



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOSÉ NOGUEIRA DO NASCIMENTO JUNIOR

**IDENTIFICAÇÃO DE TRAJETÓRIA COM MÍNIMOS QUADRADOS DE UM
MANIPULADOR ROBÓTICO ACIONADO COM MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO**

FORTALEZA-CE

2019

JOSÉ NOGUEIRA DO NASCIMENTO JUNIOR

**IDENTIFICAÇÃO DE TRAJETÓRIA COM MÍNIMOS QUADRADOS DE UM
MANIPULADOR ROBÓTICO ACIONADO COM MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª.Laurinda Lúcia Nogueira do Reis.

FORTALEZA-CE

2019

JOSÉ NOGUEIRA DO NASCIMENTO JUNIOR

**IDENTIFICAÇÃO DE TRAJETÓRIA COM MÍNIMOS QUADRADOS DE UM
MANIPULADOR ROBÓTICO ACIONADO COM MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Dr^a. Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis (Orientador)
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.Sc. Darielson Araújo de Souza
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. M.Sc. Josias Guimarães Batista
Instituto Federal do Ceará (IFCE – Campus Fortaleza)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- J1i Junior, José Nogueira do Nascimento.
Identificação de trajetória com mínimos quadrados de um manipulador robótico acionado com motor de indução trifásico / José Nogueira do Nascimento Junior. – 2019.
45 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Profª. Dra. Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis.
1. Manipulador Robótico. 2. Identificação de Sistemas. 3. Mínimos Quadrados. 4. Motor de Indução Trifásico. I. Título.

CDD 621.3

Dedico este trabalho a meus pais
José Nogueira e Leni Bento

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por sua infinita bondade, pelo dom da vida e por nunca ter me abandonado mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, José Nogueira e Leni Bento, por todo apoio, auxílio, amparo e pelo sacrifício diário para que este momento se concretizasse. Por terem sido comigo em todas as minhas decisões e sempre terem me incentivado a seguir o caminho dos estudos e da educação.

À minha amada Paloma, por estar sempre ao meu lado me dando suporte mesmo em meus piores dias. Obrigado por toda paciência e dedicação que você tem comigo e por me aguentar durante as dificuldades.

A minha orientadora, Professora Laurinda Nogueira, pela confiança, estímulo e paciência. Obrigado pelas oportunidades dadas e por sempre acreditar na minha capacidade.

Ao Grupo de Pesquisa em Automação, Controle e Robótica (GPAR) pela oportunidade de trabalhar em projetos de iniciação científica e que me auxiliaram na produção desde trabalho. Em especial aos Doutorandos Darielson Araújo e Josias Batista, que sempre estiveram dispostos a esclarecer minhas dúvidas e me orientar.

Aos meus amigos de curso Bruno Melo, Felipe Virgulino e José Raimundo que vivenciaram junto a mim muitos momentos bons e ruins dessa trajetória.

Aos inúmeros colegas do curso de graduação que me deram apoio durante o curso e que me inspiraram a continuar estudando.

Aos demais professores do departamento de engenharia elétrica que colaboraram imensamente com minha formação acadêmica.

“Por mais difícil que pareça a vida, sempre há algo que você pode fazer e ter sucesso. É importante que você não desista.”

(Stephen Hawking)

RESUMO

Os motores de indução trifásicos são muito usados na indústria atualmente, justificando a relevância da identificação do manipulador. Um dos problemas ocorridos durante o uso de manipuladores no dia-dia é a mudança da sua construção física gerada por desgaste de operação. Os métodos de identificação consistem em determinar o modelo dinâmico do sistema a partir de medições de sinais de entrada e saída. Com isso, há uma justificativa para usar métodos de identificação com o intuito de obter modelos de acordo com a mudança da planta. O manipulador usado é do tipo cilíndrico, onde está sendo utilizado dois graus de liberdade. Este trabalho tem como objetivo a identificação de sistemas aplicado a um manipulador robótico com motor de indução trifásico. Já os métodos usados são mínimos quadrados recursivos e mínimos quadrados não recursivos, a forma de avaliação dos mesmos são o coeficiente de correlação múltipla e custo computacional. Os resultados obtiveram um bom desempenho validando a presente proposta.

Palavras-chave: Manipulador Robótico. Motor de indução trifásico. Identificação de sistemas. Mínimos Quadrados Não Recursivos. Mínimos Quadrados Recursivos.

ABSTRACT

Three-phase induction motors are very important in the automotive industry, justifying the importation of the manipulator identification. The use of the problems that occur during the use of manipulators in the day-day is a construction of its generated by the operation. Identification methods consist of determining the audio and video system model of input and output signals. With a single and justification to use the identification methods with the intention of obtaining models according to plant. The manipulator used is cylindrical, where two degrees of freedom are being loaded. This work has a systems identification applied to a robotic manipulator with three-phase induction motor. We already use the scheduling schemes and the average cannot be recursive, they are formed in an analogous way to the calculation of term and the computational cost. The results obtained are positive.

Keywords: Robotic manipulator. Three-phase induction motor. Identification of systems. Non-Recursive Square Least Squares. Recursive Square Minima.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Manipulador Robótico GPAR.	17
Figura 2 - Coordenadas de estruturas ligadas ao manipulador.	19
Figura 3 - Coordenadas dos quadros para a convenção D-H.	20
Figura 4 - Estrutura de coordenadas manipulador cilíndrico.	22
Figura 5 - Projeção da primeira junta $x_0 - y_0$.	23
Figura 6 - Metodologia de identificação de sistemas.	26
Figura 7 - Processo de estimação de parâmetros.	28
Figura 8 - Diagrama de identificação de ajuste do modelo.	30
Figura 9 - Trajetória no espaço cartesiano.	35
Figura 10 - Identificação pelo método dos Mínimos Quadrados Não Recursivo.	36
Figura 11 - Erro dos Mínimos quadrados não recursivo das juntas 1 e 3.	37
Figura 12 - Identificação das trajetórias das juntas com Mínimos Quadrados Recursivo.	38
Figura 13 – Erro dos Mínimos Quadrados recursivo das juntas 1 e 3.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros D-H do manipulador do GPAR.	21
Tabela 2 - Comparação dos Resultados do R^2 durante a etapa de treinamento da 1ª junta.	40
Tabela 3 - Comparação dos Resultados do R^2 durante a etapa de treinamento da 3ª junta.	40
Tabela 4 - Comparação dos Resultados do R^2 durante a etapa de testes da 1ª junta.	41
Tabela 5 - Comparação dos Resultados do R^2 durante a etapa de testes da 3ª junta.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

D-H	Transformada Denavit-Haterberg
GPAR	Grupo de Pesquisa em Automação, Robótica e Controle
K-ABC	Colônia de abelhas baseada em conhecimento (<i>knowledge-based artificial bee colony</i>)
RPP	Rotacional Prismático Prismático
R ²	Coeficiente de Correlação Multipla
SMC	Controle de Modo Deslizante (<i>Sliging Mode Control</i>)
UFC	Universidade Federal do Ceará
ZOH	Retenção de Ordem Zero (<i>Zero Order Hold</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

U	Conjunto dos sinais de entrada
Y	Conjunto dos sinais de saída
N	Universo de experimentação
y	Saída do sistema
\hat{y}	Saída estimada do sistema
ε	Erro de previsão
V	Tensão Elétrica
Cv	Cavalo Vapor
A	Ampere
θ	Vetor de parâmetros
φ	Vetor de medidas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Revisão Bibliográfica	13
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 Contribuições.....	15
1.4 Estrutura do Trabalho	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Manipulador Cilíndrico	17
2.2 Cinemática Direta	18
2.3 Cinemática Inversa	22
2.3 Motor de Indução Trifásico	23
3 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	25
3.1 Fundamentos.....	25
3.2 Estimador dos Mínimos Quadrados Não Recursivos	30
3.3 Estimador dos Mínimos Quadrados Recursivo	33
4 RESULTADOS.....	35
4.1 Resultados dos Mínimos Quadrados Não Recursivos.....	36
4.2 Resultado dos Mínimos Quadrados Recursivos	38
5 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 Revisão Bibliográfica

A substituição da ação humana por máquinas vem se tornando cada vez mais expressiva na medida em que a tecnologia avança. Conhecer os modelos físicos e poder expressá-los matematicamente abre uma série de possibilidades para contribuições na área de robótica e afins. O estudo da cinemática de manipuladores vem sendo fundamental para solucionar problemas como planejamento de trajetória, movimento guiado por visão, previsão de colisões, agarramento de objetos e assim por diante. Abordagens das mais diversas formas para solucionar os problemas cinemáticos são constantemente desenvolvidas. (Carlos *et al.*, 2018)

Engenheiros e pesquisadores buscam usar técnicas e construir máquinas que consigam melhorar o processo com o máximo de eficiência e o mínimo de custo possível. Muitos dos manipuladores utilizados na indústria são acionados através de servo motores de corrente contínua ou servo motores baseados em máquinas síncronas. Apesar de fácil modelagem e controle, sua manutenção possui um elevado custo devido o grande número de componentes e ao contato mecânico de suas partes. Os motores de indução trifásicos do tipo gaiola de esquilo, possuem uma enorme simplicidade de construção, são mais baratos e necessitam de pouca manutenção, além de possuírem maior robustez quando comparados a outros tipos de máquinas elétricas. O expressivo desafio para utilização desses motores em manipuladores articulados é seu controle de posição, pois possui uma modelagem matemática bastante complexa de modo que exija um grande esforço computacional para sua implementação. (LIPO *et al.*, 1997).

