

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizadores)

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial****Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



# Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações

**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-258-0400-2

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.002221708>

1. Engenharia elétrica. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.

CDD 621.3

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br



## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro electricista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de subáreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta  
Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **APLICAÇÃO DO NIÓBIO NAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO**

Claudinei Guilherme Hoffmann

Luciana Paro Scarin Freitas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217081>

### **CAPÍTULO 2..... 14**

#### **FORECAST METHOD FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES: A CASE STUDY OF THE ONTARIO'S ELECTRICAL SYSTEM**

Bruno Knevitz Hammerschmitt

Felipe Cirolini Lucchese

Marcelo Bruno Capeletti

Renato Grethe Negri

Leonardo Nogueira Fontoura da Silva

Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Alzenira da Rosa Abaide

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217082>

### **CAPÍTULO 3..... 28**

#### **IDENTIFICADOR DE FALHAS PARA MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO BASEADO EM SUPPORT VECTOR MACHINE IMPLEMENTADO EM CLOUD**

Jacyeude de Moraes Passos Araujo Segundo

Carlos Vinicius Alves Coimbra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217083>

### **CAPÍTULO 4..... 41**

#### **DETECÇÃO DE AVARIAS EM ISOLADORES DE POTÊNCIA: UMA PESQUISA DA LITERATURA CORRELATA À UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES**

Ivan Nunes da Silva

Beatriz de Lima Tavares

Sofia Moreira de Andrade Lopes

Danilo Hernane Spatti

Rogério Andrade Flauzino

Victor Hideki Yoshizumi

Ana Cláudia Carvalho Barquete

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217084>

### **CAPÍTULO 5..... 56**

#### **LEITURA DE PARÂMENTOS DE MOVIMENTO DE UM PÊNDULO RÍGIDO CONTÍNUO UTILIZANDO SENSOR DE EFEITO HALL**

Getúlio Teruo Tateoki

Jackson Tsukada

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217085>

<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>65</b>
PANELES FOTOVOLTAICOS ADICIONALES A COLECTORES PARABÓLICOS PARA UN SISTEMA AUTÓNOMO DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR EN ZONAS TROPICALES	
Rosenberg J Romero	
Yuridiana Rocio Galindo Luna	
Jesús Cerezo Román	
Moisés Montiel González	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217086">https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217086</a>	
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>94</b>
UM MODELO HÍBRIDO DE BUSCA HARMÔNICA E OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS APLICADO NO PROJETO DO CONTROLADOR LQR	
Luis B. P. Nascimento	
Vandilberto P. Pinto	
Márcio A. B. Amora	
Rômulo N. C. Almeida	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217087">https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217087</a>	
<b>CAPÍTULO 8.....</b>	<b>108</b>
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOVIMENTO DO ROBÔ MANIPULADOR SCARA T3 401SS FABRICANTE EPSON	
Bruno Suracci de Lima	
Flávio Luiz Rossini	
João Henrique Dias Corrêa	
João Marcos Pericaró Lopes	
Reginaldo Ferreira de Sousa Barbosa	
Yuri Ruzzene Barroso	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217088">https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217088</a>	
<b>CAPÍTULO 9.....</b>	<b>126</b>
SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA SOB A FORMA DE HIDROGÊNIO (SAEEH <sub>2</sub> ) INSTALADO NA UHE ENG. SÉRGIO MOTA UTILIZANDO O SOFTWARE HOMER	
Juarez Corrêa Furtado Júnior	
Ennio Peres da Silva	
Vitor Feitosa Riedel	
Ana Beatriz Barros Souza	
Hélio Nunes de Souza Filho	
Demóstenes Barbosa da Silva	
Diogo Hernandez de Oliveira Barbosa	
Thiago Dias Alencar Ferreira	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217089">https://doi.org/10.22533/at.ed.0022217089</a>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES .....</b>	<b>138</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO.....</b>	<b>139</b>

## MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE MOVIMENTO DO ROBÔ MANIPULADOR SCARA T3 401SS FABRICANTE EPSON

*Data de aceite: 01/08/2022*

### **Bruno Suracci de Lima**

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão  
Campo Mourão - Paraná - Brasil

### **Flávio Luiz Rossini**

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão  
Campo Mourão - Paraná - Brasil

### **João Henrique Dias Corrêa**

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão  
Campo Mourão - Paraná - Brasil

### **João Marcos Pericaro Lopes**

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão  
Campo Mourão - Paraná - Brasil

### **Reginaldo Ferreira de Sousa Barbosa**

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão  
Campo Mourão - Paraná - Brasil

### **Yuri Ruzzene Barroso**

Departamento Acadêmico de Engenharia Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Campo Mourão  
Campo Mourão - Paraná - Brasil

**RESUMO:** O artigo propôs a modelagem matemática, simulação e análise do robô manipulador SCARA T3 401SS da fabricante Epson. O assunto se justifica na demanda por crescimento e desenvolvimento da robótica na indústria, a qual esta diretamente relacionada com a competitividade do setor e do país. A Confederação Nacional Da Industria (CNI) desenvolveu uma pesquisa sobre os resultados das empresas que adotaram conceitos da indústria 4.0, sendo os resultados divulgados no ano de 2018. No Brasil existem 1.595 unidades com instalações de robôs. Assim, desenvolveu-se os modelos estático e dinâmica do referido robô e a utilização de um sistema de controle não linear denominado de controle particionado baseado em modelo no espaço de juntas. A partir dessa proposta, construiu-se o código no ambiente do software MATLAB®. Em seguida, realizou-se a simulação e foram obtidos os resultados numérico, quanto a posição, velocidade e aceleração do efetuador em relação a base fixa do robô. Por meio da descrição matemática e da simulação computacional, os resultados se mostraram coerentes e promissores, os quais têm a finalidade de contribuir com estudantes e profissionais da área que buscam modelos e comportamentos temporais, a fim de checagem, comparação e implementar em novas tecnologias embarcadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Robô Scara T3 401SS, modelagem dinâmica, modelagem cinemática, sistema de controle não linear.

