



Método para evaluación de una estrategia de control realimentado en la funcionalidad de agarre de poder con una prótesis de mano robótica

Method for the assessment of a feedback control strategy on the power grasp functionality with a prosthetic robotic hand

Pablo Alejandro Perdomo Fernández ¹, Carlos Alberto Gaviria López ²

Fecha de Recepción: 09 de febrero de 2021

Fecha de Aceptación: 20 de octubre de 2021

Cómo citar: Perdomo-Fernández, P.A y Gaviria-López, C.A. (2022). Método para evaluación de una estrategia de control realimentado en la funcionalidad de agarre de poder con una prótesis de mano robótica. *Tecnura*, 26(71), 80-95. <https://doi.org/10.14483/22487638.17042>

Resumen

Objetivo: En el diseño de una prótesis de mano robótica surgen variedad de problemáticas para las cuales existen múltiples soluciones propuestas en la literatura. Una de las problemáticas es la selección de una estrategia para el control automático del movimiento de la mano. Entre las funcionalidades de una prótesis, la de *agarre de poder* es una de las más importantes. Dada la gran cantidad de propuestas en cuanto técnicas de control para el agarre de poder, el diseñador se enfrenta al dilema de cuál de ellas es la más adecuada para su diseño particular. Aunque hay métricas para cuantificar la calidad del agarre, las que se han propuesto abordan diversos aspectos de manera independiente, lo cual no permite tomar una decisión acerca de la mejor opción para el caso particular. En este trabajo se propone un método para calcular un indicador compuesto que permite la evaluación del desempeño de técnicas de control en el agarre de poder, con base en las siguientes métricas individuales que evalúan diferentes aspectos en la ejecución del agarre de poder: la fuerza del dedo, la fuerza del agarre, la eficiencia del agarre, el tiempo de ciclo de agarre, la resistencia al deslizamiento, el error de seguimiento y el sobreimpulso de la respuesta transitoria. Gracias al método propuesto en este trabajo, se da respuesta a la pregunta: “De varias opciones de control a probar, ¿cuál ofrece un mejor desempeño funcional?”.

Metodología: Se adoptó un conjunto de métricas con las cuales obtener datos cuantitativos relacionadas con la calidad del agarre de poder y con el desempeño del objetivo de control para gobernar la prótesis. Posteriormente, se calcularon métricas individuales seleccionadas para cada una de las técnicas de control de agarre a evaluar, sobre un entorno virtual, constituido por una mano robótica y un objeto a agarrar. Luego se construyeron dos indicadores compuestos para obtener una valoración cuantitativa de la calidad del agarre a partir de un análisis estadístico, y se contrastaron los resultados contra las métricas individuales utilizadas.

Resultados: Se planteó un método para la construcción de un indicador compuesto que permitiera la evaluación del desempeño de técnicas de control, en agarres de poder en manos robóticas. Al implementar dicho método, se encontraron los mejores valores de desempeño en controladores híbridos.

Conclusiones: En este trabajo se sugiere una alternativa tendiente a facilitar la toma de decisiones del diseñador en cuanto

¹Ingeniero en Automática Industrial. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. Email: pperdomo@unicauca.edu.co

²Doctor en Automatización Avanzada y Robótica, ingeniero en Electrónica. Docente titular Universidad del Cauca. Popayán, Colombia. Email: cgaviria@unicauca.edu.co

a la técnica de control más adecuada, entre varias disponibles, para el logro del agarre de poder con una prótesis específica. El método busca construir un indicador compuesto que agrupa variadas métricas para evaluar funcionalidad particular de agarre, y también para cuantificar el logro de seguimiento de consignas, facilitando la toma de decisiones acerca de la incidencia de la técnica de control en el logro del objetivo final.

Financiamiento: Este trabajo fue financiado por la Universidad del Cauca, en el marco del programa de Maestría en Automática.

Palabras clave: mano robótica protésica, agarre de poder, indicadores compuestos, evaluación de la calidad del agarre de poder.

Abstract

Objective: In the design of a robotic hand prosthesis, a variety of problems arise for which there are multiple solutions proposed in the literature. One of them is the selection of a strategy for the automatic control of the movement of the hand. Within the functionalities of a prosthesis, the power grip functionality is one of the most important. Given the wide variety of proposals in terms of control techniques for power grip, the designer is faced with the dilemma of which of them is the most suitable for his particular design. Although there are metrics to quantify the quality of the grip, those that have been proposed address various aspects independently, which does not allow making a decision about the best option for the particular case. In this work, a method is proposed to calculate a composite indicator that allows the evaluation of the performance of control techniques in the power grip based on the following individual metrics that evaluate different aspects in the execution of the power grip: finger strength, grip strength, grip efficiency, grip cycle time, slip resistance, following error, and transient response overshoot. Thanks to the method proposed in this work, the question is answered: of several control options to be tested, which one offers better functional performance?

Methodology: A set of metrics are adopted with which to obtain quantitative data related to the quality of the power grip and to the performance of the control target to govern the prosthesis; subsequently, selected individual metrics are calculated for each of the grip control techniques to be evaluated on a virtual environment, consisting of a robotic hand and an object to be grasped; then two composite indicators are constructed to obtain a quantitative assessment of the quality of the grip based on a statistical analysis, and the results are contrasted against the individual metrics used.

Results: A method is proposed for the construction of a composite indicator, which allows the evaluation of the performance of control techniques, in power grips in robotic hands. By implementing this method, the best performance values were found in hybrid controllers.

