

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS

GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECATRÔNICA



Relatório 1

Modelagem, Calibração e Validação com o Robix

Erick Nathan Martins Alves
Loren Rodrigues Menezes
Robson Resende Teixeira Junior
Tiago Antônio Liduário

Professor(a): Dr. Renato Dâmaso

30 de agosto de 2023

1 Introdução

O avanço tecnológico, a busca por processos de produção mais eficientes e a necessidade de substituir operadores humanos em ambientes hostis ou que necessitem realizar atividades repetitivas têm ampliado o campo de atuação dos mecanismos robóticos. Assim, cada vez mais se necessita de operações com critérios de alta qualidade, como exatidão e repetibilidade no posicionamento dos robôs. Estes critérios podem ser aperfeiçoados através do processo de calibração do manipulador. Este, é um procedimento experimental e pode ser definido como um “conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição referencial, valores representados por uma medida materializada ou um material de referência e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões”. Assim, o presente relatório tem como principal objetivo abordar e discutir a calibração e a validação de um manipulador de 3 GDL's montado a partir de um kit *Robix*, apresentando dados, gráficos, tabelas e registros fotográficos que foram utilizados durante a execução da prática.

2 Modelo Cinemático Direto

Para iniciar a medição, determinou-se a chamada posição *HOME* do robô, que é a terminologia utilizada para designar a pose referencial, da qual todas as tarefas partirão, como mostrado na Figura 1.

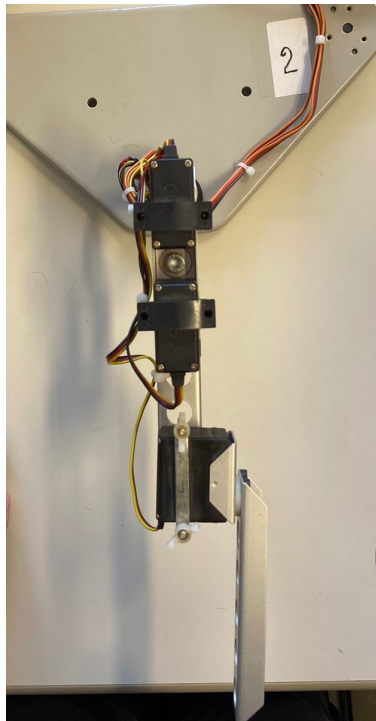


Figura 1: Manipulador em posição Home.

Ademais, com o auxílio de uma régua, mediu-se os valores, em milímetros, dos links do robô, como é possível observar na Tabela 1.

Tabela 1: Medidas dos links.

Link	Medida(mm)
1	127
2	10
3	79
4	76
5	30
6	104
7	10

A seguir, montou-se o diagrama de arame do robô, conforme mostra a Figura 2.