**ABSTRACT:** The article proposed the mathematical modeling, simulation and analysis

of the robot manipulator SCARA T3 401SS from Epson. The subject is justified in the demand for knowledge and development of robotics in the industry, which is directly related to the competitiveness of the sector and the country. The National Confederation of Industry (NCI) developed a survey on the results of companies that adopted industry 4.0 concepts, and the results were released in 2018. In Brazil there are 1,595 units with robot installations. Thus, the static and dynamic models of the robot were developed and the use of a non-linear control system called partitioned control based on a joint space model. Based on this proposal, the code was built in the MATLAB® software environment. Then, the simulation was carried out and the numerical results were obtained, regarding the position, speed and acceleration of the effector in relation to the fixed base of the robot. Through mathematical description and computer simulation, the results proved to be coherent and promising, which are intended to contribute to students and professionals in the area who seek temporal models and behaviors, in order to check, compare and implement new embedded technologies.

**KEYWORDS:** Scara T3 401SS robot, dynamic modeling, kinematic modeling, non-linear control system.

## 1 | INTRODUÇÃO

Desde 2010, a demanda por robôs industriais aumentou consideravelmente, devido à tendência de automação e inovação tecnológica industrial e uso da robótica. Após a queda nas instalações de robôs em 2019, por conta da guerra comercial entre China e Estados Unidos da América, o número de instalações de robôs tornou a crescer em 2020, apesar da situação de pandemia global, e atingiu o número de 383.545 unidades instaladas. No Brasil, entretanto, esse número caiu de 1.833 para 1.595 unidades instaladas [1].

Apesar do Brasil não estar entre os maiores consumidores de robôs do mundo, assim como de plantas industriais instaladas, a robótica ainda é uma área que demanda de conhecimento e desenvolvimento, pois o uso da robótica está diretamente relacionada à competitividade da indústria [1]. De acordo com a pesquisa da Confederação Nacional da Indústria (CNI), as empresas que adotaram os conceitos da indústria 4.0 obtiveram melhores resultados do que possuíam anteriormente [2].

Em certas situações, a intervenção humana se torna limitada ou impossível, tais com condições ambientais, incapacidade física, alta precisão de execução, fator de escala de força ou de movimento, etc. Dessa forma, torna-se atrativo o uso de sistemas robóticos, o qual surge como uma possível solução no meio industrial. Ao considerar o fator de escala, destaca-se o uso da força em aplicações industriais, como no caso da manipulação de equipamentos de dobra de chapas metálicas, usados na indústria automobilística. Existem outras aplicações de extrema precisão, onde o robô se movimenta a partir do rastreamento de trajetória, sendo essa preestabelecida para execução da respectiva tarefa. Desse modo, o uso de manipuladores robóticos se torna atrativo e motiva tanto o desenvolvimento de máquinas como o aperfeiçoamento de sistemas que visam auxiliar o homem em suas atividades de projeto e desenvolvimento [3].

Nesse contexto, o presente artigo desenvolveu um estudo de caso aplicado ao Robô Manipulador Scara T3 401SS da fabricante EPSON [4]. A partir das notas de aula da disciplina de Introdução à Robótica<sup>1</sup> do curso de Engenharia Eletrônica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Campo Mourão [5], realizaram-se as modelagens da cinemática direta e da dinâmica do robô, além da aplicação de uma estratégia de controle não linear de posição.

O artigo se encontra organizado do seguinte modo: na Seção II, relatou-se sobre a descrição do modelo matemático; na Seção III, desenvolveu-se a cinemática direta do manipulador; na Seção IV, realizou-se o planejamento de trajetória; na Seção V, desenvolveram-se as equações dinâmicas; na Seção VI, implementou-se o controle não linear de torque do robô; na Seção VII, apresentou-se os resultados gráficos da trajetória, da dinâmica e do sistema controle baseado em modelo; e na Seção VIII, descreveu-se os resultados do trabalho.

## 2 | DESCRIÇÃO DO MODELO

Considerou-se o robô SCARA modelo T3 401SS da fabricante Epson para a modelagem matemática, a qual incluem o modelo estático, representado pela cinemática direta, e a descrição dinâmica, além da estratégia de controle. Toda modelagem matemática e o controle foram baseados na literatura do CRAIG [6]. O referido robô possui três graus de liberdade, na qual duas juntas são rotativas e a última é prismática, abreviado por RRP ou 2RP, ilustrado na Figura 1.



Fig. 1. Robo Epson modelo T3 401SS [7]

<sup>1</sup> Aulas ministradas pelo Prof. Dr. Flávio Luiz Rossini na disciplina de Introdução a Robótica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus de Campo Mourão - UTFPR-CM, durante o primeiro semestre de 2022

Para melhor inferir sobre o modelo matemático, desenvolveu-se um esquema mecânico em duas dimensões do robô, estabeleceu-se a hipótese de simetria em relação ao eixo  $X$ , conforme ilustrado na Figura 2. Na referida figura, observam-se os elos e juntas com os respectivos Sistemas de Referência (SR)  $\{i\}$ , com  $i = 1, 2, 3, 4$ , localizados na origem de cada elo ou corpo rígido do robô.

