



UNIVERSIDAD DEL CAUCA

Evaluación de la incidencia de las estrategias de control para prótesis de mano robóticas, en el desempeño de agarres de poder

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de magister en automática

Pablo Alejandro Perdomo Fernández

Director: *Phd. Carlos Alberto Gaviria López.*

Maestría en automática
Facultad de ingeniería en electrónica y telecomunicaciones
Departamento de electrónica, instrumentación y control
Cauca, 2021



Universidad del Cauca

Contenido

Introducción.....	9
Capítulo I.....	10
1.1 Modelo mano robótica – Caso de estudio.....	11
1.2 Entorno virtual.....	13
1.3 Modelo mano robótica en entorno virtual.....	15
1.4 Identificación del modelo de mano virtual.....	17
1.5 Selección de técnicas de control.....	25
1.6 Pruebas de control en mano virtual.....	38
1.6.1 Técnicas de control con modelo de mano.....	39
Capitulo II.....	60
2.1 Identificación de características de desempeño.....	60
2.1.1 Resistencia al deslizamiento.....	60
2.1.2 Tiempo de ciclo de agarre.....	63
2.1.3 Eficiencia de agarre.....	65
2.1.4 Seguimiento de la fuerza.....	68
Capitulo III.....	71
3.1 Análisis de datos.....	71
3.1.1 Resistencia al deslizamiento.....	71
3.1.2 Tiempo de ciclo de agarre.....	72
3.1.3 Eficiencia del agarre.....	73
3.1.4 Seguimiento de fuerza.....	73
3.2 Propuesta de un indicador de desempeño.....	74
3.2.1 Desarrollo de un marco conceptual teórico.....	76
3.2.2 Selección de un conjunto de indicadores simples.....	76
3.2.3 Tratamiento de datos.....	77
3.2.4 Análisis multivariante.....	78
3.2.5 Normalización de los datos.....	84
3.2.6 Ponderación y agregación de indicadores simples.....	85
3.2.7 Análisis de sensibilidad del IC.....	87
3.2.8 Identificación de los indicadores simples con el IC.....	88
3.2.9 Visualización de los indicadores simples con el IC.....	88
3.3 Resultados.....	89

3.3.1 Comparación de estrategias frente a métricas individuales	89
3.3.2 Indicador compuesto	94
Conclusiones.....	100
Bibliografía.....	101
Anexos.....	106
A. Métricas de desempeño	106
A.1 Resistencia al deslizamiento.....	106
A.2 Tiempo de ciclo de agarre	106
A.3 Eficiencia del agarre.....	106
A.4 Seguimiento de la fuerza del dedo	107
B. Tratamiento de datos	108
C. Análisis multivariante.....	109
D.1 Matriz de correlación.....	109
D.2 Extracción de componentes principales	111

Lista de figuras

Figura 1 Mano 3D.....	11
Figura 2 Barras por dedo.....	11
Figura 3 Mecanismo doble de cuatro barras cruzadas	12
Figura 4 Mecanismo 4 barras cadena interna.....	12
Figura 5 Mecanismo 4 barras cadena externa	12
Figura 6 Componentes del mecanismo	13
Figura 7 Mano en Solidworks y MSC Adams	15
Figura 8 Esquema Simulink y MSC Adams	15
Figura 9 Componentes de la mano.....	16
Figura 10 Esquema entrada salida.....	17
Figura 11 Fuerza aplicada	18
Figura 12 Esquema de conexión para identificación de dedo	19
Figura 13 Posición del deslizador del dedo anular.....	19
Figura 14 Toolbox Ident de Matlab.....	20
Figura 15 Modelos en espacio de estados del dedo anular.....	20
Figura 16 Modelo en espacio de estados del dedo anular	21
Figura 17 Modelos en función de transferencia del dedo anular.....	21
Figura 18 Modelo en función de transferencia $tf1$	22
Figura 19 Esquema para identificación del modelo de la mano.....	23
Figura 20 Fuerza aplicada al deslizador.....	23
Figura 21 Fuerza aplicada por la yema	24
Figura 22 Modelo en función de transferencia del dedo anular	24
Figura 23 Tipos de implementaciones	38
Figura 24 Esquema de control PID difuso	39
Figura 25 Base de reglas difusas	39
Figura 26	40
Figura 27 Esquema de control PI difuso en Simulink.....	41
Figura 28	41
Figura 29 Esquema difuso.....	42
Figura 30 Reglas de entrada E.....	42
Figura 31 Reglas de entrada R	42

Figura 32 Salida U	43
Figura 33 Superficie difusa	43
Figura 34 Conjunto de reglas difusas	44
Figura 35 Dedo anular	45
Figura 36 Dedo pulgar	45
Figura 37 Dedo índice	46
Figura 38 Esquema de control PI adaptativo.....	47
Figura 39	47
Figura 40 Esquema de control PI adaptativo en Simulink	48
Figura 41 Esquema de adaptación de ganancias del controlador	48
Figura 42 Fuerza lateral aplicada	49
Figura 43 Señal del filtro pasa altas	49
Figura 44	50
Figura 45	50
Figura 46 Control adaptativo dedo anular.....	51
Figura 47 Control PI adaptativo dedo pulgar	51
Figura 48 Control PI adaptativo dedo índice.....	52
Figura 49 Esquema de control en cascada.....	53
Figura 50 Esquema de control Cascada en Simulink	53
Figura 51	54
Figura 52	54
Figura 53 Control cascada dedo anular	55
Figura 54 Control cascada dedo pulgar.....	55
Figura 55 Control cascada dedo índice	56
Figura 56 Esquema.....	57
Figura 57 Esquema de control.....	58
Figura 58 Control impedancia dedo anular	58
Figura 59 Control impedancia dedo pulgar.....	59
Figura 60 Control impedancia dedo índice	59
Figura 61 Ambiente de métrica de resistencia al deslizamiento	61
Figura 62 Deslizamiento.	61
Figura 63 Ambiente virtual	62
Figura 64 Fuerza de tracción.....	62
Figura 65 Deslizamiento	63
Figura 66 Fuerza de agarre (Fuerza entre las caras del cilindro)	63