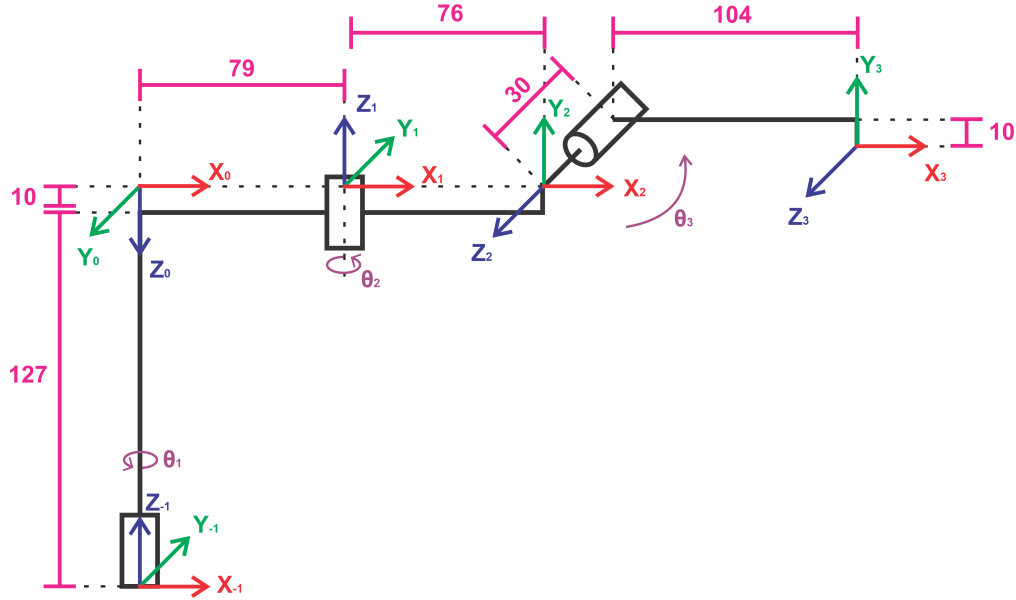


Figura 2: Diagrama de arame do *Robix*.

Assim, obteve-se o Modelo Cinemático Direto do robô, com base nas convenções de Denavit Hartenberg (Spong et al., 2005), obtendo a Tabela 2

Tabela 2: Tabela de DH.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
0	0	137	0	180°
1	θ_1^*	0	79	180°
2	θ_2^*	0	76	90°
3	-	-	-	-

Entretanto, pôde-se perceber que a transformação do *frame 2* para o *frame 3* não segue a convenção de DH devido á existência de um deslocamento em Y. Dessa forma, encontrou-se uma Matriz de Transformação Homogênea do *frame 3* em relação ao *frame 2*. Assim, a partir das matrizes de transformação *frame-a-frame*, obteve-se o resultado final da cinemática direta, a Matriz 1, por meio da multiplicação consecutiva dessas matrizes.

$$H_0^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 137 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 79c_1 \\ s_1 & -c_1 & 0 & 79s_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_1 & 76c_2 \\ s_2 & 0 & -c_1 & 76s_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_3^2 = \begin{bmatrix} s_3 & c_3 & 0 & 104c_3 + 10s_3 \\ -c_3 & s_3 & 0 & -10c_3 + 104s_3 \\ 0 & 0 & 1 & -30 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$H_3^{-1} = \begin{bmatrix} c_{(1-2)}s_3 & c_3c_{(1-2)} & -s_{(1-2)} & 79c_1 + 2c_{(1-2)}(52c_3 + 5s_3) + 76c_{(1-2)} + 30s_{(1-2)} \\ -s_3s_{(1-2)} & -c_3s_{(1-2)} & -c_{(1-2)} & 30c_{(1-2)} - 70s_1 - 2s_{(1-2)}(52c_3 + 5s_3) - 76s_{(1-2)} \\ -c_3 & s_3 & 0 & -10c_3 + 104s_3 + 137 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

3 Calibração

A calibração do robô *Robix* é um processo essencial para garantir a precisão e a confiabilidade de suas operações. Sendo assim, utilizou-se o software *Fusion 360* para essa calibração, uma ferramenta que permite a manipulação de imagens e a imposição de cotas para a medição dos ângulos. Nesse contexto, duas imagens sobrepostas são utilizadas, e linhas são traçadas para medir os ângulos resultantes das diferentes posições angulares de cada junta do robô.

No processo da calibração, quatro medições foram coletadas para cada junta. A primeira medição corresponde ao ângulo extremo positivo, a segunda a uma posição intermediária positiva, a terceira a uma posição intermediária negativa e a quarta ao ângulo extremo negativo. Esses dados são então comparados com os valores previamente fornecidos pelo software Nexus, que contém informações equivalentes aos ângulos esperados para cada junta. A Figura 3, evidenciam como foram extraídos os valores dos ângulos de cada juntas.