Um método para a solução do controle de posição de motores de indução é o Controle por Modos Deslizantes (*Sliding Mode Control-SMC*), que ocorre por meio do controle da corrente de eixo em quadratura, por consequência o conjugado e por fim a posição do motor. Vittek *et al.*, (2008) utilizam algoritmos SMC com estrutura em cascata em que o laço interno do sistema é baseado no controle de linearização por meio de realimentação de estados, enquanto o mais externo é baseado no SMC. Dessa maneira, o controle de vibração pode ser trabalhado neste laço mais externo, que está ligado diretamente a posição. Vasevic *et al.*, (2010) também fazem uso da metodologia SMC com um estimador de velocidade de Euler para substituir os observadores de estados, que são mais sensíveis a erros de observação em sistemas com distúrbios, e, não são eficientes no que tange o controle de posição do motor

de indução.

Porém, a construção dessas máquinas abrange áreas que vão além de seu acionamento. Na medida em que os manipuladores operam, suas partes mecânicas vão ocasionando variações no modelo da planta devido a degradação de seus componentes. Por este motivo, o estudo da cinemática dos manipuladores através de processos de identificação de sistemas para monitorar e até mesmo prever como essas alterações irão ocorrer, se torna fundamental nessas situações. E com pode-se reajustar a forma como o controlador irá se comportar em meio essas variações.

Pode-se citar Carlos *et al.*, (2018) fazem uso de metaheurísticas para solucionar problemas de cinemática inversa dos manipuladores, representados por seu modelo D-H. Em seu trabalho a abordagem visa evitar configurações de singularidades, uma vez que não faz uso da inversão de matrizes jacobianas. Zhao *et al.*, (2018) também tratam dos problemas de singularidade da metodologia D-H, pois seus parâmetros são descontínuos quando os eixos articulares adjacentes são paralelos ou próximos do paralelo, fazendo com que o modelo obtido não seja adequado a solução cinemática. O estudo propõe evitar o problema de singularidade baseado na teoria do parafuso.

Zhou *et al.*, (2018) tratam a solução da cinemática inversa, com uma metodologia que consiste em algoritmos genéticos de aprendizagem de máquina para tal determinação. O algoritmo visa a minimização do tempo computacional sem comprometer a precisão do *end-effector*. O trabalho de Sherbiny *et al.*, (2018), propõem a utilização de um algoritmo K-ABC, colônia de abelhas artificial baseada no conhecimento, para rápida conversão e exploração do espaço de busca pretendido, aplicando isso na solução de cinemática inversa de um manipulador de 5 graus de liberdade.

Yang *et al.*, (2018) propõem um sistema de controle e identificação de robôs para estimar parâmetros cinemáticos e dinâmicos desconhecidos com uma taxa de convergência aprimorada. Uma vez que grande parte dos estudos visa a qualidade da estimativa e esquece da velocidade de convergência.

1.2 Objetivos

A seguir são apresentados os objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a identificação de trajetória de duas juntas de um manipulador cilíndrico acionado por motores de indução trifásico, através de estimadores de mínimos quadrados recursivos e não recursivos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são enumerados a seguir:

1. Identificação de 2 graus de liberdade de um manipulador robótico acionado por motores de indução trifásico;
2. Revisão da literatura dos métodos de identificação;
3. Estudo e modelagem de um manipulador cilíndrico;
4. Análise e discussão dos métodos de identificação aplicados ao sistema.

1.3 Contribuições

O presente trabalho apresenta como contribuição à utilização de métodos de identificação através de estimadores de mínimos quadrados recursivos e não recursivos para a obtenção do modelo de um manipulador robótico acionado por motores de indução, para definição de trajetória e mapeamento de alterações no modelo da planta. Estudos nesta área vem sendo desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Automação, Controle e Robótica (GPAR), da Universidade Federal do Ceará (UFC).

A identificação realizada neste projeto permite que sejam construídos controladores robustos e adaptativos para o manipulador, além de uma possível adaptação para identificação em uma situação com mais graus de liberdade.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta monografia foi dividida por capítulos que abordam desde os princípios teóricos até os resultados obtidos nas simulações.

No capítulo 2 é apresentada a modelagem das cinemáticas inversa e direta do manipulador robótico, além dos princípios do motor de indução.

O Capítulo 3 descreve como funciona o processo de identificação e como são construídos os algoritmos de mínimos quadrados recursivos e não recursivos.

O Capítulo 4 contém os resultados obtidos e discussões das propostas presentes neste trabalho. E finalmente, o capítulo 5 finaliza o trabalho com as conclusões obtidas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manipulador Cilíndrico

Neste trabalho está sendo utilizado como planta um manipulador robótico de três graus de liberdade, porém serão utilizados apenas 2 graus no estudo em questão. A Figura 1 apresenta o manipulador usado na pesquisa, em que o primeiro grau de liberdade possui um movimento rotativo, enquanto o segundo e terceiro apresentam movimentos translacionais, que são comumente chamados de prismáticos. O manipulador é do tipo RPP (Rotacional-Prismático-Prismático). Uma das principais contribuições da planta é a forma como suas juntas são acionadas, através de motores de indução trifásicos, pois normalmente manipuladores robóticos são constituídos por motores que operam em corrente contínua, devido à simplicidade do controle. Entretanto, a utilização desses motores gera um custo elevado na confecção da planta. A proposta da utilização de motores de indução nessa planta vem do seu alto índice de uso na indústria além de seu custo.

Figura 1 - Manipulador Robótico GPAR.



Fonte: O autor.

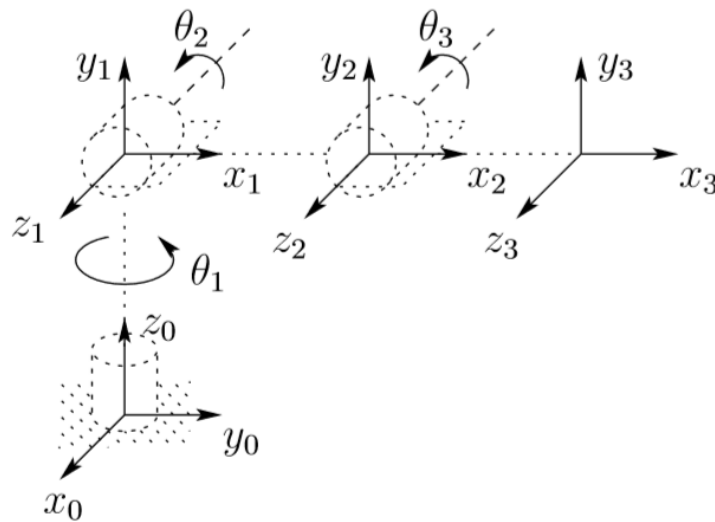
O acionamento das juntas do manipulador é realizado por meio de um motor de indução trifásico, do tipo gaiola de esquilo, com 0,5 CV de potência nominal, tensão nominal de 380/220 V, 4 polos e 1,18 A de corrente nominal ligado em delta. O controle dos motores de indução para a realização das trajetórias faz uso da metodologia de controle de campo orientado indireto, que utiliza o estudo da Transformada de Clarke, ou Transformada $\alpha\beta 0$. Essa metodologia diagonaliza as matrizes simétricas que surgem nos modelos da máquina trifásica, em outras palavras, essa transformada o modelo da máquina simétrica trifásica em um modelo bifásico simétrico, preservando potência, torque, velocidade e número de polos por meio de algumas variáveis hipotéticas.

2.2 Cinemática Direta

A problemática da cinemática direta consiste fundamentalmente em determinar a posição e orientação do *end-effector* a partir dos valores das variáveis das juntas do manipulador. Essas variáveis são os ângulos entre os elos, no caso de juntas de revolução ou juntas rotacionais, e a extensão do ligamento, no caso de juntas prismáticas ou deslizantes. (SPONG, 2004)

Para realização da análise cinemática deve-se anexar um quadro de coordenadas a cada ligamento do robô. Em particular, atribuindo $o_i x_i y_i z_i$ para um ligamento i . Assim, independente do movimento realizado, as coordenadas de cada ponto no ligamento i são constantes quando expressas no quadro de coordenadas i^{th} . Dessa forma, quando a junta i é acionada, o ligamento i e a sua estrutura fixa $o_i x_i y_i z_i$, executa um movimento resultante. A estrutura $o_0 x_0 y_0 z_0$, que está anexado a base do manipulador, é definida como o referencial inercial. A figura 2 ilustra a ideia de atribuir estruturas aos ligamentos para o caso de um manipulador de juntas rotacionais. (SPONG, 2004)

Figura 2 - Coordenadas de estruturas ligadas ao manipulador.



Fonte: Spong (2004).