Conclusions: In this work, a method has been proposed to facilitate the decision-making of the designer regarding the most adequate control technique, among several available, to achieve the power grip with a specific prosthesis. The method seeks to build a composite indicator that groups together various metrics to evaluate particular grip functionality, and also to quantify the achievement of following instructions, facilitating decision-making about the incidence of the control technique in the achievement of the final objective.

Financing: This work was supported by University of Cauca under the Master of Science in Automation program.

Keywords: prosthetic robotic hand, power grasp, composite indicators, quality of power grasp assessment.

Tabla de Contenidos

	Pág
Introducción	82
Método para valoración comparativa de estrategias de control	83
Fase 1. Métricas para calidad de agarre y desempeño de la estrategia de control	84
Fase 2. Cálculo de métricas para las estrategias de control a evaluar	85
Fase 3. Cálculo del indicador compuesto	86
Validación experimental del método	88
Resultados	89
Conclusiones	92
Referencias	92

INTRODUCCIÓN

Las manos humanas tienen una estructura difícil de imitar con una prótesis robótica debido al número de grados de libertad disponible, el número de músculos que gobiernan sus movimientos, los mecanismos de percepción sensorial y su compleja comunicación con la actividad cerebral. La tarea de agarre de objetos es una de las funciones más complejas a ser reproducida por un sistema robótico, y una de las funcionalidades más importantes que el usuario desea recuperar (Boughdiri *et al.*, 2012). Usando la taxonomía de Napier, el agarre se puede clasificar en dos tipos: poder y precisión; este último ocurre cuando el objeto queda atrapado entre los flexores de los dedos y el pulgar opuesto, y el agarre de poder implica sostener un objeto en la cavidad formada por los dedos flexionados y la palma de la mano, aplicando una contrapresión con el pulgar en el plano de la mano (Napier, 1956).

El problema del agarre de objetos con manos robóticas suele dividirse en dos fases: síntesis de agarre, en el cual se estiman los puntos de contacto entre la mano y el objeto, así como también la fuerza que garantice un agarre estable; y ejecución de agarre, la cual se divide a su vez en una fase antes del contacto y una fase después del contacto. Para evaluar el agarre en manos robóticas, se definen métricas de calidad, las cuales se utilizan en la evaluación, comparación y selección de las configuraciones de agarre. En Rubert, León, *et al.*, 2017 se utilizan las métricas en la fase de síntesis de agarre, a manera de guía en algoritmos de planificación de agarre. En otros casos se implementan las métricas en la evaluación de diferentes aspectos de las manos robóticas, como la ubicación de puntos de contacto, o fuerzas de contacto frente a perturbaciones y manipulación del objeto Rubert y Morales, 2016. En ellas se analizan y caracterizan parámetros operativos que permitan la ubicación de puntos de contacto y configuración del manipulador, en aplicaciones prácticas León *et al.*, 2014.

Los trabajos de [Goins et al., 2014](#), y [Rubert, Kappler et al., 2017](#) también han implementado métricas en algoritmos de predicción de la calidad del agarre, relacionadas con los puntos de contacto, su ubicación y distancia entre estos.

También se han implementado métricas en la evaluación del desempeño de manos robóticas, comparando diferentes aspectos de diseño que conduzcan a mejorar su rendimiento ([Rubert et al., 2014](#)). Recientemente el National Institute of Standards and Technology propuso un marco unificado con el mismo fin, dada la necesidad de definir marcos generales que permitan evaluar el desempeño de un diseño de mano particular en el agarre de objetos ([Falco et al., 2018](#)).

A pesar de los avances en la evaluación de manos robóticas mediante variadas métricas de desempeño, no se han contemplado métricas para evaluar el desempeño de controladores automáticos para el agarre de objetos, puesto que comúnmente los controladores propuestos se evalúan en cuanto al logro del seguimiento de consignas de fuerza o posición, mas no en cuanto al desempeño del agarre del objeto. De este modo, un diseñador no tiene claridad en cuanto a qué estrategia de control, de entre las muchas opciones disponibles, es la más adecuada para el logro de un mejor desempeño del agarre.

En este artículo se contribuye al problema descrito previamente, proponiendo un método para cuantificar la incidencia que tiene la estrategia de control realimentado utilizada en el agarre de poder con una prótesis de mano robótica. Para ello se construye, de manera metodológica, un índice compuesto que permite cuantificar la efectividad de una determinada estrategia de control en el logro del agarre de poder buscado con la prótesis. El aporte central de este trabajo investigativo es que el método propuesto permite tener un indicador para concluir acerca de qué estrategia de control, entre varias implementadas, logra el mejor desempeño funcional en cuanto a agarre de poder.

MÉTODO PARA VALORACIÓN COMPARATIVA DE ESTRATEGIAS DE CONTROL

Para dar respuesta a la problemática presentada se debe adoptar un marco de referencia para cuantificar el desempeño del agarre de poder. Para ello se propone un método compuesto por tres fases: la primera consiste en la adopción de un conjunto de métricas con las cuales obtener datos cuantitativos relacionadas con la calidad del agarre de poder y con el desempeño del objetivo de control para gobernar la prótesis; la segunda consiste en el cálculo de las métricas individuales seleccionadas para cada una de las técnicas de control de agarre a evaluar; y la tercera, la construcción de un indicador compuesto que arroje una valoración cuantitativa del agarre logrado, y con base a este indicador, evaluar las técnicas de control.

