

Estimação do ângulo de uma junta antropomórfica a tempo real mediante sensor resistivo flexível

Laiza Araujo Gordiano Oliveira¹, Armando S. Sanca (*Orientador*)²

¹ Curso de Engenharia de Computação
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
44036-900 - Feira de Santana, BA - Brasil

²Departamento de Tecnologia
Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS)
44036-900 - Feira de Santana, BA - Brasil

lgordiano@ecomp.uefs.br, armando@ecomp.uefs.br

Abstract. *The flexometer, also known as a flex sensor or resistive flex sensor (RFS), is a sensitive device that varies its resistance in response to bending. This study investigates the application of the RFS in accurately estimating angular displacements, with an emphasis on its potential for assistive technologies aimed at people with disabilities. The work focuses on the analysis and mitigation of hysteresis effects, a phenomenon in which the sensor's response is influenced by its deformation history. Through a detailed analysis of hysteresis and the use of the Preisach model, significant insights were obtained for the effective compensation of this effect. This study contributes to a deeper understanding of hysteresis in flexible sensors and its implications for the development of more accurate and responsive assistive devices, thereby improving the quality of life for users.*

Resumo. *O flexômetro, conhecido também como sensor flex ou sensor resistivo flexível (RFS), é um dispositivo sensível que varia sua resistência característica em resposta a uma flexão em seu corpo. Este estudo investiga a aplicação do RFS na estimativa de deslocamentos angulares com precisão, com ênfase em seu potencial para tecnologias assistivas voltadas a pessoas com deficiência. O trabalho se concentra na análise e mitigação dos efeitos da histerese, um fenômeno em que a resposta do sensor é influenciada por seu histórico de deformação. Através de uma análise detalhada da histerese e da utilização do modelo de Preisach, foram obtidos insights significativos para a compensação eficaz desse efeito. Este estudo contribui para o aprofundamento do conhecimento sobre histerese em sensores flexíveis e suas implicações para o desenvolvimento de dispositivos assistivos mais precisos e responsivos, melhorando assim a qualidade de vida dos usuários.*

1. Introdução

Conforme a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua) de 2022, a população com deficiência no Brasil foi estimada em 18,6 milhões de pessoas com 2 anos ou mais, representando 8,9% da população total. Essa diversidade de

deficiências reflete a complexidade da condição humana. Dentre essas pessoas, 3,4% enfrentam dificuldades para caminhar ou subir degraus, destacando-se como uma das principais limitações físicas dentro desse grupo populacional [IBGE 2023].

Diante dessas estatísticas, fica evidente a necessidade de avanços tecnológicos que melhorem a qualidade de vida das pessoas com deficiência, especialmente no que diz respeito à reabilitação e acessibilidade. No caso específico das deficiências motoras nos membros inferiores, a estimativa precisa dos movimentos realizados ao caminhar é fundamental para o desenvolvimento de dispositivos assistivos personalizados. Mensurar as trajetórias articulares de forma precisa permite propor dispositivos que auxiliem na mobilidade, melhorando assim a qualidade de vida dos indivíduos.

Nesse contexto, os sensores de flexão surgem como uma solução viável na concepção de dispositivos assistivos, pois permitem a coleta de dados precisos em sistemas vestíveis com um custo relativamente baixo, sendo adequados para a aplicação proposta neste trabalho. A literatura apresenta três tipos principais desses sensores: o sensor óptico [Zimmerman 1985], o sensor capacitivo [Neely and Restle 1997] e o sensor resistivo flexível (RFS) [Saggio et al. 2015].

Portanto, este trabalho tem como objetivo explorar a utilização do RFS para a medição do ângulo de flexão e extensão dos membros articulares. Com isso, busca-se contribuir com uma proposta tecnológica que ofereça alternativas mais acessíveis e eficientes para pessoas com deficiência, visando melhorar sua mobilidade e qualidade de vida.