Admitindo que A_i é uma matriz de transformação homogênea que expressa a posição e orientação da estrutura fixa em relação ao $o_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$, temos então que a matriz A_i não é constante, pois varia em função da configuração do robô. Porém, a suposição de que todas as articulações são de revolução ou prismáticas significa que a matriz A_i é uma função de apenas uma única articulação variável, q_i . Logo (Siciliano, 2008)

$$A_i = A_i(q_i) \quad (1)$$

Dessa forma, a matriz de transformação homogênea que expressa a posição $o_jx_jy_jz_j$ em relação ao $o_ix_iy_iz_i$ é denominada, por convenção, uma matriz de transformação, e é denotada por T_j^i . (Siciliano, 2008)

$$T_j^i = A_{i+1}A_{i+2} \dots A_{j-1}A_j \text{ se } i < j \quad (2)$$

$$T_j^i = I \text{ se } i = j$$

$$T_j^i = (T_j^i)^{-1} \text{ se } i > j$$

A posição e orientação do *end-effector* em relação ao referencial inercial ou de base é definido por um vetor tridimensional O_n^0 , que fornece as coordenadas da origem de referência do *end-effector* no que diz respeito ao quadro base, e uma matriz de rotação 3×3 , R_n^0 , que define a matriz de transformação homogênea (Siciliano, 2008)

$$H = \begin{bmatrix} R_n^0 & O_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Assim, a posição e orientação do *end-effector* no quadro inercial são dadas por

$$H = T_n^0 = A_i(q_i) \dots A_n(q_n) \quad (4)$$

Apesar da possibilidade de realização da análise usando uma estrutura arbitrária anexada a cada ligamento, é conveniente realizar a escolha das estruturas de forma sistêmica. Uma convenção bastante utilizada para selecionar as estruturas de referência em aplicações robóticas é a convenção Denavit-Hartenberg, ou convenção D-H. Nessa convenção, cada transformação homogênea A_i é representada como um produto de quatro transformações básicas (Spong, 2004)

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Trans_{z,d_i} Trans_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (5)$$

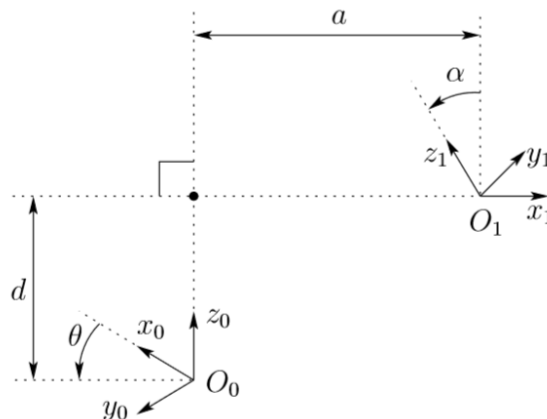
$$A_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Em que as grandezas $\theta_i, a_i, \alpha_i, d_i$ são parâmetros associados com o ligamento i e geralmente são denominados comprimento do ligamento, torção do ligamento, ângulo de junta e desvio de ligação, respectivamente. (Spong, 2004)

Esses nomes derivam de aspectos específicos da relação geométrica entre os dois quadros de coordenadas. Como a matriz A_i é uma função de uma única variável, tem-se que três das quatro grandezas são constantes para um determinado ligamento, enquanto o quarto parâmetro, θ_i para uma junta de revolução e d_i para uma junta prismática, é a variável conjunta. (Spong, 2004)

Figura 3 - Coordenadas dos quadros para a convenção D-H.



Embora a convenção D-H seja sistemática, ela ainda permite considerável liberdade na escolha de alguns parâmetros do manipulador, principalmente no caso de eixos de juntas paralelas ou quando juntas prismáticas estão envolvidas.

A partir disso foram definidos os parâmetros D-H para o manipulador cilíndrico do GPAR como ilustra a tabela a seguir

Tabela 1: Parâmetros D-H do manipulador do GPAR

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	0	0,245	θ_1^*
2	0,11	-90°	d_2^*	0
3	0	0	d_3^*	0

Fonte: O autor.

Aplicando a conversão D-H, a partir dos parâmetros apresentados na tabela 1, obtém-se as matrizes A e T correspondentes

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_2 & 0 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0,245 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_3^0 = A_1 A_2 A_3 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & -S_1(d_3 + 0,35) \\ S_1 & 0 & C_1 & C_1(d_3 + 0,35) \\ 0 & -1 & 0 & 0,245 + d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Assim, qualquer posição do *end-effector* pode ser encontrada no espaço de operação a partir das coordenadas no espaço das juntas como observado abaixo

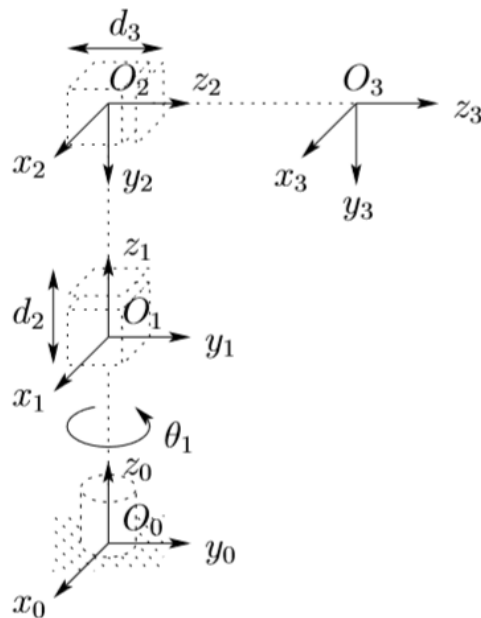
$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta_1)(d_3 + 0,35) \\ \cos(\theta_1)(d_3 + 0,35) \\ 0,245 + d_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.3 Cinemática Inversa

Diferente da problemática da cinemática direta, a cinemática inversa busca encontrar as trajetórias das juntas em seu espaço de trabalho a partir da posição final do *end-effector*. Logo, uma das formas de resolver a problemática da cinemática inversa de um robô é analisando geometricamente o comportamento de cada ligamento sob sua estrutura de espaço. (Spong, 2004)

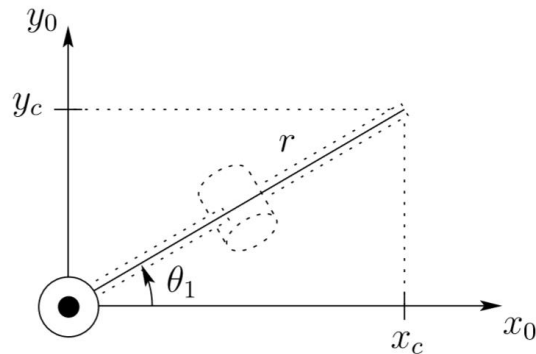
Para isso, foi realizada a análise da cinemática inversa para o manipulador cilíndrico do GPAR a partir das seguintes ilustrações.

Figura 4 - Estrutura de coordenadas manipulador cilíndrico.



Fonte: Spong (2004).

Figura 5 - Projeção da primeira junta $x_0 - y_0$



Fonte: Spong (2004).

A partir da figura 5 pode-se obter θ_1 , que pode ser obtido como

$$\theta_1 = \tan^{-1}(P_x, P_y) \quad (12)$$

O segundo ligamento tem natureza prismática, e pode ser observado na figura 4 que d_2 está no mesmo eixo que z_1 . Portanto, podemos denotar d_2 da seguinte forma

$$d_2 = P_z - 0,245 \quad (13)$$

No terceiro ligamento, que também possui configuração prismática, temos o parâmetro d_3 . O mesmo irá se deslocar no plano formado por x e y , e pode ser definido então por

$$d_3 = (\sqrt{P_x^2 + P_y^2}) - 0,35 \quad (14)$$

2.3 Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico é um conversor eletromecânico de energia que produz torque em seu eixo em função da produção de campos girantes em seu entreferro, devido a isso, são denominados máquinas de campo girante. (BIM, 2014).

Os enrolamentos polifásicos dispostos no estator ligados a uma fonte polifásica, faz surgir um campo magnético que gira de forma distribuída, em relação ao enrolamento, com velocidade síncrona. O campo formado produz uma força magneto motriz no estator do motor, que por sua vez produzem tensões que estabelecem correntes, fazendo com que elas produzam forças magneto motrizes. A interação dessas forças provoca um torque mecânico no eixo da máquina. (BIM, 2014)

Devido seus elevados parâmetros de confiabilidade, simplicidade de construção e pequena massa, acionamento com velocidade variável através de um motor de indução permite, independente de incertezas e perturbações, uma vasta faixa de operação de velocidade. (SEPULCHRE,2013; EL BADSI,2013)

Por causa dessas características o estudo de técnicas para controle dos motores de indução tem sido foco de pesquisa em diversos locais. Dentre essas técnicas, o controle de campo orientado tem ganhado um maior destaque. Essa técnica busca produzir correntes nos enrolamentos do estator de tal modo que o fluxo de campo esteja sempre perpendicular ao fluxo de armadura. Os avanços obtidos nessa área juntamente com o a redução de custo nos dispositivos de eletrônica de potência e microcontroladores, vem fazendo com que o acionamento de motores de indução com velocidade variável seja uma alternativa econômica para muitas aplicações industriais. A utilização dessa estratégia vem substituindo os equivalentes em corrente contínua, uma vez que com essas estratégias o motor de indução possui o mesmo comportamento de um motor CC com excitação em separado. Porém, as máquinas de indução são mais complexas no âmbito de seu controle em relação as máquinas de corrente contínua devido ao seu acoplamento e dinâmica não linear. (LIPO,1997;LEONHARD,1996)