Figura 67 Esquema del ciclo de agarre	64
Figura 68 Representación de regiones de fuerza dinámica y cuasi estática durante los ciclos de agarre.	64
Figura 69 Ambiente virtual	65
Figura 70 Presencia de fuerza cuasi estática	65
Figura 71 Configuración de eficiencia de agarre, F_{grasp} y F_{pull}	66
Figura 72 Ambiente virtual	67
Figura 73 Fuerza entre caras del cilindro a) y Valor de deslizamiento b).....	67
Figura 74 Fuerza de tracción	68
Figura 75 Ambiente virtual	69
Figura 76 Seguimiento de fuerza constante	70
Figura 77 Dimensiones	82
Figura 78 Correlación entre indicadores simples	83
Figura 79 Sensibilidad.....	88
Figura 80 Valores IC	89
Figura 81 Error medio cuadrático	90
Figura 82 Sobreimpulso	91
Figura 83 Resistencia al deslizamiento	92
Figura 84 Tiempo de ciclo de agarre.....	92
Figura 85 Eficiencia	93
Figura 86 Valores de desempeño IC1	94
Figura 87 Sobreimpulso y error	96
Figura 88 Resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre y eficiencia	97
Figura 89 Desempeño del enfoque de control IC.....	98
Figura 90 Configuración de prueba de seguimiento de fuerza.....	107
Figura 91	109
Figura 92	109
Figura 93	109
Figura 94	110
Figura 95	110
Figura 96	110
Figura 97	111
Figura 98	111
Figura 99	112
Figura 100	113

Figura 101	113
Figura 102	114
Figura 103	114
Figura 104	115
Figura 105	115
Figura 106	116
Figura 107	116
Figura 108	117
Figura 109	117
Figura 110	117
Figura 111	118
Figura 112	118
Figura 113	119
Figura 114	119
Figura 115	120
Figura 116	120
Figura 117	121
Figura 118	121
Figura 119	122
Figura 120	122
Figura 121	123
Figura 122	123
Figura 123	124
Figura 124	124
Figura 125	125
Figura 126	126
Figura 127	127

Introducción

El agarre de poder es de gran relevancia en las prótesis de mano, por ello la importancia en lograr definir la incidencia de las técnicas de control en el desempeño de este tipo de agarre. Dada la gran variedad de opciones disponibles para un diseñador, surge la necesidad de definir marcos unificados para evaluar el desempeño de un diseño de mano particular en el agarre de objetos. Recientemente el *National Institute of Standards and Technology* [32], propuso un marco unificado basado en métricas para evaluación de desempeño del agarre con prótesis de manos en el sentido del logro de la funcionalidad de agarre.

En cuanto a la evaluación de desempeño de controladores para el agarre de objetos, hasta el estado del arte realizado en este proyecto de investigación, todos los autores que proponen un determinado controlador evalúan su desempeño en cuanto al fin para el cual se diseña el controlador, tal como el seguimiento de consignas de posición, consignas de fuerza o prevención de deslizamiento, sin tener en cuenta métricas de desempeño del agarre tales como: fuerza de los dedos, fuerza del agarre, resistencia al deslizamiento, tiempo del ciclo de agarre, sensibilidad de la fuerza de contacto, eficiencia del agarre, calibración de la fuerza, manipulación en la mano y estimación de la postura 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 una característica de desempeño del agarre.

La pregunta de investigación a resolver en este trabajo de investigación se planteó como: ¿De qué manera la selección de una estrategia específica para el control de agarre de poder tiene incidencia en el desempeño del agarre?

En el presente proyecto de investigación se propone un método para calcular un indicador compuesto que permita evaluar el desempeño de los controladores en el agarre de poder con manos robóticas, con base a métricas de desempeño.

En primera instancia se selecciona un grupo de técnicas de control, y se llevan a cabo diferentes sintonizaciones basadas en el modelo de la mano. En la búsqueda de métricas que permitan medir el desempeño de los controladores en el agarre de poder, se encontró un estándar que incluye 5 métricas adecuadas para este fin; las cuales se implementaron, realizando pruebas con los controladores. Teniendo en cuenta los datos obtenidos con las métricas de desempeño, se definieron estas como indicadores simples que formaran parte de un indicador compuesto, el cual permita evaluar los controladores en el agarre de poder.

Adoptando una metodología para la construcción de indicadores compuestos, se llega metodológicamente a la propuesta de un indicador compuesto para medir el desempeño del agarre de poder con una prótesis de mano robótica. Los resultados obtenidos demuestran que si hay una incidencia del enfoque de control seleccionado en el desempeño del agarre de poder, y que el método utilizado para la construcción del indicador compuesto arroja un indicador cuantitativo para calificar a la técnica de control utilizada que está en relación con las bondades que enfatiza cada enfoque de control.

Capítulo I

Técnicas de control

Resumen: *En el presente capítulo se dan a conocer algunas técnicas de control utilizadas en el control de fuerza y posición en manos robóticas que permiten realizar agarres de poder, de las cuales se seleccionan aquellas técnicas factibles de implementación, para la posterior ejecución de pruebas de control de agarre de poder. Se debe aclarar que los objetivos de este trabajo de investigación no están dirigidos hacia el diseño de controladores, así que no se pretende hacer un aporte en cuanto a técnicas de control o presentar una justificación teórica rigurosa de las leyes de control utilizadas. Se seleccionaron varias estrategias de control reportadas en la literatura, solo con el propósito de investigar acerca de la incidencia de la selección de técnicas de control en el desempeño de agarre de poder de una prótesis robótica.*

La mano juega un papel primordial en la vida cotidiana de los humanos, debido a su funcionalidad, destreza y capacidades de comunicación social. En consecuencia, la pérdida de la mano tiene enormes repercusiones tanto a nivel anatómico como psicológico, y causa un gran interés en el campo de las prótesis de extremidades superiores [1].

El diseño y control de prótesis de mano versátiles es una tarea compleja. Si bien se han logrado muchos avances en las últimas décadas, la diferencia en el rendimiento y la calidad entre las manos humanas y las manos artificiales es bastante sustancial [2]. Se han desarrollado muchas manos robóticas representativas, las cuales difieren entre sí en apariencia, grados de libertad, técnicas de control empleadas, mecanismos de realimentación propioceptiva, entre otros aspectos [3].