A continuación, se describen las fases del método propuesto, describiendo el cómo se implementaron para los datos de validación de este artículo en un entorno virtual. El hecho de validar el método mediante modelos virtuales permite que los resultados puedan repetirse en igualdad de condiciones, sin la presencia de los efectos externos al método que podrían ocurrir en un montaje real, según la naturaleza comparativa del procedimiento.

Fase 1. Métricas para calidad de agarre y desempeño de la estrategia de control

Se deben definir las métricas a implementar y que aporten información de la calidad del agarre y del seguimiento de consignas en agarres de poder. Se debe definir la instrumentación y forma de cálculo de cada métrica. En la literatura se han propuesto variadas métricas de calidad de agarre. En una revisión del tema se encontraron en la fase de agarre y síntesis de agarre hasta 24 métricas diferentes diseñadas para cuantificar la calidad del agarre (Rubert, León, *et al.*, 2017, León *et al.*, 2014, Rubert *et al.*, 2014, Falco *et al.*, 2018). Para la fase de validación, en este trabajo se adoptaron las siguientes métricas para agarres de poder y seguimiento de consignas: fuerza del dedo, fuerza de agarre, eficiencia del agarre, tiempo del ciclo de agarre, resistencia al deslizamiento, error de seguimiento y sobreimpulso definidas en Falco *et al.*, 2018, las cuales se definieron como métricas a implementar. Una vez seleccionadas las métricas, se deben describir las variables, el proceso para su cálculo y el entorno de medición de las métricas seleccionadas. En este trabajo, dicha descripción se hizo de la siguiente manera:

- *Fuerza del dedo (F_d)*. Representa la fuerza máxima aplicada por cada dedo sobre el objeto, la cual se obtiene mediante el cierre de la mano y la toma de lectura de fuerza cuasiestática en las yemas de los dedos (se denomina *fuerza cuasiestática* a aquella con bajas oscilaciones, una vez realizado el agarre del objeto). En este trabajo se simuló la existencia de un sensor de fuerza en la yema de los dedos.
- *Fuerza de agarre (F_a)*. Representa la fuerza máxima aplicada sobre el objeto, la cual se obtiene mediante el cierre de la mano y la toma de lectura de fuerza cuasiestática. En este trabajo se construyó un cilindro virtual a ser agarrado por la mano, simulando la existencia de una celda de carga en el interior del cilindro.
- *Eficiencia de agarre (E_a)*. Representa el cociente entre la fuerza externa aplicada al objeto, de manera que produzca deslizamiento del objeto, y la fuerza aplicada al objeto con la mano. Se debe medir la fuerza externa en contacto con el objeto, y la fuerza realizada por la mano sobre el objeto, cuya lectura se toma en celda de carga.
- *Tiempo del ciclo de agarre (T_c)*. Representa el tiempo requerido para que la mano haga los movimientos de cierre, agarre del objeto y apertura, el cual se calcula mediante la toma del tiempo desde el inicio de cierre de la mano hasta obtener una fuerza cuasiestática, una vez entrado en contacto con el objeto, cuyo valor se multiplica por dos; esto arroja el valor de T_c .
- *Resistencia al deslizamiento (R_d)*. Representa la fuerza máxima soportada previo al deslizamiento del objeto. En este trabajo se obtuvo agarrando el cilindro con la mano, y aplicando una fuerza lateral tal que provoque el deslizamiento del objeto. Se mide la fuerza en la yema de los dedos en el instante del deslizamiento y se registra como R_d .

- *Error de seguimiento* (E_r). Representa el error medio cuadrático (RMSE) entre la fuerza de referencia y la fuerza aplicada al objeto.
- *Sobreimpulso* (S_m). Representa el valor pico máximo de la curva de respuesta en el seguimiento de la consigna de fuerza en las yemas de los dedos en la ejecución del agarre. Se promedia el valor obtenido en las yemas.

Estas métricas son implementadas en un entorno virtual, el cual incluye una mano robótica cuyos dedos se actúan con un mecanismo de Stephenson I de seis barras [Norton y McCarthy, 2003](#), presentando un movimiento antropomórfico; un objeto cilíndrico para agarrar, y sensores de posición y fuerza para las estrategias de control.

Fase 2. Cálculo de métricas para las estrategias de control a evaluar

Se definen etiquetas para las técnicas de control a implementar describiendo las variables controladas, y el método de sintonización. Los resultados de las métricas adoptadas en la fase previa se organizan en una tabla de indicadores simples para cada técnica de control etiquetada. En el presente proyecto se seleccionaron aquellas técnicas viables de implementar en el entorno de simulación, las cuales se describen a continuación.

- *LQR con acción integral* (C_1). Permite control de posición ([Fossen, 2011](#)), cuya sintonización está basada en el modelo de la mano.
- *Control por modelo interno IMC* (C_2). Realiza un control de posición ([Puerto et al., 2011](#)), cuya sintonización está basada en el modelo de la mano.
- *PID* (C_3). Implementa un control de posición ([Kent y Engeberg, 2016](#)), cuya sintonización está basada en el modelo de la mano ([Chen y Seborg, 2002](#)).
- *PI difuso* (C_4). Presenta un control de fuerza ([Deng et al., 2018](#)), cuya sintonización está basada en el modelo de la mano ([Castrillón Hernández et al., 2015](#)).
- *PI adaptativo* (C_5). Incorpora un control de fuerza ([Deng et al., 2016](#)), cuya sintonización está basada en el modelo de la mano ([Castrillón Hernández et al., 2015](#)).
- *Híbrido impedancia – PI* (C_6). Realiza un control de posición y fuerza ([Fan et al., 2018](#)), cuya sintonización del lazo de fuerza es basada en el modelo ([Castrillón Hernández et al., 2015](#)), y la sintonización del lazo de posición es basada en ensayo y error.
- *Híbrido IMC – PI adaptativo* (C_7). Utiliza un control de posición y fuerza, en cuyo lazo de posición se encuentra C_2 , y en el lazo de fuerza C_5 .

