

ENGENHARIAS EM FOCO

GUILLERMO DANIEL RODRÍGUEZ
(ORGANIZADOR)



**EDITORA
ARTEMIS**

2024

ENGENHARIAS EM FOCO

GUILLERMO DANIEL RODRÍGUEZ
(ORGANIZADOR)



**EDITORA
ARTEMIS**

2024



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). Direitos para esta edição cedidos à Editora Artemis pelos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento, desde que sejam atribuídos créditos aos autores, e sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

A responsabilidade pelo conteúdo dos artigos e seus dados, em sua forma, correção e confiabilidade é exclusiva dos autores. A Editora Artemis, em seu compromisso de manter e aperfeiçoar a qualidade e confiabilidade dos trabalhos que publica, conduz a avaliação cega pelos pares de todos manuscritos publicados, com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

Editora Chefe	Prof. ^a Dr. ^a Antonella Carvalho de Oliveira
Editora Executiva	M. ^a Viviane Carvalho Mocellin
Direção de Arte	M. ^a Bruna Bejarano
Diagramação	Elisangela Abreu
Organizador	Prof. Ing. Guillermo Daniel Rodríguez
Imagem da Capa	aleksandrar/123RF
Bibliotecário	Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Conselho Editorial

Prof.^a Dr.^a Ada Esther Portero Ricol, *Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”*, Cuba
Prof. Dr. Adalberto de Paula Paranhos, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
Prof. Dr. Agustín Olmos Cruz, *Universidad Autónoma del Estado de México*, México
Prof.^a Dr.^a Amanda Ramalho de Freitas Brito, Universidade Federal da Paraíba, Brasil
Prof.^a Dr.^a Ana Clara Monteverde, *Universidad de Buenos Aires*, Argentina
Prof.^a Dr.^a Ana Júlia Viamonte, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
Prof. Dr. Ángel Mujica Sánchez, *Universidad Nacional del Altiplano*, Peru
Prof.^a Dr.^a Angela Ester Mallmann Centenaro, Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil
Prof.^a Dr.^a Begoña Blandón González, *Universidad de Sevilla*, Espanha
Prof.^a Dr.^a Carmen Pimentel, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof.^a Dr.^a Catarina Castro, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
Prof.^a Dr.^a Cirila Cervera Delgado, *Universidad de Guanajuato*, México
Prof.^a Dr.^a Cláudia Neves, Universidade Aberta de Portugal
Prof.^a Dr.^a Cláudia Padovesi Fonseca, Universidade de Brasília-DF, Brasil
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos, Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil
Prof. Dr. Cristo Ernesto Yáñez León – New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ, Estados Unidos
Prof. Dr. David García-Martul, *Universidad Rey Juan Carlos de Madrid*, Espanha
Prof.^a Dr.^a Deuzimar Costa Serra, Universidade Estadual do Maranhão, Brasil
Prof.^a Dr.^a Dina Maria Martins Ferreira, Universidade Estadual do Ceará, Brasil
Prof.^a Dr.^a Edith Luévano-Hipólito, *Universidad Autónoma de Nuevo León*, México
Prof.^a Dr.^a Eduarda Maria Rocha Teles de Castro Coelho, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal
Prof. Dr. Eduardo Eugênio Spers, Universidade de São Paulo (USP), Brasil
Prof. Dr. Eloi Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima, Brasil
Prof.^a Dr.^a Elvira Laura Hernández Carballido, *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, México



Prof.^a Dr.^a Emilas Darlene Carmen Lebus, *Universidad Nacional del Nordeste/ Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*
Prof.^a Dr.^a Erla Mariela Morales Morgado, *Universidad de Salamanca, Espanha*
Prof. Dr. Ernesto Cristina, *Universidad de la República, Uruguay*
Prof. Dr. Ernesto Ramírez-Briones, *Universidad de Guadalajara, México*
Prof. Dr. Fernando Hitt, *Université du Québec à Montréal, Canadá*
Prof. Dr. Gabriel Díaz Cobos, *Universitat de Barcelona, Espanha*
Prof.^a Dr.^a Gabriela Gonçalves, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), Portugal
Prof.^a Dr.^a Galina Gumovskaya – Higher School of Economics, Moscow, Russia
Prof. Dr. Geoffroy Roger Pointer Malpass, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
Prof.^a Dr.^a Gladys Esther Leoz, *Universidad Nacional de San Luis, Argentina*
Prof.^a Dr.^a Glória Beatriz Álvarez, *Universidad de Buenos Aires, Argentina*
Prof. Dr. Gonçalo Poeta Fernandes, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal
Prof. Dr. Gustavo Adolfo Juarez, *Universidad Nacional de Catamarca, Argentina*
Prof. Dr. Guillermo Julián González-Pérez, *Universidad de Guadalajara, México*
Prof. Dr. Håkan Karlsson, *University of Gothenburg, Suécia*
Prof.^a Dr.^a Iara Lúcia Tescarollo Dias, Universidade São Francisco, Brasil
Prof.^a Dr.^a Isabel del Rosario Chiyon Carrasco, *Universidad de Piura, Peru*
Prof.^a Dr.^a Isabel Yohena, *Universidad de Buenos Aires, Argentina*
Prof. Dr. Ivan Amaro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
Prof. Dr. Iván Ramon Sánchez Soto, *Universidad del Bío-Bío, Chile*
Prof.^a Dr.^a Ivânia Maria Carneiro Vieira, Universidade Federal do Amazonas, Brasil
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz, *University of Miami and Miami Dade College, Estados Unidos*
Prof. Dr. Jesús Montero Martínez, *Universidad de Castilla - La Mancha, Espanha*
Prof. Dr. João Manuel Pereira Ramalho Serrano, Universidade de Évora, Portugal
Prof. Dr. Joaquim Júlio Almeida Júnior, UniFIMES - Centro Universitário de Mineiros, Brasil
Prof. Dr. Jorge Ernesto Bartolucci, *Universidad Nacional Autónoma de México, México*
Prof. Dr. José Cortez Godinez, Universidad Autónoma de Baja California, México
Prof. Dr. Juan Carlos Cancino Diaz, Instituto Politécnico Nacional, México
Prof. Dr. Juan Carlos Mosquera Feijoo, *Universidad Politécnica de Madrid, Espanha*
Prof. Dr. Juan Diego Parra Valencia, *Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colômbia*
Prof. Dr. Juan Manuel Sánchez-Yáñez, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México*
Prof. Dr. Juan Porras Pulido, *Universidad Nacional Autónoma de México, México*
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof. Dr. Leinig Antonio Perazolli, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil
Prof.^a Dr.^a Livia do Carmo, Universidade Federal de Goiás, Brasil
Prof.^a Dr.^a Luciane Spanhol Bordignon, Universidade de Passo Fundo, Brasil
Prof. Dr. Luis Fernando González Beltrán, *Universidad Nacional Autónoma de México, México*
Prof. Dr. Luis Vicente Amador Muñoz, *Universidad Pablo de Olavide, Espanha*
Prof.^a Dr.^a Macarena Esteban Ibáñez, *Universidad Pablo de Olavide, Espanha*
Prof. Dr. Manuel Ramiro Rodriguez, *Universidad Santiago de Compostela, Espanha*
Prof. Dr. Manuel Simões, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
Prof.^a Dr.^a Márcia de Souza Luz Freitas, Universidade Federal de Itajubá, Brasil
Prof. Dr. Marcos Augusto de Lima Nobre, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Brasil
Prof. Dr. Marcos Vinicius Meiado, Universidade Federal de Sergipe, Brasil
Prof.^a Dr.^a Mar Garrido Román, *Universidad de Granada, Espanha*
Prof.^a Dr.^a Margarida Márcia Fernandes Lima, Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil
Prof.^a Dr.^a María Alejandra Arecco, *Universidad de Buenos Aires, Argentina*
Prof.^a Dr.^a Maria Aparecida José de Oliveira, Universidade Federal da Bahia, Brasil
Prof.^a Dr.^a Maria Carmen Pastor, *Universitat Jaume I, Espanha*



