

2.2 Montagem

A montagem dos sistema embarcado para o sistema de feedback háptico é composto pelo sensor de força, amplificador, Raspberry Pi Pico e cabos de conexão. Dessa forma, o sistema apresenta uma boa portabilidade, facilitando a implementação em dispositivos vestíveis.

Entretanto, para análise dos dados e estudo do desempenho do protótipo, foi acoplado um acelerômetro ao atuador ressonante linear, e um Arduino Uno foi utilizado para fazer a leitura do acelerômetro. Os microcontroladores foram, então, conectados ao computador para aquisição dos dados para as análises. Assim, o sistema ficou modelado de acordo com a Figura 1.

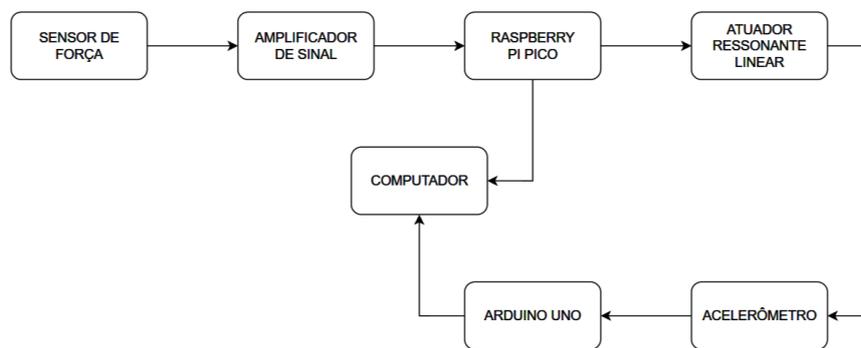


Figura 1: Modelagem do protótipo de realimentação sensorial.

Ademais, foi utilizado o osciloscópio para ler a tensão entregue pelo sensor de força após ser amplificada e também para observar a forma de onda quadrada na saída PWM do Raspberry Pi Pico, que é controla a intensidade de vibração do atuador ressonante linear.

2.3 Lógica de funcionamento

A lógica de funcionamento do projeto consiste em captar um sinal de força aplicado em um sensor e converter em intensidade de vibração. A força aplicada na superfície do sensor gera um sinal de tensão que, por sua vez, é amplificado pelo amplificador até uma tensão de aproximadamente 2,8 V. O sinal amplificado é conectado a uma entrada ADC do Raspberry Pi Pico, programado em MicroPython – linguagem de programação baseada em Python para o microcontrolador. O sinal de força, por sua vez, é utilizado para modular o duty cycle de um sinal de PWM, permitindo uma variação de 0% a 50%, pois em 50% que ocorre a maior intensidade de vibração do LRA.

Durante o processamento do sinal de força, o microcontrolador Pico lê em sua entrada ADC um valor de 16 bits, referenciado a uma tensão máxima de 2,8 V, com uma frequência de amostragem de 500 Hz. Na sequência, o valor de força passa por uma equação de conversão para definir o Duty Cycle que será entregue ao vibrador. Essa equação deve linearizar a relação entre a intensidade de aceleração da vibração do LRA com a tensão referente a força aplicada no sensor, oferecendo um feedback sensorial mais adequado possível. Entretanto, o LRA não apresenta uma relação linear entre

sua intensidade de vibração e o duty cycle do sinal de PWM. Portanto, primeiro, foi necessário identificar a relação de controle do vibrador, isto é, a relação entre aceleração e duty cycle, para então forçar uma relação linear entre o duty cycle e a força aplicada.

2.4 Ajuste da relação entre Aceleração e Duty Cycle

Durante os testes, fez-se uma varredura dos valores do duty cycle de 0% a 50% em passos de (0,2%) e com um intervalo de duração de 3 s por duty cycle. Então, foi medida a aceleração de pico-a-pico em cada trecho, eliminando os primeiros e últimos 0,5 s por corresponder a um período transitório. Como observado na Figura 2A, a curva é semelhante a uma distribuição gaussiana e, baseando-se nessa característica, buscou-se a equação da curva que pudesse descrevê-la, obtendo a equação da aceleração de pico-a-pico dada por

$$a_{pp} = a_{pp,max} \cdot e^{-\frac{(DC-50)^2}{33,8^2}} \quad (1)$$

onde a_{pp} é a aceleração instantânea, $a_{pp,max}$ é a aceleração máxima do vibrador, que, no caso, foi $6,5 \text{ m/s}^2$, e DC é o duty cycle do sinal de PWM.