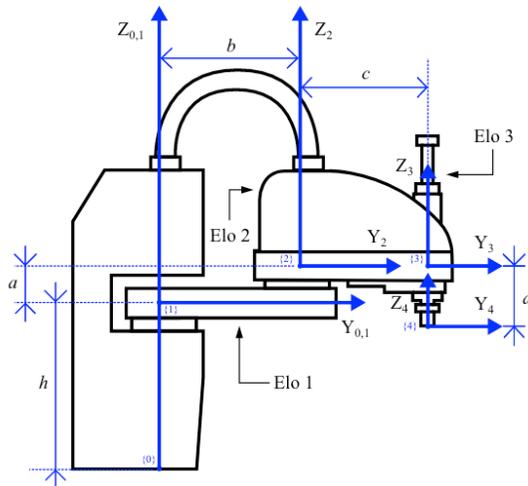


Fig. 2. Modelo mecânico 2D

### A. Posição do SR $\{i\}$

Nesta subsecção, são apresentadas as posições dos SR  $\{i\}$  em relação ao SR  $\{i - 1\}$ , com  $i = 1, 2, 3, 4$ . A partir do estabelecimento do SR 0 como origem e fixo, os demais SR são móveis e foram obtidos conforme descrito:

$${}^0P_1 = [0 \quad 0 \quad h]^T \quad (1)$$

$${}^1P_2 = [0 \quad b \quad a]^T \quad (2)$$

$${}^2P_3 = [0 \quad c \quad 0]^T \quad (3)$$

$${}^3P_4 = [0 \quad 0 \quad -d]^T \quad (4)$$

sendo  $d$  o movimento prismático do SR  $\{3\}$ .

### B. Orientação do SR $\{i\}$

Para descrição completa de um SR, além da posição há necessidade da orientação do mecanismo. Assim, realizaram-se as projeções dos SR  $\{i\}$  em relação ao SR  $\{i - 1\}$ , com  $i = 1, 2, 3, 4$ , expresso como:

$${}^i{}_{i-1}R = \begin{bmatrix} X_i X_{i-1} & Y_i X_{i-1} & Z_i X_{i-1} \\ X_i Y_{i-1} & Y_i Y_{i-1} & Z_i Y_{i-1} \\ X_i Z_{i-1} & Y_i Z_{i-1} & Z_i Z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A projeção do SR 1 em relação ao SR 0 em torno do eixo Z, expressada por:

$${}^0{}_{1}R = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

sendo  $\cos(\theta_1) = c_1$  e  $\sin(\theta_1) = s_1$ .

Analogamente para o SR 2 em relação ao SR 1 em torno do eixo Z, obtida por:

$${}^1{}_{2}R = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

sendo  $\cos(\theta_2) = c_2$  e  $\sin(\theta_2) = s_2$ .

No SR {3} em relação ao SR {2} ocorre o movimento prismático ao longo do eixo Z, portanto a matriz rotacional é igual a identidade de ordem 3, dada por:

$${}^2{}_{3}R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Por fim, o SR {4} em relação ao SR {3} em torno do eixo Z, a matriz rotacional é obtida como:

$${}^3{}_{4}R = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

sendo  $\cos(\theta_4) = c_4$  e  $\sin(\theta_4) = s_4$ .

### C. Equação Transformação

Para descrição completa da Cinemática Direta do robô, o vetor de posição, Eqs. (1)-(4), e a matriz rotacional, Eqs. (6)-(9), dos respectivos SR devem ser concatenados numa estrutura única, denominada de Equação Transformação (ET). A forma geral da ET é dada por:

$${}^i{}_{i-1}T = \begin{bmatrix} {}^i{}_{i-1}R & {}^i{}_{i-1}P_i \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

A seguir são listadas as ETs para cada elo, Eq. (10), com  $i = 1, 2, 3, 4$ , da forma:

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

### 3 I CINEMÁTICA

Cinemática é a área do conhecimento que trata do assunto sem considerar as forças que o causam, essa trata apenas da posição, velocidade, aceleração ao logo do tempo e demais derivadas, a partir da geometria. Nesta etapa serão consideradas as posições e orientações dos SR do robô em uma configuração estática, afim de determinar a posição dos elos em relação ao SR{0}.

#### A. Cinemática Direta

A Cinemática Direta (CD), corresponde a descrição matemática estática do robô, essa descrição possui como variáveis independentes  $\theta = [\theta_1, \theta_2, d]^T$  e como variáveis dependentes a posição cartesiana do SR {4},  ${}^0P_4 = \{x \ y \ z\}^T$ .

Afim de localizar o efetuador final, SR {4}, em relação a base fixa do robô, SR {0}, realizou-se a multiplicação das ETs, Eqs. (11)-(14), da forma:

$${}^0_4T = {}^0_1T ({}^1_2T ({}^2_3T ({}^3_4T))) \quad (15)$$

A ET, mostrada na Eq. (15), possui estrutura da forma:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} {}^0_4R & {}^0P_4 \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

sendo, por inspeção, possível identificar a matriz rotacional equivalente,  ${}^0_4R$ , assim como a localização do efetuador do robô,  ${}^0P_4$ .

## 4 | DESCRIÇÃO DA TRAJETÓRIA

Nesta seção, descreveu-se a trajetória do referido robô, a partir do uso da Eq. (16).

A trajetória do robô deve possuir movimento suave, isso é necessário para que o manipulador não tenha movimentos bruscos, os quais podem acarretar em vibrações ou danos no sistema. Para tender a restrição de movimento suave, usou-se o polinômio do terceiro grau, da forma:

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (17)$$

sendo  $\theta(t)$  o valor do ângulo da junta em função do tempo  $t$ ,  $a_i$ , com  $i = 0, 1, 2, 3$ , são os parâmetros do polinômio para que o movimento seja suave.

A primeira deriva da Eq. (17), a qual corresponde a equação de velocidade do mecanismo, obtida por:

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (18)$$

A derivada da Eq. (18), sendo essa a equação de aceleração, expressada por:

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3t \quad (19)$$

Estabelecidas das Eqs. (17)-(19), em seguida foram impostas as restrições de posição e velocidade, como:

$$\theta(0) = \theta_0 \quad (20)$$

$$\theta(t_f) = \theta_f \quad (21)$$

$$\dot{\theta}(0) = 0 \quad (22)$$

$$\dot{\theta}(t_f) = 0 \quad (23)$$

sendo  $t_f$  tempo final do movimento,  $\theta_0$  ângulo inicial e  $\theta_f$  ângulo final, além das velocidades inicial e final nulas.