- *Híbrido LQR – PI difuso (C_8)*. Aplica un control de posición y fuerza, en cuyo lazo de posición se encuentra C_1 y en el lazo de fuerza C_4 .

Las técnicas de control de posición presentan la desventaja de tener picos altos de fuerza en el agarre, cuya fuerza puede causar daños en el objeto. Las estrategias híbridas presentan las ventajas combinadas del control de posición y fuerza, cuyo cambio de estado se ejecuta al alcanzarse un error de posición inferior al 10 %, cambiando de control de posición a fuerza. En técnicas de control posición, en el valor de desempeño de las métricas de error de seguimiento y sobreimpulso, es asignado un valor de nulo.

Fase 3. Cálculo del indicador compuesto

Un indicador se compone de un conjunto de datos que ayudan a medir objetivamente la evolución de un proceso (AENOR, 2003). Se distinguen dos tipos de indicadores: simples y compuestos. El primero se define como una función de una o más variables que conjuntamente miden una característica; y el compuesto (IC) se define como una combinación matemática de indicadores simples (Bas Cerda, 2014). En la literatura se encuentran metodologías para la construcción de indicadores, como el aporte en Bas Cerda, 2014 y (Nardo *et al.*, 2008), por tanto, se debe definir el procedimiento a seguir para la construcción del indicador compuesto. En el presente proyecto se adopta el método en Bas Cerda, 2014 basado en el trabajo de Nardo *et al.*, 2008, como guía para la propuesta del IC de desempeño. Los pasos utilizados para la construcción del IC en esta propuesta, aplicados al caso de estudio en este trabajo, son:

- *Marco conceptual*. El IC a construir tuvo como objetivo evaluar las técnicas de control en el desempeño del agarre de poder, dando a conocer cómo la selección de una estrategia específica incidía en el desempeño del agarre.
- *Selección de indicadores simples*. Se utilizaron los indicadores adoptados en la fase 1 del método, en este trabajo: F_d , F_a , E_a , T_c y R_d relacionadas con calidad del agarre, E_r y S_m , asociadas con el desempeño del algoritmo de control. Otras métricas fueron excluidas por su enfoque hacia agarres de precisión o a la calibración de instrumentación.
- *Población de datos*. Se seleccionó el grupo de estrategias de control que permitieran agarres de poder, y se realizaron los experimentos para el cálculo de los indicadores para cada técnica. En este trabajo las técnicas evaluadas se describieron en la fase 2 como: C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 , C_7 y C_8 .
- *Normalización de datos*. Se implementó el método de normalización de reescalamiento, al presentar ventajas sobre otros métodos de normalización; como permitir la aplicación de datos cuantitativos, la conservación de las distancias relativas, el ajuste de los indicadores a la misma escala de medida y al mismo rango de variación (Bas Cerda, 2014).

- *Tratamiento de datos.* Se analizó la presencia de valores atípicos en los datos obtenidos en las diferentes métricas. En este trabajo no se encontró ninguno, consecuencia de la estrategia de prueba en un modelo virtual. Se hallaron datos estadísticos correspondientes a media, desviación estándar, curtosis y coeficiente de asimetría. De esta información, se concluyó que la métrica F presentaba una baja dispersión de datos, y una alta concentración alrededor de la media, según su valor de desviación estándar y curtosis, indicando un aporte bajo en información al IC.
- *Análisis multivariante.* Se halló la matriz de correlación entre los indicadores simples donde hubo una alta correlación entre F_d y F_a , lo que indicó la posibilidad de redundancia en la información aportada al IC. Luego se analizaron los componentes principales, donde se encontró que la proyección sobre dos componentes logró explicar el 72,45 % de la varianza. Esto se realizó mediante algoritmos para análisis de componentes principales en R, utilizando la interfaz gráfica *R commander* (Sáez Castillo, 2016). Analizando el plano de correlación en base a los dos componentes hallados, se observa la alta correlación entre las métricas F_d , S_m y F_a .
- *Ponderación y agregación de indicadores.* Se propuso un indicador, I_{C1} indicado en la ecuación (1). Se asignaron pesos iniciales de igual proporción. A partir de la información aportada por el tratamiento de datos y el análisis multivariante, los pesos en (1) se ajustaron teniendo en cuenta la correlación entre los indicadores F_a , F_d y S_m , asignándoles un peso bajo a dos de ellos. Ya que los indicadores F_d y R_d presentaron un alto valor de curtosis, indicando alta concentración de datos alrededor de la media, se le asignó a uno de ellos un peso levemente menor en comparación con la mayoría.

