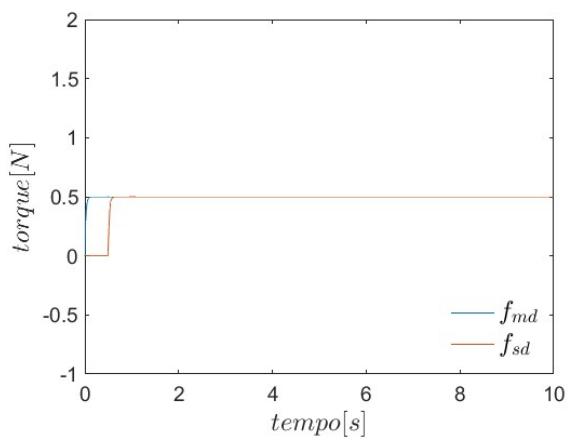
(b)



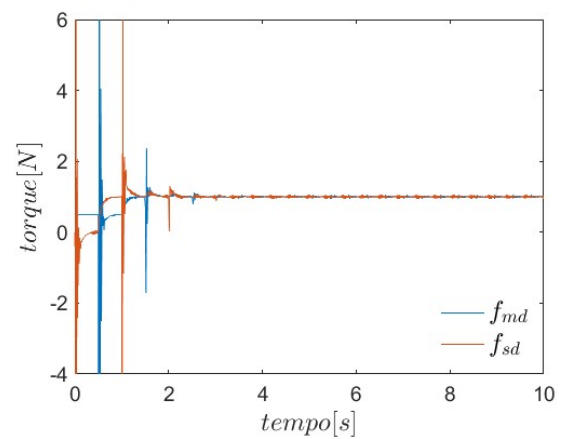
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Produção do autor

#### 4.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TELEOPERAÇÃO BILATERAL COM FILTRAGEM DE ONDA

O sistema de teleoperação com filtragem de onda é projetado para combinar à impedância do sistema de acordo com a restrição de largura de banda  $\lambda$ . Para isso, um filtro passa-baixas de primeira ordem é adicionado ao canal de comunicação, especificamente no caminho da onda direita  $u_s$  como mostrado em [Figura 17](#). O comportamento desse sistema foi analisado com base em dois testes: um com um atraso de  $100ms$  e outro com um atraso de  $500ms$  no canal de comunicação. Os parâmetros e ganhos usados nessa simulação são os mesmos usados na simulação de teleoperação com variáveis de onda, exceto pela massa inercial e amortecimento dos dispositivos mestre e subordinado, Tabela [2](#). Os novos parâmetros foram determinados a partir das equações [3.12](#) e [3.13](#) estão disponíveis na Tabela [4](#).

O teste inicial com o sistema de teleoperação com filtragem de onda é ilustrado na [Figura 18](#). A [Figura 18-a](#) mostra as velocidades dos dispositivos mestre  $\dot{x}_m$  e subordinado  $\dot{x}_s$  estabilizada em torno de  $2m/s$ , a [Figura 18-c](#) mostra as posições alcançadas pelos dispositivos mestre  $x_m$  e subordinado  $x_s$  aumentando ao longo do tempo, e a [Figura 18-e](#) mostra as forças desejadas do mestre  $f_{md}$  e do subordinado  $f_{sd}$  estabilizadas em torno de  $0,5N$ . Essas informações de velocidade de posição e de força indicam que o subordinado está se movendo no espaço livre e as impedâncias do sistema estão casadas. De maneira análoga, a [Figura 18-b](#) mostra as velocidades dos dispositivos mestre  $\dot{x}_m$  e subordinado  $\dot{x}_s$  estabilizada em torno de  $0m/s$ , a [Figura 18-d](#) mostra a posição do mestre  $x_m$  estabilizada em torno de  $15,8cm$  e a posição do subordinado  $x_s$  estabilizada em torno de  $10cm$ , respectivamente, e a [Figura 18-f](#) mostra as forças desejadas do mestre  $f_{md}$  e do subordinado  $f_{sd}$  estabilizadas em torno de  $1N$ . Essas informações de velocidade de posição e de força indicam que o subordinado está em contato com o ambiente remoto e que há um erro de rastreamento de  $\Delta x = 5,8cm$ .