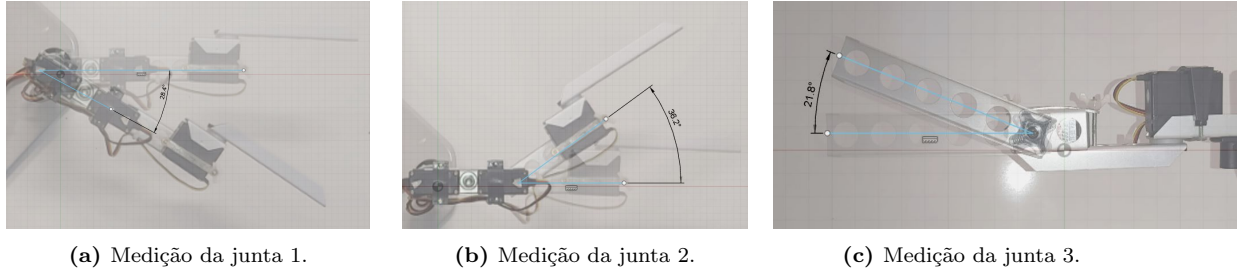


Figura 3: Medições de ângulos intermediários positivos das juntas.

Para facilitar a interpretação dos dados e tornar as relações entre os valores fornecidos pelo software Nexus e os ângulos medidos mais claras, foi criada uma tabela. Assim, a Tabela 3 apresenta uma comparação direta entre os ângulos medidos em diferentes posições (*HOME*, extremo positivo (medição 1), intermediário positivo (medição 2), intermediário negativo (medição 3) e extremo negativo (medição 4)) e os respectivos valores obtidos pelo terminal do Nexus.

Tabela 3: Valores extraídos do Nexus e experimentalmente, para variações em cada junta do manipulador .

	Off-set		Medição 1		Medição 2		Medição 3		Medição 4	
	Nexus	Ângulo (°)	Nexus	Ângulo (°)	Nexus	Ângulo (°)	Nexus	Ângulo (°)	Nexus	Ângulo (°)
Junta 1	81	0	1400	64.3	721	28.4	-660	-36.2	-1400	-74.3
Junta 2	-175	0	1400	73	575	36.2	-960	-39.4	-1400	-61.6
Junta 3	461	0	1400	46.9	931	21.8	-90	-27.8	-1400	-92.6

A partir das medições realizadas e das comparações com os valores do software Nexus, são traçados pontos em um gráfico. Para estabelecer relações mais precisas entre os valores fornecidos pelo sistema operacional e os ângulos medidos, é empregada uma técnica de regressão linear. Essa análise estatística permite determinar equações que relacionam os ângulos medidos com os valores fornecidos pelo software, contribuindo para uma calibração mais precisa do robô Robix.

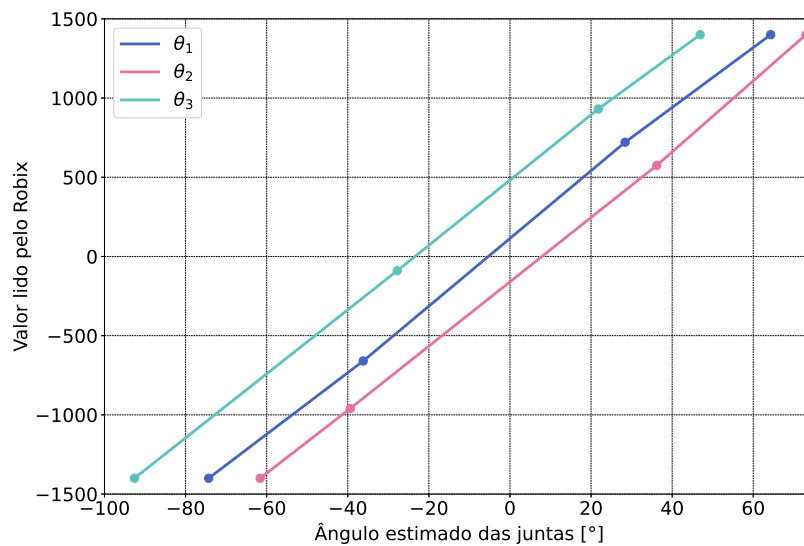


Figura 4: Correlação entre ângulos das juntas e o valor lido.

