

DESENVOLVIMENTO DE UM DATASET PARA TREINAMENTO DE ALGORITMOS DE CONTROLE NÃO LINEAR BASEADOS EM DADOS UTILIZANDO UM SISTEMA BOLA E PLACA

William Rodrigo Lüdtke, williamr.ludtke@gmail.com¹
Giuliana Sardi Venter, giuliana.venter@ufpr.br¹

¹Universidade Federal do Paraná, Av. Cel. Francisco H. Dos Santos, 230, Centro Politécnico, Bloco IV, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba/PR

Resumo. Plataformas Stewart-Gough (PSG) são manipuladores paralelos com diversas aplicações, controlando precisamente posição e orientação de objetos em todos os seis graus de liberdade. Geralmente controladas utilizando estratégias de controle clássicas, quando utilizamos uma PSG para o controle de trajetória de uma esfera em uma placa, temos uma aplicação relevante para avaliação de estratégias de controle não-linear, implementadas analiticamente ou baseadas em dados. Este estudo descreve a criação de um conjunto de dados para treinamento de algoritmos de controle não-linear baseados em dados, usando um sistema bola e placa com sensor de tela sensível ao toque, acoplado a uma PSG atuada por servomotores. Os parâmetros coletados foram posição da esfera, ângulo dos servomotores e tempo decorrido. Foi realizado tratamento do sinal de posição para redução de ruído. Os dados foram coletados considerando seis cenários diferentes, onde a esfera foi posicionada e permitiu-se que o sistema atuasse para trazê-la até a posição alvo, enquanto dados eram registrados. Após estabilização da esfera, o cenário era repetido, totalizando dez repetições por setor. Foi realizado tratamento posterior dos dados para utilização. Foi observada boa concordância entre procedimento experimental e dados obtidos. O conjunto de dados foi disponibilizado publicamente para uso didático.

Palavras chave: Inteligência artificial. Dataset. Controle não-linear. Plataforma Stewart-Gough. Sistema bola e placa.

Abstract. Stewart-Gough Platforms (SGP) are parallel manipulators with diverse applications, precisely controlling position and orientation of objects in all six degrees of freedom. Generally controlled using classical control strategies, when we use a SGP to control the trajectory of a sphere on a plate, we have a relevant application for evaluating non-linear control strategies, implemented analytically or based on data. This study describes the creation of a dataset for training data-driven nonlinear control algorithms, using a ball and plate system with a touch screen sensor, coupled to a SGP actuated by servomotors. The collected parameters were sphere position, servomotor angle and elapsed time. Position signal processing was performed to reduce noise. Data was collected considering six different scenarios, where the sphere was positioned and the system was allowed to act to bring it to the target position, while data was recorded. After stabilizing the sphere, the scenario was repeated, totaling ten repetitions per sector. Further processing of the data was carried out for use. Good agreement was observed between the experimental procedure and data obtained. The dataset was made publicly available for education purposes.

Keywords: Artificial intelligence. Dataset. Nonlinear control. Stewart-Gough platform. Ball and plate system.

1. INTRODUÇÃO

O manipulador paralelo com seis graus de liberdade (GDL) foi inicialmente proposto por Gough (1962), onde duas plataformas, uma fixa e outra móvel, foram conectadas utilizando seis atuadores lineares. Anos mais tarde, Stewart (1965) sugeriu uma implementação similar para um simulador de voo. Este tipo de manipulador passou a ser conhecido como plataforma Stewart-Gough (PSG), ou simplesmente plataforma de Stewart (Dasgupta e Mruthyunjaya, 2000). Aplicações incluem simuladores de movimento, de voo, telescópios astronômicos, entre outros (Xu, *et al.*, 2018).

O sistema de bola e viga é um problema bem conhecido para aplicações de controle não linear (Kassem, *et al.*, 2015). Uma expansão deste sistema é o sistema de bola e placa (SBP), que consiste em uma esfera que pode rolar livremente sobre uma superfície. Um sistema composto por um SBP acoplado a uma PSG com seis GDL torna-se um caso interessante para avaliação de estratégias de controle não linear (Kassem, *et al.*, 2015). Vieira (2022) desenvolveu um protótipo de plataforma Stewart-Gough com SBP integrado, utilizando controle PID para posicionamento da esfera. O equipamento encontra-se disponível no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, para uso didático.

O controle de sistemas dinâmicos não lineares por métodos tradicionais muitas vezes torna-se ineficiente (Xu, *et al.*, 2018). Atualmente, muitos destes sistemas tem sido aproximados por modelos baseados em dados (*data-driven*), como os modelos de regressão e de aprendizado de máquina (AM) (Brunton e Kutz, 2022). Nguyen, *et al.*, (2020), Jabbari Asl e Janabi-Sharifi (2017) e Xu, *et al.*, (2018) estudaram diferentes esquemas de controle adaptativo de robôs paralelos baseados em redes neurais. Dobriborsci, *et al.*, (2017) descreveram um sistema de controle utilizando visão computacional para uma PSG com dois graus de liberdade. Vários estudos foram também realizados para sistemas bola e placa. Kassem, *et al.*, (2015) estudaram diferentes estratégias de controle estático e dinâmico de um SBP sobre uma PSG. Ali, *et al.*, (2022), Maldonado, *et al.*, (2021) e Yaovaja (2018) aplicaram técnicas de AM para SBP's sobre PSG's.

