



# Projeto e Implementação de Veículo Teleoperado com Transmissão Simulada e *Force Feedback*

Inácio Rodrigues de Matos Galvão | Orientador: Prof. Dr. José Marques Soares | Coorientador: Eng. Me. Artur Rodrigues Rocha Neto  
Curso de Engenharia de Computação | Departamento de Engenharia de Teleinformática | Centro de Tecnologia | Universidade Federal do Ceará (UFC) | Fortaleza, CE, Brasil

## Introdução e Objetivo

Sistemas de teleoperação ganham relevância em **mineração**, **exploração espacial** e **operações militares**. A **latência** e o **retorno háptico** determinam a precisão da tarefa, mas soluções comerciais são caras e complexas.

**Hipótese:** UDP simples sobre Wi-Fi doméstico, combinado a *force feedback* calculado a partir de uma **IMU embarcada**, basta para teleoperação responsiva em *hardware* de **baixo custo**.

**Objetivo:** projetar, implementar e validar uma arquitetura de teleoperação para veículo em **escala 1:5 estilo Fórmula 1**, avaliando latência, perda de pacotes, fidelidade do modelo do motor, resposta háptica, autonomia e comportamento térmico.

## Arquitetura do Sistema

**Três camadas:** (i) **veículo embarcado** com Raspberry Pi 4 (8 GB), câmera OV5647, BMI160, motor DC 775 com ponte H BTS960 e três servos MG996R via PCA9685; (ii) **cliente PC** que decodifica vídeo MJPEG, calcula *force feedback* e exibe telemetria; (iii) **simulador Logitech G923**.

A comunicação usa **três portas UDP separadas** (vídeo, telemetria e comandos), o que evita que *frames* de vídeo bloqueiem os **100 Hz** exigidos pelo retorno háptico. **UDP simples** foi preferido a TCP pelo comportamento diante de perda: perder um dado antigo é preferível a atrasar um dado novo.

## Modelo do Motor

Motor DC 775 com transmissão de cinco marchas. Dinâmica modelada como sistema de primeira ordem:

$$G(s) = \frac{K}{\tau_{\text{eff}} s + 1}, \quad \tau_{\text{eff}} = \tau_{\text{base}}(g) \cdot M_{\text{zona}}.$$

$\tau_{\text{base}}$  cresce de **2 s** (1ª) a **10 s** (5ª);  $M_{\text{zona}}$  vale **1,0** (IDEAL), **10,0** (SUBÓTIMA) e **25,0** (POBRE). Operar em **marcha errada** para a faixa de rotação penaliza a resposta, como em uma transmissão real.

## Force Feedback (G923) e Configuração Experimental

Categoria	Efeitos (sete tipos, oito instâncias)
Condicional (1 kHz no <i>firmware</i> )	Centralização, amortecimento, fricção, inércia
Força ( <i>thread</i> 100 Hz)	<b>Força lateral</b> (G lateral + <i>yaw</i> ); batente virtual nos limites de curso
Vibração ( <i>thread</i> 100 Hz)	<b>Vibração de impacto</b> ; vibração do motor (senoide 5–12,5 Hz)

**Mapeamento direto da IMU:**  $G_{\text{lateral}}$  do BMI160 satura em **100 % a 2 g**, passa por filtro EMA e segue para o motor do volante. *Cache* por efeito reduziu o bloqueio da *thread* de sensores de 12–60 ms para **0–15 ms** por pacote.

9 sessões <i>indoor</i>		4 sessões externas (pista 55,81 m)	
Sess. Foco	Dur.	Sess. Foco	Dur.
S01 Motor escalonado 1ª→3ª	18,0	S1-ext Rolamento unidirecional	2,0
S02 Direção + freio isolados	12,0	S2-ext Direto sem rolamento	15,7
S03 Resolução × filtros de PDI	15,3	S3-ext Direto reforçado (falha térmica)	5,7
S04 Uso representativo completo	15,0	S4-ext Validação do motor retrabalhado	4,7
S05 Curva de descarga da bateria	47,4		
S06 Trocas de marcha rápidas	4,4		
S07 Filtros de PDI combinados	7,0		
S08 Latência fim a fim	5,0		
S09 Calibração do BMI160	12,4		

*Indoor:* rodas livres, sala a 27 ± 2 °C. *Externas:* peso total sobre as rodas, com força G lateral, corrente realista do motor e comportamento térmico em regime.

## Discussão e Conclusão

**UDP simples** + modelo de primeira ordem + *force feedback* direto entregam teleoperação responsiva em *hardware* de baixo custo. Latência em **1,1× a meta**, com gargalo no Wi-Fi compartilhado, **não no veículo**. Migrar para enlace dedicado reduziria o p50 em **uma ordem de grandeza** sem alteração do código. Limitação principal foi **estrutural, não eletrônica**: chassi em PLA e suportes do motor cederam em pista.