3 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

3.1 Fundamentos

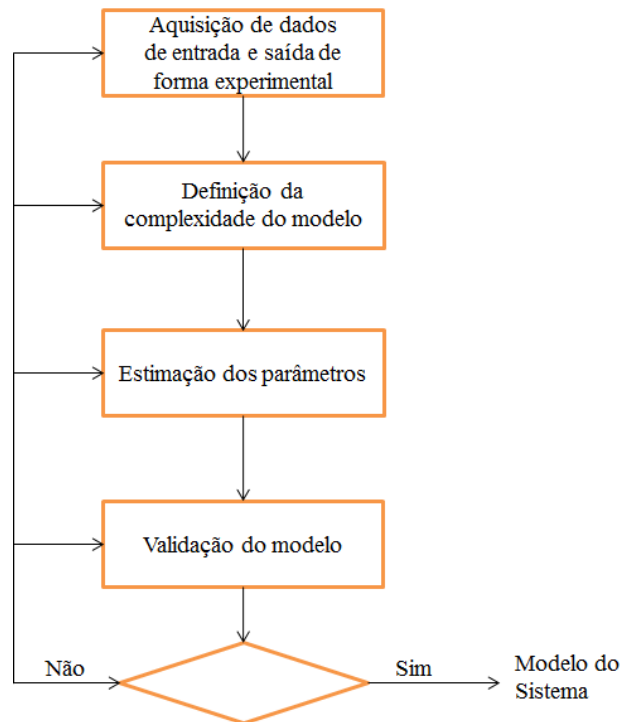
De acordo com Landau (2006), a identificação de sistemas é uma abordagem experimental que tem como objetivo a obtenção do seu modelo dinâmico. Esse processo é composto de quatro etapas:

- Aquisição de dados de entrada/saída através de um protocolo de experimentação;
- Definição da estrutura do modelo. Tendo como parâmetro fundamental a ser analisado o quão complexo ele irá ser mediante os parâmetros propostos;
- Estimação dos parâmetros do modelo;
- Validação do modelo identificado.

Uma operação de identificação completa deve necessariamente compreender todas as etapas anteriormente citadas. Os métodos a serem utilizados em cada uma das etapas varia de acordo com o modelo desejado (paramétrico ou não paramétrico, tempo contínuo ou tempo discreto) e as condições experimentais em que se passa o processo de identificação (hipótese sobre ruído, malha aberta ou identificação em malha fechada). Vale ressaltar também a importância da etapa de validação do modelo identificado, pois apenas assim pode-se afirmar algo quanto a validade de representação do modelo ao sistema real.

A necessidade de validar o modelo encontrado vem da premissa de que não se tem um método universal para estimação dos parâmetros de um dado sistema, assim, dependendo da metodologia escolhida e das condições experimentais pode-se chegar a modelos que não representem bem um sistema, ao ponto de invalidar o até então modelo encontrado. Nesse caso, é necessário reconsiderar os algoritmos de estimação utilizados, a complexidade atribuída ao modelo ou as condições experimentais em que se deu o processo de identificação. A identificação de um sistema deve ser considerada como um processo iterativo, conforme ilustra a figura abaixo.

Figura 6 - Metodologia de identificação de sistemas



Fonte: Adaptado Landau.

A metodologia clássica para o processo de identificação é aquela em que se observa a saída de um sistema através da resposta a um degrau de entrada. Entretanto, uma série de desvantagens está associada a esse tipo de metodologia, tais como, exatidão reduzida, má influência dos distúrbios, sinais de teste com grande magnitude (que raramente são aceitos em sistemas industriais) e ausência de validação do modelo. Por esse motivo, as etapas que constituem um processo de identificação devem ser realizadas com bastante cuidado, visando a obtenção de um modelo que represente bem o sistema em questão.

A aquisição dos dados de entrada e saída é a primeira etapa no processo de identificação e consiste fundamentalmente em um processo experimental. Nesse passo deve-se selecionar um sinal de excitação para a planta que possua um espectro de frequência rico o suficiente para cobrir a largura de banda do sistema e conseqüentemente mapear o que se deseja. O sinal escolhido para excitação deve possuir uma baixa magnitude, pois na prática essas variações de magnitude na entrada são fortemente restritas. A partir dessas premissas foram utilizados degraus que mudam de referência ao longo do tempo na planta para a obtenção dos dados, utilizou-se desse tipo de entrada pois a natureza da planta exige que se tenha uma maior suavidade em seu acionamento, para evitar desconformidades de operação e prever possíveis referências que potencialmente serão utilizadas no dia-dia da planta.

Assim, ainda nessa etapa deve-se definir um período em que esse experimento vai ocorrer e o período de amostragem em que os dados serão coletados. Após selecionado o período de amostragem para cada situação em particular, deve-se coletar um conjunto de medidas visando a obtenção de um modelo discreto. No problema proposto iremos coletar o sinal de referência que definirá a trajetória que o manipulador deverá realizar e a posição de cada junta no decorrer dessa trajetória. Serão realizadas medidas em instantes de tempos definidos a fim de construir os seguintes conjuntos:

$$Z^N = \{U, Y\} \quad (15)$$

$$U = \{u(t) / t = 1, \dots, N\} \quad Y = \{y(t) / t = 1, \dots, N\} \quad (16)$$

Onde:

$U \rightarrow$ Conjunto dos sinais de entrada;

$Y \rightarrow$ Conjunto dos sinais de saída;

$N \rightarrow$ Universo de experimentação em que t especifica os instantes de amostragem múltiplos de T_s .

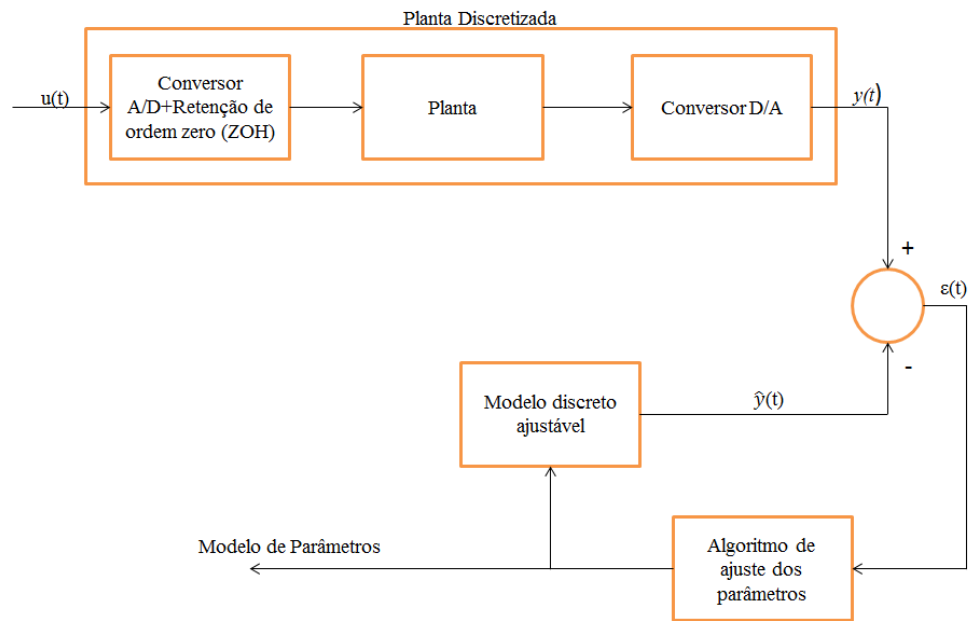
Na fase seguinte é realizada a estimativa da complexidade do modelo, que consiste basicamente na definição das técnicas que serão utilizadas em seu processo de obtenção. Os métodos que serão utilizados para realização da estimativa serão os de mínimos quadrados recursivos e mínimos quadrados não recursivos, que será melhor abordado nos tópicos a seguir.

Posteriormente, é feita a estimação dos parâmetros do modelo com parte dos dados colhidos na primeira parte do processo de identificação, esse procedimento se resume em definir os valores dos parâmetros até então desconhecidos do modelo em questão. Comumente caracteriza-se essa etapa como um problema de otimização, no qual o melhor modelo é aquele que melhor se adequa às medidas para os critérios definidos. Esse processo de ajuste dos parâmetros é feito de modo que o erro entre a saída real do sistema e a do modelo estimado seja mínimo, levando em consideração os critérios adotados.

O processo de estimação de parâmetros para modelos de tempo discreto é ilustrado figura 6. O sinal discreto $u(t)$ escolhido para identificação é aplicado por meio de um

conversor analógico-digital a planta, seguido de uma retenção de ordem zero (ZOH). A saída da planta $y(t)$ é obtida por meio de um conversor digital-analógico.

Figura 7 - Processo de estimação de parâmetros.



Fonte: Adaptada Landau.

O erro entre a saída do sistema $y(t)$ no instante t e a saída prevista pelo modelo $\hat{y}(t)$ é usado no algoritmo de adaptação de parâmetros que, a cada instante de amostragem, modifica os parâmetros do modelo para minimizar esse erro com base em um critério escolhido.

Após a obtenção do modelo uma validação objetiva é realizada através de testes estatísticos sobre o erro de previsão $\epsilon(t)$ e o resultado previsto. Essa avaliação de validade é realizada com a parte dos dados que sobram do processo de estimação de parâmetros. O critério de separação entre conjunto de estimação e conjunto de validação fica a cargo do desenvolvedor, mas aconselha-se geralmente uma proporção de 80% e 20%, respectivamente.

A validação permite que o melhor modelo seja escolhido para uma determinada planta, ou seja, a melhor estrutura e o melhor algoritmo para a estimativa dos parâmetros.