O RFS possui propriedades piezoresistivas, ou seja, sua resistência varia em resposta à flexão ou extensão do material [Sanca et al. 2018]. Quando flexionado ou estendido, o RFS descreve uma curva característica de natureza não linear, exibindo o fenômeno da histerese [Saggio and Orengo 2018]. A histerese é uma propriedade de certos materiais que faz com que a saída do sensor não retorne ao estado original mesmo após a remoção do estímulo externo [Brokate and Sprekels 2012]. Portanto, para que o RFS seja utilizado como estimador preciso de deslocamento angular, o efeito de memória causado pela histerese deve ser compensado.

2. Estudos recentes sobre a Histerese e o Modelo de Preisach

Estudos recentes investigaram a compensação da histerese, abordando questões de implementação e sugestões para obter um desempenho satisfatório. Um estudo recente conduzido em [Kim and Kim 2017], foi investigada a resposta piezoresistiva do compósito CNT/PDMS sob carga compressiva, identificando a presença de histerese na relação de tensão de saída e à carga aplicada. Os resultados destacaram a importância crítica de compreender e mitigar a histerese ao projetar e caracterizar sensores flexíveis baseados em materiais piezoresistivos, dada sua capacidade de introduzir não linearidades e imprecisões nas medições de carga ou deformação, comprometendo a confiabilidade e a precisão do sensor em diversas aplicações práticas.

No contexto da modelagem dos efeitos de histerese nos atuadores piezoeletétricos (PAD do inglês: Piezoelectric Actuator Drive), em [Zsurzsán et al. 2015] explorou o uso de um modelo de Preisach discreto. Esse modelo foi selecionado devido à sua popularidade como ferramenta de modelagem de histerese, bem como à sua relativa simplicidade

e facilidade de implementação. O estudo envolveu a medição de 50 curvas de reversão de histerese para construir o modelo, a partir das quais as funções de Everett correspondentes foram extraídas. A validação do modelo foi realizada em relação a uma variação de entrada aleatória, demonstrando uma precisão relativa de 95,8% na estimativa do deslocamento ou posicionamento do motor.

Além disso, em [de Almeida et al. 2001] foi a aplicabilidade do modelo clássico de Preisach para descrever a histerese térmica em sensores de filmes finos de dióxido de vanádio (VO). Nesse, foi investigada a histerese presente na região de transição de fases, com características assimétricas, para atender às condições necessárias e suficientes para a aplicabilidade do modelo de Preisach.

2.1. O modelo de Preisach

A histerese é um fenômeno intrínseco a sistemas físicos e tecnológicos, onde a mudança atual é influenciada por mudanças passadas. Ao abordar o conceito de histerese, frequentemente nos deparamos com uma relação entre duas quantidades escalares dependentes do tempo, que não podem ser descritas por uma função unívoca [Brokate and Sprekels 2012], mas que se manifestam na forma de laços. Esse fenômeno é de interesse significativo em diversos campos científicos e tecnológicos de ponta, incluindo áreas que tratam com sistemas dinâmicos complexos e processamento de sinais. O estudo do fenômeno da histerese é crucial para compreendermos os comportamentos não lineares e históricos de sistemas, onde a resposta do sistema não é apenas uma função das condições presentes, mas também de seu histórico [Brokate and Sprekels 2012].

Existem diversos modelos matemáticos que são usados para compensar os efeitos de histerese, um desses modelos é o modelo de Preisach [Brokate and Sprekels 2012]. O modelo escalar clássico de Preisach é fundamentado na representação do efeito de histerese através de uma coleção infinita de elementos descontínuos, chamados histerons básicos, que se comportam como relés [Zsurzsán et al. 2015]. Esses histerons estão conectados em paralelo e são representados por $\gamma_{\alpha\beta}[u(t)]$. Cada histeron possui dois limiares, α e β , que indicam os estados “ligado” e “desligado”, respectivamente, com $\beta \leq \alpha$. Quando o sinal de entrada $u(t)$ excede o limiar α , a saída do histeron muda para o estado “alto” e retorna ao estado “baixo” somente quando a entrada se torna menor que β . Durante o intervalo entre os limiares, o valor anterior é mantido. A equação (1), descreve tal comportamento.

$$\gamma_{\alpha\beta}[u(t)] = \begin{cases} 1, & u(t) \geq \alpha; \\ \gamma_{\alpha\beta}[u(t)], & \beta < u(t) < \alpha; \\ 0, & u(t) \leq \beta. \end{cases} \quad (1)$$

A representação do operador básico de histerese, como ilustrado graficamente na Figura 1, reflete a propriedade da função nos quais a saída não depende apenas da entrada atual, mas também dos valores anteriores da entrada. Essa não linearidade com efeito de memória não local é característica da histerese [Zsurzsán et al. 2015].