Para determinar os parâmetros  $a_i$ , com  $i = 0, 1, 2, 3$ , foram substituídas as condições Eqs. (20)-(23), nas Eqs. (17)-(19), ao manipular obteve-se:

$$a_0 = \theta_0 \quad (24)$$

$$a_1 = 0 \quad (25)$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) \quad (26)$$

$$a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) \quad (27)$$

A partir dos parâmetros determinados, Eqs. (24)-(27), torna-se possível realizar o planejamento de trajetória do efetuador do robô, conforme será ilustrado na Seção de Resultados.

## 5 | DINÂMICA

A dinâmica é a área do conhecimento que considera as forças necessárias para causar o movimento. Neste contexto existem dois problemas relacionados a dinâmica do robô, a saber: (i) a partir de um ponto de trajetória encontrar o vetor  $\tau$  necessário para os torques das juntas; e (ii) com o vetor de torque  $\tau$  encontrar a trajetória do robô.

### A. Distribuição de Massa

Para iniciar o estudo do movimento, torna-se necessário analisar a distribuição de massas dos elos e conseqüentemente os tensores de inercia, que podem ser definidos em relação a qualquer SR  $\{i\}$ , com  $i = 0, \dots, 4$ . No caso do robô SCARA, adotou-se o SR de cada elo localizado no Centro de Massa (CM) do corpo, além de considerar cada corpo análogo a um paralelepípedo, maciço e rígido. O CM pode ser expresso por:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k \\ l \\ q \end{bmatrix} \quad (28)$$

sendo  $k$  o comprimento ao longo do eixo  $X_p$ ,  $l$  é a largura ao longo do eixo  $Y_i$  e  $q$  é a altura do paralelepípedo ao longo do eixo  $Z_p$ .

O tensor de inércia para cada corpo rígido,  $i = 1, 2, 3$ , pode ser obtido por:

$${}^c I_i = \begin{bmatrix} \frac{m_i}{12}(q_i^2 + l_i^2) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_i}{12}(k_i^2 + q_i^2) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_i}{12}(l_i^2 + k_i^2) \end{bmatrix} \quad (29)$$

sendo  $m$  a massa do elo.

### B. Algoritmo Dinâmico Iterativo de Newton-Euler

Para obtenção das equações dinâmicas do robô, aplicou-se o algoritmo iterativo de Newton-Euler. Assim, determinaram-se as equações de torque  $\tau$  para cada junta do robô do elo  $i = 0 \rightarrow n - 1$ .

A equação de velocidade angular:

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (30)$$

sendo  ${}^{i+1}\omega_{i+1}$  a velocidade angular do elo  $\{i + 1\}$  em relação ao SR  $\{i + 1\}$  e  ${}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$  eixo de rotação do elo  $\{i + 1\}$ , nesse caso  ${}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} = [0 \ 0 \ 1]^T$ .

A equação de aceleração angular:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} &= {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i + \dots \\ \dots {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \quad (31)$$

sendo  ${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1}$  a aceleração angular do elo  $\{i+1\}$  em relação ao SR  $\{i+1\}$ .

A equação de aceleração linear:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} &= {}^{i+1}R({}^i\dot{\omega} \times {}^iP_{i+1} + \dots \\ \dots {}^i\dot{\omega}_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + {}^i\dot{v}_i) \end{aligned} \quad (32)$$

sendo  ${}^{i+1}\dot{v}_{i+1}$  a aceleração linear do elo  $\{i+1\}$  em relação ao SR  $\{i+1\}$ .

A equação da aceleração linear do CM:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} &= {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + \dots \\ \dots {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}}) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \end{aligned} \quad (33)$$

sendo  ${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}}$  a aceleração linear do elo  $\{i+1\}$  em relação ao seu CM e  ${}^{i+1}P_{C_{i+1}}$  o vetor posição do CM do elo  $\{i+1\}$ .

A equação da força:

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \quad (34)$$

sendo  ${}^{i+1}F_{i+1}$  a equação de força em relação ao SR  $\{i+1\}$ .

A equação do torque:

$$\begin{aligned} {}^{i+1}N_{i+1} &= {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + \dots \\ \dots {}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \end{aligned} \quad (35)$$

sendo  ${}^{i+1}F_{i+1}$  a equação de torque em relação ao SR  $\{i+1\}$  e  ${}^{C_{i+1}}I_{i+1}$  o tensor de inercia do elo  $\{i+1\}$ .

Para juntas prismáticas, deve-se usar as equações correspondentes as eqs. (31) e (32), respectivamente:

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^{i+1}R^i \dot{\omega}_i \quad (36)$$

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} &= {}^{i+1}R({}^i\dot{\omega} \times {}^iP_{i+1} + \dots \\ \dots {}^i\dot{\omega}_i \times ({}^i\omega_i \times {}^iP_{i+1}) + {}^i\dot{v}_i) + \dots \\ \dots 2 {}^{i+1}\omega_{i+1} \times \dot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \end{aligned} \quad (37)$$

Após a realização das iterações descritas pelas Eqs. (31)-(35), finalizou-se algoritmo de Newton-Euler com as interações do elo  $i = n \rightarrow 1$ , assim houve a decomposição dos torques  $\tau_i$ .

A equação de força:

$${}^i f_i = {}^i_{i+1}R {}^{i+1}f_{i+1} + {}^i F_i \quad (38)$$

sendo  ${}^i f_i$  a força na junta  $\{i\}$ .

A equação de torque:

$$\begin{aligned} {}^i n_i &= {}^i N_i + {}^i_{i+1} R^{i+1} n_{i+1} + \dots \\ \dots {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^i_{i+1} R^{i+1} f_{i+1} \end{aligned} \quad (39)$$

sendo  ${}^i n_i$  o torque na junta  $\{i\}$ .