Con la finalidad de comparar el indicador calculado con estos criterios, se implementó un algoritmo de optimización en la búsqueda de los pesos de los indicadores simples, de lo que se obtuvo un segundo indicador I_{C2} , mostrado en la ecuación (2). El proceso de optimización es un enfoque conocido como método de búsqueda simple de Nelder-Mead (Becker et al., 2017), no requiere conocimiento de derivadas y tiende a producir resultados de convergencia eficientes. En la práctica, los pesos optimizados pueden dar lugar a pesos negativos, debido a la estructura de correlación ente indicadores simples. No se propone que los pesos optimizados se apliquen a ciegas, se plantean como una herramienta de aprendizaje para mostrar cuán lejos están los pesos de los valores óptimos, qué pesos de los indicadores tienen poco impacto en los resultados, e incluso que indicadores podrían eliminarse.

$$I_{C1} = 0,12 F_d + 0,01 F_a + 0,1975 R_d + 0,1975 T_c + 0,08 E_a + 0,1975 S_m + 0,1975 E_r \quad (1)$$

$$I_{C2} = -0,372 F_d + 0,1962 F_a + 0,3381 R_d - 0,0911 T_c + 0,686 E_a + 0,0961 S_m + 0,1468 E_r \quad (2)$$

- *Análisis de sensibilidad.* Se realizó con base al cálculo de las varianzas de los indicadores individuales y del indicador compuesto al aplicarlos a los datos; así, se definió *la sensibilidad* como el

cociente entre la varianza esperada de un indicador simple y la varianza total de salida. Este análisis dio a conocer la influencia de cada índice simple en el IC.

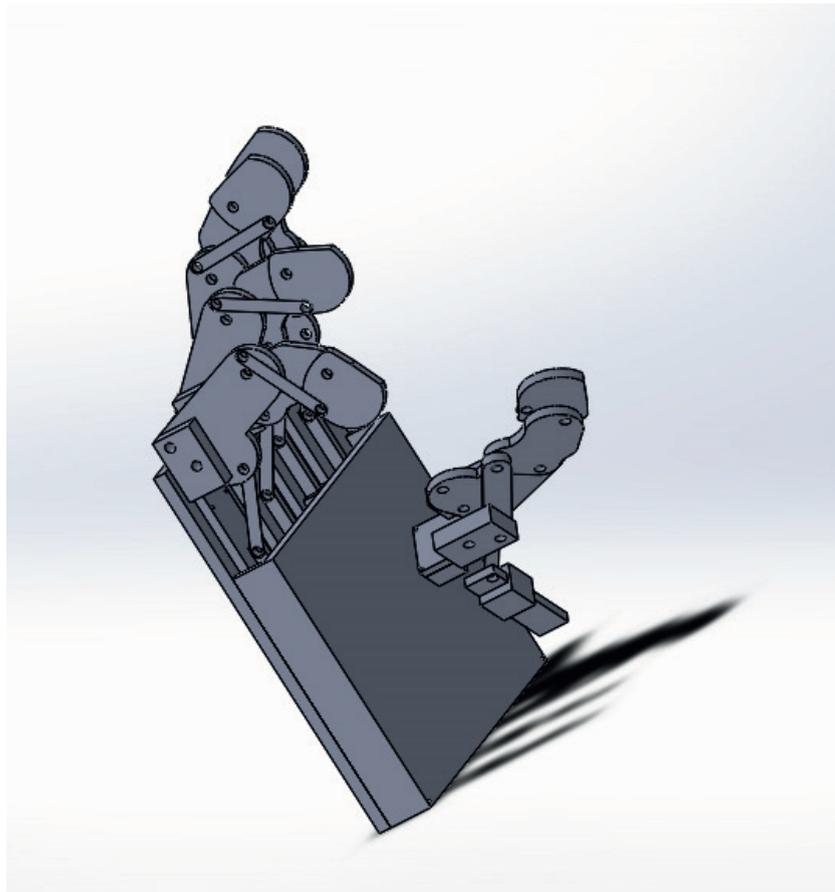


Figura 1. Modelo de mano virtual en SolidWords

Fuente: elaboración propia.

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MÉTODO

El proceso para definición y validación del IC se llevó a cabo construyendo un prototipo virtual de una mano subactuada que utiliza mecanismos de barras, la cual se muestra en la figura 1. En el ambiente virtual se puede realizar el control de posición y fuerza de los dedos. En las pruebas efectuadas para medir las métricas encontradas en la literatura ([Rubert et al., 2014](#), [León et al., 2014](#), [Falco et al., 2018](#), [Rubert, León, et al., 2017](#)), solo fuerza de agarre, fuerza del dedo, tiempo del ciclo de agarre, eficiencia, resistencia al deslizamiento y seguimiento de fuerza, se pueden implementar en la mano virtual con que se cuenta, considerando agarres de poder. El prototipo virtual se construyó mediante los paquetes de software MSC Adams®, y MatLab® los cuales son comerciales y ampliamente utilizados por los científicos en el mundo. MSC Adams está diseñado para análisis

dinámico automático de sistemas multicuerpo (automatic dynamic analysis of multibody systems) y provee un gran conjunto de herramientas para construir ambientes virtuales compuestos de objetos 3D, además es compatible con software especializado de diseño asistido por computador (CAD), como SolidWorks. El motor de física de MSC Adams permite al usuario establecer propiedades como la gravedad, fuerzas y fuerzas generalizadas, 3D, pares, materiales de los cuerpos, entre otras. En MSC Adams también están disponibles una variedad de medidas físicas de variables y actuadores, lo que facilita el análisis comprensivo de un sistema mediante modelado simple y flexible de objetos sólidos. Esos objetos se interconectan mediante enlaces cinemáticos y restricciones de movimiento en una sola unidad, la cual corresponde a las características reales del sistema mecánico (Hroncová *et al.*, 2014). La herramienta MSC Adams Controls permite exportar el modelo dinámico calculado a MatLab. La propiedad de cosimulación implementada en MSC Adams facilita el intercambio de información entre los dos simuladores en tiempo de simulación, de modo que el usuario puede sacar ventaja de las capacidades sobresalientes de MatLab para análisis y diseño de controladores para el sistema robótico. Algunos trabajos reportados que utilizan MSC Adams y MatLab en cosimulación son Rubert, Kappler *et al.*, 2017, Rubert *et al.*, 2014 y Falco *et al.*, 2018, quienes demuestran el potencial de simulación para sistemas dinámicos mecánicos.