Essa metodologia moderna de identificação de modelos de sistemas, sugerida por Landau, nos isenta de uma série dos problemas relacionados aos métodos clássicos mencionados anteriormente e também oferece outras possibilidades, como:

- Rastreamento das variações dos parâmetros do sistema em tempo real permitindo a sintonização dos controladores durante a operação;
- Identificação dos modelos de distúrbios;
- Modelagem dos ruídos do sinal de controle, tendo em vista sua eliminação;
- Detecção e medição das frequências de vibração;
- Análise espectral dos sinais.

Um elemento essencial para a implementação dessa metodologia é o algoritmo de adaptação de parâmetros, que aciona os parâmetros do modelo de previsão ajustável a partir dos dados coletados no sistema em cada instante de amostragem. A estrutura desse algoritmo tem uma característica recursiva, ou seja, o novo valor dos parâmetros estimados é igual ao valor anterior mais um termo de correção que dependerá das medições mais recentes.

Segundo Landau, os algoritmos de adaptação de parâmetros seguem normalmente a mesma estrutura, na qual é definido um vetor de parâmetros como um vetor dos diferentes parâmetros que devem ser identificados. Como segue:

$$\begin{bmatrix} \text{Novos} \\ \text{parâmetros} \\ \text{estimados} \\ \text{(Vetor)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Parâmetros} \\ \text{antigos} \\ \text{estimados} \\ \text{(Vetor)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Ganho} \\ \text{de} \\ \text{adaptação} \\ \text{(Matriz)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Função} \\ \text{de} \\ \text{Medição} \\ \text{(Vetor)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{Função} \\ \text{de} \\ \text{Predição de Erro} \\ \text{(Escalar)} \end{bmatrix}$$

Existem também algoritmos de identificação com metodologias não recursivas, que processam um conjunto de arquivos de entrada e saída num dado tempo de amostragem. Fazendo um breve comparativo entre a metodologia recursiva e não recursiva, pode-se então listar algumas vantagens das metodologias recursivas:

- Obtenção de um modelo estimado à medida em que o sistema evolui;
- Maior compactação de dados, uma vez que os algoritmos recursivos processam em cada instante apenas um par de entrada e saída em vez de todo o conjunto de dados;
- Requisitos muito mais baixos do computador em termos de memória processada;

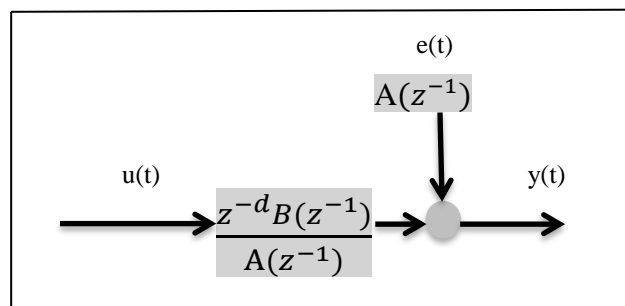
- Possibilidade de implementar sistemas de identificação em tempo real;
- Possibilidade de rastrear os parâmetros dos sistemas variáveis no tempo.

A última e não menos importante etapa do processo de identificação é a validação do modelo estimado. Ela é realizada pela comparação do modelo obtido com as medidas em um conjunto de dados que não foram utilizados na estimação do modelo. O objetivo é verificar se o modelo de saída excitado pela mesma entrada aplicada reproduz as variações da saída causadas pelas variações da entrada independentemente do efeito do ruído dentro de uma faixa preestabelecida de variação.

3.2 Estimador dos Mínimos Quadrados Não Recursivos

Segundo COELHO (2004), a metodologia de identificação por meio do estimador dos mínimos quadrados não-recursivos é caracterizada por uma entrada, $u(t)$, e uma saída, $y(t)$, colhidos experimentalmente de uma dada planta levando em consideração uma perturbação, $e(t)$, e um possível atraso da planta, z^{-d} . As características do sistema são então aproximadas através de dois polinômios em que não se conhece seus parâmetros como ilustra a figura a seguir.

Figura 8 - Diagrama de identificação de ajuste do modelo.



Fonte: Adaptado Coelho.

Na planta apresentada, a entrada $u(t)$ aplicada são as coordenadas cartesianas de um ponto no espaço que a garra do manipulador robótico deverá estar e a saída $y(t)$ é a posição que cada junta deverá admitir para fazer com que a garra chegue ao ponto desejado. O objetivo desse método de identificação é encontrar o valor dos coeficientes dos polinômios que melhor representam a planta, levando um erro mínimo entre o real colhido e o obtido pelo modelo encontrado.

Para a resolução da problemática deve-se primeiramente resolver o diagrama de blocos da figura 8, em que encontramos a seguinte equação:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) + e(t) \quad (17)$$

onde:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na} \quad (18)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb} \quad (19)$$

A partir disso, pode-se construir a equação de diferenças que possui o seguinte formato:

$$y(t) = -a_1y(t-1) - a_2y(t-2) - \dots - a_{na}y(t-na) + b_0u(t-d) + b_1u(t-d-1) + \dots + b_{nb}u(t-d-nb) + e(t) \quad (20)$$

O modelo apresenta uma forma generalizada do método onde tem-se que estimar $na+nb+1$ parâmetros utilizando o que se conhece do sistema, no caso a entrada e saída em cada instante de tempo. O termo $e(t)$ pode representar o erro de modelagem, o erro de medição ou o ruído na saída do tipo estocástico, determinístico ou *offset*.

Para a construção do algoritmo do estimador de mínimos quadrados a fim de identificar o manipulador robótico é mais conveniente tratar as medidas na forma de vetores. Assim, definindo o vetor de medidas $\varphi(t)$ que representa a trajetória de cada junta e a posição do *end-effector* resultante dessa trajetória, de dimensão $(na+nb+1)$ temos

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1) \quad -y(t-2) \quad \dots \quad -y(t-na) \quad u(t-d) \quad \dots \quad u(t-d-nb)] \quad (21)$$

O vetor de parâmetros a ser encontrado, $\theta(t)$, com a mesma dimensão possui o seguinte formato

$$\theta^T(t) = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_{na} \quad b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_{nb}] \quad (22)$$

Com isso, podemos reescrever a equação 20 que possui a seguinte forma

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta(t) + e(t) \quad (23)$$

Admitindo então que são realizadas N medidas suficientes para determinar os parâmetros desconhecidos da equação de diferença, tem-se que

$$\begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \dots \\ y(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi^T(0) \\ \varphi^T(1) \\ \dots \\ \varphi^T(N-1) \end{bmatrix} \theta + \begin{bmatrix} e(0) \\ e(1) \\ \dots \\ e(N-1) \end{bmatrix} \quad (24)$$

A representação matricial da equação 24 é

$$Y = \Phi\theta + E \quad (25)$$

onde a matriz de observação é

$$\Phi = \begin{bmatrix} -y(-1) & -y(-2) & \dots & -y(-na) & u(-d) & u(-d-1) & \dots & u(-d-nb) \\ -y(0) & -y(0) & \dots & -y(1-na) & u(1-d) & u(-d) & \dots & u(1-d-nb) \\ -y(1) & -y(0) & \dots & -y(2-na) & u(2-d) & u(1-d) & \dots & u(2-d-nb) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -y(N-2) & -y(N-3) & \dots & -y(N-na-1) & u(N-d-1) & u(N-d-2) & \dots & u(N-nb-2) \end{bmatrix} \quad (26)$$

Dessa forma, o vetor de saída assume a seguinte forma:

$$Y^T = [y(0) \ y(1) \ y(2) \ \dots \ y(N-1)] \quad (27)$$

A partir disso, podemos então estimar o vetor de parâmetros, θ , utilizando-se de um algoritmo de mínimos quadrados. Aplicando o vetor estimado θ , a saída que melhor representa o sistema, \hat{y} , é calculada por

$$\hat{Y} = \Phi\theta \quad (28)$$

Dessa forma, o erro de previsão, ε , entre o real medido de forma experimental e o estimado por meio do algoritmo dos mínimos quadrados pode ser avaliado pela seguinte equação

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} = Y - \Phi\theta \quad (29)$$

Para a realização da implementação do algoritmo com o fim de encontrar os valores estimados da matriz θ chegamos na seguinte expressão

$$\theta = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T Y \quad (30)$$

É importante ressaltar que nesse método o erro, ε , é ponderado igualmente e isso corresponde à suposição de que todas as medidas têm a mesma precisão.

3.3 Estimador dos Mínimos Quadrados Recursivo

Segundo COELHO (2004), a construção do estimador de mínimos quadrados recursivos tem como premissa comparar a estimativa baseada nas medidas realizadas num determinado instante de tempo que varia de 1 até $t = N$ com a estimativa baseada nas medidas nos instantes de 1 até $N+1$. A utilização desta metodologia torna possível a construção de um sistema que se adapte em tempo real na medida em que a planta sofre variações.