A equação de torque decomposto sobre eixo de rotação ou translação:

$$\tau_i = {}^i n_i^T {}^i \hat{Z}_i \quad (40)$$

sendo  $\tau_i$  o torque orientado na junta  $\{i\}$ .

Após realizar as iterações para fora, Eqs. (31)-(35), e para dentro, Eqs. (38)-(40), são apresentados os torques calculados referentes a cada junta, sendo  $\tau_1$  e  $\tau_2$  os torques realizados nas juntas 1 e 2, respectivamente, e o  $\tau_3$  a força aplicada a junta prismático:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= (m_1 b_{cm}^2 + {}^c I_{zz1}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_2 (b^2 + 2bc_{cm}c_2 + c_{cm}^2) + {}^c I_{zz2}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_2 (bc_{cm}c_2 + c_{cm}^2) + {}^c I_{zz2}) \ddot{\theta}_2 + \dots \\ \dots (m_3 (b^2 + 2bcc_2 + c^2) + {}^c I_{zz3}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_3 (bcc_2 + c^2) + {}^c I_{zz3}) \ddot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 &= (m_2 (bc_{cm}c_2 + c_{cm}^2) + {}^c I_{zz2}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_3 (bcc_2 + c^2) + {}^c I_{zz3}) \ddot{\theta}_1 + \dots \\ \dots (m_3 c^2 + {}^c I_{zz3}) \ddot{\theta}_2 + (m_2 c_{cm}^2 + {}^c I_{zz2}) \ddot{\theta}_2 + \dots \\ \dots (m_2 bc_{cm} s_2) \dot{\theta}_1^2 + (m_2 bc_{cm} s_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dots \\ \dots (m_3 bcs_2) \dot{\theta}_1^2 + (m_3 bcs_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (42)$$

$$\tau_3 = m_3 \ddot{d} - m_3 g \quad (43)$$

Podem-se adequar as Eqs. (41)-(43) na forma de equação geral, expressada por:

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (44)$$

sendo  $\tau$  o vetor de torques ( $n \times 1$ ),  $M(\theta)$  a matriz de inércia do manipulador ( $n \times n$ ),  $V(\theta, \dot{\theta})$  é o vetor dos termos Centrífugos e de Coriolis ( $n \times 1$ ) e  $G(\theta)$  é um vetor dos termos de Gravidade ( $n \times 1$ ). Nota-se que os termos são dependentes de  $\theta$  (posição),  $\dot{\theta}$  (velocidade) e  $\ddot{\theta}$  (aceleração).

No caso do robô SCARA modelo T3 401SS, a matriz de inérica,  $M(\theta)$ , da Eq. (44) se torna:

$$\begin{aligned} A_1 &= {}^c I_{zz1} + {}^c I_{zz2} + {}^c I_{zz3} + b_{cm}^2 m_1 + \dots \\ \dots m_3 (b^2 + 2bcc_2 + c^2) + \dots \\ \dots m_2 (b^2 + 2bc_{cm}c_2 + c_{cm}^2) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= {}^c I_{zz2} + {}^c I_{zz3} + m_3 (c^2 + bcc_2) + \dots \\ \dots m_2 (c_{cm}^2 + bc_{cm}c_2) \end{aligned} \quad (46)$$

$$C_1 = 0 \quad (47)$$

$$M_1 = [A_1 \quad B_1 \quad C_1] \quad (48)$$

$$A_2 = {}^c I_{zz2} + {}^c I_{zz3} + m_3(c^2 + bcc_2) + \dots \\ \dots m_2(c_{cm}^2 + bc_{cm}c_2) \quad (49)$$

$$B_2 = {}^c I_{zz2} + {}^c I_{zz3} + m_3c^2 + m_2c_{cm}^2 \quad (50)$$

$$C_2 = 0 \quad (51)$$

$$M_2 = [A_2 \quad B_2 \quad C_2] \quad (52)$$

$$A_3 = 0 \quad (53)$$

$$B_3 = 0 \quad (54)$$

$$C_3 = m_3 \quad (55)$$

$$M_3 = [A_3 \quad B_3 \quad C_3] \quad (56)$$

A matriz M será composta pelas Eqs. (48), (52) e (56), expresso por:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (57)$$

Analogamente para o vetor V ( $\theta, \theta'$ ), Eq. (44), obtém-se:

$$V_1 = 0 \quad (58)$$

$$V_2 = (bcm_3s_2 + bc_{cm}m_2s_2)\dot{\theta}_1^2 + \dots \\ \dots (bcm_3s_2 + bc_{cm}m_2s_2)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \quad (59)$$

$$V_3 = 0 \quad (60)$$

$$V = [V_1 \quad V_2 \quad V_3] \quad (61)$$

O último vetor, G( $\theta$ ), da Eq. (44), obtém-se.

$$G_1 = 0 \quad (62)$$

$$G_2 = 0 \quad (63)$$

$$G_3 = -gm_3 \quad (64)$$

$$G = [G_1 \quad G_2 \quad G_3] \quad (65)$$

Para realizar a simulação, torna-se necessário isolar a variável  $\ddot{\theta}$  da Eq. (44), da forma:

$$\ddot{\theta} = M(\theta)^{-1}(\tau - V(\theta, \dot{\theta}) - G(\theta)) \quad (66)$$

Para executar a iteração ponto a ponto, discretizou-se o tempo para realizar a integração numérica, a partir da Eq. (66), obtém-se:

$$\dot{\theta} = \dot{\theta} + T_x \ddot{\theta} \quad (67)$$

$$\theta = \theta + T_x \dot{\theta} \quad (68)$$

sendo  $T_x$  a taxa de amostragem.

Na próxima seção, será usada a Equação (44) para realização do controle do robô manipulador.