Prof.ª Dr.ª Maria da Luz Vale Dias – Universidade de Coimbra, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria do Céu Caetano, Universidade Nova de Lisboa, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria do Socorro Saraiva Pinheiro, Universidade Federal do Maranhão, Brasil
Prof.ª Dr.ª MªGraça Pereira, Universidade do Minho, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maria Gracinda Carvalho Teixeira, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil
Prof.ª Dr.ª María Guadalupe Vega-López, *Universidad de Guadalajara, México*
Prof.ª Dr.ª Maria Lúcia Pato, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal
Prof.ª Dr.ª Maritza González Moreno, *Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba*
Prof.ª Dr.ª Mauriceia Silva de Paula Vieira, Universidade Federal de Lavras, Brasil
Prof. Dr. Melchor Gómez Pérez, Universidad del País Vasco, Espanha
Prof.ª Dr.ª Ninfa María Rosas-García, Centro de Biotecnología Genómica-Instituto Politécnico Nacional, México
Prof.ª Dr.ª Odara Horta Boscolo, Universidade Federal Fluminense, Brasil
Prof. Dr. Osbaldo Turpo-Gebera, *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Peru*
Prof.ª Dr.ª Patrícia Vasconcelos Almeida, Universidade Federal de Lavras, Brasil
Prof.ª Dr.ª Paula Arcoverde Cavalcanti, Universidade do Estado da Bahia, Brasil
Prof. Dr. Rodrigo Marques de Almeida Guerra, Universidade Federal do Pará, Brasil
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares, Universidade Federal do Piauí, Brasil
Prof. Dr. Sérgio Bitencourt Araújo Barros, Universidade Federal do Piauí, Brasil
Prof. Dr. Sérgio Luiz do Amaral Moretti, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
Prof.ª Dr.ª Silvia Inés del Valle Navarro, *Universidad Nacional de Catamarca, Argentina*
Prof.ª Dr.ª Solange Kazumi Sakata, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)- USP, Brasil
Prof.ª Dr.ª Stanislava Kashtanova, *Saint Petersburg State University, Russia*
Prof.ª Dr.ª Susana Álvarez Otero – Universidad de Oviedo, Espanha
Prof.ª Dr.ª Teresa Cardoso, Universidade Aberta de Portugal
Prof.ª Dr.ª Teresa Monteiro Seixas, Universidade do Porto, Portugal
Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Universidade Federal de Viçosa, Brasil
Prof.ª Dr.ª Vanessa Bordin Viera, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil
Prof.ª Dr.ª Vera Lúcia Vasilévski dos Santos Araújo, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil
Prof. Dr. Wilson Noé Garcés Aguilar, *Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Colômbia*
Prof. Dr. Xosé Somoza Medina, *Universidad de León, Espanha*

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharia em foco / Organizador Guillermo Daniel Rodriguez. – Curitiba, PR: Artemis, 2024.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

Edição bilingue

ISBN 978-65-81701-38-3

DOI 10.37572/EdArt_281124383

1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. 2. Práticas sustentáveis. I. Rodriguez, Guillermo Daniel.

CDD 620.7

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422



PRESENTACIÓN

O campo das engenharias está em constante evolução, impulsionado pela necessidade de soluções inovadoras para os desafios do mundo moderno. Em "Engenharia em Foco" reunimos uma série de artigos que exploram questões cruciais para a engenharia contemporânea, que vão desde aspectos técnicos até interseções com o ensino de engenharia, comunicação e sustentabilidade.

Este livro investiga as atuais fronteiras da engenharia, com pesquisas que vão desde o controle de sistemas robóticos e práticas sustentáveis aplicadas à construção civil até o uso de Big Data para otimizar serviços tecnológicos. A diversidade de tópicos reflete as muitas facetas da engenharia moderna, exigindo habilidades técnicas, criativas e de comunicação e uma compreensão abrangente das necessidades globais.

Os artigos aqui apresentados não só oferecem uma análise detalhada de diferentes aspectos da engenharia, mas também servem como fonte de inspiração para futuras pesquisas e práticas no setor. A aposta na inovação, na sustentabilidade ou na educação de qualidade reflete-se nos diferentes capítulos, tornando este trabalho um valioso contributo para a comunidade académica, para os profissionais da área e para todos os envolvidos na construção do futuro das engenharias.

Agradecemos aos autores que contribuíram para a preparação deste volume, cujos esforços coletivos contribuem para o avanço contínuo do conhecimento e da prática nas engenharias. Esperamos que este livro seja uma fonte de reflexão e aprendizagem, incentivando novas abordagens e soluções para os complexos desafios que a engenharia enfrenta no século XXI.

Guillermo Daniel Rodríguez

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

ANÁLISIS DEL CONTROL DE POSICIÓN DE UN MANIPULADOR ROBÓTICO CON COMPENSACIÓN DE GRAVEDAD

Alejandro Hossian
Roberto Carabajal
Francisco Barboza
Maximiliano Alveal

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2811243831

CAPÍTULO 2..... 16

ESTRATEGIAS BASADAS EN LA ECONOMÍA CIRCULAR APLICADAS A LAS FASES DEL CICLO DE VIDA DE UNA EDIFICACIÓN

Daniela Gama Cruz
Ulises Loreto Gurrola

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2811243832

CAPÍTULO 3..... 27

VINCULACIÓN PROFESIONAL PARA EL MONITOREO DE SERVICIOS DE TICs UTILIZANDO BIG DATA

Marcelo Dante Caiafa
Ariel Rodrigo Aurelio

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2811243833

CAPÍTULO 4..... 38

EL PERFIL IDEAL DEL INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN A PARTIR DE LA REESTRUCTURACIÓN DEL PROGRAMA EDUCATIVO

José Luis Gutiérrez Liñán
Carmen Aurora Niembro Gaona
Alfredo Medina García
Jorge Eduardo Zarur Cortés