Pode-se realizar o início da análise a partir dos conceitos que foram definidos na seção anterior. Com isso, temos que

$$\theta = [\phi^T \phi]^{-1} \phi^T Y \quad (31)$$

Fazendo uso da metodologia dos mínimos quadrados definida por COELHO, supõe-se que no instante $t + 1$ há uma nova medida do sistema. Dessa forma, pode-se reescrever as matrizes ϕ e Y aumentadas da seguinte maneira

$$\phi(t+1) = \begin{bmatrix} \phi^T(1) \\ \phi^T(2) \\ \dots \\ \phi^T(t) \\ \phi^T(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \phi^T(t+1) \end{bmatrix} \quad Y(t+1) = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \dots \\ y(t) \\ y(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y(t) \\ y(t+1) \end{bmatrix} \quad (32)$$

A partir disso podemos reescrever as estimativas no instante $t+1$ da seguinte forma

$$\theta(t+1) = [\phi^T(t+1)\phi(t+1)]^{-1} \phi^T(t+1)Y(t+1) \quad (33)$$

A construção do algoritmo do estimador de mínimos quadrados é composto também por uma matriz de covariância e de um ganho desse estimador que depende dessa matriz. Essa matriz tem por função fundamental realizar a convergência dos valores dos coeficientes que irão compor a equação de diferenças que irá representar o sistema. Onde a mesma é representada pela seguinte equação:

$$P(t+1) = P(t) \frac{P(t)\phi(t+1)\phi^T(t+1)P(t)}{1+\phi^T(t+1)P(t)\phi(t+1)} \quad (34)$$

Por meio dessa definição, pode-se obter também definir o ganho do estimador

$$K(t + 1) = P(t + 1)\varphi(t + 1) = \frac{P(t)\varphi(t+1)}{1 + \varphi^T(t+1)P(t)\varphi(t+1)} \quad (35)$$

Com isso pode-se calcular o vetor de parâmetros estimados

$$\theta(t + 1) = \theta(t) + K(t + 1)\varepsilon(t + 1) \quad (36)$$

Assim como na seção anterior, podemos definir o erro de previsão do estimador dos mínimos quadrados recursivos

$$\varepsilon(t + 1) = y(t + 1) - \varphi^T(t + 1)\theta(t) \quad (37)$$

Por fim, com as expressões necessárias pode-se descrever um algoritmo básico para o estimador dos mínimos quadrados recursivos:

1. Medir a saída e entrada do sistema;
2. Atualizar o vetor de medidas;
3. Calcular o erro de previsão;
4. Calcular o vetor de parâmetros estimados;
5. Calcular a matriz de covariância.

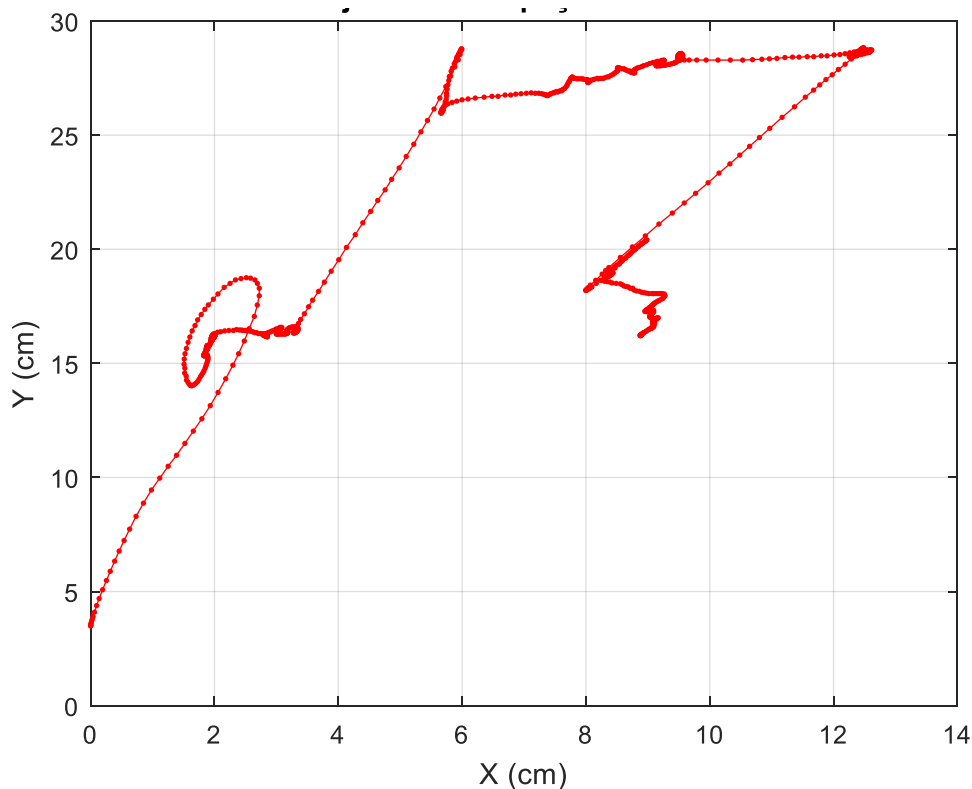
4 RESULTADOS

Para a identificação do manipulador robótico, foram trabalhadas apenas duas juntas, a junta 1 e a junta 3, que são responsáveis pelo o movimento rotacional da base e translacional do terceiro ligamento, onde se localiza o *end-effector*. A construção da base de dados utilizada nos algoritmos de identificação foi construída através da coleta experimental da posição de cada junta medidas através de um *encoder*, após isso foi utilizado esses dados para gerar a cinemática direta do manipulador em questão. Com isso obteve-se a posição que cada junta deveria admitir para proporcionar a localização *end-effector*.

Nas seções abaixo será abordado os resultados dos métodos de identificações que são os mínimos quadrados recursivos e não recursivos.

Para a identificação do manipulador robótico, como mencionado anteriormente, foi usando um plano 2D formado pelas juntas 1 e 3. Assim, para uma melhor identificação, foi utilizado apenas uma coordenada cartesiana 2D do efeito final. Por meio disso obtemos num plano 2D a trajetória produzida pelo *end-effector* como ilustra a figura a seguir.

Figura 9 - Trajetória no espaço cartesiano.



Fonte: O autor.

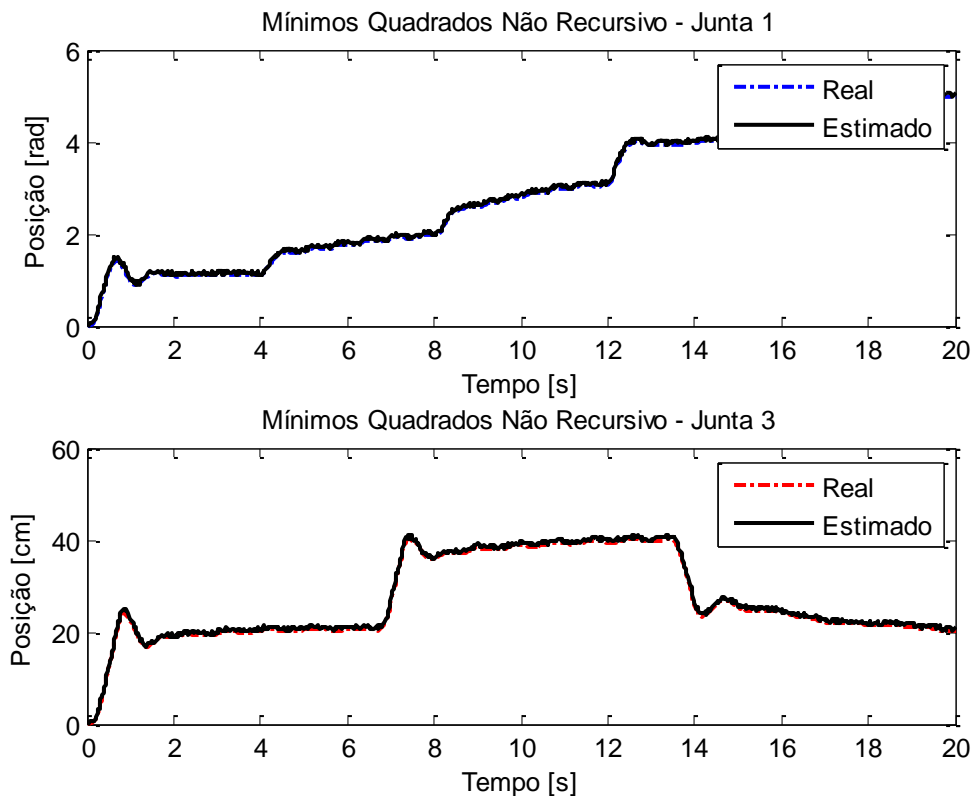
A etapa de identificação do modelo foi realizada primeiramente com a

organização de sua base de dados. Onde esta se deu com uma divisão de treino e teste, onde obteve-se 80% e 20% respectivamente.

4.1 Resultados dos Mínimos Quadrados Não Recursivos

O método dos mínimos quadrados não recursivos é uma técnica mais comumente usada em aplicações de regressões. Neste trabalho, propõe-se uma análise por esse método, que é bastante importante na literatura quando se trata de identificação de sistemas. Abaixo está a Figura 10, que representa a identificação da cinemática inversa das juntas 1 e 3 do manipulador robótico pelo método dos mínimos quadrados não recursivos, após a etapa de validação com todos os modelos gerados de treino e teste.