## 6 | CONTROLE NÃO LINEAR

Concluída a modelagem dinâmica, deseja-se que os elos do robô manipulador sigam determinadas trajetórias. Desse modo, realiza-se o controle de torque dos atuadores de forma a alcançar a posição final desejada de maneira suave.

Existem estratégias de controle aplicadas aos manipuladores robóticos, essas podem ser classificadas como lineares ou não lineares. Para o caso de não linearidades tênues, torna-se possível a linearização local, obtém-se modelos lineares que aproximam as equações não lineares na vizinhança do ponto de operação. Contudo, o problema de controle de um robô manipulador não é adequado para essa abordagem.

Portanto, busca-se uma lei de controle a qual não negligencie as não linearidades intrínsecas do robô de modo que o sistema de controle seja criticamente amortecido, sendo descrito pelo sistema em malha aberta na Equação (44).

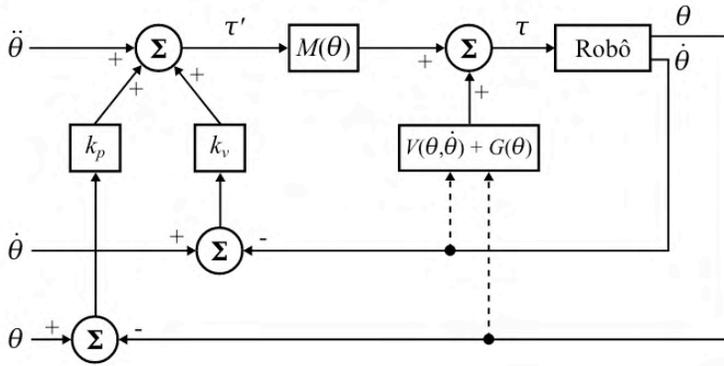


Fig. 3. Diagrama de controle em malha fechada. Adaptado de [7]

Na Figura 3, representa-se o diagrama de controle em malha fechada do sistema.

A partição da lei de controle, obtém-se o seguinte modelo:

$$\tau = \alpha \tau' + \beta \quad (69)$$

sendo  $\alpha = M(\theta)$ ,  $\beta = V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$ , e  $\tau'$  a partição do servo expressa por:

$$\tau' = \ddot{\theta} + k_v \dot{e} + k_p e \quad (70)$$

sendo  $k_p$  é o ganho de posição,  $k_v$  é o ganho de velocidade,  $e$  é o erro de posição e  $e'$  é o erro de velocidade, dado por:

$$e = \theta_f - \theta_a \quad (71)$$

O erro de velocidade,  $e'$ , expresso por:

$$\dot{e} = \dot{\theta}_f - \dot{\theta}_a \quad (72)$$

sendo  $\theta_f$  é a posição final desejada,  $\theta_a$  a posição atual do robô,  $\dot{\theta}_f$  a velocidade final desejada e  $\dot{\theta}_a$  a velocidade atual do robô. Os parâmetros  $k_p$  e  $k_v$ , são calculados com base nas especificações de desempenho do projeto.

Quanto a implementação computacional, discretiza-se Eqs.(44), em seguida: (i) determinam-se as variáveis de posição ( $\theta$ ), velocidade ( $\dot{\theta}$ ) e aceleração ( $\ddot{\theta}$ ); (ii) calculam-se os erros de posição ( $e$ ) e velocidade ( $e'$ ), descrito na Eq. (71); (iii) calcula-se a partição do servo ( $\tau'$ ), conforme Eq. (70); e (iv) computa-se a equação de malha aberta, de acordo com a Equação (69).

Afim de implementar a lei de controle, isolou-se ãna Equação (44), como segue:

$$\ddot{\theta} = \alpha^{-1}(-\beta + \tau) \quad (73)$$

Nesta etapa da iteração, realizou-se a integração numérica e obtém-se  $\dot{\theta}$  e  $\theta$ , como expresso na equações (67) e (68).

Realimenta-se as variáveis de  $\theta$  e  $\dot{\theta}$  e retorna-se o laço iterativo até que a condição de parada seja alcançada.

## 71 RESULTADOS

Os resultados foram obtidos a partir do software MATLAB®. Realizaram-se as simulações de trajetória e con-trole, a partir dos valores de posição, velocidade e aceleração desejadas para cada elo,  $i = 1, 2, 3$ , com os parâmetros apresentados na Tabela I.

Elos	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$m_i$ (Kg)	1, 2	4, 0	0, 4
$CM_i(m)$ ( $10^{-3}$ )	$b_{cm} = 112, 5$	$c_{cm} = 87, 5$	170, 0
$k_i(m)$ ( $10^{-3}$ )	90	129	8, 57
$l_i(m)$ ( $10^{-3}$ )	$b = 225$	$c = 175$	8, 57
$q_i(m)$ ( $10^{-3}$ )	35	176	340, 7
${}^c I_{xxi}$ ( $10^{-6}$ )	10400	38100	3900
${}^c I_{yyi}$ ( $10^{-6}$ )	900	16000	3900
${}^c I_{zz i}$ ( $10^{-6}$ )	11000	33300	4, 8963
$\theta_i$ Inicial (rad)	0	0	0
$\dot{\theta}_i$ Inicial (rad/s)	0	0	0
$\theta_i$ Final (rad)	$\pi$	$-\pi$	0, 15
$\dot{\theta}_i$ Final (rad/s)	0	0	0
$\ddot{\theta}_i$ Final (rad/s <sup>2</sup> )	0	0	0
$g$ ( $m/s^2$ )	9, 8	9, 8	9, 8
$k_{p_i}$	1	0, 25	4
$k_{v_i}$	2	1	4
$T_{xi}$ (s)	0, 001	0, 001	0, 001

TABELA I - PARÂMETROS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

### A. Geração da trajetória

Gerou-se o gráfico da trajetória, com as condições apre- sentadas nas Eqs. (17)-(19), para determinar os coeficientes descritos nas Eqs. (24)-(27). Nas Figuras 4-6, ilustram-se os comportamentos temporais dos elos  $i = 1, 2, 3$ .