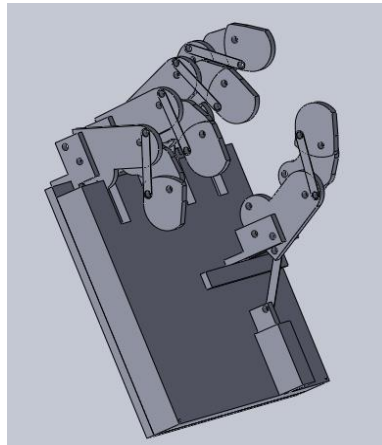
Los movimientos de la mano se dividen en dos grupos: movimientos prensiles y no prensiles [4]. Las capacidades prensiles se pueden clasificar mediante taxonomías de agarre [5]. Una taxonomía conocida es la propuesta por Napier, la cual muestra dos patrones de la actividad prensil de la mano, el agarre de poder y el de precisión. El sostener un objeto en la cavidad formada por los dedos parcialmente flexionados y la palma de la mano, aplicando una contrapresión con el pulgar en el plano de la mano, se conoce como agarre de poder; y cuando el objeto queda atrapado entre los flexores de los dedos y el pulgar opuesto, se denomina agarre de precisión [4].

En la literatura se encuentran variadas técnicas de control que permiten realizar agarres de poder, entre ellas: PID, control por impedancia, LQR, lógica difusa, modo deslizante, *adaptive backstepping* y el control predictivo. A continuación, se brinda una descripción de la mano prototipo utilizada para las pruebas de control.

1.1 Modelo mano robótica – Caso de estudio

En el presente proyecto de investigación se construye un modelo de una mano virtual, a través de la cual lograr implementar algunas técnicas de control de fuerza. El prototipo virtual es basado en un mecanismo de seis barras Stephenson I, tal como se muestra en [6]. El diseño de la mano se realiza a través del software CAD Solidworks; en la Figura 1 se ilustra el diseño básico, donde se observa la palma de la mano y cinco dedos.

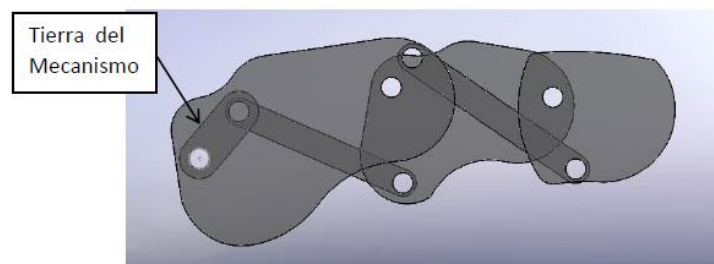
Figura 1 Mano 3D



Fuente autor.

El diseño de los dedos se basa en un mecanismo doble de 4 barras cruzadas propuesto en [7], como se ilustra en la Figura 2; el cuál es el trabajo base para el desarrollo del prototipo completo de la mano. El prototipo no constituye un aporte al diseño de manos robóticas, sin embargo, se implementa con la finalidad de presentar un ambiente de simulación adecuado, para llevar a cabo las pruebas de técnicas de control de fuerza.

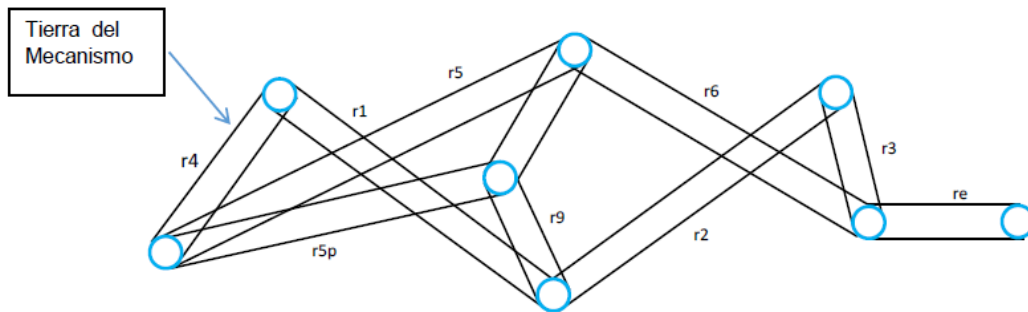
Figura 2 Barras por dedo



Fuente [7].

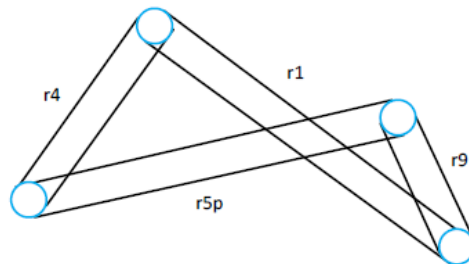
El mecanismo de doble lazo implementado posee cuatro ramas para su análisis cinemático, dos respecto a las cuatro barras estándar, y dos respecto a las demás ramas resultantes del lazo, como se ilustra en la Figura 3; el cual se compone por una cadena interna ilustrada en la Figura 4 y una cadena externa ilustrada en la Figura 5. Los eslabones se denotan con la letra r seguida por un número o letra, tal como r1, r2, r3, r4, r5 y re.

Figura 3 Mecanismo doble de cuatro barras cruzadas



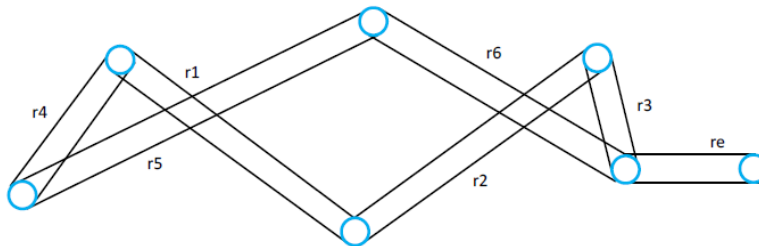
Fuente [7].

Figura 4 Mecanismo 4 barras cadena interna



Fuente [7].