Foi realizado um teste adicional com o sistema de teleoperação baseado em ondas considerando atraso de  $500ms$ . Os resultados estão apresentados na [Figura 19](#). Ao comparar as [Figura 18-a](#), [Figura 18-c](#) e [Figura 18-e](#) do primeiro teste com as [Figura 19-a](#), [Figura 19-c](#) e [Figura 19-e](#) do segundo teste, observou-se ao aumento o atraso, o sistema continuou casado, mas aumento o erro de rastreamento. Da mesma forma, ao comparar as seções [Figura 18-b](#), [Figura 18-d](#) e [Figura 18-f](#) do primeiro teste com as seções [Figura 19-b](#), [Figura 19-d](#) e [Figura 19-f](#) do segundo teste, observou-se novamente que o erro de rastreamento aumenta com o aumento do atraso.

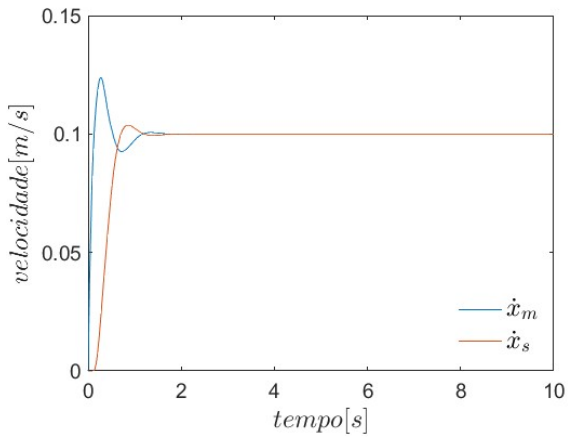
Tabela 4 – Parâmetros para a simulação do sistema de teleoperação com filtro de onda.

Símbolos	Descrição	Valor	Unidade
$T_m$	Tempo de amostragem	10	$s$
$\lambda$	Largura de banda	$\frac{1}{T_d}$	$Hz$
$M'$	Massa inercial dos dispositivos mestre e subordinado	$M_m + bT_d + \frac{b}{\lambda} + M_s$	$Kg$
$B'$	Amortecimento dos dispositivos mestre e subordinado	$2b$	$Nsm^{-1}$
$T_d$	Tempo de atraso	100 e 500	$ms$

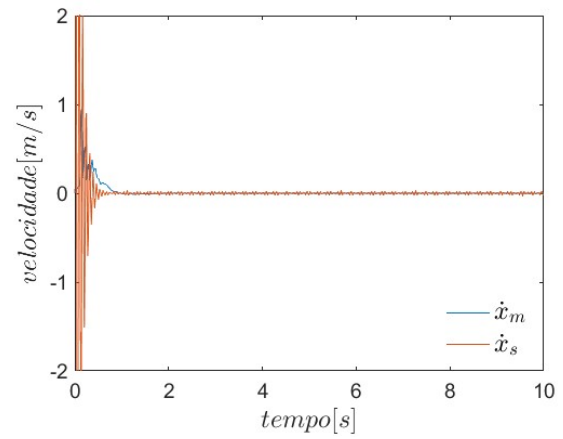
Fonte: Produção do autor



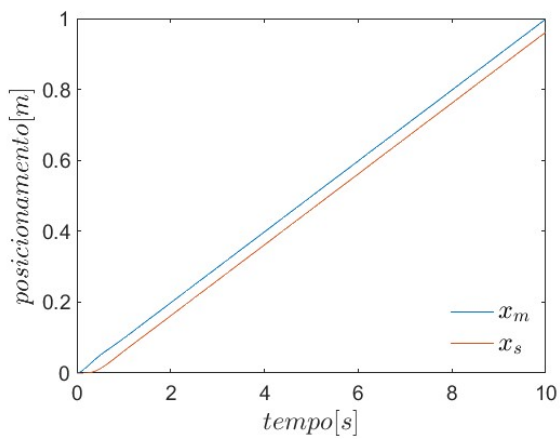
Figura 18 – Resposta do sistema de teleoperação com filtragem de onda quando há atrasos de  $100ms$ . (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.



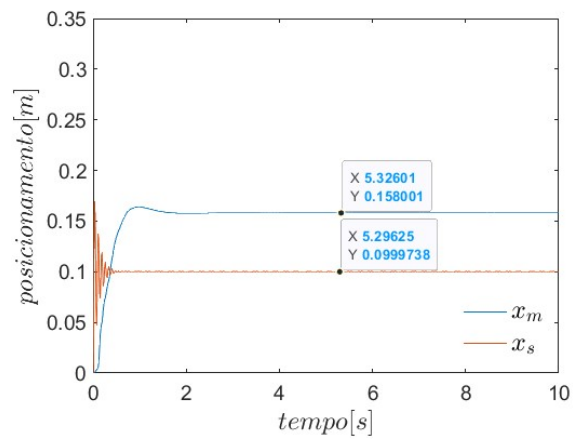
(a)