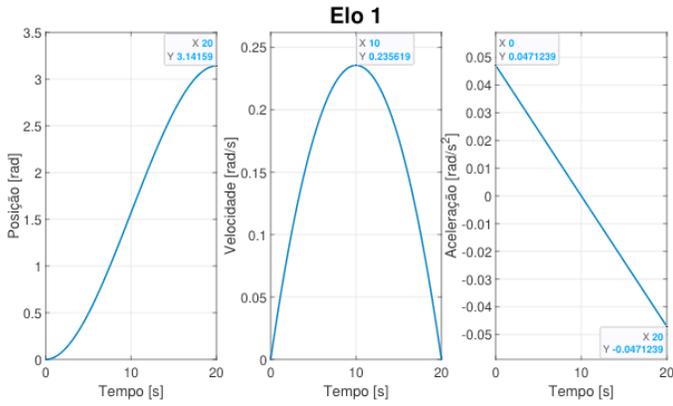


Fig. 4. Trajetória do elo 1

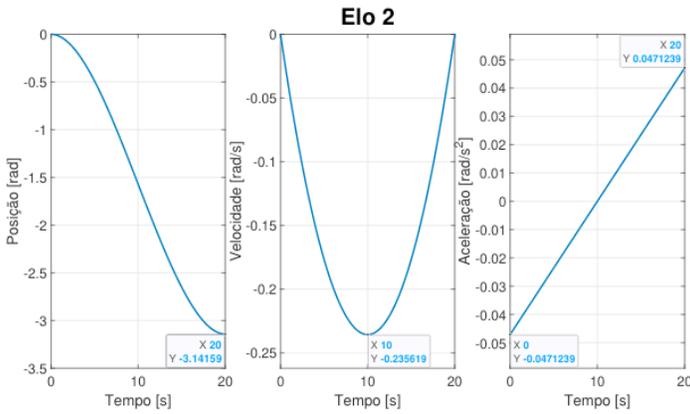
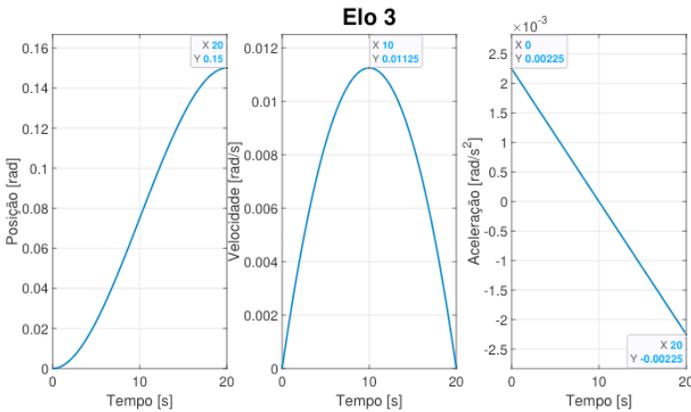


Fig. 5. Trajetória do elo 2



## B. Controle

Na etapa de controle, calcularam-se as Eqs. (57), (61) e (65), as quais compõem a dinâmica do robô e computou-se o sistema de controle em malha fechada. Para simulação, foram usados os parâmetros apresentados na Tabela I e tempo de amostragem de 0,001s. Nas Figuras 7-9, ilustram-se os resultados numéricos quanto ao comportamento temporal dos elos do robô RRP.