2.5 Ajuste da relação entre Aceleração e Força

O ajuste linear entre a força e a aceleração deve seguir a equação:

$$a_{pp} = \frac{a_{pp,max}}{F_{max}} \cdot F \quad (2)$$

onde F_{max} é o valor máximo de tensão referente à força aplicada, e F a tensão instantânea da força.

Igualando as equações (1) e (2), obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{F}{F_{max}} \cdot a_{pp,max} = a_{pp,max} \cdot e^{-\frac{(DC-50)^2}{33,8^2}} \quad (3)$$

Portanto, isolando o duty cycle (DC), obtém-se:

$$DC = 50 - 33,8 \cdot \sqrt{-\ln\left(\frac{F}{F_{max}}\right)} \quad (4)$$

O sinal de força é primeiramente filtrado por um filtro Butterworth digital passa-baixas de terceira ordem com frequência de corte de 15 Hz com objetivo de suavizar o sinal. Por fim, com o sinal processado e filtrado, é enviado um sinal de onda quadrada, tipo PWM, de 175 Hz com o respectivo duty cycle. Essa frequência de 175 Hz é a frequência de ressonância do LRA. Para possibilitar boa resolução do duty cycle (0,2%), o sinal de PWM foi gerado com uma frequência de amostragem aproximadamente 11,36MHz.

Para a validação da linearização entre força e aceleração (equação 3), foram testados diferentes valores de tensão (referente à força), e mensurada a aceleração. Para manter uma precisão e um resultado teórico coerente, esta análise foi feita com valores controlados de tensão, via software, antes de partir para os testes práticos, via sensor

de força. Para tanto, foi feita a varredura de tensão de 0 a 2,8V, em passos de 0,1V, e duração de 3 s, e calculada a aceleração de pico-a-pico do vibrador para cada tensão, novamente eliminando 0,5 s do período transitório. A 2B mostra o resultado desta análise, indicando um comportamento aproximadamente linear da aceleração em função da tensão (força).

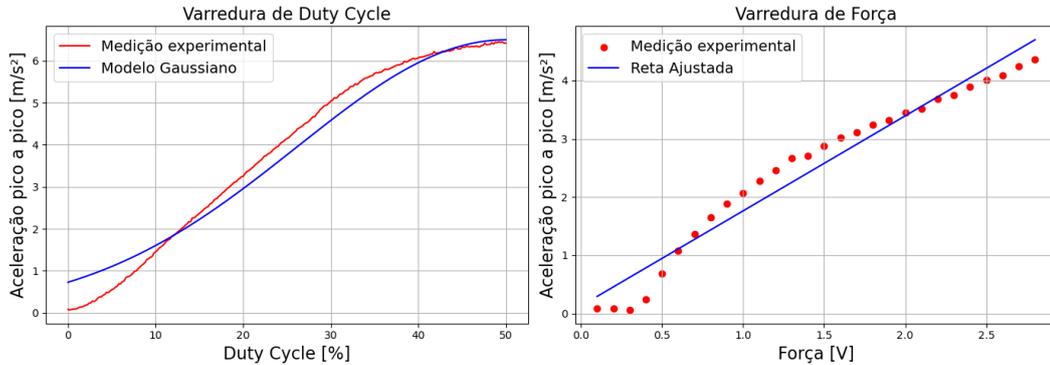


Figura 2: (A) Valores de aceleração no modelo experimental (vermelho) e Gaussiano (azul) de acordo com o duty cycle do sinal de PWM. (B) Aceleração encontrada durante o teste de linearidade com a tensão aplicada (vermelho) em comparação com o valor teórico (azul).