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2811243834

CAPÍTULO 5..... 49

FORTALECIMIENTO DE LA COMPETENCIA COMUNICATIVA EN ESTUDIANTES DE INGENIERÍA: ESTRATEGIAS Y DESAFÍOS

Marta Graciela Caligaris

Georgina Beatriz Rodríguez

Lorena Fernanda Laugero

 https://doi.org/10.37572/EdArt_2811243835

SOBRE O ORGANIZADOR..... 61

ÍNDICE REMISSIVO62

CAPÍTULO 1

ANÁLISIS DEL CONTROL DE POSICIÓN DE UN MANIPULADOR ROBÓTICO CON COMPENSACIÓN DE GRAVEDAD

Data de submissão: 04/11/2024

Data de aceite: 19/11/2024

Alejandro Hossian

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional del Neuquén
Doctor en Ingeniería Plaza Huinul
Provincia de Neuquén
República Argentina

Roberto Carabajal

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional del Neuquén
Ingeniero Electrónico Plaza Huinul
Provincia de Neuquén
República Argentina

Francisco Barboza

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional del Neuquén
Técnico Electrónico Plaza Huinul
Provincia de Neuquén
República Argentina

Maximiliano Alveal

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional del Neuquén
Técnico Electrónico Plaza Huinul
Provincia de Neuquén
República Argentina

RESUMEN: El control de posición (regulación) es una temática de gran importancia en las aplicaciones industriales actuales; tales como pintado de objetos y estibado. Este problema se analiza en base al movimiento del efector terminal del manipulador desde cualquier posición inicial hacia una cierta posición deseada. Este hecho se traduce en que la i – ésima articulación del manipulador debe moverse hacia la i – ésima posición deseada. En el presente artículo se propone un método de análisis sustentado en dos fases. En la primera se construye la correspondiente ecuación en lazo cerrado en términos de las variables de estado que definen el problema del control de posición, combinando la ley de control con la ecuación del modelo dinámico del manipulador. En la segunda fase, se lleva a cabo el análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov y la unicidad del punto de equilibrio del sistema dinámico que se estudia.

PALABRAS CLAVE: Manipulador. Modelo dinámico. Control de posición. Sistema dinámico. Estabilidad.

ANALYSIS OF THE POSITION CONTROL OF A ROBOTIC MANIPULATOR WITH GRAVITY COMPENSATION

ABSTRACT: Position control (regulation) is a topic of great importance in current industrial applications; such as painting objects and stowage. This problem is analyzed based on the movement of the end effector of the manipulator from any initial position towards a

certain desired position. This fact means that the i^{th} joint of the manipulator must move towards the i^{th} desired position. In this article, an analysis method based on two phases is proposed. In the first, the corresponding closed-loop equation is constructed in terms of the state variables that define the position control problem, combining the control law with the equation of the dynamic model of the manipulator. In the second phase, the analysis of stability in the Lyapunov sense and the uniqueness of the equilibrium point of the dynamic system being studied is carried out.

KEYWORDS: Manipulator. Dynamic model. Position control. Dynamic system. Stability.

1 INTRODUCCION

Una forma simple de especificar el movimiento de un manipulador es punto a punto, que consiste en determinar un conjunto de puntos en el espacio de trabajo del robot, por los cuáles se desea que pase el efector terminal a los efectos de realizar una tarea determinada, tal como se ilustra en Fig. 1. Este problema de control se basa en hacer pasar el extremo del robot por estos puntos (Barrientos, 2007). Otra manera para especificar el movimiento es el de trayectoria continua; en el cual se determina una curva parametrizada en el tiempo del espacio de trabajo.

Fig 1. Movimiento del efector terminal del robot en su espacio de trabajo.



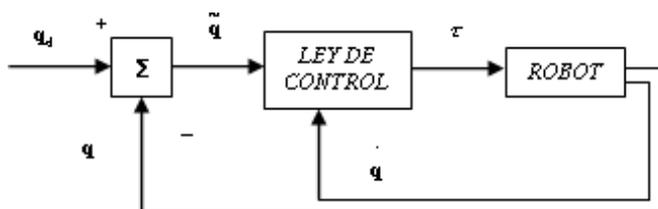
En este caso, el problema de control consiste en hacer pasar el efector terminal del manipulador por dicha trayectoria tan cerca como sea posible. El problema de control descrito en estos términos se denomina “control de movimiento” de robots; el cual consiste en la obtención de los pares τ aplicados a los servos actuadores que forman las articulaciones, a los efectos de que las posiciones asociadas a las coordenadas articulares del manipulador $q(t)$ sigan con la mayor precisión posible a la posición articular deseada $q_d(t)$. Un caso especial de control de movimiento es el de control de posición, en el que la trayectoria especificada en el espacio de trabajo del robot constituye un punto en dicho espacio (Reyes Cortes, 2011). De lo que se infiere que en el espacio articular, la posición deseada q_d es constante en el tiempo (set point). En este contexto, el problema de control de posición tiene como objetivo hallar una ley de control τ (función

vectorial) que suministre los pares que se deben aplicar a las articulaciones para que $q(t)$ se aproxime asintóticamente a q_d y la velocidad articular a cero $\dot{q}(t)=0$, sin importar las condiciones iniciales. También es habitual plantear el problema de control de posición en función del vector de errores de posicionamiento $q(t) = q_d - q(t)$. Ahora para que se cumpla el objetivo del control de posición, tanto el vector de errores de posicionamiento como el de velocidad articular deben tender a cero (Reyes Cortes, 2013). La ecuación (1) refleja estos conceptos en términos $\ddot{q}(t)$ y $\dot{q}(t)$.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{bmatrix} \ddot{q}(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \forall t \geq 0 \quad (1)$$

En la Fig. 2 se ilustra el diagrama de bloques para un sistema de control de posición en lazo cerrado de un robot manipulador. La variable τ representa la ley de control y se refiere al par que se le debe suministrar a las articulaciones del manipulador, de forma tal que el efector terminal sea capaz de moverse desde su posición inicial a la posición deseada q_d . La posición instantánea del robot la suministra el sensor encoder, y por diferenciación numérica se puede obtener la velocidad.

Fig 2. Diagrama de bloques para control de posición en lazo cerrado.



2 MARCO TEORICO

Los modelos dinámicos de los manipuladores robóticos se caracterizan por ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales y no autónomas. De esta forma, las técnicas de diseño y los procedimientos de sintonía que se emplean en sistemas lineales, puedan ser aplicados de manera limitada en la síntesis de controladores con alto desempeño para estos dispositivos. Por tal razón, y en función de la elevada precisión y velocidad en los movimientos que requieren estos dispositivos, es que se emplean técnicas de control más elaboradas a los efectos de obtener controladores con mayor nivel de prestaciones. El diseño de algoritmos de control para un robot manipulador de “n” grados de libertad requiere conocer su modelo dinámico; en especial, cuando la técnica de diseño del controlador se sustenta en la estructura de dicho modelo, tal como es el caso de la

teoría de estabilidad de Lyapunov (Poliak, 2017). Por lo tanto, los conceptos de control clásico como Bode, root locus y Nyquist entre otros son específicos de sistemas lineales (Hernandez Gaviño, 2003); y, en consecuencia, no son aplicables a robots manipuladores, dado que su estructura es la de un sistema dinámico no lineal.