Figura 5 Mecanismo 4 barras cadena externa

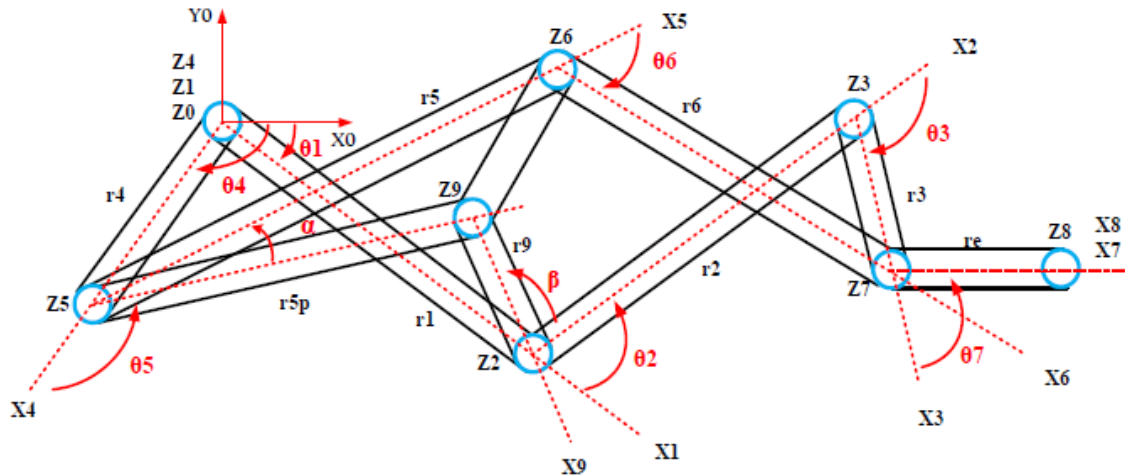


Fuente [7].

En [7] se implementa el formalismo de Denavit Hatenberg en el análisis cinemático de posición, para la construcción de modelo geométrico del dedo de la mano, el cual relaciona los parámetros geométricos entre eslabones por medio de matrices de transformación.

El toolbox de Matlab desarrollado por Peter Corke utilizado en [7], proporciona funciones básicas para el estudio y simulación de sistemas robóticos seriales. El toolbox permite desarrollar el modelo geométrico directo para encontrar las ecuaciones de restricción a partir de los parámetros geométricos del dedo sub-actuado, donde la única articulación actuada es θ_1 , las demás son pasivas $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ y θ_6 , las distancias de los eslabones serán constantes ($r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_9, re$), al igual de los parámetros θ_4, α y β . En la Figura 6 se ilustra lo anteriormente descrito.

Figura 6 Componentes del mecanismo



Fuente [7].

1.2 Entorno virtual

El diseño del prototipo anteriormente descrito se llevó a cabo con una herramienta de diseño CAD; para ello se realizó una breve búsqueda de algunas herramientas, tales como:

- SolidWorks: Este convierte una geométrica de boceto en geometría 3D; algunas de sus funcionalidades le permiten agregar y eliminar material de varias maneras diferentes, incluido el uso de Extrudes, Resolves, Filletsy y Chamfers. Además, permite el ensamblaje de animación [8].
- Catia: Ofrece herramientas de modelado 3D/sólido (herramientas de edición paramétricas, de forma libre, proceso de edición simétrica, etc.), herramientas de renderizado, herramientas básicas de dibujo e importación y exportación de archivos [8].
- FreeCad: Presenta un entorno de trabajo similar a Catia y SolidWorks. Utiliza técnicas de modelado paramétrico (utiliza parámetros para definir sus límites o acciones) y está provisto de una arquitectura de software modular [8].

Teniendo en cuenta la breve descripción anterior, la experiencia en cuanto a manejo y la amplia funcionalidad en diseño mecánico, se opta por la herramienta CAD SolidWorks.

En la búsqueda de software a implementar en la simulación dinámica, se encontraron algunas alternativas, como:

- MSC ADAMS ®: Es un software de simulación dinámica multicuerpo equipado con los solucionadores numéricos Fortran y C++. Permite la creación e importación de geometría de sólidos 3D, refinamiento del modelo con flexibilidad de piezas, sistemas

de control automático fricción y deslizamiento de las juntas. Cuenta con un módulo que permite el modelado y simulación del sistema de control en lazo cerrado, está disponible a través de Adams/Controls [8].

- Ansys: Las competencias o capacidades de este programa están enfocadas a las soluciones estructurales en cuanto a: estática, dinámica, propiedades no lineales del material, vibración, modal y análisis armónico, fatiga, térmico; contacto no lineal avanzado y otras capacidades de análisis para sistemas mecánicos y de materiales [8].
- Vrep: Es un simulador de robots, con entorno de desarrollo integrado, se basa en una arquitectura de control distribuido: cada objeto/modelo puede controlarse individualmente a través de un script embebido, un complemento, un nodo ROS o BlueZero, un cliente API remoto o una solución personalizada. Permite cálculos de cinemática inversa y directa para cualquier tipo de mecanismo [8].

Dada la consecuente implementación en MSC ADAMS ® de pruebas de técnicas de control en prótesis virtuales en la Maestría en Automática y en Ingeniería en Automática Industrial de la Universidad del Cauca, se opta por implementar esta herramienta en la simulación dinámica del prototipo virtual.

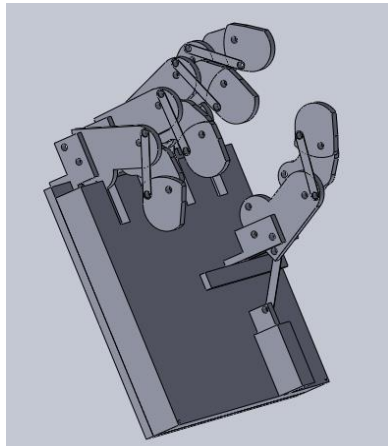
Con base a la anterior selección de herramientas software, el prototipo virtual se construyó mediante los paquetes de software MSC ADAMS ® y MatLab ®, los cuales son paquetes comerciales ampliamente utilizados por los científicos alrededor del mundo. MSC ADAMS está diseñado para análisis dinámico automático de sistemas multicuerpo (Automatic Dynamic Analysis of Multibody Systems) y provee un gran conjunto de herramientas para construir ambientes virtuales compuestos de objetos 3D, siendo compatible con software especializado de diseño asistido por computador (CAD) tal como SolidWorks. El motor de física de MSC ADAMS permite al usuario establecer propiedades tales 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, permitiendo 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 [9]. La herramienta MSC ADAMS controls permite exportar el modelo dinámico calculado a MatLab. La propiedad de co-simulación implementada en MSC ADAMS permite el intercambio de información entre los dos simuladores en tiempo de simulación, de modo que el usuario pueda sacar ventaja de las capacidades sobresalientes de MatLab para análisis y diseño de controladores para controlar el sistema robótico. Algunos trabajos reportados que utilizan MSC ADAMS y Matlab en co-simulación son [10], [11], y [12], demostrando el potencial de simulación para sistemas dinámicos mecánicos.