Figura 10 - Identificação pelo método dos mínimos quadrados não recursivo



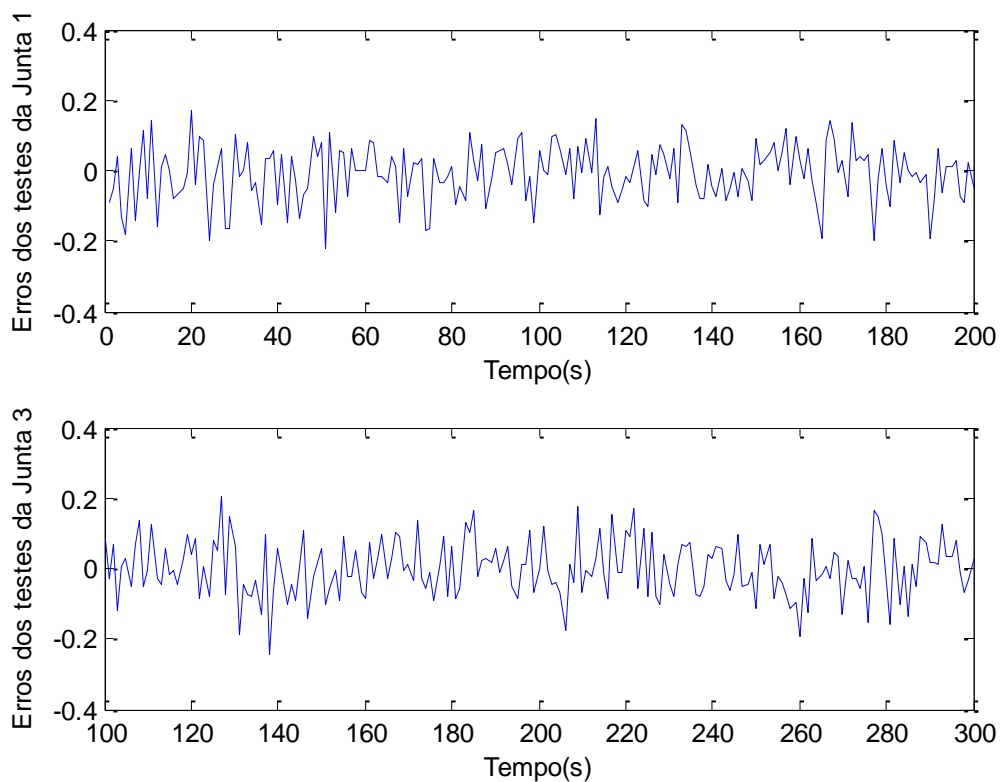
Fonte: O autor.

De acordo com a Figura 10, pode-se perceber que a identificação está de forma coerente com um o *fit* muito alto. Assim, o método dos mínimos quadrados não recursivos conseguiu identificar de forma adequada a cinemática inversa do manipulador robótico.

A Figura 11 apresenta também os erros da identificação dos mínimos quadrados não recursivos após a etapa de validação.

Durante o desenvolvimento dos algoritmos de identificação foi usado a coeficiente de correlação múltipla, logo essa métrica foi aplicada nas etapas de identificações. Assim, ao se observar na figura 11 foi é mostrado os erros da etapa de testes, ou seja, 20% das amostras das juntas 1 e 3.

Figura 11- Erro dos Mínimos Quadrados recursivo das juntas 1 e 3

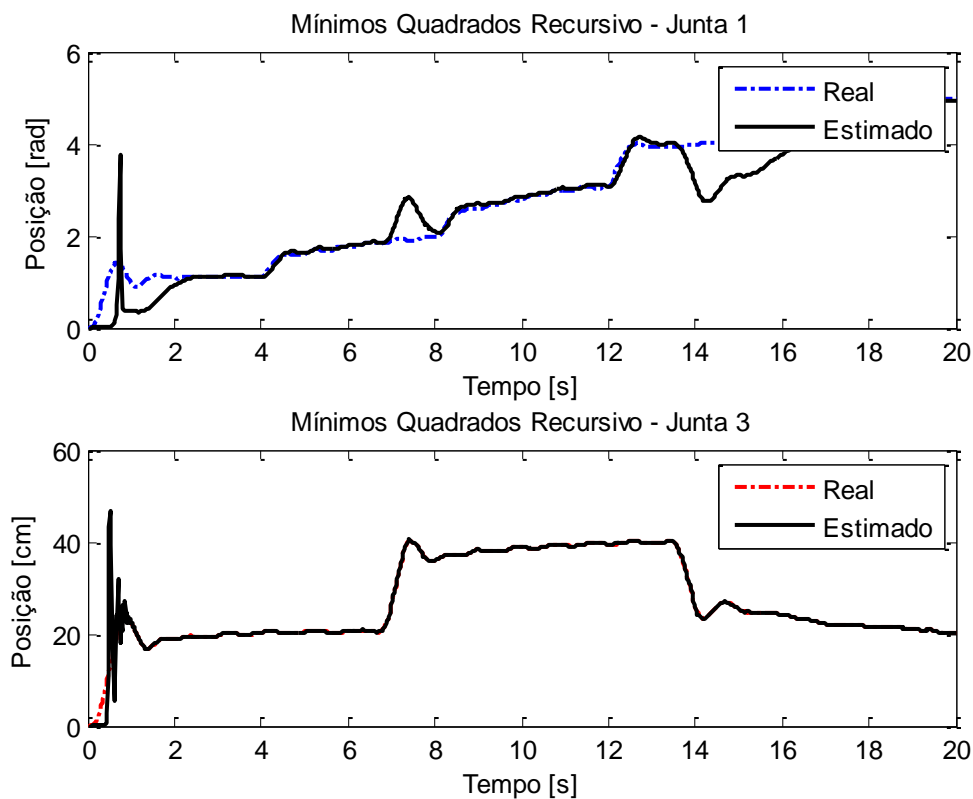


Fonte: O autor.

4.2 Resultado dos Mínimos Quadrados Recursivos

O método dos Mínimos Quadrados Recursivos é extremamente importante em aplicações de tempo real que precisam de uma resposta rápida e que atualizam constantemente. Será identificada a cinemática inversa do manipulador com uma ponderação empírica da matriz de covariância. A Figura 12 apresenta a estimação das trajetórias das juntas 1 e 3, em que o modelo foi testado após a etapa de validação.

Figura 12 - Identificação das trajetórias das juntas com Mínimos Quadrados Recursivo



Fonte: O autor.

Uma das dificuldades do método dos mínimos quadrados recursivos é encontrar a matriz de covariância que se adeque com os resultados de treinamento e teste. Para o presente trabalho foi feita uma ponderação através de métodos empíricos. Ou seja, tentativa e erro, sempre observando a saída do sistema. Essa matriz é responsável pela convergência dos valores do vetor coeficientes, θ , que serão responsáveis pela criação da equação de diferenças que irá representar o sistema. É importante ressaltar também que a diagonal principal da matriz de covariância possui maior influência na obtenção desses valores.

Durante a sintonia da matriz de covariância foi detectada que os valores [0, 1, -1, -

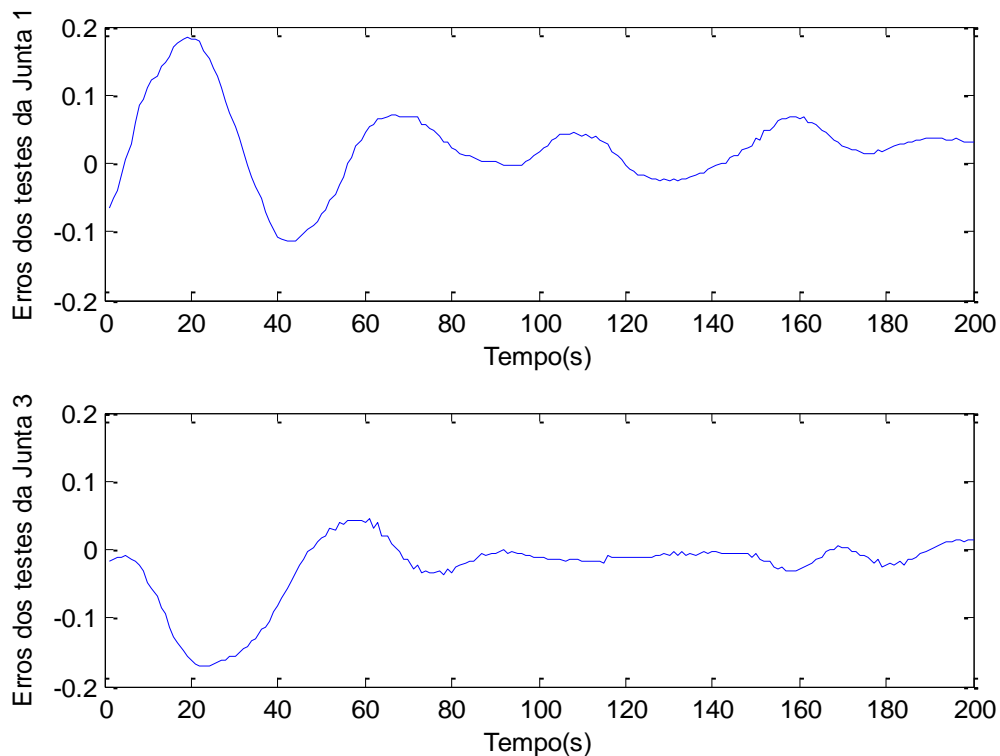
10, 10 e 100], possuem uma boa influência nos resultados. Logo, as posições dos índices da última linha foram ponderados com valores [-10, 10 e 100], já na terceira linha foram: [-1, 10 e 100]. A segunda linha foi ajustado com os valores : [0 e 1], e por ultimo a primeira linha foi: [0, 1 e 10].