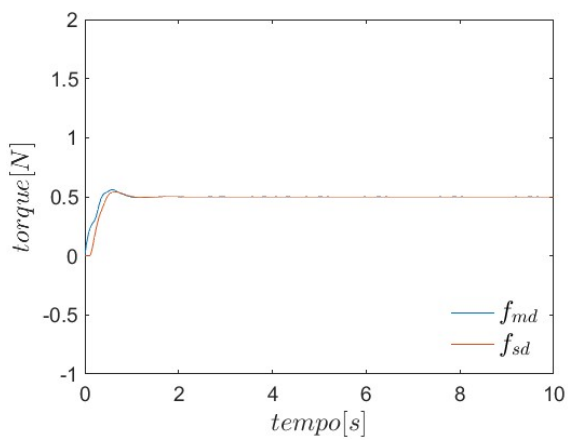
(b)



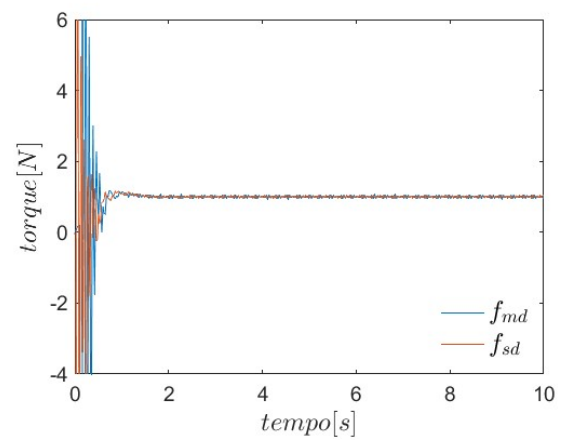
(c)



(d)



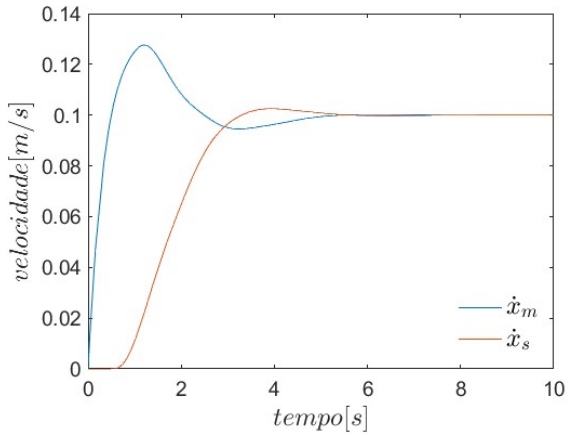
(e)



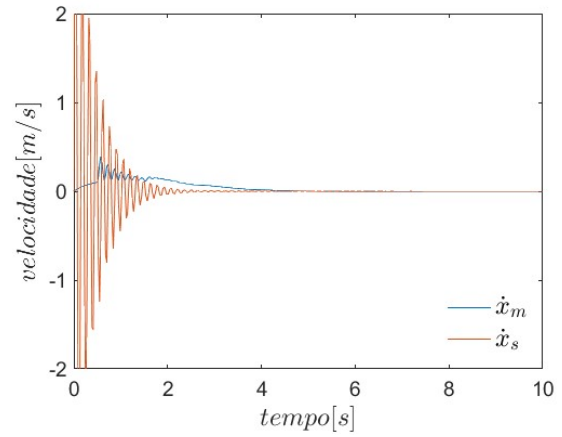
(f)

Fonte: Produção do autor

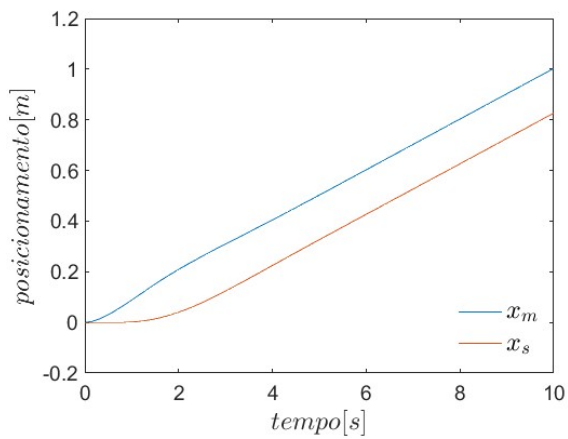
Figura 19 – Resposta do sistema de teleoperação com filtragem de onda quando há atrasos de  $500ms$ . (a), (c) e (e) dispositivo subordinado em movimento livre; (b), (d) e (f) dispositivo subordinado em movimento restrito.