De esta manera en el entorno de diseño y simulación se utilizan tres herramientas software comerciales: *SolidWorks* para el diseño CAD, *MSC Adams* para la construcción de un modelo dinámico, y *Matlab* para el diseño de técnicas de control.

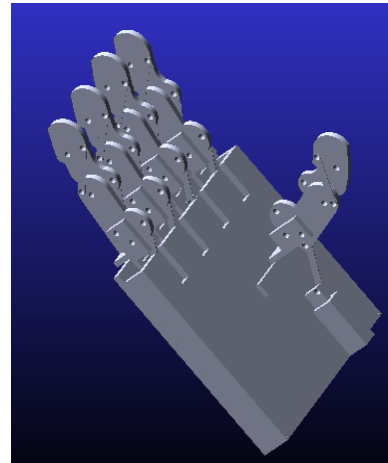
En la Figura 7 a) se observa el diseño en *Solidworks*, el cual incluye los componentes mecánicos de la mano tales como falanges y eslabones. Posteriormente el diseño es exportado

al ambiente de *MSC Adams*, donde le es asignado el tipo de movimiento (lineal o circular), variables de entrada, variables de salida, rigidez y fricción.

Figura 7 Mano en Solidworks y MSC Adams



a) Solidworks

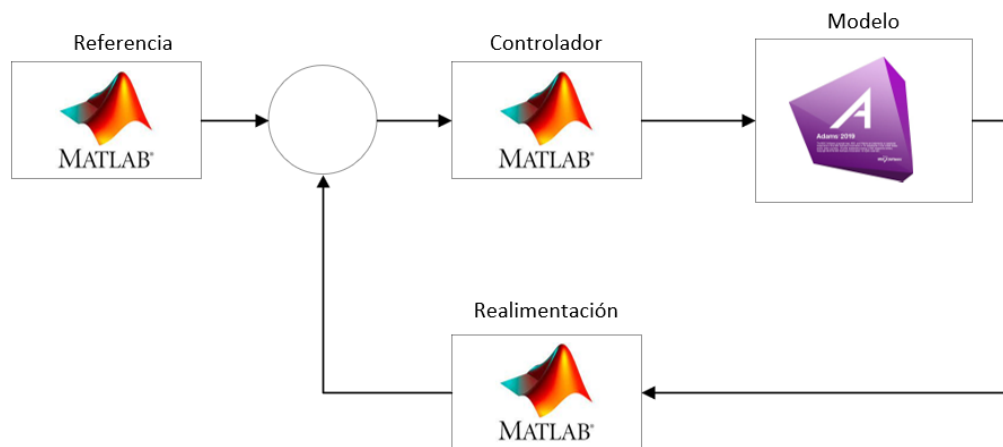


b) MSC Adams

Fuente autor.

Al tener asignados los tipos de movimiento, variables de entrada, variables de salida y fricción, es exportado el modelo dinámico de la mano en una *sfunction* (*Simulink*), el cual permite la interacción entre *Matlab* y *MSC Adams*, bajo el esquema mostrado en la Figura 8.

Figura 8 Esquema Simulink y MSC Adams

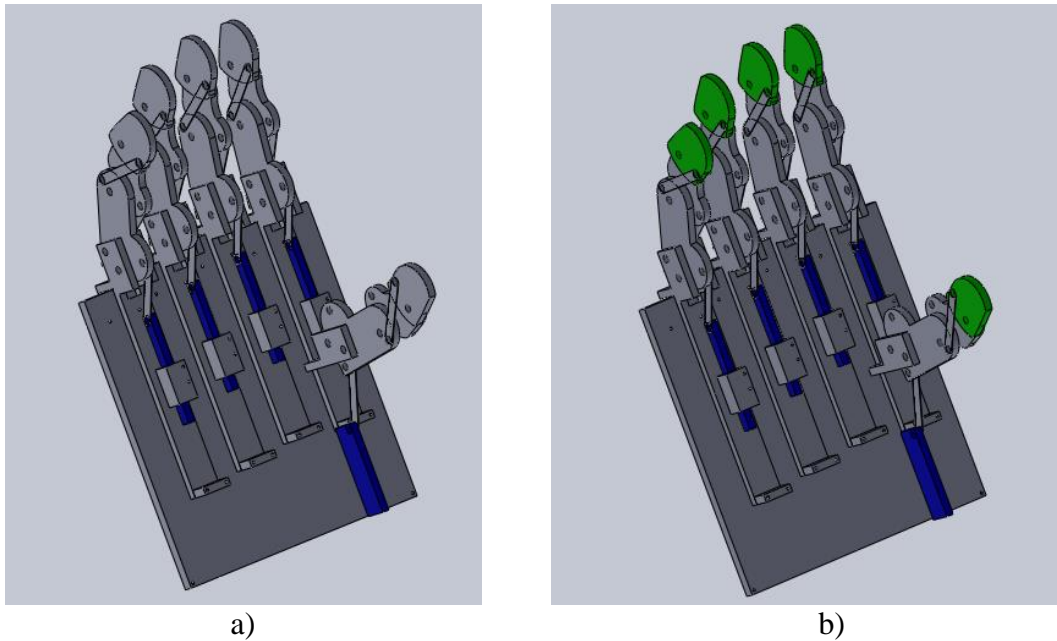


Fuente autor.