a. Modelo dinámico de robots manipuladores

Este modelo exhibe de manera explícita los principales fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del sistema – robot; tales como, fuerzas centrífugas y de Coriolis, efectos inerciales, par gravitacional y fenómenos de fricción (viscosa, Coulomb y estática). La descripción matemática del modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad, está dada por la ecuación diferencial no lineal (2):

$$r(t) = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_f(q, \dot{q}, f_e) \quad (2)$$

Donde $\tau(t)$ es el vector de fuerzas o pares que se aplica a cada articulación, $q(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de posiciones articulares, $\dot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de velocidades articulares, $\ddot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de aceleraciones articulares, $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia que representa el cambio de estado de movimiento del robot, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de fuerzas centrífugas (fuerzas radiales en movimientos curvilíneos hacia adentro del centro de curvatura) y de Coriolis (esta fuerza representa la desviación del movimiento de traslación a raíz de su componente de rotación), $G(q) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares gravitacionales (vector gradiente de la energía potencial) y $F_f(q, \dot{q}, f_e) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de pares de fricción (viscosa, Coulomb y estática) de cada articulación del manipulador. Cabe señalar, que la expresión (2) es una ecuación diferencial compleja, multivariable con dinámica fuertemente acoplada y “no lineal” en el vector de estados $[\dot{q}^T, \ddot{q}^T]^T$; además de ser válida cuando el robot tiene una estructura en cadena cinemática abierta y que no incluye el fenómeno de elasticidad (Saltaren, 2014).

b. Formulación Lagrangiana

Las ecuaciones de movimiento de Lagrange constituyen una potente herramienta analítica para el modelado de robots manipuladores (Taylor, 2018); dado que permiten describir la dinámica del robot a partir de un balance de energía, la cual se expresa en términos de la energía cinética y potencial de sus eslabones. Para realizar la formulación Lagrangiana, es preciso contar con las expresiones de la cinemática directa del manipulador, que permite llevar a cabo cuatro procedimientos de cálculo: 1) cálculo de la energía cinética ($K(q(t), \dot{q}(t))$), 2) cálculo de la energía potencial ($U(q(t))$), 3) cálculo del Lagrangiano ($L = K(q(t), \dot{q}(t)) - U(q(t))$) y 4) formulación de las ecuaciones escalares dinámicas de movimiento de Lagrange para un robot manipulador de n grados de

libertad (gdl); las cuales se desarrollan para cada uno de ellos (3), y donde el miembro $r(t) - F_f(q, \dot{q}, e)$ se refiere a fuerzas o pares no conservativos en cada articulación.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau(t) - F_f(q, \dot{q}, e) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

c. Sistemas dinámicos

Para el análisis y el diseño en robótica es habitual transformar el modelo dinámico a una ecuación diferencial de primer orden, haciendo uso de la representación en variables de estado. La estructura de una ecuación diferencial ordinaria de primer orden es como la (4), pudiendo ser la representación de un sistema mecánico con dinámica lineal y no lineal (Salgado, 2005).

$$\dot{x} = f(x) \quad (4)$$

Donde $x \in R^n$ es la variable de estado fase que suministra información interna acerca de la dinámica del sistema mecánico, siendo función continua del tiempo $x = x(t)$ y $n \in N$. La derivada temporal de la variable de estado existe y es continua en el tiempo: $\dot{x} \in R^n$ y $\dot{x} = \dot{x}(t)$. La función $f(x)$ es un mapeo vectorial $f: R^n \rightarrow R^n$ en la variable de estado $x(t)$. La estructura (4) se corresponde con un sistema dinámico autónomo, dado que el tiempo t como variable independiente está presente de forma implícita, es decir $x = x(t)$. Una gran mayoría de los sistemas mecánicos son de esta forma permanecen invariantes en la línea de tiempo.

d. Estabilidad en el sentido de Lyapunov

Esta teoría permite analizar el comportamiento de sistemas dinámicos lineales y no lineales de acuerdo a la ecuación (4); para lo cual, es necesario fijar ciertos conceptos:

- Punto de equilibrio: es un vector constante $x_e \in R^n$ del sistema (4) si $f(x_e) = 0 \quad \forall t \geq 0$. Como consecuencia de esta definición, si la condición inicial $x(0) \in R^n$ es un equilibrio ($x(0) = x_e \in R^n$), entonces se satisface $x(t) = x_e \quad \forall t \geq 0$ y $\dot{x}(t) = 0 \quad \forall t \geq 0$. Generalmente se asume que el origen $x = 0 \in R^n$ es un equilibrio de un sistema dinámico representado por la ecuación (4). El vector x_e constituye un ente dinámico en el cual todas las fuerzas del sistema hallan su equilibrio; siendo fundamental en control de robots analizar la estabilidad del vector x_e .
- Estabilidad del punto de equilibrio y zona de atracción: en la zona de atracción sucede que cada solución de la trayectoria $x(t)$ que comienza suficientemente cercana a 0, a partir de t_0 se aproxima al origen 0 a medida que $t \rightarrow \infty$. El origen

$x = 0 \in R^n$ es un punto de equilibrio asintóticamente estable en forma global si: 1) el origen es estable; esta condición se cumple si para cada número $\varepsilon > 0 \exists$ un número $\delta / \|x(0)\| < \delta \rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon \forall t \geq 0$ y 2) el origen es atractivo en forma global; condición que se cumple si $\|x(t)\| \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty \forall x(0) \in R^n$. La estabilidad asintótica global en sistemas dinámicos autónomos indica que el punto de equilibrio $x_e = 0 \in R^n$ es único y no depende de la condición inicial $x(0) \in R^n$. Por su parte, la estabilidad asintótica local significa varios puntos de equilibrio y la convergencia de la trayectoria $x(t)$ es con respecto a uno de esos puntos (origen de estados $x = 0 \in R^n$ en general) y, en consecuencia, sí depende de las condiciones iniciales dentro de la zona de atracción del origen de estados. En síntesis, la existencia de un único x_e es una condición necesaria para establecer sobre éste estabilidad asintótica en forma global (Ollero, 2001). Cabe señalar, que estos conceptos de estabilidad son propiedades intrínsecas deseables del punto de equilibrio x_e de un sistema dinámico caracterizado por la ecuación (4) $\dot{x} = f(x)$.

- Método directo de Lyapunov: el núcleo central de la teoría de estabilidad de Lyapunov asume que el punto de equilibrio de un sistema dinámico autónomo como el caracterizado por la ecuación (4), es estable si su energía total es una función definida positiva continuamente decreciente hasta alcanzar un estado de equilibrio, el cual está asociado con el mínimo global de la energía total. De esta forma, la derivada temporal de esta función de energía (potencia del sistema) es definida negativa hasta alcanzar el llamado equilibrio.