As funções afins resultantes da regressão linear estabelecem relações matemáticas entre os ângulos medidos e os valores fornecidos pelo software Nexus. Essas equações foram desenvolvidas com o auxílio do *Python* e podem ser representadas por:

Fórmula Geral \rightarrow Ângulo Medido = Coeficiente \cdot Valor Nexus + Interceptação

$$\begin{aligned}\theta_1 &= 0.04899J_1 - 3.9681, \\ \theta_2 &= 0.04829J_2 + 8.4508, \\ \theta_3 &= 0.04959J_3 - 22.8605,\end{aligned}\tag{2}$$

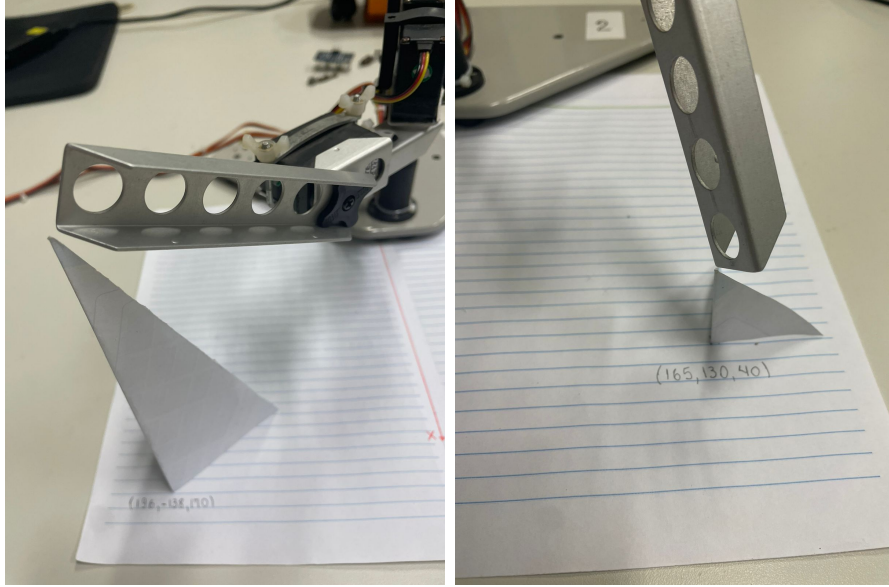
em que “Ângulo Medido” é o ângulo obtido a partir das medições feitas com o robô em diferentes posições, “Valor Nexus” é o valor esperado fornecido pelo software Nexus, “Coeficiente” é o coeficiente angular da reta de regressão, indicando como os ângulos medidos variam em relação aos valores Nexus, “Interceptação” é o ponto em que a reta de regressão intercepta o eixo vertical (valor ângulo medido).

Essas equações permitem predizer os ângulos medidos com base nos valores Nexus, ajustando a relação entre os dados medidos e esperados. Isso é fundamental para calibrar o robô de forma mais precisa e corrigir eventuais desvios entre as medições reais e as previsões teóricas fornecidas pelo software Nexus.

De maneira geral, a calibração do Robix envolveu a utilização do software *Fusion 360* para medir ângulos por meio de imagens sobrepostas, seguida pela comparação com os valores Nexus e a aplicação de regressão linear para estabelecer relações confiáveis entre os ângulos das juntas, em graus, e os valores relacionados no Nexus. Esse processo é crucial para assegurar o desempenho preciso e consistente do robô em suas tarefas.