1.3 Modelo mano robótica en entorno virtual

La mano virtual prototipo permite el control de fuerza y posición, en ambos casos se tiene como variable manipulada la fuerza aplicada a un deslizador, tal como se muestra en la Figura 9; en azul resaltan los eslabones lineales, en cuyas bases se aplica una fuerza.

Figura 9 Componentes de la mano

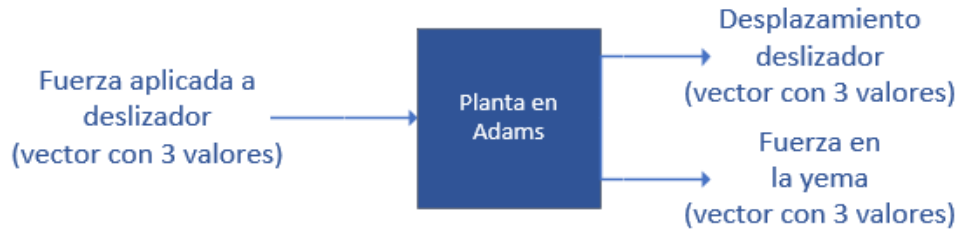


Fuente autor.

Como variables controladas se tiene la fuerza en las yemas y la posición del deslizador. Las yemas de las falanges se ilustran en verde en la Figura 9; cuya fuerza se regula con base a la fuerza aplicada al deslizador. La posición del deslizador en cada falange se controla mediante la fuerza aplicada a la base de este.

El deslizador permite el movimiento de los dedos de la mano, mediante la fuerza aplicada en su base. En la Figura 10 se ilustran las variables de entrada y salida del dedo en *MSC ADAMS*, donde se tiene un vector con tres componentes en la entrada y en cada salida, siendo un componente por cada dedo (anular, índice y pulgar); puesto que en el presente proyecto de investigación se consideró solo tres dedos de la mano, debido al alto coste computacional. En una aplicación en un entorno real, el deslizador se reemplazaría por un motor lineal y la fuerza aplicada por una señal de voltaje aplicado al motor.

Figura 10 Esquema entrada salida



Fuente autor.

1.4 Identificación del modelo de mano virtual

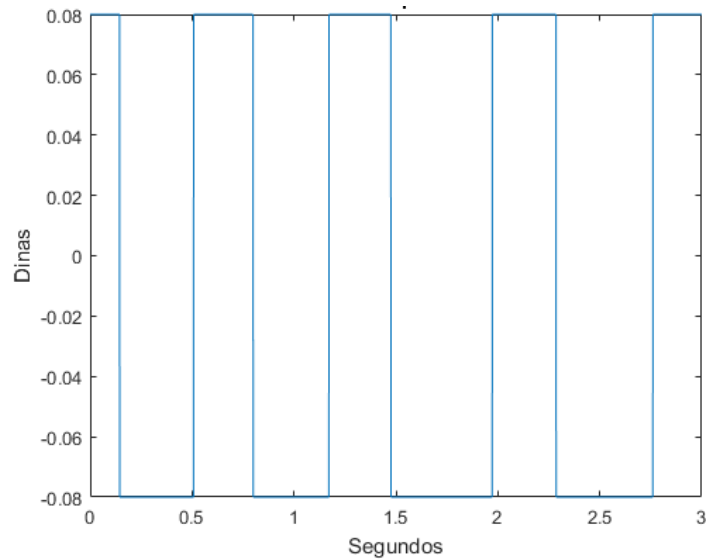
Al tener el prototipo de mano virtual, se describe el proceso de identificación del modelo dinámico de los dedos, obteniendo representaciones lineales en espacio de estado y en función de transferencia. Se obtienen dos tipos de modelos: el primero que relaciona el desplazamiento del deslizador como función de la fuerza aplicada al deslizador (por cada dedo); y el segundo que relaciona la fuerza en la yema como función de la fuerza aplicada al deslizador (por cada dedo).

- a) Modelamiento dinámico para estimar posición del deslizador como función de la fuerza aplicada en la base del mismo, para cada dedo.

La identificación de modelos dinámicos se realizó usando el mismo procedimiento que se pasa a explicar para cada dedo de la mano virtual. Nuevamente, se aclara que en esta investigación no se buscó un aporte en este tema, razón por la cual se utilizaron procedimientos muy conocidos, basados en herramientas disponibles para tal fin en Simulink/MatLab.

Utilizando una excitación binaria para la fuerza aplicada en la base del deslizador, como se muestra en la Figura 11, se lleva a la posición del actuador a variar alrededor de una posición central, con lo que logra un movimiento oscilatorio de la posición de la yema del dedo. Aunque se probó con señales binarias pseudoaleatorias, la dificultad principal en este tipo de excitación es que la dinámica aleatoria de fuerza aplicada al eslabón móvil de la estructura, lleva a comportamientos bruscos en el movimiento mecánico de los dedos, que favorecen fenómenos no deseables como fuerzas de reacción en el bloqueo de los mecanismos, lo que cual no permite una correcta identificación de la dinámica buscada.

Figura 11 Fuerza aplicada

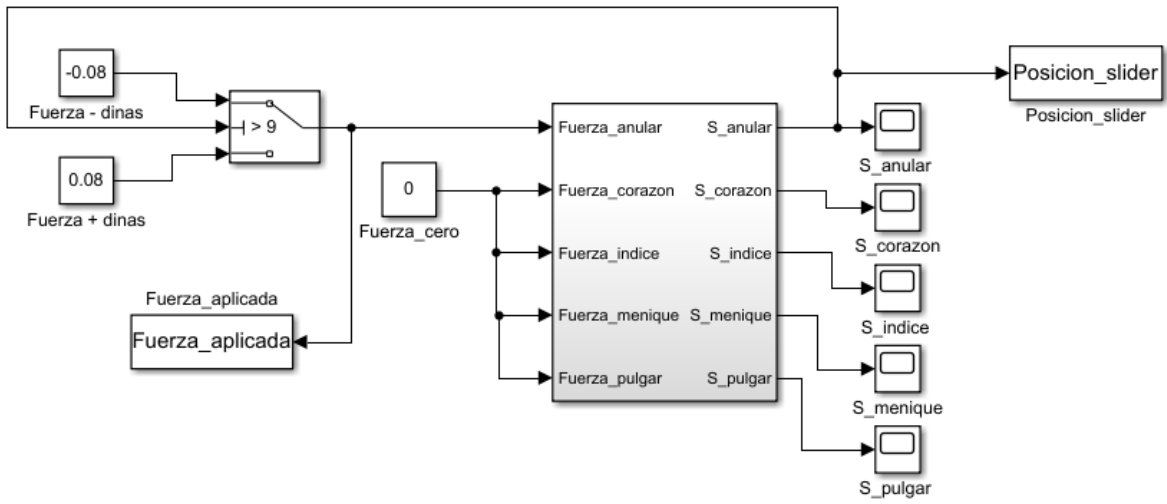


Fuente autor.