En síntesis, una función $V(x)$ para el equilibrio $x = 0 \in R^n$ es una función candidata de Lyapunov de la ecuación (4) si $V: R + x R^n \rightarrow R +$ si: $V(x)$ es una función definida positiva y $\frac{\partial V(x)}{\partial x}$ y $\frac{\partial V(x)}{\partial t}$ son funciones continuas respecto a x . De acuerdo a estos conceptos, se tienen dos teoremas fundamentales para el análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov. El primero establece que el origen $x = 0 \in R^n$ es un estado de equilibrio estable de la ecuación (4) si existe una función candidata de Lyapunov $V(x)$ con derivadas parciales continuas respecto a x y tal que su derivada temporal satisfaga $\frac{\partial V(x)}{\partial t} = \dot{V}(x) \leq 0 \forall t \geq 0 \forall x \in R^n$. Si esto se cumple, entonces $V(x)$ es una función decreciente y las soluciones $x(t)$ de un sistema dado por la ecuación (4) están acotadas para toda condición inicial $x(0) = \varepsilon \in R^n$. El segundo dice que el origen $x = 0 \in R^n$ es un estado de equilibrio estable en forma global de la ecuación (4) si existe una función candidata de Lyapunov $V(x)$ tal que su derivada temporal satisfaga $\dot{V}(0) = 0 \forall t \geq 0$ y $\dot{V}(x) < 0 \forall t \geq 0, \forall x \neq 0 \in R^n$. Por consiguiente, se cumple para la variable de estado $x(t)$ que $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$.

e. Teorema de Lasalle

Para un sistema dado por la ecuación (4) cuyo origen $x = 0 \in R^n$, y aun cuando la función candidata de Lyapunov $V(x)$ presenta una derivada temporal semidefinida negativa, en ciertos casos se puede demostrar estabilidad asintótica global. Se define a un conjunto invariante Ω para un sistema dinámico como aquel en el cual cada trayectoria que comienza en Ω permanece en $\Omega \forall t \geq 0$. En este sentido, cualquier punto de equilibrio estable es ejemplo de un conjunto invariante, dado que ninguna trayectoria puede permanecer en forma indefinida en un punto distinto al de equilibrio estable. De esta manera, si es posible construir una función Lyapunov ($V(x)$), tal que sus derivadas a lo largo de las trayectorias del sistema son semidefinidas negativas, y no existe otra trayectoria del sistema que pueda permanecer indefinidamente en puntos donde las derivadas se disipan, entonces el punto de equilibrio presenta estabilidad asintótica en forma global. Más precisamente, definiendo el conjunto Ω en base a la expresión (5):

$$\Omega = \{x \in R^n: V(x) = 0\} \quad (5)$$

Si $x(0) = 0$ es la única condición inicial en Ω para la cual se cumple que $x(t) \in \Omega \forall t \geq 0$, entonces el origen $x(0) \in R^n$ es un equilibrio asintóticamente estable (Kelly, 2003).

f. Control PD en robot manipuladores

La ecuación en lazo cerrado conformada por el modelo dinámico del manipulador robótico y la estructura matemática del control proporcional derivativo (PD) con compensación de gravedad, posee un origen asintóticamente estable en forma global en términos del vector de estados $[\ddot{q}^T, \dot{q}^T]^T$. A tal efecto, se elige una función de Lyapunov conformada por la energía cinética del manipulador más una función cuadrática del error de posición, de forma tal que la derivada temporal sea semidefinida negativa. Y empleando el teorema de Lasalle, se demuestra estabilidad asintótica global del punto de equilibrio. El modelo dinámico de un robot manipulador de n gdl sin término de fricción, está dada por la ecuación (6); y la ley de control PD con compensación de gravedad por la ecuación (7):

$$\tau(t) = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (6)$$

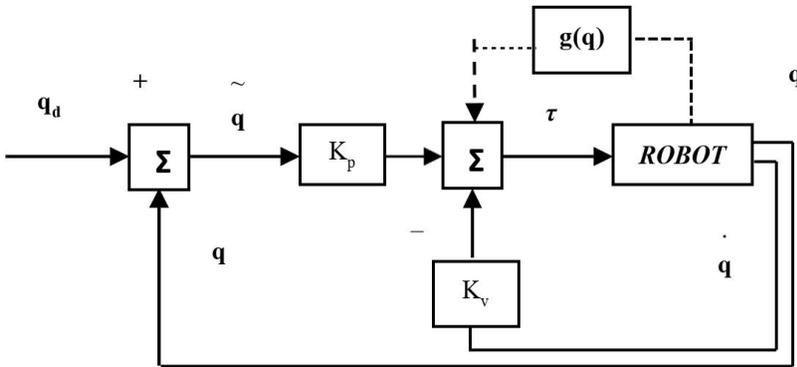
$$\tau(t) = K_p\ddot{q} - K_v\dot{q} + g(q) \quad (7)$$

En la (7) K_p y $K_v \in R^{n \times n}$ representan las ganancias proporcional y derivativa, y deben ser matrices definidas positivas para garantizar la estabilidad asintótica global del origen de la (7). Y $g(q)$ es el vector de pares gravitacionales, el cual se puede obtener como

$g(q) = \frac{\partial U(q)}{\partial q}$, siendo $U(q)$ la energía potencial gravitatoria del robot. El término $g(q)$ en la ecuación (7) del algoritmo de control, indica que el controlador hace uso en forma parcial del modelo dinámico del sistema robótico. El término de compensación de gravedad $g(q)$, junto con las condiciones establecidas para las matrices K_p y K_v , es fundamental para garantizar la unicidad del punto de equilibrio (Dorf, 2005). Combinando la (6) y (7) se obtiene la ecuación en lazo cerrado (8) en variables de estado que precisan el problema de control de posición; y en Fig. 3 se ilustra el diagrama de bloques para un control PD con compensación de gravedad.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ M(q)^{-1} [K_p \ddot{q} - K_v \dot{q} - C(q, \dot{q}) \dot{q}] \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fig 3. Diagrama de bloques de control PD con compensación de gravedad.

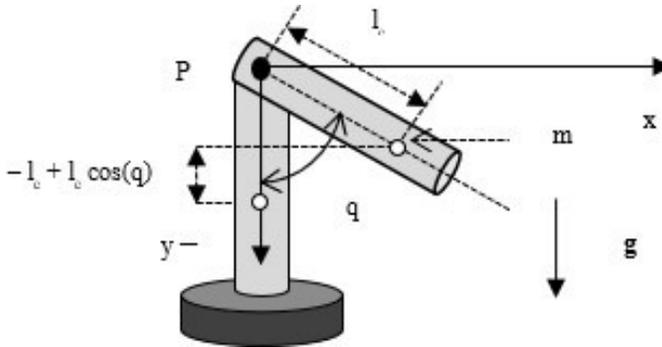


La posición articular $q(t)$ se retroalimenta formando la señal de error $\ddot{q}(t) = q_d - q(t)$. La velocidad articular $\dot{q}(t)$ actúa como inyección de amortiguamiento, de forma de dosificar la energía del término de control proporcional $K_p \ddot{q}$ mejorando así el funcionamiento.