2.6 Validação do Protótipo

Como validação do protótipo, foi aplicada uma pressão crescente sob o sensor de força, e avaliada a relação linear entre a força e a vibração. Para possibilitar a comparação entre o sinal de aceleração com a força, foi necessário suavizar o sinal oscilatório da aceleração. Para tanto, primeiramente, foi obtido o módulo da aceleração e, a partir da detecção dos picos a cada 4 amostras (pela função *scipy.signal.findpeaks*), foi feita uma interpolação dos valores. Assim, esses valores obtidos foram suavizados por um filtro Butterworth passa-baixa de quarta ordem e frequência de corte de 15 Hz. Para mensurar a linearidade entre a aceleração suavizada e a força aplicada, foi realizado um ajuste da curva, e obtido o coeficiente de determinação.

3 Resultados e Discussão

Nos testes realizados, espera-se que a vibração do LRA acompanhe o sinal da força aplicada de forma minimamente linear.

Na Figura 3A, no decorrer do tempo (em amostras), tem-se a tensão amplificada do sensor de força (vermelho), o módulo da aceleração lida pelo acelerômetro (cinza) e uma curva suavizada referente aos picos de aceleração (preto).

Na Figura 3B, mostra-se os valores de pico a pico da aceleração para cada valor de tensão (pontos azuis) e o ajuste de curva por método de regressão linear (reta vermelha). O coeficiente de determinação calculado teve um valor de 0,98, indicando um bom ajuste linear.

Com esses gráficos, é possível observar que, embora haja um erro maior durante os valores extremos de tensão aplicados (0V e 2,8V), há uma faixa relativamente linear entre os valores de aceleração e a tensão (como pode ser observado entre 0,6V e 2,3V). Ademais, é importante ressaltar que na equação 4, para valores de tensão $F < 0,314$, obtêm-se números de duty cycle negativos. Por este motivo, não há vibração até esta intensidade de força.

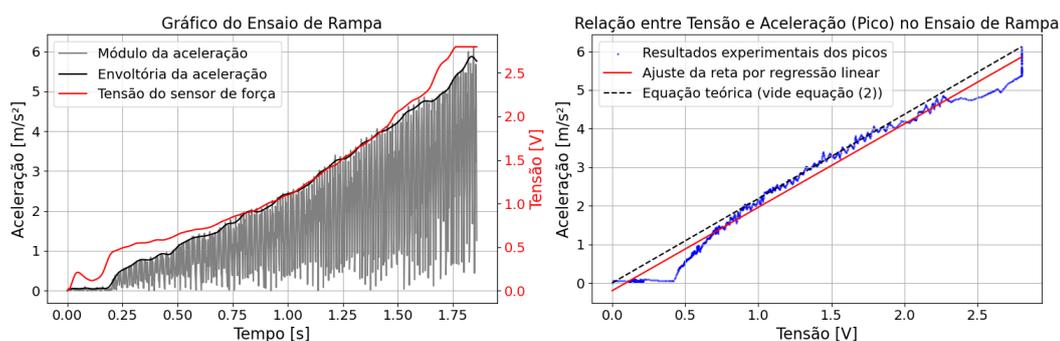


Figura 3: Gráficos referentes ao ensaio de rampa.

4 Conclusão

Em suma, o objetivo de desenvolver um sistema de realimentação tátil que converte a força de contato em uma intensidade de vibração apresenta resultados interessantes. Até o presente momento, com base nos testes já realizados, o projeto apresenta uma resposta vibratória diretamente proporcional à força aplicada, devido a linearização feita entre o sinal de força de entrada e a aceleração de saída.

Referências

- [1] P. J. Kyberd and W. Hill, “Survey of upper limb prosthesis users in sweden, the united kingdom and canada,” *Prosthetics & Orthotics International*, vol. 35, p. 234–241, June 2011.
- [2] S. Raspopovic, G. Valle, and F. M. Petrini, “Sensory feedback for limb prostheses in amputees,” *Nature Materials*, vol. 20, p. 925–939, Apr. 2021.
- [3] T. Rosenbaum-Chou, W. Daly, R. Austin, P. Chaubey, and D. A. Boone, “Development and real world use of a vibratory haptic feedback system for upper-limb prosthetic users,” *JPO Journal of Prosthetics and Orthotics*, vol. 28, p. 136–144, Oct. 2016.