Quando consideramos que o sistema de bola e placa é um problema relevante para avaliação de estratégias de controle não linear (Kassem, *et al.*, 2015); que manipuladores paralelos são de grande interesse por sua rigidez, precisão e capacidade de sobrecarga (Masory e Jian Wang, 1994; Nguyen, *et al.*, 2020); que o desenvolvimento de métodos de controle para robôs paralelos é de grande importância teórica e valor prático (Xu, *et al.*, 2018); que muitos sistemas dinâmicos tem sido aproximados por modelos baseados em dados, em particular os modelos de regressão e de aprendizado de máquina (Brunton e Kutz, 2022); e que uma série de trabalhos tem buscado desenvolver aplicações de aprendizado de máquina em SBP's acoplados a plataformas de Stewart, considera-se relevante desenvolver uma base de dados que possa ser utilizada para o desenvolvimento de modelos de controle *data-driven*.

Assim, este trabalho se propôs a gerar um conjunto de dados experimentais, utilizando um sistema bola e placa sobre plataforma Stewart-Gough disponível fisicamente no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, para treinamento de modelos de aprendizado de máquina para o controle deste sistema e similares.

2. METODOLOGIA

Este trabalho é parte de um conjunto de atividades que estão sendo desenvolvidas dentro do Laboratório de Monitoramento e Controle (LaMoC) da UFPR para a criação de um modelo de controle *data-driven* para o sistema físico disponível no laboratório. Estas atividades podem ser divididas em três grandes etapas: preparação dos dados, implementação dos modelos e análise dos resultados (Fig. 1). O escopo deste trabalho trata da fase de preparação, onde foram selecionadas as *features* de interesse (dados a serem coletados), foi realizada a captação de dados do *dataset*, o tratamento deste *dataset* e a criação de *features* derivadas.

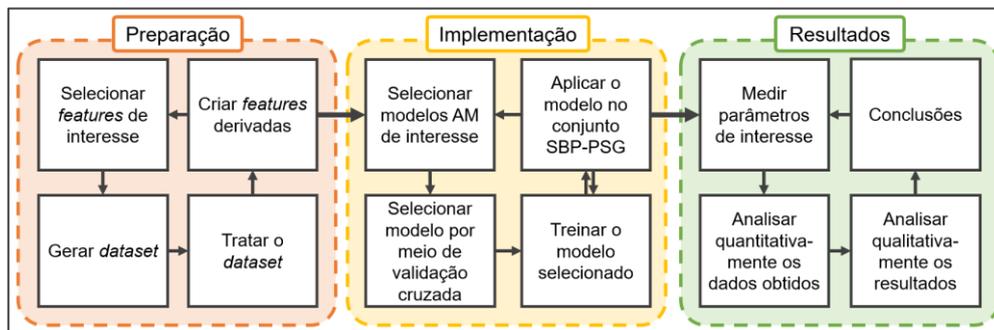


Figura 1. Fluxograma geral de atividades (o autor, 2024)

Os componentes principais do sistema de controle do SBP-PSG disponível fisicamente (Vieira, 2022) são seis servo motores MG90D, um Servo Driver PCA9685, uma tela resistiva de 4 vias e um microcontrolador Arduino Uno R3. O arranjo elétrico destes componentes é demonstrado na Fig. 2. Como o foco deste trabalho encontra-se no modelo de controle aplicado ao microcontrolador, as entradas do modelo de controle neste caso são a posição objetivo e o sinal de posição continuamente recebido do sensor resistivo, enquanto as saídas do microcontrolador são os sinais de controle para cada Servo Driver. A saída serial do microcontrolador foi utilizada para captação dos dados, sendo estes então registrados em um arquivo externo. Assim, foram selecionados como parâmetros de interesse a serem registrados para o dataset: as coordenadas de posição captadas pela tela resistiva, as coordenadas da posição objetivo, os sinais de comando enviados pelo microcontrolador ao servo driver, e a marcação de tempo (*timestamp*) de cada ponto de dados. Foi adicionado também um parâmetro de sinalização (*flag*) que indica quando certas condições ocorrem na execução do programa de controle, que modificam o comportamento do microcontrolador. O único sensor utilizado para captação de dados foi a tela resistiva, visto que é o único atuando no SBP-PSG durante sua operação. Os sinais de comando foram considerados como as saídas do microcontrolador Arduino, na expectativa de que o modelo seja capaz de se adaptar a efeitos causados pelo Servo Driver, pelos servo-motores ou por folgas e imperfeições na plataforma física.

O modelo de controle original de Vieira (2022) foi modificado para este trabalho. O código passou a utilizar funções para suas principais ações, de forma a facilitar a leitura do código principal e das ações dentro de cada função (Fig. 3), além de permitir testar alterações no funcionamento de funções específicas. Além disso, os parâmetros de execução do programa foram substituídos por variáveis, podendo ser facilmente ajustados por meio da definição destas variáveis em

um determinado bloco de código onde estas foram agrupadas. Os parâmetros ajustáveis selecionados foram a posição objetivo da esfera, os parâmetros do controlador PID, a distância de transição de comportamento, o tempo de estabilização de tensão da tela resistiva, o número de amostras por medida de posição, o número de tentativas de medição por laço de repetição, a tolerância de posição para limiarização e os ângulos mínimo e máximo permitidos para os servomotores.