3 ANALISIS DE CASO

Se analiza el caso de un robot de 1 gdl en 2 fases: en la 1^{ra} se obtiene la ecuación en lazo cerrado empleando un algoritmo de control PD con compensación de gravedad, siempre en términos de las variables de estado que definen el problema del control de posición; y en la 2^{da}, se lleva a cabo el análisis de estabilidad en el sentido de Lyapunov y la unicidad del punto de equilibrio. La Fig. 4 muestra los parámetros físicos del robot: la masa m , el centro de masa l_c , el momento de inercia $I_P = ml_c^2 + I$ y la posición articular variable en el tiempo q .

Fig 4. Movimiento del centro de masa l_c del robot manipulador.



1^{RA} Fase: se hace la formulación Lagrangiana obteniendo el modelo dinámico del robot, cuya cinemática directa la da (9):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_c \sin(q) \\ -l_c \cos(q) \end{bmatrix}; v = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_c \cos(q) \dot{q} \\ l_c \sin(q) \dot{q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Se obtiene la energía cinética K mediante la ecuación y la energía potencial por medio de la (11).

$$K(q(t), \dot{q}(t)) = \frac{1}{2} [v^T v + I \dot{q}^2] = \frac{1}{2} [m l_c^2 + I] \dot{q}^2 \quad (10)$$

$$U(q) = m g l_c (1 - \cos(q)) \quad (11)$$

Se obtiene el Lagrangiano mediante la ecuación (12).

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) = \frac{1}{2} [m l_c^2 + I] \dot{q}^2 - m g l_c (1 - \cos(q)) \quad (12)$$

La (12) adquiere el formato de una ecuación escalar (13).

$$\tau = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} + b \dot{q} \quad (13)$$

Se llega al modelo dinámico (14) combinando (12) y (13).

$$\tau = [m l_c^2 + I] \ddot{q} + b \dot{q} + m g l_c \sin(q) \quad (14)$$

El problema se focaliza en posicionar el brazo en un punto deseado q_d , desde una inicial como $q=0$. El modelo de control PD más compensación gravitatoria para este robot lo da la ecuación (15).

$$\tau = k_p \ddot{q} - k_v \dot{q} + m l_c \sin(q) \quad (15)$$

Es preciso transformar la ecuación (14) a una estructura de una ecuación diferencial de primer orden como la (4); a partir de escoger adecuadamente las variables de estado. En el presente estudio, el problema de posición del robot se define en términos de las variables de estado \dot{q} y \ddot{q} . De esta forma, se determina la ecuación en lazo cerrado (16) que vincula el modelo dinámico (14) con la estrategia de control (15).

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q} \\ \frac{1}{(m l_c^2 + I)} [k_p \ddot{q} - k_v \dot{q} + b \dot{q}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ \frac{k_p}{(m l_c^2 + I)} & -\frac{(k_v + b)}{(m l_c^2 + I)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (16)$$

2^{DA} Fase: analizando las componentes de la (16) se infiere:

La 1^{ra} componente de (16) indica que $-\dot{q} = -1 \dot{q} = 0 \leftrightarrow \dot{q} = 0$.

Empleando $\dot{q} = 0$ en la 2da componente de (16), se tiene que $[k_p + b] \ddot{q} = 0 \leftrightarrow \ddot{q} = 0 \wedge k_p \in R_+$; $b \in R_+$. Siendo que también se tiene que $k_p \ddot{q} = 0 \leftrightarrow \ddot{q} = 0 \wedge k_p \in R_+$. Se demuestra que el origen del espacio de estados es el punto de equilibrio y es único; a saber: $[\ddot{q}, \dot{q}]^T = [0, 0]^T$. Para el análisis de la estabilidad del punto de equilibrio (origen de estados) se propone la siguiente función de Lyapunov (17), teniendo en cuenta que $I_p = m l_c^2 + I$:

$$V(\ddot{q}, \dot{q}) = \frac{1}{2} I_p \dot{q}^2 + \frac{1}{2} k_p \ddot{q}^2 \quad (17)$$

Considerando que $q_d = \text{constante}$ y a partir de la 2^{da} componente de la (16), se tienen las expresiones (18) y (19):

$$\ddot{q}(t) = q_d - q(t) \rightarrow \ddot{q}(t) = \dot{q}_d - \dot{q}(t) \rightarrow \ddot{q}(t) - \dot{q}(t) \quad (18)$$

$$I_p \ddot{q} = k_p \ddot{q} - k_v \dot{q} - b \dot{q} \rightarrow I_p \ddot{q} \dot{q} = k_p \ddot{q} \dot{q} - [k_v + b] \dot{q}^2 \quad (19)$$

Se deriva con respecto al tiempo la (17) considerando las expresiones (18) y (19), llegando a la ecuación (20):

$$\dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) = I_p \ddot{q} \dot{q} + k_p \ddot{q} \dot{q} = I_p \ddot{q} \dot{q} - k_p \ddot{q} \dot{q} = k_p \ddot{q} \dot{q} - [k_v + b] \dot{q}^2 - k_p \ddot{q} \dot{q} \rightarrow \dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) = -[k_v + b] \dot{q}^2 \leq 0 \quad (20)$$

Esta derivada temporal de la función de Lyapunov es semidefinida negativa; habida cuenta de que depende solo de la variable \dot{q} , y dado que no se identifica en la (20) la otra variable de estado correspondiente al error \ddot{q} . Se concluye que $\dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) = 0$ si $\dot{q} = 0$ y el error \ddot{q} adopta un valor cualquiera. De esta forma, se demuestra estabilidad del punto de equilibrio. En virtud de que la expresión (20) no satisface las condiciones necesarias de estabilidad asintótica en forma global para la ecuación autónoma de lazo cerrado (16), el teorema de Lasalle permite demostrar la estabilidad global. En el caso presente, el conjunto Ω está dado por la expresión (21).

$$\Omega = \left\{ \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \in R^2: \dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) = 0 \leftrightarrow \dot{q} = 0 \in R, \ddot{q} \in R \right\} \quad (21)$$

De (21) se infiere que $\dot{V}(\ddot{q}, \dot{q}) = 0 \leftrightarrow \dot{q} = 0 \wedge \ddot{q} \in R$. Una solución $[\ddot{q}(t), \dot{q}(t)]^T \in \Omega \forall t \geq 0$ si $\dot{q}(t) = 0 \forall t \geq 0$; en cuyo caso la posición articular $q(t)$ es una constante, siendo la misma la posición deseada q_d . Entonces el error de posición $\ddot{q}(t) = q_d - q(t) = 0$. En función de lo expuesto y observando en detalle la expresión (20), se tiene que $k_p \ddot{q} = 0 \leftrightarrow \ddot{q} = 0$; lo que $\rightarrow \ddot{q} = 0 \forall t \geq 0$. Esto significa que el conjunto $[\ddot{q}(t), \dot{q}(t)]^T = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \in R^2$ es la única condición inicial en Ω para la cual se cumple que $x(t) \in \Omega \forall t \geq 0$. De esta forma, mediante el teorema de Lasalle se demuestra estabilidad asintótica en forma global del origen (punto de equilibrio) de la ecuación en lazo cerrado (16).