Se llevaron a cabo las pruebas para el indicador compuesto, en el entorno virtual mostrado en la figura 2, ejecutando el agarre de un cilindro de diámetro pequeño, definido en la taxonomía propuesta en (Feix *et al.*, 2016) como un agarre de poder.

RESULTADOS

Siguiendo el método propuesto en este trabajo, se evaluaron estrategias de control realimentado en la funcionalidad de agarre de poder con una prótesis de mano, donde se calcularon los indicadores simples de fuerza del dedo, fuerza de agarre, resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre, eficiencia, sobreimpulso y error de seguimiento. Luego, se seleccionaron ocho estrategias de control a implementar. Después, se construyó un indicador compuesto, con base en la metodología descrita; por último, se evaluó el desempeño de los controladores. A continuación, se dan a conocer los resultados en la evaluación de los controladores mediante I_{C1} e I_{C2} .

En la figura 3 se ilustran los valores de desempeño que se obtuvieron con cada uno de los controladores evaluados según I_{C1} e I_{C2} , donde I_{C1} representa el indicador propuesto en base al método propuesto, e I_{C2} representa el indicador obtenido mediante un algoritmo de optimización con base al análisis de sensibilidad. A modo de validación comparativa del indicador I_{C1} frente a I_{C2} , se observa un alto grado de similitud en los valores de desempeño arrojados en controladores como C_3, C_4, C_5, C_6, C_7 y C_8 demostrando la congruencia del método propuesto para la construcción del indicador compuesto.

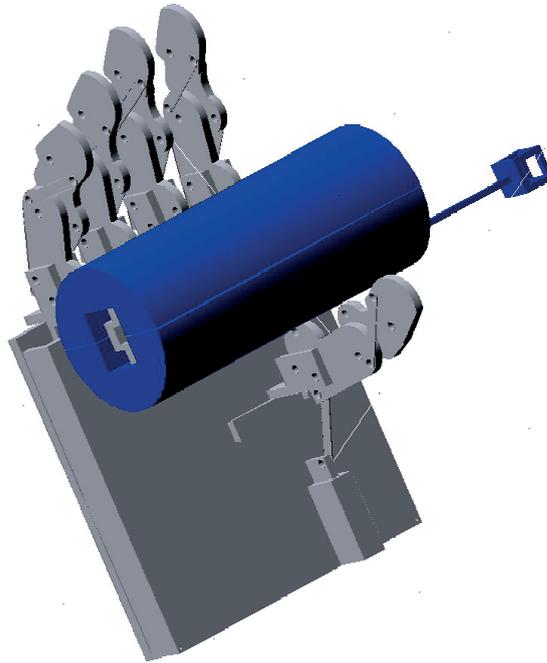


Figura 2. Entorno virtual en *MSC Adams*

Fuente: elaboración propia.

En el desempeño de los controladores se aprecia el mayor valor en C_7 y C_8 en ambos indicadores, y con menor desempeño los controladores C_1 y C_3 . Con los valores de desempeño un diseñador podría elegir entre C_7 y C_8 , dado que poseen un desempeño similar, aunque con requerimientos de implementación diferentes, con lo cual no se pierde funcionalidad en el agarre y se acopla a las necesidades y recursos del diseñador.

A continuación, se muestran algunos datos que permiten comprender el porqué del valor de desempeño de los controladores C_1, C_2, C_7 y C_8 ; y que a su vez muestran que los dos indicadores compuestos efectivamente coinciden en el desempeño que se desea evaluar.

En la tabla I se muestran los valores normalizados obtenidos con cada métrica por los controladores evaluados, se observa cómo aquellos con mayor desempeño (C_7 y C_8) presentan una mayor valoración de métricas simples sobre controladores con bajo desempeño (C_1 y C_3) según los IC, en métricas como F_d, F_a, R_d, T_c, S_m y E_r . Con ello se resalta la superioridad del control híbrido sobre el control de fuerza y posición, teniendo en cuenta las técnicas de control y métodos de sintonización implementados.