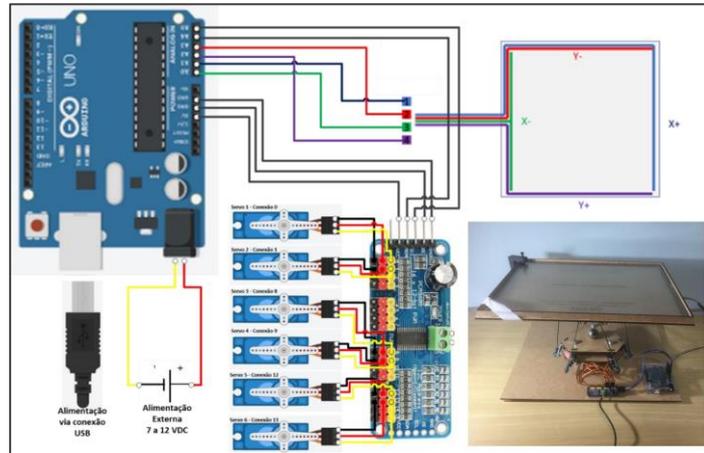


Figura 2. Esquema do circuito de controle e imagem da plataforma física (Vieira, 2022)

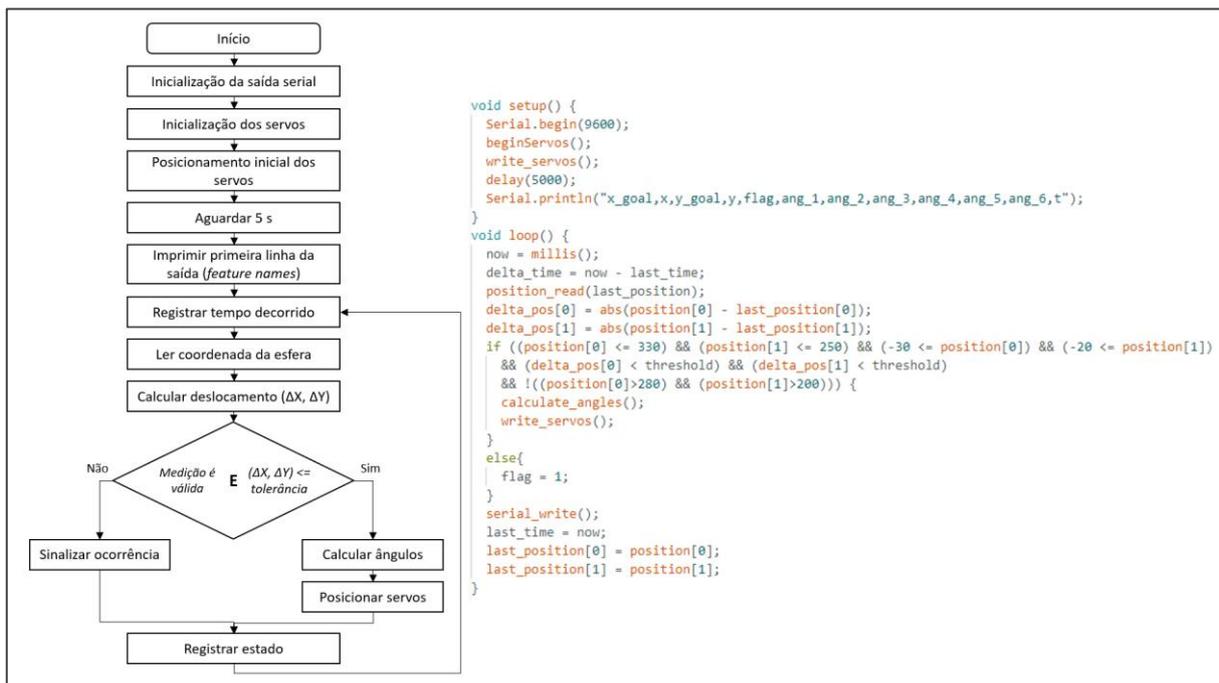


Figura 3. Fluxograma de execução do algoritmo de controle, e sua implementação para Arduino (o autor, 2024)

Para a obtenção dos dados a serem registrados, foram utilizadas as seguintes abordagens:

- Coordenadas da posição atual: capturadas através do sensor de tela resistiva, acionado por meio de função específica dentro do código para leitura de posição;
- Coordenadas da posição objetivo: definidas na configuração do programa;
- Sinais de comando para o servo driver: ângulos calculados por meio de função específica dentro do código, onde é feita a implementação do controle PID;
- Marcação de tempo (*timestamp*): obtida através da função “*millis()*”;
- Parâmetro de sinalização (*flag*): condicionais distribuídos ao longo do código alteram o valor da variável de acordo com as condições de execução.