A continuación, se muestra la simulación de un robot prototipo de 1 gdl, cuyo extremo se desea posicionar en 120° a partir de una posición inicial de 0° . Posee un servomotor con un torque máximo de 15Nm, una masa $m = 4$ Kg, la fricción viscosa $b = 0.2$ Nms/rad, centro de masa $l_c = 0.09$ m, longitud $l = 0.5$ m, y momento de inercia $I = 0.2$ Nms²/rad. La ganancia proporcional es de $k_p = 1.4$ y se adopta una ganancia derivativa de un 40% de k_p en esta primera prueba ($k_v = 0.4 \times 1.4 = 0.56$). La Fig. 5 ilustra como la posición articular $q(t)$ del brazo robótico converge hacia los 120° , con lo que la señal del error converge a 0° . Se observa que la fase transitoria para $q(t)$ se caracteriza por un comportamiento suave, con un pequeño sobre pico. Esto se debe a la energía que suministra el término de control proporcional $k_p \ddot{q}$. Esta energía se ve dosificada por la inyección de amortiguamiento que proporciona la acción de control derivativo, dada por el término $-k_v \dot{q}$, donde el signo menos en el modelo de control es el que dosifica la energía entregada por el término de control proporcional $k_p \ddot{q}$. Una vez que el brazo llega a la posición deseada $q_d = 120^\circ$, el 2do gráfico de la Fig. 5 refiere a que la velocidad articular es 0. Este hecho refiere a que el brazo permanece estático en el estado estacionario, lo cual indica que el mismo ingresa en la zona del atractor del punto de equilibrio. El robot

se mantiene de forma indefinida en esa posición; salvo que se re programe otra posición deseada o tenga lugar alguna acción perturbadora. Esto se plasma en el siguiente código de la función péndulo para la respuesta del robot de un grado de libertad, cuya grafica resultante se ilustra en la gráfica 5. En este programa se declara el vector de estados, la posición y velocidad articular; los parámetros del péndulo como la masa, centro de masa, gravedad, inercia, fricción, fricción viscosa, posición deseada; las ganancias de control, proporcional y derivativa.

```
function xp =pendulo(t, x)
%vector de estados %posición articular
q=x(1); %velocidad articular
qp=x(2); %parámetros del péndulo
m=4 %masa
lc=0.09; %centro de masa
g=9.81; %constante de aceleración gravitacional
I=0.2 %momento de inercia del rotor %momento de inercial total del péndulo
Ip=m*lc*lc+I; %fricción del péndulo
b=0.2 %coeficiente de fricción viscosa
qd=120*pi/180; %posicion deseada
qt=pi*qd/180-q; %error de posición %ganancias del algoritmo de control
kp=1.4; %ganancia proporcional
kv=0.4*kp; %ganancia derivativa %algoritmo de control proporcional derivativo PD
tau=kp*(qd-q)-kv*qp+m*g*lc*sin(q); % par aplicado al pendulo %aceleracion articular del
pendulo
qpp=(tau-b*qp-m*g*lc*sin(q))/Ip; %vector de salida
xp=[qp ; %xp(1)=qp=x(2) velocidad articular
qpp] ; %xp(2)=qpp aceleración articular end
```

Se definen la posición y velocidad articular respectivamente. Se declaran los parámetros, se implementa el algoritmo de control proporcional derivativo que proporciona la energía necesaria al péndulo para que se mueva a la posición deseada de 120° desde un inicial 0°. Se tiene el programa del control PD, el cual tiene definido los parámetros de compensación de la gravedad, ganancias proporcional y derivativa, error de posición, y esquema de control; a través del código principal, se lleva a cabo la simulación. En el cuadro siguiente, se muestra el código de la simulación, donde se determinan las condiciones iniciales, el tiempo de la simulación, el vector del tiempo, la simulación del péndulo. Se determinan la posición y velocidad articulares.

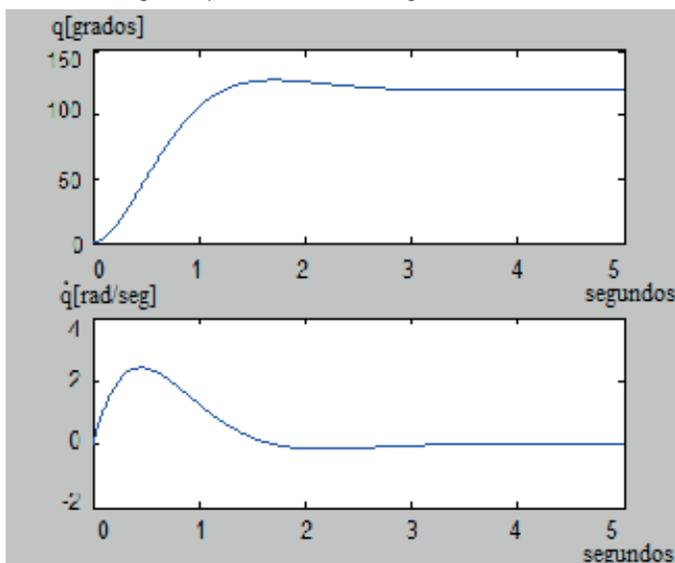
```

clear; close all; clc;
format short g %condicion inicial
x0=[0 0]; %tiempo de simulacion
ti=0; h=0.001; tf=5;
ts=ti:h:tf; %vector tiempo
opciones=odeset('RelTol',h,'InitialStep',h,'MaxStep',h);
%simulacion del pendulo
[t,x]=ode45('Pendulo',ts,x0,opciones); %posicion y velocidad articulares q=x(:,1);
%posicion articular
qp=x(:,2); %velocidad articular %grafica las variables de estado
subplot(2,1,1); plot(t, 180*q/pi)
subplot(2,1,2); plot(t, qp)

```

La posición $q_1(t)$ se une con la deseada a 120° aproximadamente a los 2,8 segundos, tal como se observa. El punto de equilibrio de la ecuación en lazo cerrado creado por el modelo dinámico del robot y el algoritmo del control PD tiene la propiedad de ser asintóticamente estable. Esto obedece a la naturaleza dinámica del punto de equilibrio. Otro aspecto a resaltar, es que el efecto de la acción del control D no se manifiesta en el estado estacionario debido a que la posición del robot $q_1(t)=q_{d1}$ es constante, por lo cual $\dot{q}(t) = 0$. En el caso de un nuevo cambio en los valores y la presencia de perturbaciones, la acción derivativa ejercerá su beneficio de amortiguamiento.

Fig 5. Respuesta del robot de un grado de libertad.