Conforme a Figura 12 pode-se perceber que o projeto dos mínimos quadrados recursivos conseguiu identificar, mas com desempenho médio, que a etapa de treinamento e teste ficaram entre 0.7 e 0,79 em ambas as juntas. A matriz de covariância gerada após com um melhor desempenho alcançado foi:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 10 & 10 & 100 \\ -10 & 10 & 100 & 10 \end{bmatrix}$$

A figura 13 apresenta os erros resultados dos mínimos quadrados recursivos na etapa de testes das juntas 1 e 2. A figura dará uma visão da qualidade de identificação do modelo.

Figura 13 - Erro dos mínimos quadrados recursivos das juntas 1 e 3



4.4 Comparação dos métodos

Para avaliar os métodos utilizados, foram usadas duas métricas para poder obter o melhor modelo de identificação em ambos. As métricas de avaliação foram o R^2 (coeficiente de correlação múltipla) e o custo computacional.

De acordo com a Tabelas 2, são apresentados os resultados oriundos das identificações da cinemática inversa do manipulador robótico, avaliados pelo R^2 (Coeficiente de Correlação), dado pela Equação 38, e pelo custo computacional.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (38)$$

Onde:

y_i : dados observados;

\bar{y} : é a média dos dados observados;

\hat{y}_i : dados estimados pelo modelo.

Conforme mostram as Tabela 2, 3, 4 e 5 o método dos mínimos quadrados não recursivos (NRLS) conseguiu uma severidade em comparação com os mínimos quadrados recursivos, porém perde no custo computacional.

Tabela 2. Comparação dos Resultados do R^2 durante a etapa de treinamento da 1ª junta.

RESULTADOS OBTIDOS DA 1ª JUNTA		
Métodos	R^2	Custo Computacional
RLS	0.78	3 s
NRLS	0.90	5 s

Tabela 3. Comparação dos Resultados do R^2 durante a etapa de treinamento da 3ª junta.

RESULTADOS OBTIDOS DA 3ª JUNTA		
Métodos	R^2	Custo Computacional
RLS	0.81	2 s
NRLS	0.86	3 s

Tabela 4. Comparação dos Resultados do R^2 durante a etapa de testes da 1ª junta.

RESULTADOS OBTIDOS DA 1º JUNTA		
Métodos	R^2	Custo Computacional
RLS	0.71	2 s
NRLS	0.75	2.5 s

Tabela 5. Comparação dos Resultados do R^2 durante a etapa de testes da 3ª junta.

RESULTADOS OBTIDOS DA 3º JUNTA		
Métodos	R^2	Custo Computacional
RLS	0.73	1 s
NRLS	0.83	2 s

Ambos os métodos conseguiram obter resultados aceitáveis, apesar dos dados serem totalmente não lineares. Os mínimos quadrados não recursivos tem uma característica de atualização da estimativa em cada iteração, por isso obteve resultados mais satisfatórios. Porém os resultados dos mínimos quadrados recursivos não podem ser desprezados, embora a diferença do R^2 seja muito alta. Porém, para sistemas em tempo real, o mesmo pode ser muito útil pelo fato de ser um algoritmo rápido conforme o custo computacional apresenta um bom tempo de execução.

5 CONCLUSÃO

Os trabalhos atuais estão em constantes avanços nas áreas de identificações de sistemas e robótica, visando melhores desempenhos, aplicações em diversas áreas como: médica, metalúrgica, entre outras. Dessa forma estudos sobre identificação de sistemas aplicados a robótica vem ganhando destaque. A robótica manipulada traz uma relevância diversa em muitas áreas de pesquisas, devido a isso ela está em constante desenvolvimento.

No presente trabalho foi apresentada uma revisão da literatura existente sobre manipuladores e suas modelagens. Foi abordada uma solução para a cinemática inversa usando métodos de identificação de sistemas em um manipulador robótico com juntas de motores de indução trifásicos. Foram apresentados 2 métodos de identificação de sistemas: Método dos mínimos quadrados recursivo e mínimos quadrados não recursivo.

Os métodos de identificação tiveram a finalidade de estimar a cinemática inversa do manipulador citada anteriormente. Com intuito de acompanhar o envelhecimento da planta, assim sempre fazendo o ajuste necessário com o passar do tempo. Os métodos foram avaliados com métricas estatísticas e computacionais: R^2 (coeficiente de correlação múltipla) e custo computacional.

Os métodos apresentaram duas fases de identificação que é treinamento e teste, onde foi dividida respectivamente em 80% e 20%, no qual ambos os métodos apresentaram bons desempenhos conforme as métricas apresentadas. Logo o método dos mínimos quadrados não recursivo mostrou-se melhor para essa aplicação superando os resultados dos mínimos quadrados recursivo.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. Introdução à Identificação de Sistemas. **Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. 3. ed. [S.l.]: UFMG, 2007.
- AVAGO TECHNOLOGIES. **HEDM-55xx/560x HEDS-55x/56xx - Quick Assemble Twoand Three Channel Optical Encoders**. 2014. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 3. ed. [S.l.]: Elsevier, 2014.
- CARLOS, L. F.; Barragán, J. H.; Alanis, A. Y.; Daniel, A., N.; **Inverse kinematics of mobile manipulators based on differential Evolution**. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2018
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5ª ed. [S.l.]: Bookman, 2013.
- COELHO, A. A R.; COELHO, A. S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. [S.l.]: Editora UFSC, 2004.
- DINIZ, E., C. **UTILIZAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS EM MANIPULADOR ARTICULADO COM 2 GRAUS DE LIBERDADE CONSIDERANDO ESTRATÉGIAS DE CONTROLE VETORIAL DE CAMPO ORIENTADO INDIRETO E MODO DE CONTROLE DESLIZANTE**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, 2013.
- EL BADSI, B., BOUZIDI, B., MASMOUDI, A.. **DTC Scheme for a Four Switch InverterFed Induction Motor Emulating the Six-Switch Inverter Operation**. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, issue 7, 2013.
- Hidalgo, R.; Ortega, A B.; Pliego, A A.; Ocampo, J C.; Rosado, WM A.. **Dynamix analysis control of a three-revolute-prismatic-spherical parallel robot by algebraic parameters identification**. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019
- JÚNIOR, A.B.S.,DINIZ, E.C., BARRETO, L.H.S.C., ALMEIDA,O. M.,HONÓRIO, D.A.. **DSP-Based Position Control Applied to Squirrel-Cage Induction Motor Using Vector Control and Space Vector PWM Modulation.**, Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 2008.
- JÚNIOR, A., B., S. **ESTRATÉGIA HÍBRIDA APLICADA NO CONTROLE DE POSIÇÃO DE UM SISTEMA DE ACIONAMENTO COM MOTOR DE INDUÇÃO USANDO CONTROLE DE CAMPO ORIENTADO**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, 2014.
- KOSOW, I. I. **Máquinas Elétricas e Transformadores**, Ed. Globo, 15ª. Edição, 1996.
- LANDAU, I. D.; LOZANO, R.; M’SAAD, M.; KARIMI, A. **Adaptive control: algorithms, analysis and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- LEONHARD,W.. **Control of Electrical Drives**. New York: Springer-Verlag, 1996.

LIPO, T.A.; NOVOTNY, D.W.. **Vector Control and Dynamics of AC Drives**. Clarendon Press, Oxford, 1997.

MARK, W. SPONG; SETH, H.; VIDYASAGAR, M. **Robot Dynamics and Control**. 2 ed. [S.I.]: 2004.

Sherbiny, A.; Elhosseini, M. A.; Hiakal, A. Y.. **A new ABC variant for solving inverse kinematics problem in 5 dof robot arm**. 2018

SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L; VILLANI, L. **Robotics Modelling, Planning and Control**. [S.I.]: Springer.

SPONG, M. W., HUTCHINSON, S., VIDYASAGAR, M.. **Robot Modelling and Control** Wiley Student Edition, New Delhi, 2006

SEPULCHRE, R., DEVOS, T., JADOT, F., MALRAIT, F.. **Antiwindup Design for Induction Motor Control in the Field Weakening Domain**. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 21, issue 1, pp. 52-66, 2013.

VESELIC, B., PERUNICIC, B., MILOSAVLJEVIC, C.. **Improved Discrete-Time Sliding Mode Position Control Using Euler Velocity Estimation**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.57, issue 11, pp. 3840-3847, 2010.

VITTEK, J., BRIS, P., STULRAJTER, M., PACHA, M.. **Chattering Free Sliding Mode Control Law For Position Control of the Drive Employing Induction Motor**. Power Engineering Conference AUPEC '08, PP. 1-6, 2008.

Wang, J.; Liu, S.; Zhang, B.; Yu, C.. **Inverse kinematics-based motion planning for dual-arm robot with orientation constraints**. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2019

Yang, C.; Jiang, Y.; Na, J.; Xu, B.. **Adaptive Parameter Estimation and Control Design for Robot Manipulators With Finite-Time Convergence**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 65, NO. 10, 2018

Zhou, A.; Guo, H.; Wang, Y.; Zhu, Z.; Wu, J.; Liu, X.. **Inverse kinematics solution for robotic manipulator based on extreme learning machine and sequential mutation genetic algorithm**. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2018

Zhao, R.; Shi, Z.; Guan, Y.; Shao, Z.; Zhang, Q.; Wang, G.. **Inverse kinematic solution of 6R robot manipulators based on screw theory and the Paden-Kahan subproblem**. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2018