Para modelar uma relação entrada-saída $u(t) \Rightarrow y(t)$ com histerese, uma superposição das saídas dos histerons básicos são ponderadas com uma função de ponderação experimentalmente determinada por $\mu(\alpha, \beta)$. A determinação dessa função

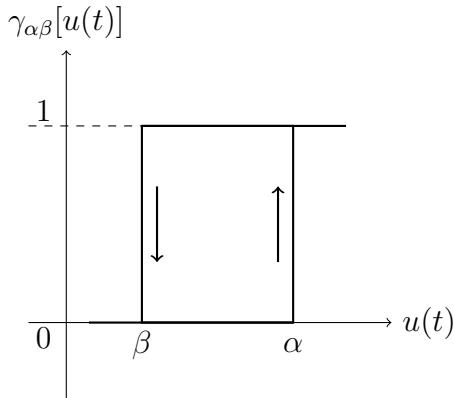


Figura 1. Representação gráfica do operador relé.

representa o principal desafio na derivação e utilização do modelo de histerese de Preisach, como descrito pela equação (2) [Zsurzsán et al. 2015].

$$y(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}[u(t)] d\alpha d\beta. \quad (2)$$

Onde $\mu(\alpha, \beta)$ é uma função de peso não negativa, representando os pesos de cada histeron no plano de Preisach $S = \{(\alpha, \beta) : \alpha \geq \beta, \alpha \leq \alpha_m, \beta \geq \beta_m\}$, onde α_m e β_m referem-se aos valores mais altos e mais baixos para α e β , respectivamente. O plano de Preisach S pode ser geometricamente dividido em duas sub-regiões, S^+ , que corresponde a relés com valor de saída 1, e S^- , correspondendo a valores de saída de 0, segundo [Stakvik et al. 2015].

O uso do operador $\gamma_{\alpha\beta}$ permite uma formulação genérica da equação, possibilitando sua aplicação para representar uma variedade de fenômenos de histerese, desde que obejam certas propriedades básicas[SENA et al. 2001].

Para compreender como a saída é influenciada, imagine que em um instante de tempo inicial t_0 , a entrada seja $u(t_0) = u_0$, que é menor que o limiar mínimo β_m . Isso significa que todos os elementos de relé atrasados têm uma saída de 0. Se aumentarmos gradualmente a entrada até atingir um máximo em outro instante t_1 com u_1 , então os elementos de relé abaixo do limiar u_1 serão ativados, enquanto os acima dele serão desativados. Similarmente, se diminuirmos gradualmente a entrada até atingir outro instante u_2 em t_2 , os elementos de relé acima do limiar u_2 serão desativados. Essa sequência de eventos é o que influencia a saída conforme descrito na equação (2) [SENA et al. 2001].

3. Metodologia e Desenvolvimento

3.1. Materiais utilizados

3.1.1. O Sensor Resistivo Flexível

O RFS, é um dispositivo sensível que muda a resistência característica em resposta à flexão no seu corpo. Esse sensor é caracterizado em [Sanca et al. 2018] é fundamentado o

princípio do efeito piezoresistivo, onde a resistência elétrica em materiais semicondutores ou metálicos varia sob a aplicação de uma determinada carga.

Atualmente, o RFS está em destaque em diversas áreas, incluindo a robótica, realidade virtual e, especialmente, nos sistemas vestíveis empregados na reabilitação. Segundo [Saggio and Orengo 2018], sensores flexíveis representam uma solução eficaz para a medição de ângulos de flexão em articulações humanas, desempenhando um papel fundamental na avaliação da postura e cinemática do corpo. No contexto da reabilitação, o sensor desempenha um papel vital ao permitir a análise dos movimentos articulares e musculares dos pacientes [Eugênio 2018]. No entanto, esse sensor sofre com a não linearidade associada à histerese, que impacta diretamente a capacidade do sensor em fornecer leituras precisas e consistentes.