Es de aclarar en la presente investigación que el desempeño de un controlador en comparación con otros, en base a las métricas, no es indicativo de superioridad de una técnica de control respecto a otra, puesto que influyen aspectos como la calidad de sintonización, o el uso o no de modelos

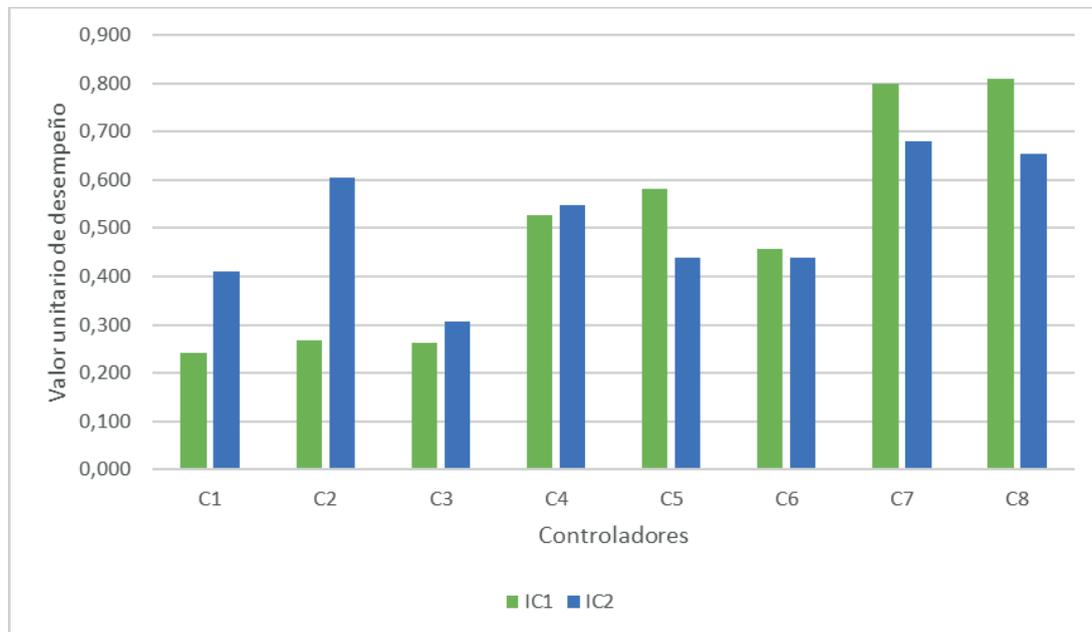


Figura 3. Indicadores compuestos

Fuente: elaboración propia.

Tabla I. Valores normalizados de los controladores en cada métrica

	C_1	C_3	C_7	C_8
F_d	0,395	0	1	1
F_a	0,511	0,014	1	1
R_d	0,667	0,333	0,8	0,733
T_c	0,734	0	0,867	0,745
E_a	0,012	1	0,280	0,427
S_m	0	0	0,987	0,997
E_r	0	0	0,975	0,985

En los valores normalizados, 1 indica un logro ideal del indicador considerándose el mejor, y 0 indica un logro nulo considerándose el peor.

Fuente: elaboración propia.

para el objeto o para la mano. Por tal razón, la actual propuesta de un método de comparación de desempeño de las técnicas centrado en el desempeño del agarre ofrece una herramienta analítica para decidir acerca de qué estrategia de control es más adecuada para una tarea específica con la prótesis, instrumentación y *hardware* disponible.

CONCLUSIONES

Cuando se desea comparar el desempeño de técnicas de control para el agarre de objetos, las decisiones se toman usualmente con base en criterios relacionados con el error de seguimiento de consignas y esfuerzos de control. De otro lado, las métricas de desempeño para evaluar la calidad de agarre evalúan aspectos disimiles en el agarre de poder, aunque de forma aislada. En este trabajo se ha propuesto un método tendiente a facilitar la toma de decisiones del diseñador en cuanto a la técnica de control más adecuada, entre varias disponibles, para el logro del agarre de poder con una prótesis específica. El método busca construir un indicador compuesto que agrupa variadas métricas para evaluar funcionalidad particular de agarre, y también para cuantificar el logro de seguimiento de consignas, facilitando la toma de decisiones acerca de la incidencia de la técnica de control en el logro del objetivo final.

En este trabajo se siguieron dos enfoques distintos para la construcción de un indicador compuesto, llegando a conclusiones similares con los dos indicadores, lo que muestra que, si el procesamiento de la información disponible es adecuado, el método propuesto lleva a conclusiones coherentes.

Este método podría utilizarse para evaluar otros aspectos como el diseño mecánico de la mano, el uso de ciertos actuadores o sensores, cuyo beneficio final no son del todo claros para que el diseñador de prótesis tome decisiones acertadas.

Trabajos futuros buscan evaluar el método propuesto en prototipos de laboratorio de prótesis de mano robóticas físicas.

REFERENCIAS

- [Bas Cerda, 2014] Bas Cerda, M. del C. (2014). *Estrategias metodológicas para la construcción de indicadores compuestos en la gestión universitaria* [Tesis de doctorado]. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/35330> ↑Ver página 86
- [Becker *et al.*, 2017] Becker, W., Saisana, M., Paruolo, P. y Vandecasteele, I. (2017). Weights and importance in composite indicators: Closing the gap. *Ecological Indicators*, 80, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.056> ↑Ver página 87
- [Boughdiri *et al.*, 2012] Boughdiri, R., Nasser, H., Bezine, H., M'Sirdi, N. K., Alimi, A. M. y Naamane, A. (2012). Dynamic modeling and control of a multi-fingered robot hand for grasping task. *Proce-*

dia Engineering, 41, 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.264> ↑Ver página 82

[Castrillón Hernández *et al.*, 2015] Castrillón Hernández, F. y Castellanos-Cárdenas, D. (2015). New tuning rules for PID controllers based on IMC with minimum IAE for inverse response processes. *Dyna*, 82(194), 111-118. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n194.46744> ↑Ver página 85

[Chen y Seborg, 2002] Chen, D. y Seborg, D. E. (2002). PI/PID controller design based on direct synthesis and disturbance rejection. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41(19), 4807-4822. <https://doi.org/10.1021/ie010756m> ↑Ver página 85