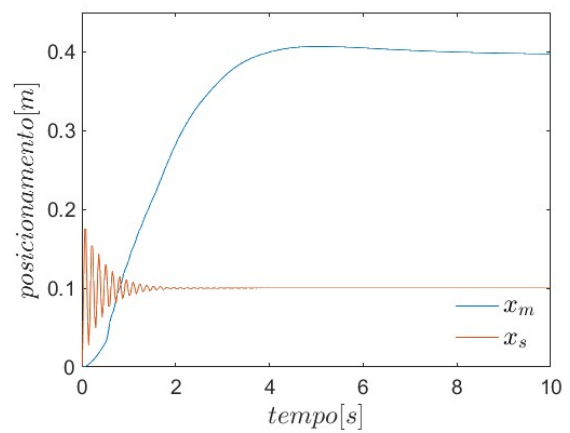
(a)



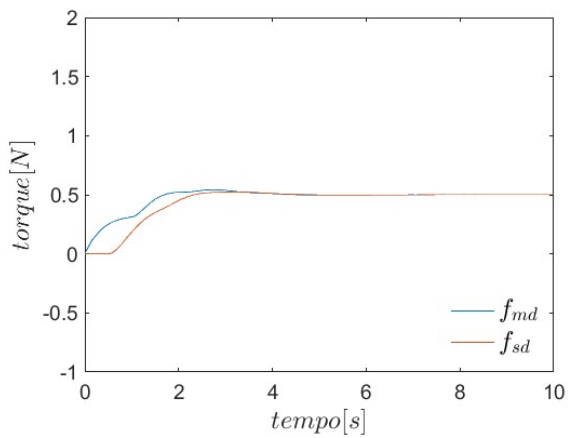
(b)



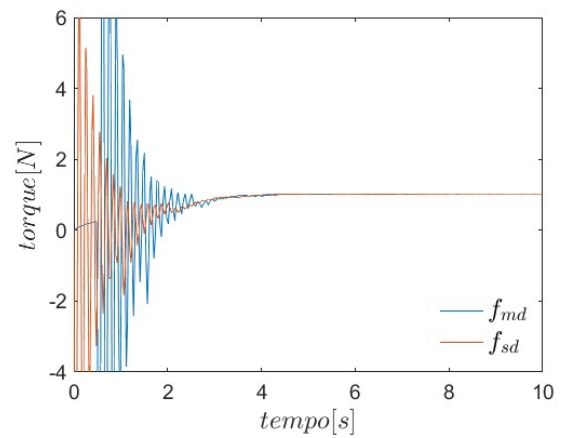
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Produção do autor

## 5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como propósito analisar e avaliar estratégias de controle de teleoperação baseadas em variáveis de onda. Através do areare Matlab/Simulink, identificou-se que o sistema de teleoperação pode sofrer reflexões de onda quando as impedâncias dos componentes, dentro ou entre subsistemas, não estão devidamente casadas. Duas estratégias foram testadas para mitigar os efeitos adversos dessas reflexões: o casamento de impedância e a filtragem de onda. Os resultados da aplicação dessas estratégias indicaram que ambas conseguiram casar as impedâncias do sistema, independentemente do tempo de atraso. Contudo, à medida que o tempo de atraso aumenta, observou-se um incremento no erro de rastreamento.

O método de casamento de impedância é de fácil implementação, elementos de amortecimento são inseridos em paralelo aos dispositivos mestre, subordinado e ao controlador PD, visando especificamente eliminar as componentes de reflexões de onda, sem comprometer as informações de onda originais do sistema. Por outro lado, a filtragem de onda adota uma abordagem extremamente conservadora ao inserir o filtro diretamente na transmissão da onda. Isso resulta na dificuldade do filtro em distinguir entre reflexões da onda e a onda original do sistema, levando à eliminação de parte do sinal de feedback destinado ao operador.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo, foi revisado e examinado apenas dois métodos para lidar com as reflexões das ondas e o desvios de posição que ocorrem em sistemas de teleoperação baseados em ondas: casamento de impedância e filtragem de onda. No entanto, outros dois métodos como integração de onda e transmissões de canal único proposto [Niemeyer e Slotine \(1997\)](#) também podem ser implementados para melhorar o rastreamento de trajetórias dos dispositivos mestre e subordinados.