4 Validação

Para realizar a validação das curvas de calibração que relacionam os valores obtidos através do console fornecido pelo software Nexus com os ângulos de cada junta, foram utilizadas dois pontos, um localizado no quadrante Superior Direito do robô, Figura 5a e outro no Inferior Esquerdo, Figura 5b, buscando variar a posição angular das juntas nas diferentes poses. Após definidos e ainda fazendo uso do Nexus, o braço articulado foi manualmente levado até cada ponto, obtendo os valores correspondentes aos ângulos formados pelas juntas nos dois pontos de interesse. Após obtidos, estes dados foram substituídos nas equações geradas através da correlação, a fim de definir os ângulos θ_1 , θ_2 e θ_3 . Estes dados, bem como os valores enviados para o *Robix* através do Nexus foram mostrados na Tabela 4:



(a) Ponto superior direito.

(b) Ponto inferior esquerdo.

Figura 5: Robix posicionado nos pontos de interesse.

Tabela 4: Relação entre valores enviados ao Robix e ângulos obtidos.

	Sup. Dir.		Inf. Esq.	
	Nexus	Ângulo ($^{\circ}$)	Nexus	Ângulo ($^{\circ}$)
Junta 1	350	13.18	-557	-31.26
Junta 2	-920	-35.98	-141	1.64
Junta 3	1040	28.71	-620	-53.61

Antes de realizar as comparações entre os comprimentos mensurados da posição real do manipulador e aqueles obtidos através da modelagem cinemática, optou-se por validar primeiramente o modelo, utilizando para isto a linguagem de programação *Python* e software de simulação *RoboAnalyzer*. Desta forma, o braço foi construído no mesmo e designadas algumas posições incluindo, comparando os dados da última coluna das matrizes de transformação obtidas através de programação e simulação, e averiguando que ambas apresentavam os mesmos deslocamentos em todos os eixos, indicando que a modelagem realizada representa de fato o robô analisado. As Figuras 6a e 6b mostram o robô posicionado nos pontos de interesse e suas respectivas matrizes de transformação final para as poses de validação escolhidas.

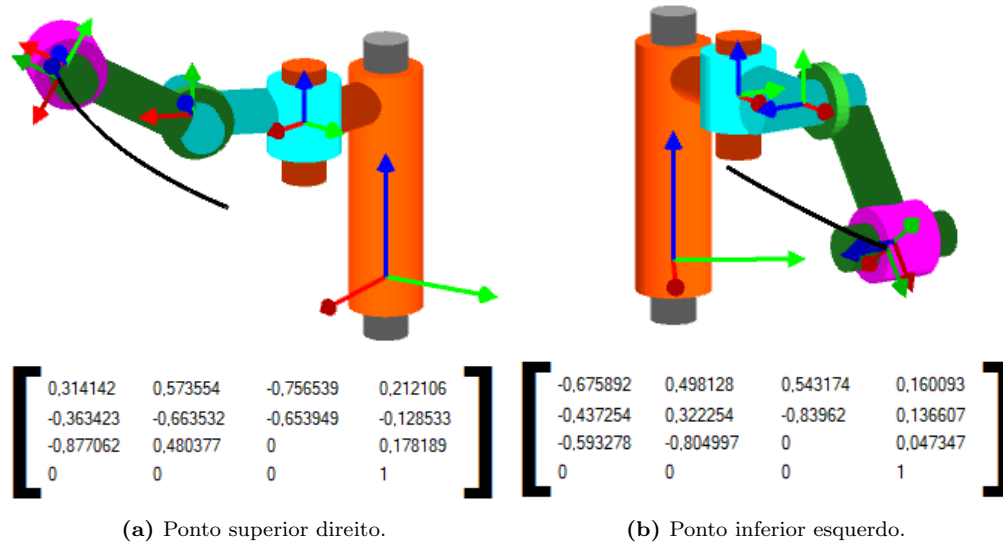


Figura 6: Matriz de transformação obtida a partir do Robot Analyzer. ($rad \mid m$).