[AENOR, 2003] Asociación Española de de Normalización y Certificación (AENOR). (2003). Sistemas de gestión de la calidad-Guía para la implantación de sistemas de indicadores. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi02dn54Ib2AhUSkFwKHSUaCY8QFnoECAQQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.aceroscampollano.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2014%2F06%2FUNE-66175-2003-Guia-para-la-Implantacion-de-Sistemas-de-Indicadores.pdf&usq=AOvVaw1e2v9sV89FDyGeL94UeXxL> ↑Ver página 86

[Deng *et al.*, 2018] Deng, H., Luo, H., Wang, R. y Zhang, Y. (2018). Grasping force planning and control for tendon-driven anthropomorphic prosthetic hands. *Journal of Bionic Engineering*, 15(5), 795-804. <https://doi.org/10.1007/s42235-018-0067-z> ↑Ver página 85

[Deng *et al.*, 2016] Deng, H., Zhong, G., Li, X. y Nie, W. (2016). Slippage and deformation preventive control of bionic prosthetic hands. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(2), 888-897. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2639553> ↑Ver página 85

[Falco *et al.*, 2018] Falco, J., Van Wyk, K. y Messina, E. (2018). *Performance metrics and test methods for robotic hands* (Draft). NIST Special Publication. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1227-draft> ↑Ver página 83, 84, 88, 89

[Fan *et al.*, 2018] Fan, S., Gu, H., Zhang, Y. y Jin, M. (2018). Research on adaptive grasping with object pose uncertainty by multi-fingered robot hand. *International Journal of Advanced Systems*, (abril), 1-16. <https://doi.org/10.1177/1729881418766783> ↑Ver página 85

[Feix *et al.*, 2016] Feix, T., Romero, J., Schmiedmayer, H. B., Dollar, A. M. y Kragic, D. (2016). The GRASP taxonomy of human grasp types. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 46(1), 66-77. <https://doi.org/10.1109/THMS.2015.2470657> ↑Ver página 89

[Fossen, 2011] Fossen, T. I. (2011). *Advanced motion control systems. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119994138.ch13> ↑Ver página 85

- [Goins *et al.*, 2014] Goins, A. K., Carpenter, R., Wong, W. y Balasubramanian, R. (2014). Evaluating the efficacy of grasp metrics for utilization in a gaussian process-based grasp predictor. En *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, (Iros) (pp. 3353-3360). <https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6943029> ↑Ver página 83
- [Hroncová *et al.*, 2014] Hroncová, D., Frankovský, P., Virgala, I. y Delyová, I. (2014). Kinematic analysis of the press mechanism using *MSC Adams*. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(7), 312-315. <https://doi.org/10.12691/ajme-2-7-30> ↑Ver página 89
- [Kent y Engeberg, 2016] Kent, B. A. y Engeberg, E. D. (2016). Robotic hand acceleration feedback to synergistically prevent grasped object slip. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(2), 1-8. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2633574> ↑Ver página 85
- [León *et al.*, 2014] León, B., Rubert, C., Sancho-Bru, J. y Morales, A. (2014). Characterization of grasp quality measures for evaluating robotic hands prehension. En *IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)* (pp. 3688-3693). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907393> ↑Ver página 82, 84, 88
- [Napier, 1956] Napier, J. R. (1956). The prehensile movements of the human hand. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 38, 902-913. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907393> ↑Ver página 82
- [Nardo *et al.*, 2008] Nardo, M., Saisama, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffman, A. y Giovannini, E. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. OECD. ↑Ver página 86
- [Norton y McCarthy, 2003] Norton, R. L. y McCarthy, J. M. (2003). Design of machinery: An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines. *Journal of Mechanical Design*, 125(3), 650. <https://doi.org/10.1115/1.1605770> ↑Ver página 85
- [Puerto *et al.*, 2011] Puerto, J., Rincon, L. y Jacinto, E. (2011). Internal model robust control applied to a motorized pendulum as virtual. *Visión Electrónica*, (1), 77-88. <https://doi.org/10.14483/22484728.3520> ↑Ver página 85
- [Rubert y Morales, 2016] Rubert, C. y Morales, A. (2016). Comparison between grasp quality metrics and the anthropomorphism index for the evaluation of artificial hands. En *IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 6 th (pp. 1352-1357). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907393> ↑Ver página 82
- [Rubert *et al.*, 2014] Rubert, C., León, B. y Morales, A. (2014). Grasp quality metrics for robot hands benchmarking. *IEEE RAS International Conference on Humanoid Robots* (pp. 761-766). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907393> ↑Ver página 83, 84, 88, 89

- [Rubert, León, *et al.*, 2017] Rubert, C., León, B., Morales, A. y Sancho-Bru, J. (2017). Characterisation of grasp quality metrics. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 89(3-4), 319-342. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907393> ↑Ver página 82, 84, 88
- [Rubert, Kappler *et al.*, 2017] Rubert, C., Kappler, D., Morales, A., Schaal, S. y Bohg, J. (2017). On the relevance of grasp metrics for predicting grasp success. En *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 265-272). <https://doi.org/10.1109/ICRA.2014.6907393> ↑Ver página 83, 89
- [Sáez Castillo, 2016] Sáez Castillo, A. J. (2016). *Métodos estadísticos con R y R Commander*. Universidad de Jaén, Departamento de Estadística e Investigación Operativa. ↑Ver página 87