En su lugar, para obtener las señales en el proceso de identificación, se tiene el esquema mostrado en la Figura 12. El interruptor *Switch* permite conmutar entre -0.008 dinas y $+0.008$ dinas de fuerza de salida, cuando las posiciones del actuador lineal se acercan a los finales de carrera, evitando el fenómeno antes descrito; con lo cual se obtiene una oscilación en la posición del deslizador del dedo, entre 1.8 y 17 milímetros para el dedo anular, como se ilustra en la Figura 13.

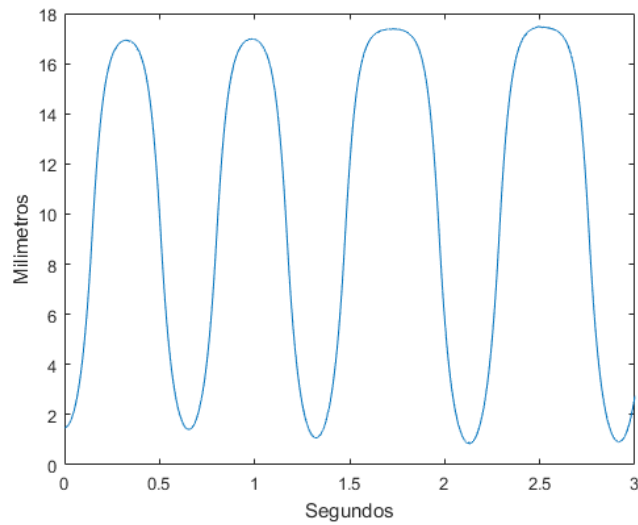
Utilizando el *Toolbox* de identificación de *Matlab*, como se ilustra en la Figura 14, se obtienen aproximaciones lineales de tiempo continuo en la representación en espacio de estado de la forma estándar $\dot{x} = Ax + Bu$, $y = Cx + Du$ para distintos órdenes del vector de estado, como se ilustra en la Figura 15, seleccionando para cada dedo, el modelo con mejor ajuste a los datos del experimento.

Figura 12 Esquema de conexión para identificación de dedo



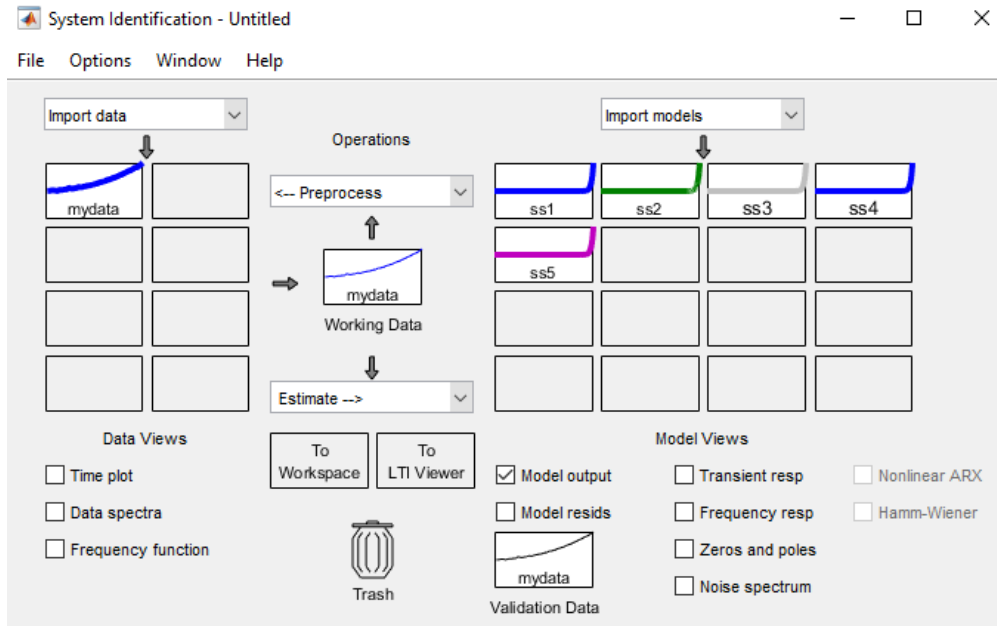
Fuente autor.

Figura 13 Posición del deslizador del dedo anular



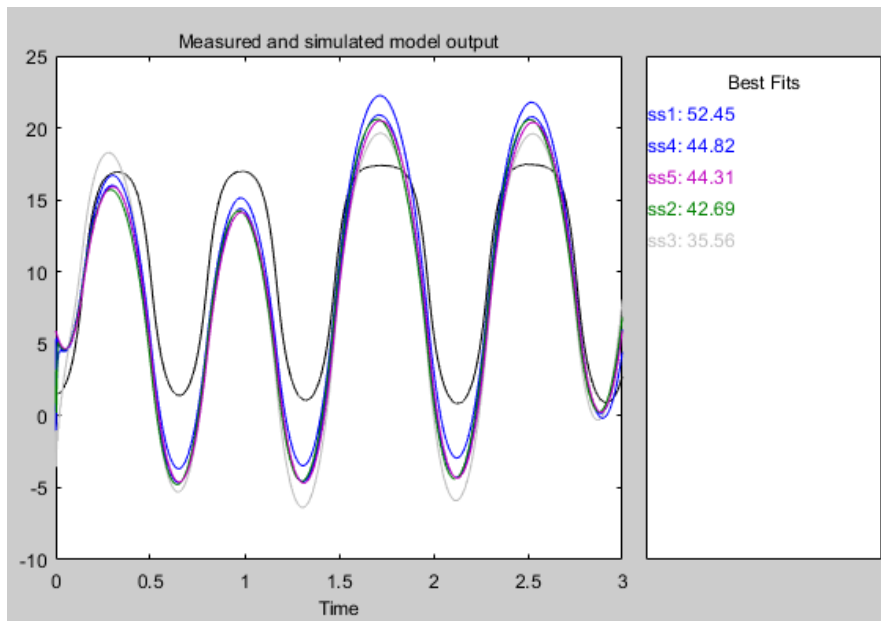
Fuente autor.