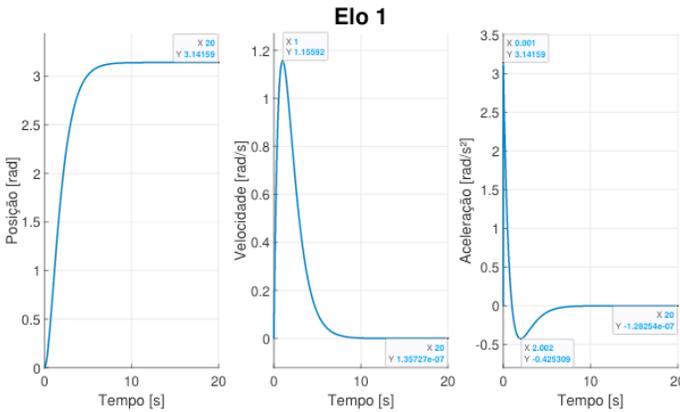


Fig. 7. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 1

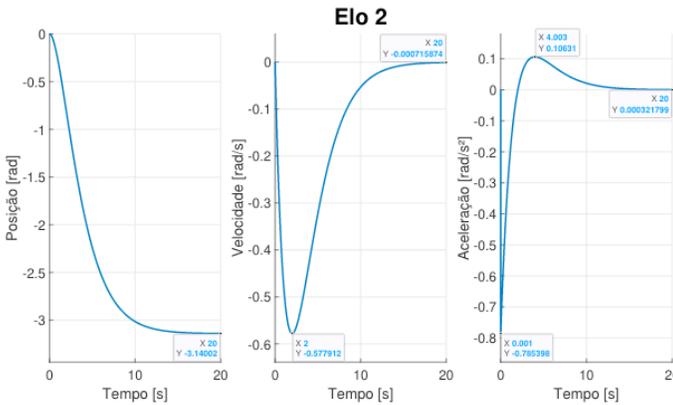


Fig. 8. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 2

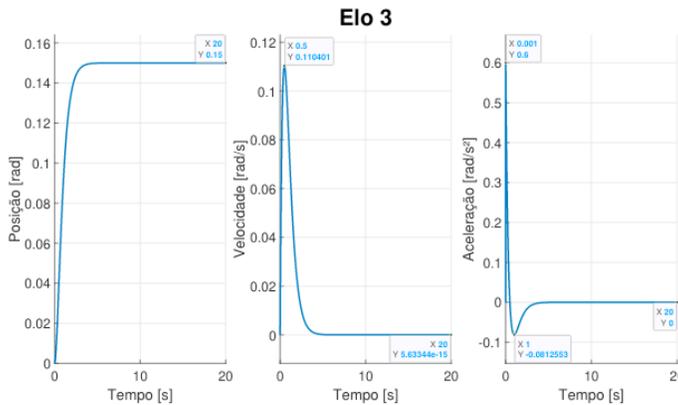


Fig. 9. Controle de posição, velocidade e aceleração do elo 3

## 8 I CONCLUSÃO

Desenvolveu-se a modelagem matemática da cinemática e da dinâmica do robô SCARA T3 401SS da empresa EPSON, assim como aplicou-se uma estratégia de controle não linear. A dinâmica foi realizada a partir do método iterativo de Newton-Euler, o qual forneceu o sistema de equações de torque para posteriormente ser realizado o controle dos atuadores a partir das mesmas.

Realizou-se a simulação e análise dos gráficos de posição, velocidade e aceleração das juntas, afim de verificar a coerência dos resultados obtidos.

Validou-se a modelagem por meio dos resultados, dessa forma se evidenciou a possível utilização desse modelo para simulação e projeto de robôs com juntas rotativas e prismática, uma vez que o modelo matemático é genérico. Dessa forma possibilita a adequação dos parâmetros de outros robôs, isso auxilia profissionais da área a verificação teórica dos resultados, antes da aplicação prática.

## REFERÊNCIAS

[1] IFR (1993-2021). *World Robotics: Industrial Robots*. Frankfurt am Main: VDMA Services GmbH, p. 12-14. Disponível em: <[https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive\\_Summary\\_WR\\_Industrial\\_Robots\\_2021.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_2021.pdf)> Acessado em 06 de julho de 2022

[2] CNI – Confederação Nacional da Indústria. *Investimentos em indústria 4.0 / Confederação Nacional da Indústria*. Brasília, 2018. Disponível em: <[https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer\\_public/8b/0f/8b0f5599-9794-4b66-ac83-e84a4d118af9/investimentos\\_em\\_industria\\_40\\_junho2018.pdf](https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/8b/0f/8b0f5599-9794-4b66-ac83-e84a4d118af9/investimentos_em_industria_40_junho2018.pdf)>. Acessado em 06 de julho de 2022

[3] CHAGAS, FÁBIO SUIM. MANIPULADOR BILATERAL COM REALIMENTAÇÃO HÁPTICA. 2005. Tese de Doutorado. INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA. Disponível em: <<http://www.comp.ime.eb.br/pos/modules/files/dissertacoes/2005/2005-FabioChagas.pdf>> Acessado em 07 de julho de 2022.

[4] SEIKO EPSON CORPORATION. *Epson T-Series Robot Manual*. Rev. 12, 2020. Disponível em: <[https://files.support.epson.com/far/docs/epson\\_t-series\\_robot\\_manual\\_\(r12\).pdf](https://files.support.epson.com/far/docs/epson_t-series_robot_manual_(r12).pdf)> Acessado em 06 de julho de 2022.

[5] UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Coordenação do curso de Engenharia Eletrônica. Disponível em: <<https://portal.utfpr.edu.br/cursos/coordenacoes/graduacao/campo-mourao/cm-engenharia-eletronica>> Acessado em 06 de julho de 2022.

[6] CRAIG, J. J.. *Robótica*. 3ª edição, Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2012

[7] SEIKO EPSON CORPORATION. *Robôs SCARA All-In-One Epson Synthis T3*. Disponível em <<https://epson.com.br/Para-empresas/Rob%C3%B3tica/Rob%C3%B4s-SCARA/Rob%C3%B4s-SCARA-All-In-One-Epson-Synthis-T3/p/RT3-401SS>> Acessado em 2

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Âodos 1, 5, 7, 8

Aprendizado de máquina 28

Aprendizagem de máquinas 41, 45

Armazenamento de energia 2, 6, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 136, 137

### B

Bateria 1, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

Busca harmônica 94, 95, 96, 99, 100, 101, 102, 105, 107

### C

Cátodos 1, 3, 4, 5, 9, 10, 12

Computação na nuvem 28, 36

Controle inteligente 95

Controle ótimo 95, 98

### E

Electric system 14, 15, 16, 17, 25

Excedente de energia 126

### F

Fontes renováveis 126, 127, 128, 131, 136, 137

### H

Hidrogênio 126, 127, 128, 129, 131, 132, 134, 135, 136, 137

### I

IBM Cloud 28, 29, 30, 39

Isoladores de potência 41, 42, 52

### M

Máquinas de vetores de suporte 28, 31, 40, 45

Modelagem cinemática 108

Modelagem dinâmica 108, 119

Motor de indução trifásico 28, 29, 35

## **N**

Nióbio 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12

## **O**

Otimização por enxame de partículas 45, 94, 95, 97, 100, 105

## **P**

Photovoltaic solar power 15

Power generation forecasting 15

## **R**

Regulador linear quadrático 94, 95, 96, 98, 105, 107

Renewable energy 14, 15, 16, 20, 25, 26, 27, 92, 131, 136, 137

Robô Scara T3 401SS 108

## **S**

Sistema de controle não linear 108

Sistemas de transmissão de energia elétrica 41

Sistemas inteligentes 29, 41, 43, 44, 46, 48, 50, 51, 52

SPSS Modeler 28, 29, 30, 31, 37, 38

## **W**

Wind power 14, 15, 17, 20, 21, 22, 24, 26

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 

# ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica  
e telecomunicações

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br) 

[contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br) 

[@atenaeditora](#) 

[www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br) 