## Resultados

Subsistema	Métrica	Critério	Resultado
<b>Comunicação UDP (9 sessões <i>indoor</i>)</b>			
Latência fim a fim	p50 / p99 ( <i>chrony</i> )	< 100 ms	<b>55,3 / 107,7 ms</b>
Latência interna RPi	p50 / p99 (814 mil amostras)	< 1 ms	<b>0,22 / 0,40 ms</b>
Perda de pacotes	Agregado / sem S03 (1080p)	< 1 %	<b>0,46 / 0,13 %</b>
<b>Vídeo, sensores e pipeline</b>			
Câmera OV5647	FPS em 480p / 1080p	≥ 25	<b>60 / 54 fps</b>
Sensor BMI160	Taxa efetiva / erro [g]	≥ 95 Hz	<b>100 Hz / &lt; 1 %</b>
Sensor BMI160	Calibração geométrica (S09)	—	<b>&lt; 0,5°</b>
Pipeline RPi	Violações de <i>budget</i> (10 ms)	0	<b>0 / 983 mil</b>
<b>Force feedback (G923)</b>			
Latência sensor-atuação	p50 / p99	< 50 ms	<b>5,0 / 10,5 ms</b>
Força lateral em pista	Pico em S2-ext	—	<b>39 %</b>
Vibração de impacto	Saturação em pista	—	<b>92–96 %</b>
<b>Energia, térmica e mecânica</b>			
Consumo médio	<i>Indoor</i> (S05) / pista (S1-ext)	—	<b>8,8 / 27,0 W</b>
Autonomia projetada	Em pilotagem real	≥ 15 min	<b>90–120 min</b>
Temperatura RPi	CPU média / pico	< 80 °C	<b>18–20 % / &lt; 50 °C</b>
Temperatura do motor	S1-ext / S2-ext / S3-ext	—	<b>33 / 40,1 / 56,1 °C</b>

## Protótipo



Figura 1: Protótipo F1 em escala 1:5 utilizado nas 13 sessões experimentais.