A histerese, no RFS, manifesta-se como uma diferença entre as respostas das suas resistências a um nível de deformação comum durante os ciclos de flexão e extensão. Em outras palavras, a posição ou o ângulo medido pode variar dependendo da deformação prévia, mesmo que a deformação aplicada seja a mesma. Quando o RFS é deformado, ocorrem alterações microestruturais nos materiais que o compõem, resultando em uma redistribuição de tensões e deformações internas. Essas alterações podem não ser completamente reversíveis quando a deformação é removida, levando a uma diferença na resposta do RFS durante a flexão e extensão subsequente.

3.1.2. O Microcontrolador STM32

Para a implementação do sistema de aquisição de dados, foi utilizado o microcontrolador STM32H750, fabricado pela STMicroelectronics. A família de microcontroladores STM32, é amplamente reconhecida por sua flexibilidade e desempenho, possibilitando a implementação de uma variedade de sistemas embarcados, desde dispositivos simples alimentados a bateria até sistemas complexos de tempo real, como helicópteros autopilotados [Brown 2012].

3.1.3. Encoder Rotativo Incremental

Um encoder incremental é um dispositivo eletromecânico utilizado para medir a posição, a velocidade e a direção de um eixo rotativo. Ele gera sinais de pulsos elétricos enquanto o eixo gira, e a contagem desses pulsos permite determinar a posição relativa e a velocidade do movimento. Encoders incrementais são amplamente utilizados em aplicações de automação, controle de motores e robótica devido à sua alta precisão e confiabilidade.

No desenvolvimento do nosso protótipo, integramos um encoder rotativo incremental para obter medições mais precisas dos parâmetros críticos do sistema usando somente RFS. A inclusão do encoder incremental foi motivada pela necessidade de ter uma referência padrão para o rastreamento das trajetórias executadas e a precisão das medições comparado com o RFS utilizado.

3.2. Desenvolvimento e Montagem do Sistema

3.2.1. Montagem da Eletrônica Embarcada

A montagem do circuito foi a primeira etapa do projeto, com toda a instrumentação eletrônica para fazê-lo funcionar. No entanto, o Conversor Analógico-Digital (ADC) do STM32H750, de LVTTL (3,3V), as variações das tensões do RFS, precisam de uma etapa de condicionamento de sinal. Com isso, foi projetado um condicionador usando uma Amplificador de Instrumentação (AmpIn). Assim, o sinal de saída do AmpIn projetado gerou os níveis de tensão compatíveis com o ADC do STM32, para o melhor aproveitamento da resolução do conversor.

O software do projeto foi programado na plataforma STM32CubeIDE devido à sua compatibilidade avançada com microcontroladores STM32, além das facilidades que a ferramenta integrada oferece, como configuração dos periféricos e facilidade de inicialização da programação.

4. Resultados Alcançados

Durante o desenvolvimento deste plano de trabalho, foram alcançados resultados significativos, demonstrando a eficácia do sistema projetado, suas capacidades e demais melhorias para a integração em sistemas vestíveis.

4.1. Precisão e Desempenho do RFS

O RFS e o encoder foram acomodados numa estrutura rotativa produzida por impressão 3D, para o fornecimento das leituras das variações de flexão/extensão.

O sinal do RFS, antes de ser enviado para o ADC, o projeto do AmpIn foi desenvolvido da seguinte forma; com características importantes a serem consideradas no processo de condicionamento para o ganho e o offset do amplificador. O cálculo começa medindo a tensão do RFS nas flexões entre 0° e 90°, sendo os valores medidos de 4,7V e 6,0V, respectivamente.