## REFERÊNCIAS

- ALISE, M. T. Expansion and implementation of the wave variable method in multiple degree-of-freedom systems. 2007. Disponível em: [http://purl.flvc.org/fsu/fd/FSU\\_migr\\_etd-0167](http://purl.flvc.org/fsu/fd/FSU_migr_etd-0167).
- ANDERSON, R.; SPONG, M. Bilateral control of teleoperators with time delay. In: **Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics**. [S.l.: s.n.], 1988. v. 1, p. 131–138.
- CHENG, R. et al. Approach and maneuver for failed spacecraft de-tumbling via space teleoperation robot system. **Acta Astronautica**, v. 181, p. 384–395, 2021. ISSN 0094-5765. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576521000485>.
- DROBINSKY, S. et al. Accuracy of on-site teleoperated milling with haptic assistance. **International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery**, v. 18, n. 11, p. 1969 – 1976, 2023. Cited by: 0; All Open Access, Hybrid Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85164957582&doi=10.1007%2fs11548-023-02983-2&partnerID=40&md5=53f28ab6686bfc545e92153c82dc5054>.
- ERICKSON, D.; WEBER, M.; SHARF, I. Contact stiffness and damping estimation for robotic systems. **The International Journal of Robotics Research**, v. 22, n. 1, p. 41–57, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0278364903022001004>.
- GOERTZ, R. C. Mechanical master-slave manipulator. **Nucleonics (U.S.) Ceased publication**, 11 1954. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/4399868>.
- HOKAYEM, P. F.; SPONG, M. W. Bilateral teleoperation: An historical survey. **Automatica**, v. 42, n. 12, p. 2035–2057, 2006. ISSN 0005-1098. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109806002871>.
- LARCHER, A. et al. Long-distance robot-assisted teleoperation: Every millisecond counts. **European Urology**, v. 83, n. 1, p. 45–47, 2023. ISSN 0302-2838. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0302283822027099>.
- LAWRENCE, D. Stability and transparency in bilateral teleoperation. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 9, n. 5, p. 624–637, 1993.
- LIU, Y.-C. Task-space bilateral teleoperation systems for heterogeneous robots with time-varying delays. **Robotica**, v. 33, n. 10, p. 2065 – 2082, 2015. Cited by: 18. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84945446708&doi=10.1017%2fs0263574714001295&partnerID=40&md5=9eabb326a133c99d987879779c844f10>.
- MADHANI, A.; NIEMEYER, G.; SALISBURY, J. The black falcon: a teleoperated surgical instrument for minimally invasive surgery. In: **Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190)**. [S.l.: s.n.], 1998. v. 2, p. 936–944 vol.2.
- MEINTEL, A. J.; LARSEN, R. L. Nasa research in teleoperation and robotics. In: . [s.n.], 1983. v. 360, p. 22 – 31. Cited by: 2. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0020621489&doi=10.1117%2f12.934080&partnerID=40&md5=2af43c073faf5118b8a28420ca6a1757>.

NIEMEYER, G.; SLOTINE, J.-J. Using wave variables for system analysis and robot control. In: **Proceedings of International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 1997. v. 2, p. 1619–1625.

NIEMEYER, G.; SLOTINE, J.-J. E. Telematipulation with time delays. **The International Journal of Robotics Research**, v. 23, n. 9, p. 873–890, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0278364904045563>.

RöSCH, O. J.; SCHILLING, K.; ROTH, H. Haptic interfaces for the remote control of mobile robots. **Control Engineering Practice**, v. 10, n. 11, p. 1309–1313, 2002. ISSN 0967-0661. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066102001533>.

SUN, D.; NAGHDY, F.; DU, H. Application of wave-variable control to bilateral teleoperation systems: A survey. **Annual Reviews in Control**, v. 38, n. 1, p. 12–31, 2014. ISSN 1367-5788. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578814000030>.

SZABó, G.; VESZPRéMI, K.; SCHMIDT, I. Matlab and simulink-based controlled electric drive software development. In: **2017 International Young Engineers Forum (YEF-ECE)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 79–84.

TANNER, N.; NIEMEYER, G. Improving perception in time delayed teleoperation. In: **Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2005. p. 354–359.

WANG, T.; GAO, J.; XIE, O. Sliding mode disturbance observer and q learning-based bilateral control for underwater teleoperation systems. **Applied Soft Computing**, v. 130, p. 109684, 2022. ISSN 1568-4946. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494622007335>.

XIA, S.-B.; LU, Q.-S. Development status of telesurgery robotic system. **Chinese Journal of Traumatology**, v. 24, n. 3, p. 144–147, 2021. ISSN 1008-1275. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1008127521000481>.

YOON, W.-K. et al. Model-based space robot teleoperation of ets-vii manipulator. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 20, n. 3, p. 602 – 612, 2004. Cited by: 150. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-2942722765&doi=10.1109%2fTRA.2004.824700&partnerID=40&md5=e5ea2b3d2a9ffc46b20b237e0381dc8d>.