Um dos primeiros problemas observados na captação de dados foi o alto nível de ruído do sinal da tela resistiva (Fig. 4). A solução aplicada foi a alteração da função de leitura da posição (Fig. 5), que passou a capturar uma série de amostras de uma coordenada em particular, calcular a média destas amostras, comparar o valor com a medição do laço anterior e,

caso a diferença entre os valores fosse superior à tolerância de limiarização, repetir o processo. Caso um dado número de tentativas fosse alcançado ou o valor obtido fosse inferior à tolerância, a função registraria o valor e passaria à aquisição da próxima coordenada em questão, sob o mesmo procedimento, e ao final retornaria os dois valores obtidos (coordenadas 'x' e 'y'). Também foram feitos ajustes no tempo de estabilização de tensão da tela resistiva. O tratamento aplicado foi capaz de reduzir significativamente o nível de ruído, podendo ser observada, no caso apresentado na Fig. 4, uma redução do erro quadrático médio (RMSE) de 59,5 e 40,5 para 7,0 e 1,8 para 'x' e 'y' respectivamente, além de um aumento da relação sinal-ruído (SNR) de 3,0 para 21,3 em 'x' e de 3,2 para 55,8 em 'y'. Ainda assim, considerando que alguns valores atípicos (*outliers*) poderiam ser obtidos nas medições, o código principal realiza uma nova filtragem por limiarização e, caso a diferença entre medições seja superior ao limiar estabelecido, opta por ignorar o valor mensurado e aguardar a próxima medição, mantendo o comportamento do sistema inalterado enquanto isto.

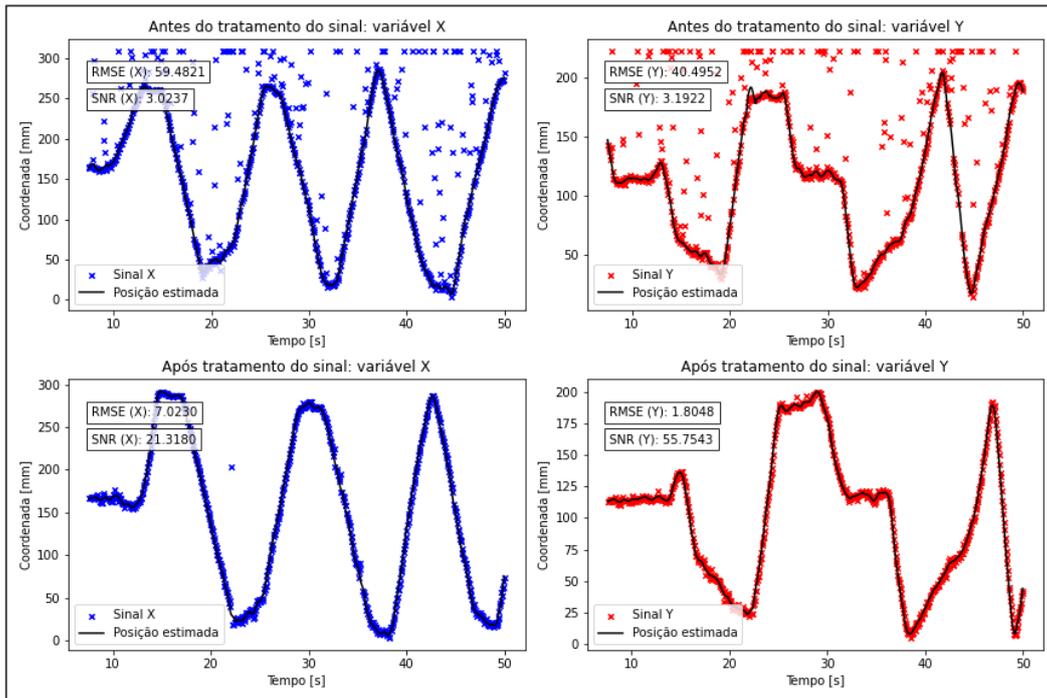


Figura 4. Sinal de coordenada de posição recebido da tela resistiva, antes (acima) e após o tratamento do sinal (abaixo), e valores de erro quadrático médio e relação sinal-ruído (o autor, 2024)

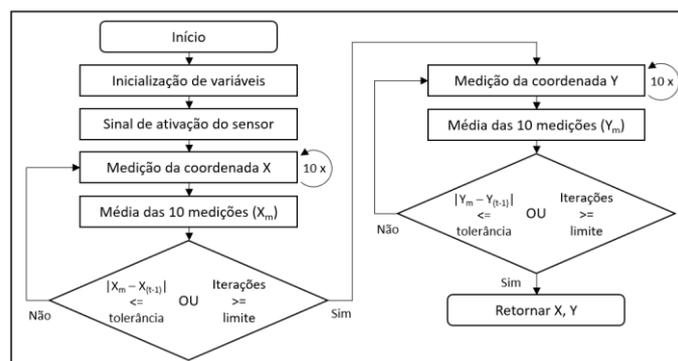


Figura 5. Algoritmo implementado para tratamento do sinal recebido da tela resistiva (o autor, 2024)

Outro problema observado foi a instabilidade da plataforma, por vezes apresentando comportamento errático e com movimentos bruscos e acentuados. A solução aplicada foi a limitação dos ângulos permitidos para os servomotores a um intervalo de $\pm 10^\circ$ ao redor da posição horizontal (90°). Como o modelo original considerava apenas pequenos ângulos dos servos e deslocamentos da esfera, situações em que a esfera se deslocava com maiores velocidades acabavam por gerar respostas exageradas no cálculo dos ângulos necessários para cada servomotor. Assim, com esta limitação aplicada, caso o ângulo calculado fosse superior ao limite estabelecido, o ângulo adotado para o servo passou a ser o ângulo máximo permitido (100°). Da mesma forma, ângulos inferiores ao limite mínimo foram substituídos pelo ângulo mínimo permitido (80°). Esta alteração permitiu o funcionamento mais controlado e previsível da plataforma.