4 CONCLUSIONES Y FUTURA LINEA DE INVESTIGACION

a. Conclusiones

- Se analiza el control de posición de un robot manipulador en términos de las variables de estado error de posición y velocidad articular.
- Se obtiene la ecuación en lazo cerrado combinando la ley de control con la ecuación del modelo dinámico haciendo uso de un modelo de control PD con compensación de gravedad.
- Se observa que el término $-k_v \dot{q}$ amortigua la energía suministrada por el término de control proporcional $k_p \ddot{q}$; por lo que su acción central se manifiesta en el estado transitorio, eliminando así los sobrepicos.
- Se lleva a cabo el análisis de estabilidad del punto de equilibrio (origen del espacio de estados) mediante la función de Lyapunov.
- Se demuestra que el origen del espacio de estados es el único punto de equilibrio, y se aplica el teorema de LaSalle para demostrar estabilidad asintótica en forma global del origen de la ecuación en lazo cerrado (16).
- Se observa que una vez que el robot se detiene en el estado estacionario, la compensación de gravedad tiende a una constante ($g(qd) = mg \cos(qd)$) para mantener al robot en la posición deseada q_d .
- En estado transitorio la única energía que entrega el algoritmo de control es la del par gravitacional ($g(qd) = mg \cos(qd)$); de lo que se infiere la importancia de incluir esta componente en la ley de control, y así compensar parcialmente la dinámica del brazo.
- Cabe señalar que, de no ser así, dicho brazo se desplazaría hacia abajo aumentando el error de posición \ddot{q} , por lo que el controlador envía energía para volverlo a la posición deseada q_d (120° para el caso de estudio). Así el brazo podría quedar oscilando; y es el par gravitacional el que se requiere para que el manipulador se mantenga en los 120° .

b. Futura línea de investigación

- El grupo de investigación se encuentra analizando el control de posición y estabilidad para robot de 2 gdl.
- El grupo de investigación se encuentra analizando una ley de control adaptable que permita un análisis detallado de la sintonización de las ganancias.
- En este sentido, se encuentra en estudio el algoritmo de control PID con ciertas condiciones de sintonía.

- Se desarrollarán varios sistemas de ganancias y se verificará como se deteriora en términos de los sobre impulsos y fluctuaciones en el comportamiento del péndulo (robot de 1 grado de libertad) en el tiempo de menor calidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barrientos, Antonio; Peñín, Luis Felipe; Balaguer Carlos y Aracil Rafael. "Fundamentos de Robótica". Editorial McGraw – Hill. Madrid – España, 2007.

Dorf, R., "Sistemas de Control Moderno". Ed. Alhambra, España, 2005.

Hernandez Gaviño, R., "Introducción a los Sistemas de Control". Ed. Pearson, México, 2003.

Kelly, R., "Control de Robots Manipuladores". Ed. Pearson Prentice Hall, España, 2003.

OlleroBaturone, A. "Robótica. Manipuladores y Robots Móviles". Ed. Marcombo, España, 2001.

Poliak, B., "Lyapunov Functions: An Optimization Theory Perspective". IFAC 2017.

Reyes Cortés, F., "Robótica – Control de Robots Manipuladores". Ed. Alfaomega, México, 2011.

Reyes Cortés, F., "Mecatrónica, Control y Automatización". Ed. Alfaomega, México, 2013.

Saltaren, R., "Robótica Aplicada. Analisis y Diseño de Robots Paralelos y Seriales con Matlab". Ed. Dextra, 2014.

Salgado, E. M., "Análisis de sistemas lineales". Ed. Pearson Education, 2005. Taylor, J., "Mecánica Clásica". Ed. Reverte, España, 2018.

SOBRE O ORGANIZADOR

El Ing. Guillermo Daniel Rodríguez se graduó como Ingeniero en Electrónica en la Universidad Nacional de La Plata, donde actualmente cursa su Doctorado en Ingeniería. A lo largo de su carrera, ha destacado por su participación en diversas áreas de investigación y desarrollo, así como por su labor docente en cursos de postgrado y perfeccionamiento. Ha dictado cursos sobre **Tecnología de Antenas**, *Instrumentación para la Caracterización Ionosférica* y **Radar de Dispersión Incoherente**, compartiendo su amplio conocimiento en tecnologías avanzadas.

Actualmente, el Ing. Rodríguez ocupa el cargo de *Profesor Adjunto con Dedicación Exclusiva* en la *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata* (FCAG-UNLP), donde sigue desarrollando actividades de investigación. Desde 2024, es *Director del Grupo de Investigación y Desarrollo en Radiofrecuencias e Instrumentación (GIDRI - FCAG - UNLP)*, cargo que ejercerá hasta 2027.

A lo largo de su carrera, Rodríguez ha participado en proyectos conjuntos de gran envergadura, como *Co-director del desarrollo de antenas para Radiómetros en bandas K y Ka para el satélite SACD*, en colaboración con el **Jet Propulsion Laboratory (NASA)**, la **CONAE** y la **UNLP**.

Además, fue *Consultor de la Sociedad Argentina de Radioprotección (SAR)* y *Co-director de proyectos en el ámbito de RAPEAS* (Red Argentina Para el Estudio de la Atmósfera Superior), vinculado al **CONICET**.

También ha tenido experiencia en gestión y liderazgo, desempeñándose como *Coordinador para Desarrollos Instrumentales y Tecnologías Asociadas en RAPEAS* hasta 2016 y como **Gerente de la misma red hasta 2013**.

*Principales Publicaciones y Contribuciones: *El Ing. Rodríguez ha participado activamente en numerosos estudios científicos y congresos internacionales. Entre sus contribuciones más destacadas se encuentran:

- "Estudio de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur con datos satelitales de precipitación de partículas" (Reunión AAGG, 2024)
- "Curva del día tranquilo para riómetro: análisis y comparación de métodos" (Space Weather, Ushuaia, 2023)
- "Diseño de antena dual banda y polarizada para radar meteorológico con análisis de modos característicos" (IEEE Biennial Congress of Argentina, 2022)
- "Parámetros de radar meteorológico obtenidos mediante simulación MOM validados con datos reales de hidrometeoros" (IEEE Congreso Bienal de Argentina, 2020)
- "Telemetría en tiempo real para satélites de órbita baja basados en comunicaciones Máquina a Máquina y constelación Inmarsat" (2nd IAA Latin American Symposium on Small Satellites, 2019)

Gracias a su experiencia académica y de investigación, el Ing. Rodríguez se ha consolidado como un referente en el estudio de tecnologías de radar e instrumentación espacial y para estudios ionosféricos.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Análisis de Ciclo de Vida 16, 17, 25, 26

Análisis Numérico 49, 50, 51, 53, 56

B

Big Data 27, 28, 29, 30, 36, 37

C

Competencias blandas 49, 50, 51

Competencias profesionales 27, 30, 46

Comunicación escrita 50, 54

Comunicación oral 50, 53

Construcción 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 29

Control de posición 1, 2, 3, 8, 14

E

Economía Circular 16, 17, 18, 19, 21, 24, 25, 26

Eficiencia 16, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 32, 38, 39, 45, 56

Estabilidad 1, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 14

F

Formación ingenieril 50

I

Ingeniero 1, 27, 28, 30, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 47, 51, 52, 60

M

Manipulador 1, 2, 3, 4, 7, 9, 14

Modelo dinámico 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 13, 14

P

Perfil 28, 30, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 46, 52, 60

Programa 12, 24, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46

R

Reestructuración 38, 39, 40, 42, 45

S

Sistema dinámico 1, 4, 5, 6, 7

T

Tecnología de la Información 27

V

Vida útil 16, 17, 20, 21, 23, 24