## Diagrama de Camadas

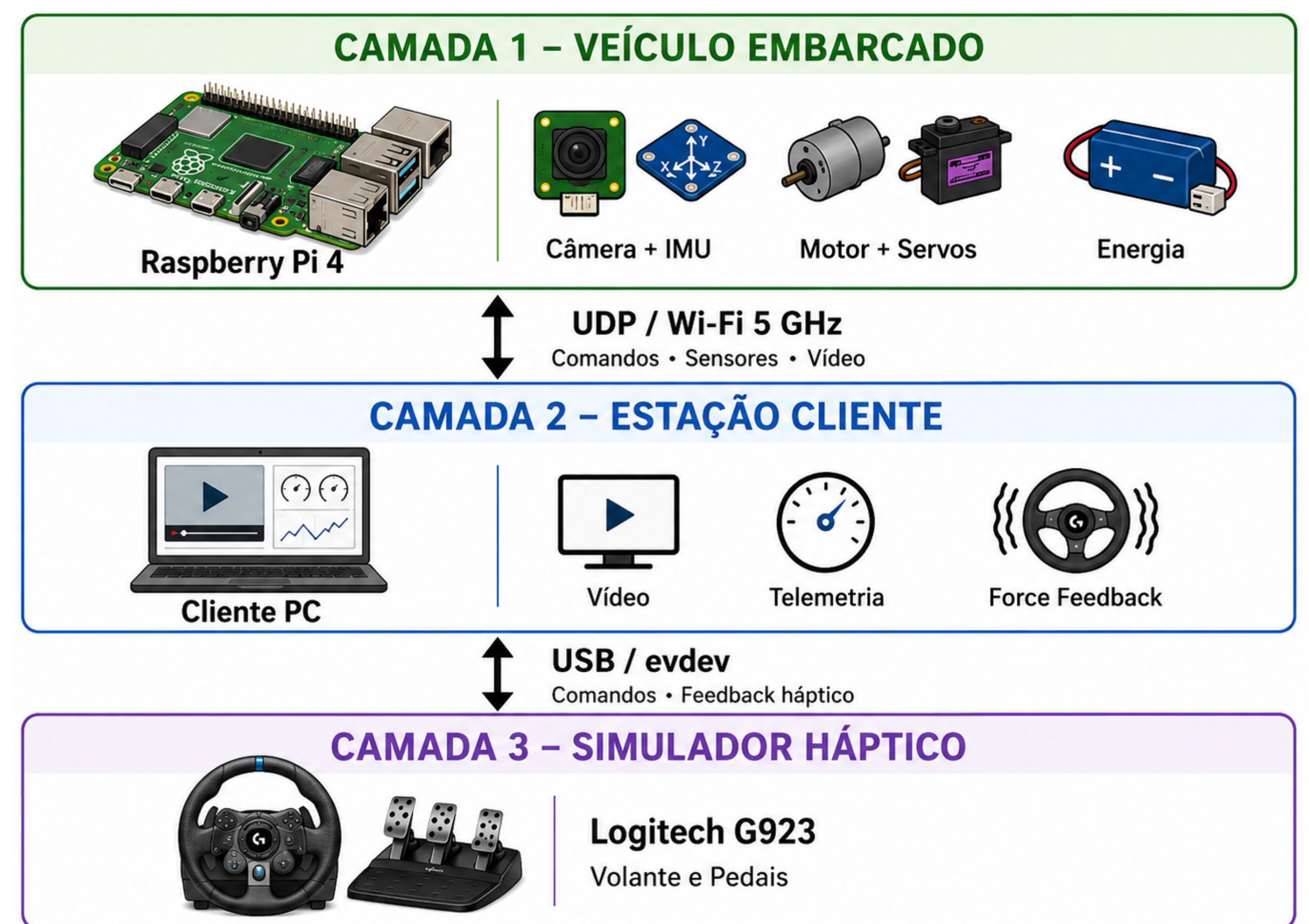


Figura 2: Arquitetura de três camadas e três portas UDP independentes (vídeo, telemetria, comandos).

## Zonas de Eficiência

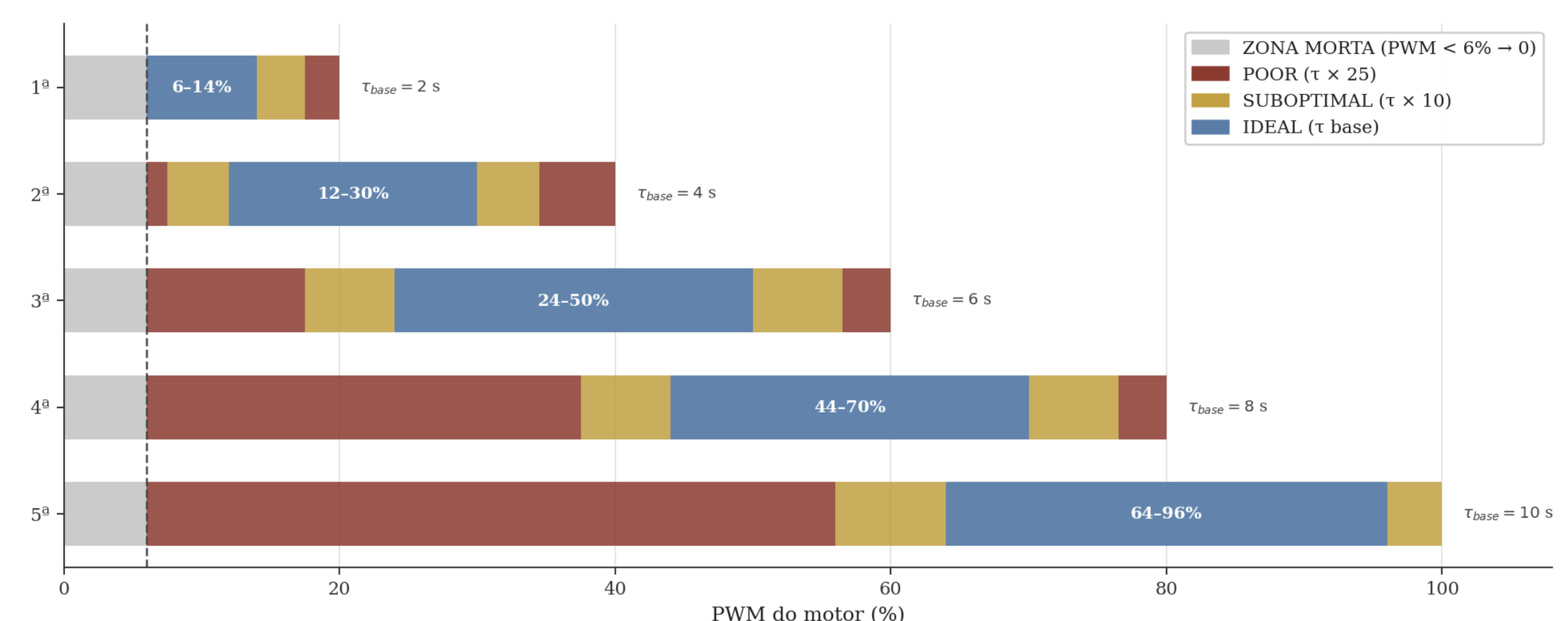


Figura 3: Zonas de eficiência por marcha e constantes de tempo  $\tau_{\text{base}}$ .

## Referências Seleccionadas

- Dreger, P. *et al.* Haptic feedback for human-controlled robotic cranes. *Mechatronics*, 2024.
- Lu, Y. *et al.* UDP-RT: reliable UDP for power line networks. *Computer Networks*, 2023.
- Bekele, A. *et al.* UDP with acknowledgement in IoT. 2024.
- Heryana, A. *et al.* Real-time evaluation in teleoperation. 2022.