O dataset foi obtido a partir do SBP-PSG por meio de experimentos dedicados. Para isto, a plataforma foi dividida em nove regiões. Os dados foram coletados considerando seis diferentes cenários, representados na Fig. 6. Em cada um destes cenários, a esfera foi posicionada em um dado ponto determinado pelas regiões definidas, podendo ser posicionada estaticamente ou com um movimento associado. Após isto, permitiu-se que a PSG atuasse de forma a levar a esfera até o centro. Os parâmetros de interesse foram registrados durante a trajetória da esfera. Após a esfera ser posicionada no centro da plataforma e lá ter permanecido por pelo menos três segundos, ela foi então removida e o cenário repetido, até um total de dez vezes, passando-se então ao ponto seguinte. Após todos os pontos do cenário terem sido executados, passou-se ao cenário seguinte de simulação, até a execução de todos estes. A captação dos dados foi feita através do registro da saída serial do microcontrolador, por meio de sessão no software PuTTY (Release 0.80).

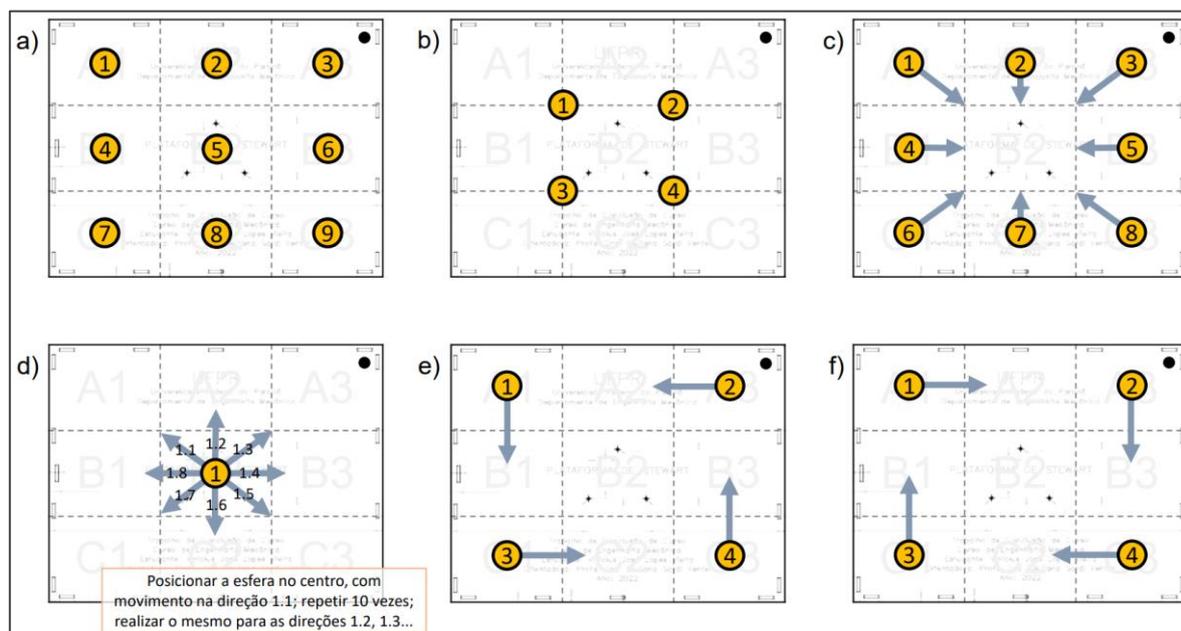


Figura 6. Cenários utilizados para geração do conjunto de dados experimentais (o autor, 2024)

Os experimentos foram registrados por meio de relatórios experimentais contendo o número do experimento, data e hora de execução, procedimento experimental (registrado em documento preparado anteriormente à execução), cenários executados, número de repetições, momento de início e término de cada cenário, medições a serem excluídas (caso houvesse) e anotações gerais. Ao todo, sete conjuntos de experimentos foram executados, com diferentes durações e resultados. Os primeiros seis conjuntos foram descartados para fins do conjunto final deste trabalho, sendo utilizados para testes e melhorias na plataforma e na captação dos dados, tal como descrito anteriormente, em passos incrementais. O conjunto de dados final foi obtido através do sétimo conjunto de experimentos, denominado “série E7.X”, numerados de 1 a 5. Um resumo dos experimentos realizados pode ser observado na Tab. 1.