4.2. Apresentação dos dados dos sensores e suas respectivas curvas de histerese fornecidos pelo Encoder e pelo RFS

Os valores coletados foram normalizados para serem apresentados os deslocamentos angulares em graus e são dados por: Para o encoder

$$\hat{\text{ângulo}}_{Encoder}(\text{graus}) = \frac{(\text{Valor do Encoder}) \cdot 90}{586} \quad (3)$$

onde:

- o valor mínimo do Encoder é 0, representando 0°
- o valor máximo é aproximadamente 586 pulsos, representando 90°

e para o RFS

$$\hat{\text{ângulo}}_{RFS}(\text{graus}) = \frac{(\text{Valor do RFS} - 47) \cdot 90}{(2539.67 - 47)} \quad (4)$$

onde:

- o valor mínimo do RFS é 47, representando 0°
- o valor máximo é aproximadamente 2539.67, representando 90°

As Figuras 2, 3 e 4 mostram os experimentos realizados de flexão/extensão em função das amostras coletadas pelo Encoder e RFS. Os dados foram coletados com velocidades: normal, lenta, rápida e também com oscilações, fazendo movimentos de flexão e extensão no protótipo. A linha tracejada representa os dados do RFS e a outra linha representa os dados do Encoder, os gráficos mostram as diferenças entre ambos sinais, respectivamente.//

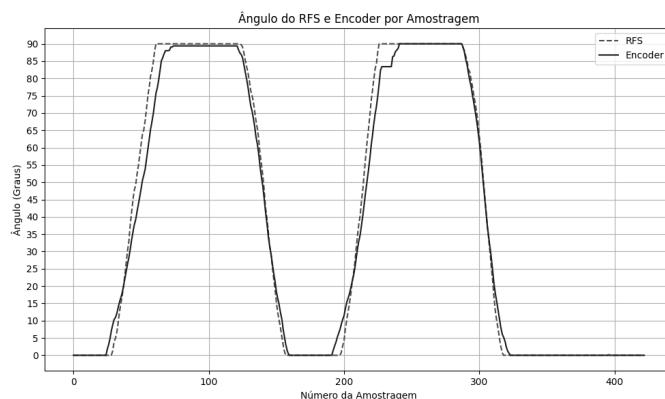


Figura 2. Gráficos do ângulo de curvatura do Encoder e do RFS coletados na velocidade normal.

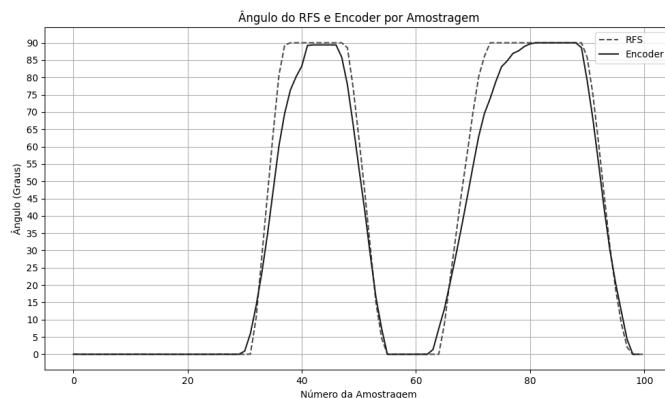


Figura 3. Gráficos do ângulo de curvatura do Encoder e do RFS coletados na velocidade rápida.

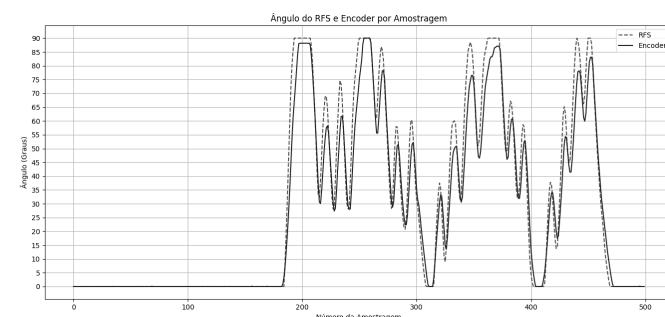


Figura 4. Gráficos do ângulo de curvatura do Encoder e do RFS coletados com oscilações na flexão e extensão.

Observa-se que ambas as linhas seguem um comportamento semelhante, com elevações e quedas repentinas no ângulo medido. No entanto, há algumas diferenças sutis entre os dois sinais, especialmente em momentos de transição, onde o ângulo aumenta ou diminui. Isso ocorre devido ao atraso (histerese) presente no RFS.