Com o modelo validado, os dois softwares mencionados foram novamente utilizados, desta vez para verificar a correspondência entre os valores calculados e medidos. Desta forma, os ângulos foram substituídos nas duas plataformas, novamente sendo possível notar a concordância entre ambas, porém um desvio quando comparado aos valores reais, mostrados na Tabela 5. Tais erros eram esperados devido às imprecisões nas medições e também próprio Robix, que apresenta oscilações de aproximadamente $5mm$ em torno do ponto determinado via software.

Tabela 5: Comparação entre valores calculados e mensurados.

	Superior Direito			Inferior Esquerdo		
	Medido	Simulado	Erro (%)	Medido	Simulado	Erro (%)
Desl. X (mm)	196	212.11	8.22	165	160.09	2.98
Desl. Y (mm)	-138	-128.53	6.86	130	136.61	5.01
Desl. Z (mm)	170	178.19	4.82	40	47.35	18.38

5 Resultados e Conclusões

A realização deste experimento possibilitou algumas contatações práticas e que devem ser consideradas ao se trabalhar com manipuladores reais: as incertezas inerentes a todo o processo de medição, calibração e até mesmo da mecânica do robô. É certo que, em um ambiente industrial, o impacto destes fatores seria atenuado ao passo que a utilização de *hardware*, *software* e instrumentações profissionais mitigariam os problemas enfrentados, mas por outro lado, a exigência de resultados mais precisos e contundentes seriam ainda maiores em uma indústria que necessita otimizar sua linha de produção, por exemplo.

Fazendo um paralelo com o manipulador utilizado nesta prática, o *Robix*, foi possível, através do processo de modelagem cinemática direta, calibração e validação dos resultados, obter um resultado minimamente satisfatório, levando em consideração as condições de ensaio e as instabilidades inerentes ao próprio kit robótico utilizado.

No modelo cinemático, observou-se a necessidade da utilização da teoria vista no capítulo 2 de Spong et al. (2005), uma vez que as convenções de Denavit Hartenberg não se aplicariam em todas as transformações. O modelo final pôde ser validado em *Python* e também no simulador *RoboAnalyzer*.

Posteriormente, a calibração foi realizada, a partir da medição de ângulos arbitrários e a associação dos mesmos com os valores expressos pelo Nexus, por meio da regressão linear. Observou-se então, que os valores analisados realmente possuíam alta correlação linear, uma vez que, as retas *plotadas* foram quase perfeitas. A partir das curvas, foram extraídas as equações que relacionassem matematicamente as variações angulares reais e os valores medidos, incluindo os *offsets* das juntas, que correspondem aos valores lidos no Nexus em posição *HOME*.

Para a validação, foram utilizados objetos-alvo com coordenadas e dimensões conhecidas, para que fosse possível mover o TCP (*Tool Center Point* até a coordenada conhecida. Os valores lidos pelo Nexus foram salvos para, após serem convertidos para ângulos, serem inseridos no modelo cinemático, gerando uma “posição calculada”. Os valores calculados foram comparados com os medidos, para fins de análise e interpretação dos resultados.

Os erros percentuais ficaram dentro do esperado e previsto, a baixo de 10%, com exceção da coordenada Z do quadrante inferior esquerdo, que apresentou um erro destoante de 18%. A imprecisão dos valores deve-se a diversos fatores, entre eles: imprecisões nas medições de comprimentos e ângulos, folgas na estrutura do *Robix*, oscilações e variações indevidas na posição do efetuador (aparentemente problemas no controlador interno ou até mesmo limitações mecânicas e/ou eletrônicas dos servo motores utilizados) e até mesmo algumas não linearidades do sistema, como uma possível flexão das juntas e/ou peças de nylon/plástico e a influência do atrito nas juntas.

Referências

Spong, M., Hutchinson, S., and Vidyasagar, M. (2005). *Robot Modeling and Control*. Wiley.