Tabela 1. Lista de experimentos realizados e número de repetições (o autor, 2024)

Experimento	Duração (s)	Cenários	Total de repetições
E7.1 07/03/24 18:15h	3032	a, b	130
E7.2 07/03/24 19:50h	4800	c, d, e, f	240
E7.3 19/03/24 09:45h	3400	a, b, c	210
E7.4 19/03/24 12:50h	2427	d, e, f	160
E7.5 19/03/24 15:00h	5334	a, b, c, d, e, f	370
E7.X (dataset completo)	18993 (5 h 16 min 33 s)	a, b, c, d, e, f (3x cada)	1110

3. RESULTADOS

Uma síntese estatística dos dados obtidos no conjunto dos experimentos E7.1 a E7.5 pode ser observada na Tab. 2. No total, mais de 240 mil linhas de dados foram captados ao longo dos cinco experimentos. Analisando comparativamente os dados de cada experimento (Fig. 7), observa-se que os valores médios e desvios padrão das coordenadas de posição e dos ângulos dos servomotores apresentam grande similaridade entre os diferentes experimentos, o que demonstra a repetibilidade do experimento em diferentes momentos e condições exteriores.

Tabela 2. Síntese estatística dos dados obtidos nos experimentos da série E7.X (o autor, 2024)

Objetivo: x = 150; y = 110	x	y	flag	ang_1	ang_2	ang_3	ang_4	ang_5	ang_6
Contagem	243730	243730	243730	243730	243729	243729	243728	243727	243726
Média aritmética	184,7	139,3	0,3	89,0	91,0	91,0	89,0	89,9	90,0
Desvio padrão	61,5	43,0	0,54	5,0	5,0	4,0	4,0	4,6	4,6
Mínimo	-75	-14	0	8,2	-17,5	-18,3	26,6	-18,9	-3,8
25%	154	116	0	87,7	89,9	90,1	88,2	89,3	89,1
50%	159	122	0	88,9	91,1	91,0	89,0	90,1	89,9
75%	179	136	1	90,2	92,3	91,8	89,9	90,9	90,7
Máximo	352	230	3	197,5	171,8	153,4	198,3	183,8	198,9

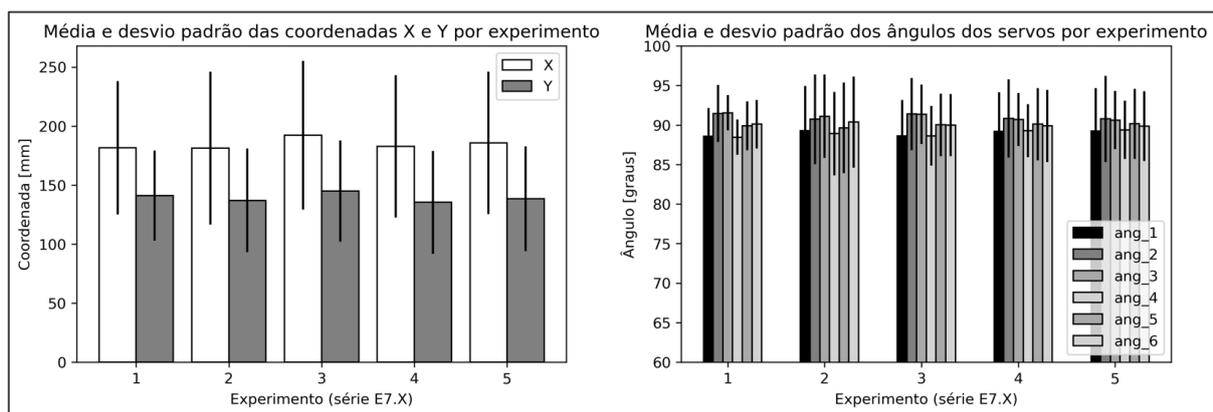


Figura 7. Comparativo de média e desvio padrão dos dados obtidos nos experimentos E7.1 a E7.5 (o autor, 2024)

Para tratamento dos dados obtidos, os seguintes passos foram executados:

- Remoção de linhas com dados ausentes;
- Criação de features secundárias - “delta_x”, “delta_y”, “delta_t” (variações de posição e intervalo de tempo entre medições), “x_rel”, “y_rel” (coordenadas relativas à posição objetivo), “ang_rel” (diferença entre o ângulo nominal de 90° e o ângulo de cada servo, de 1 a 6, resultando em seis variáveis);
- Remoção de linhas onde o valor do sinal “flag” fosse igual a 1, sinalizando que os valores em questão não foram utilizados pelo controle;
- Remoção de linhas onde algum dos ângulos registrados não estivesse dentro de um intervalo estabelecido, de 45° a 135°.

Após o tratamento, foi obtido um conjunto final de dados com 179228 linhas, totalizando 36225 KB de armazenamento. Avaliando estatisticamente o conjunto (Tabela 3) foi possível observar que o tempo de ciclo médio do programa foi de 77,9 ms, ou seja, uma frequência de operação média de 12,8 Hz, com desvio padrão de 1,9 ms (0,3 Hz). É observável também que a posição média em ‘x’ difere da posição objetivo em 6,8 mm, sendo esta diferença de 9,8 mm para ‘y’. O desvio padrão das coordenadas é de 24,3 mm para ‘x’ e 16,1 mm para ‘y’, o que indica uma grande concentração de pontos na zona central da plataforma, ao redor da posição objetivo (Fig. 8). Esta se encontra a menos de um desvio padrão (σ) de distância da posição média registrada em ambas as coordenadas, sendo de 0,28 σ para ‘x’, e 0,61 σ para ‘y’.