4.3. Gráficos da relação entre Encoder e RFS

Os gráficos a seguir mostram a relação entre encoder e o sensor de flexão. O encoder foi usado para mostrar precisão na coleta do ângulo e ao fazer a comparação é perceptível a histerese presente no sensor RFS, trazendo a não linearidade no valor coletado.

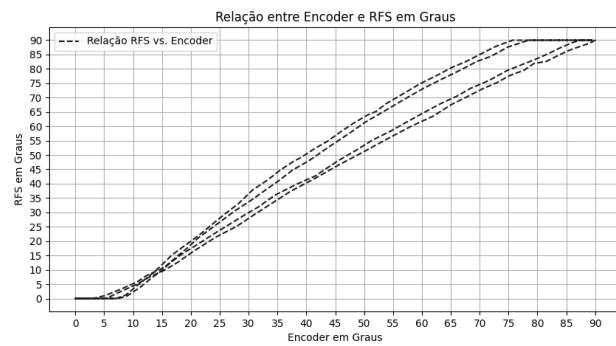


Figura 5. Gráfico da relação entre RFS e Encoder com dados coletados em velocidade normal.

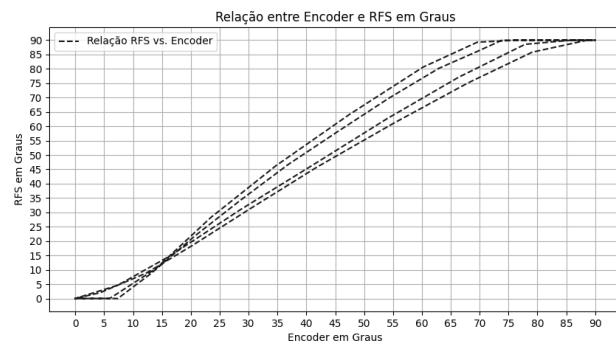


Figura 6. Gráfico da relação entre RFS e Encoder com dados coletados em velocidade rápida.

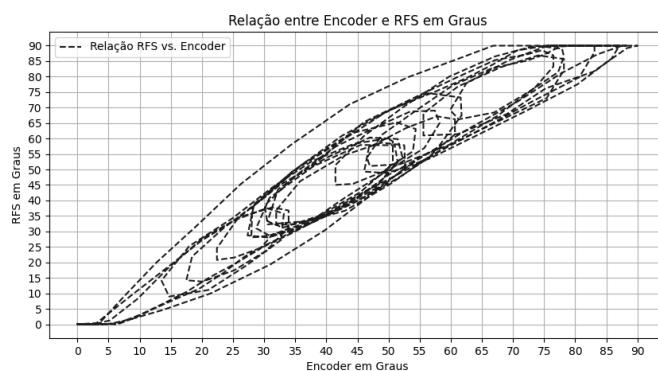


Figura 7. Gráfico da relação entre RFS e Encoder com dados lidos com oscilação na extensão e flexão.

Os gráficos mostram uma única linha que representa a relação entre o encoder e o sensor resistivo flexível (RFS), indicando que existe uma histerese significativa. Nos gráficos em questão é possível observar como os valores se comportam de forma não linear. Em termos práticos, histerese significa que o sistema não retorna ao mesmo estado quando o valor do Encoder é o mesmo. A histerese tem um impacto prático significativo em sistemas vestíveis que utilizam sensores resistivos flexíveis (RFS), especialmente em aplicações que demandam precisão em tempo real, como monitoramento de movimentos porque afeta a exatidão das leituras do sensor.

4.4. Entendimento sobre Histerese e o Modelo de Preisach

Muito esforço foi dedicado à compreensão do fenômeno da histerese e à exploração do modelo Preisach como uma maneira de compensar seus efeitos indesejáveis. Uma revisão abrangente da literatura nos forneceu uma visão mais profunda dos princípios da histerese e seu impacto na estimação precisa do ângulo obtido a partir dos sensores. O estudo do modelo nos forneceu informações úteis sobre como o modelo poderia ser usado para efetivamente caracterizar e em seguida compensar a histerese, melhorando assim a precisão e a estabilidade do sistema estimador. Contudo, é importante notar que essa é apenas uma discussão teórica ainda, e é necessário aplicar esses conhecimentos de maneira computacional. O passo seguinte seria, portanto, usar implementar o modelo inverso de Preisach para compensar a histerese nos dados do RFS, tornando sua trajetória linear.