Tabela 3. Síntese estatística do conjunto de dados da série E7.X após tratamento (o autor, 2024)

Objetivo: x = 150; y = 110	x	y	delta_t
Contagem	179228	179228	179228
Média aritmética	156,8	119,8	77,9
Desvio padrão	24,3	16,1	1,9
Mínimo	-29	-9	71
25%	152	115	77
50%	157	120	78
75%	162	125	78
Máximo	309	227	95
Total ocupado: 36225 KB			

Avaliando as correlações entre os dados captados originalmente após tratamento (Figura 9), neste caso entre as coordenadas de posição e os ângulos dos servos, é possível observar algum nível de correlação entre a variável ‘x’ e os ângulos “ang_1”, “ang_2”, “ang_5” e “ang_6”, respectivamente controlando os servomotores 1, 2, 5 e 6 da plataforma, com coeficientes de correlação de Pearson (ρ) próximos de $\pm 0,5$. Para a coordenada ‘y’, correlação similar é encontrada com os ângulos “ang_3” e “ang_4”, com coeficiente ρ de $\pm 0,58$. Também há um grau inferior, porém significativo, de correlação entre ‘y’ e os ângulos “ang_1” e “ang_2”, com ρ de $\pm 0,29$. Avaliando a implementação do modelo de controle original de Vieira (2022), fica evidente que a atuação sobre os servomotores ocorre em pares (1-2, 3-4 e 5-6), com valores de igual magnitude e sinal oposto. Isto explica a simetria de coeficientes observada entre pares de ângulos.

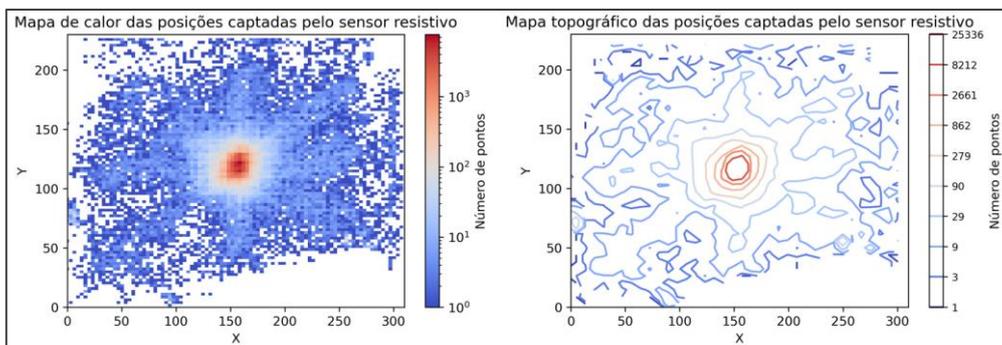


Figura 8. Mapa de calor (E) e topográfico (D) da distribuição das coordenadas ‘x’ e ‘y’ captadas pelo sensor resistivo no conjunto de dados após tratamento (o autor, 2024)

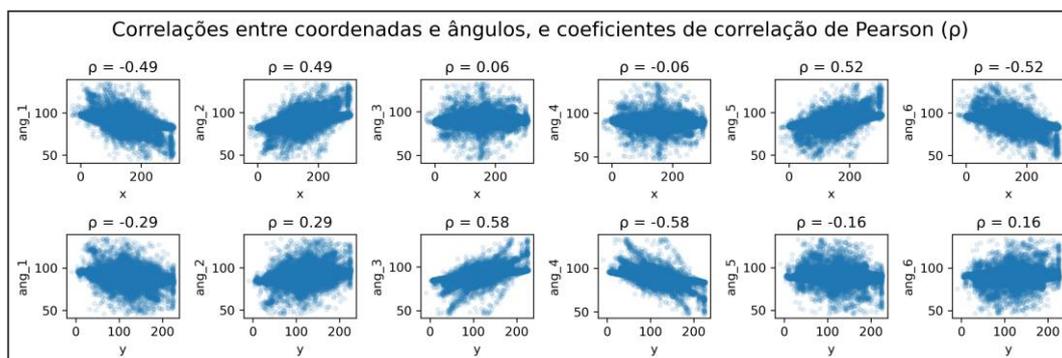


Figura 9. Correlação entre coordenadas de posição (‘x’ e ‘y’) e ângulos dos servomotores (‘ang_1’ a ‘ang_5’), no conjunto de dados após tratamento (o autor, 2024)

A Figura 10 demonstra como o perfil experimental adotado se reflete nos dados obtidos. Extraindo-se dos dados obtidos no experimento E7.1 (após tratamento) um trecho entre 210 s e 300 s e observando-se o perfil de trajetória de cada coordenada captada, é possível observar distintamente 5 trajetórias percorridas pela esfera. Em todas elas, a coordenada ‘x’ parte de um valor baixo, próximo de 60 mm, e se estabiliza ao redor de um valor próximo de 160 mm. Para ‘y’, a coordenada parte de valores altos, da ordem de 190 mm, e estabiliza próximo de 125 mm.

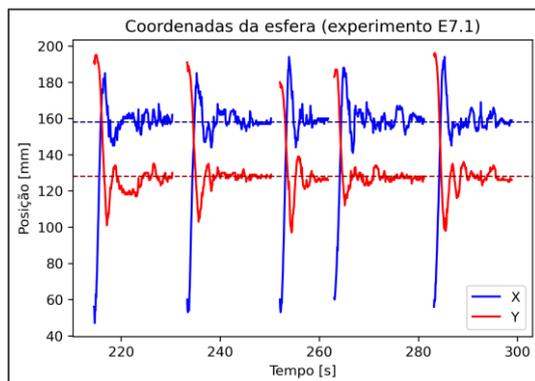


Figura 10. Evolução das coordenadas ‘x’ e ‘y’ ao longo do tempo, durante o experimento E7.1 (o autor, 2024)

Este perfil de trajetória é condizente com a condição ‘a’, posição de partida ‘1’, onde a esfera parte do canto superior esquerdo (quadrante A1, que compreende as coordenadas ‘x’ entre 0 e 110 mm e ‘y’ entre 140 e 210 mm), estática, e se desloca até próximo da posição objetivo, estabilizando ao redor desta por cerca de dois a três segundos, sendo em seguida removida para nova repetição. Ao verificarmos o relatório do experimento em questão, verifica-se que de fato, entre 210 e 300 segundos de experimento, o cenário em curso era o cenário ‘a1’, o que indica concordância entre procedimento experimental, relatório de experimento e dados obtidos.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, é apresentado o processo de criação de um *dataset* voltado ao controle baseado em dados de uma plataforma de Stewart-Gough acoplada a um sistema bola e placa, através de experimentos realizados em uma plataforma física no laboratório LaMoC, da Universidade Federal do Paraná. Os dados obtidos e tratados foram disponibilizados via repositório online, acessíveis através do link: <https://github.com/william-ludtke/sgp-dataset-creem2024>. O trabalho destacou a importância do pré-tratamento dos dados para redução do ruído de captação em sensores em aplicações práticas. Por fim, observou-se maior concentração de pontos na região central da plataforma, um tempo de ciclo médio de 77,9 ms (com pouca variação), e boa concordância entre procedimento experimental, relatório de experimento e dados obtidos. Espera-se que este conjunto de dados possa ser utilizado para o treinamento de algoritmos de controle não-linear baseados em dados, para a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina, e para o controle de sistemas similares ao original.

5. REFERÊNCIAS

- Ali, Z., *et al.*, 2022. “Design and Development of Stewart Platform to Balance the Ball Using Fuzzy Logic Control”. In *2022 International Conference on IT And Industrial Technologies (ICIT)*. Chiniot, Pakistan.
- Brunton, S. L. e Kutz, J. N., 2022. “Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control”. Cambridge University Press, 2ª edição.
- Dasgupta, B. e Mruthyunjaya, T. S., 2000. “The Stewart platform manipulator: a review.” In *Mechanism and Machine Theory*, v. 35, n. 1, p. 15–40, jan. 2000.
- Dobriborsci, D., Kapitonov, A. e Nikolaev, N., 2017. “Application of the Stewart platform for studying in control theory.” In *International Conference On Information And Digital Technologies (IDT)*. Zilina, Slovakia, jul. 2017.
- Gough, V. E., 1962. “Universal tyre test machine”. In *Proc. FISITA 9th Int. Technical Congr.*, London.
- Jabbari Asl, H. e Janabi-Sharifi, F., 2017. “Adaptive neural network control of cable-driven parallel robots with input saturation”. In *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 65, p. 252–260, out. 2017.
- Kassem, A., Haddad, H. e Albitar, C., 2015. “Comparison Between Different Methods of Control of Ball and Plate System with 6DOF Stewart Platform”. In *IFAC-PapersOnLine*, v. 48, n. 11, p. 47–52.
- Maldonado, A., *et al.*, 2021. “Design, Construction and Implementation of Stewart Platform with Control of Rolling Ball on Platform through Artificial Vision”.
- Masonry, O. e Jian Wang, 1994. “Workspace evaluation of Stewart platforms”. In *Advanced Robotics*, v. 9, n. 4, p. 443–461, jan. 1994.
- Nguyen, V., *et al.*, 2020. “Adaptive finite-time neural network control for redundant parallel manipulators”. In *Asian Journal of Control*, v. 22, n. 6, p. 2534–2542, nov. 2020.
- Stewart, D., 1965. “A Platform with Six Degrees of Freedom”. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, v. 180, n. 1, p. 371–386, jun. 1965.
- Vieira, V. J. L., 2022. “Plataforma de Stewart: desenvolvimento de um robô de estrutura paralela e implementação do controle PID”. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brazil.
- Xu, J., Wang, Q. e Lin, Q., 2018. “Parallel robot with fuzzy neural network sliding mode control.” In *Advances in Mechanical Engineering*, v. 10, n. 10, out. 2018.
- Yaovaja, K., 2018. “Ball Balancing on a Stewart Platform using Fuzzy Supervisory PID Visual Servo Control”. In *2018 5th International Conference On Advanced Informatics: Concept Theory And Applications (ICAICTA)*. IEEE, aug. 2018.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.