5. Conclusão

Neste trabalho, foi abordado a utilização do Sensor Resistivo Flexível para a estimativa de deslocamentos angulares, com o intuito de esclarecer o fenômeno da histerese e sua contribuição na imprecisão das medições. Foi proposto o uso do modelo de Preisach para compensação no plano de trabalho, mas não foram finalizadas as implementações, apenas a representação das curvas de histerese. O uso de um microcontrolador STM32H750 usando a plataforma do STM32CubeIDE, junto com as implementações eletrônicas e a programação foi possível disponibilizar uma plataforma para dar sequência ao processo computacional do compensador a tempo real.

O estudo detalhado do fenômeno da histerese e do modelo de Preisach permite uma aplicação prática na implementação de compensadores para sistemas que usam dispositivos RFS e novas possíveis abordagens para a compensação. No entanto, é preciso salientar que desafios consideráveis estão na implementação prática do modelo de Preisach, e o estudo mais aprofundado e implementação de algoritmos computacionais mais robustos, necessários para a integração efetiva do modelo ao sistema e melhora da precisão e estabilidade de medição.

Em resumo, o trabalho contribuiu para o avanço do conhecimento e aplicação acerca da histerese em RFS, e cria uma base sólida para futuros trabalhos e projetos de pesquisa nesta área de sistemas de medição e controle. O trabalho apresentado até aqui, apesar de representar um avanço pequeno, será a base para a busca de soluções mais robustas para a compensação da histerese, os quais tornarão possível a utilização destes dispositivos em sistemas vestíveis.

Referências

- Brokate, M. and Sprekels, J. (2012). *Hysteresis and phase transitions*, volume 121. Springer Science & Business Media.
- Brown, G. (2012). Descobrindo o microcontrolador stm32.
- de Almeida, L. A. L., Deep, G. S., Lima, A. N., Neff, H. F., and Freire, R. C. S. (2001). A hysteresis model for a vanadium dioxide transition-edge microbolometer. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50(4):1030–1035.
- Eugênio, K. J. d. S. (2018). Sistema multissensorial vestível de baixo custo para captura de marcha humana aplicado a exoesqueleto ortopédico ortholeg 2.0. Master's thesis, Brasil.
- IBGE (2023). Pesquisa nacional por amostra de domicílios contínua - pessoas com deficiência, 2022. Acesso em: 10 set. 2024.
- Kim, J.-S. and Kim, G.-W. (2017). Hysteresis compensation of piezoresistive carbon nanotube/polydimethylsiloxane composite-based force sensors. *Sensors*, 17(2):229.
- Neely, J. S. and Restle, P. J. (1997). Capacitive bend sensor. US Patent 5,610,528.
- Saggio, G. and Orengo, G. (2018). Flex sensor characterization against shape and curvature changes. *Sensors and Actuators A: Physical*, 273:221–231.
- Saggio, G., Riillo, F., Sbernini, L., and Quitadamo, L. R. (2015). Resistive flex sensors: a survey. *Smart Materials and Structures*, 25(1):013001.
- Sanca, A. S., Rocha, J. C., Eugenio, K. J., Nascimento, L. B., and Alsina, P. J. (2018). Characterization of resistive flex sensor applied to joint angular displacement estimation. In *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pages 33–38. IEEE.
- SENA, J. A. d. S. et al. (2001). Adaptação do modelo de Preisach para histereses assimétricas: aplicação ao caso vo2.
- Stakvik, J. Å., Ragazzon, M. R. P., Eielsen, A. A., and Gravdahl, J. T. (2015). On implementation of the Preisach model identification and inversion for hysteresis compensation.
- Zimmerman, T. (1985). Optical flex sensor (united states patent no. us4542291a).
- Zsurzsán, T.-G., Andersen, M. A., Zhang, Z., and Andersen, N. A. (2015). Preisach model of hysteresis for the piezoelectric actuator drive. In *IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pages 002788–002793. IEEE.