Figura 14 Toolbox Ident de Matlab



Fuente autor.

Figura 15 Modelos en espacio de estados del dedo anular



Fuente autor

El valor del modelo *ss1* se muestra en la Figura 16, cuyo modelo es de orden 4.

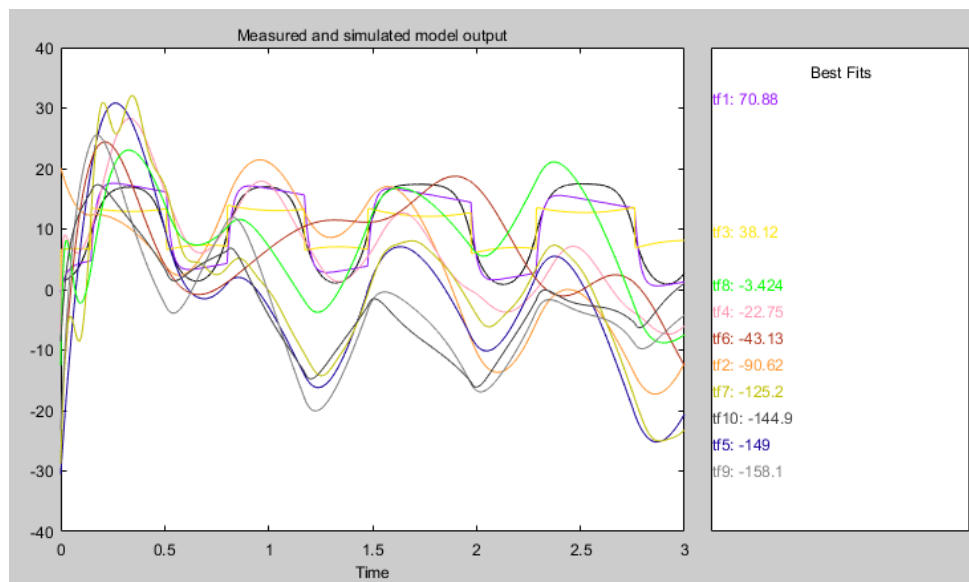
Figura 16 Modelo en espacio de estados del dedo anular

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0.1236 & -5.997 & 0.9602 & 0.8933; \\ -3.478 & -0.05434 & 52.81 & 32.84; \\ -1.78 & -2.264 & -774.9 & -2967; \\ -2.567 & -0.5758 & -245.7 & -1431 \end{bmatrix}; \\ B &= [-0.003491; -3.966; -15.37; -9.648]; \\ C &= [519.1 \quad 0.4624 \quad -0.5711 \quad -0.6875]; \\ D &= [0]; \end{aligned}$$

Fuente autor.

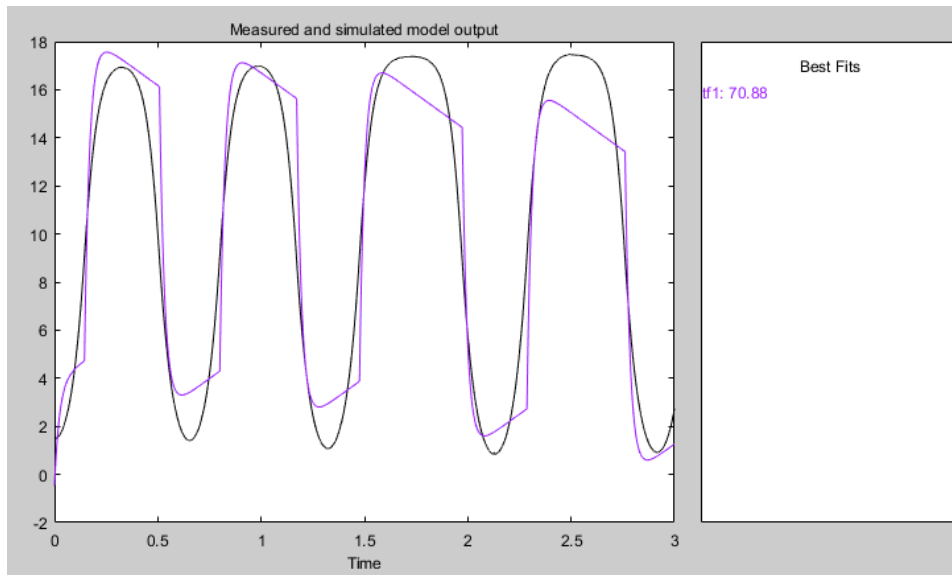
Además, se identificaron modelos de función de transferencia, que se utilizarán en enfoques que usan este tipo de representación. Sin embargo, en lugar de obtener un modelo de función de transferencia por conversión desde el modelo de espacio de estado previamente calculado, se identifican modelos directamente desde el *toolbox* de identificación en *Simulink*, ya que se tiene la ventaja de poder variar la estructura de polos y ceros, buscando un mejor ajuste de los datos. En la Figura 17, se ejemplifica el proceso de prueba con varias estructuras de polos y ceros para el caso del dedo anular.

Figura 17 Modelos en función de transferencia del dedo anular



Fuente autor.

Figura 18 Modelo en función de transferencia $tf1$



Fuente autor.

El modelo del dedo anular en función de transferencia, con el mejor ajuste resulta tf_{p1} cómo se ilustra en la Figura 18; de primer orden en el numerador y de segundo orden en el denominador, como se muestra a continuación.

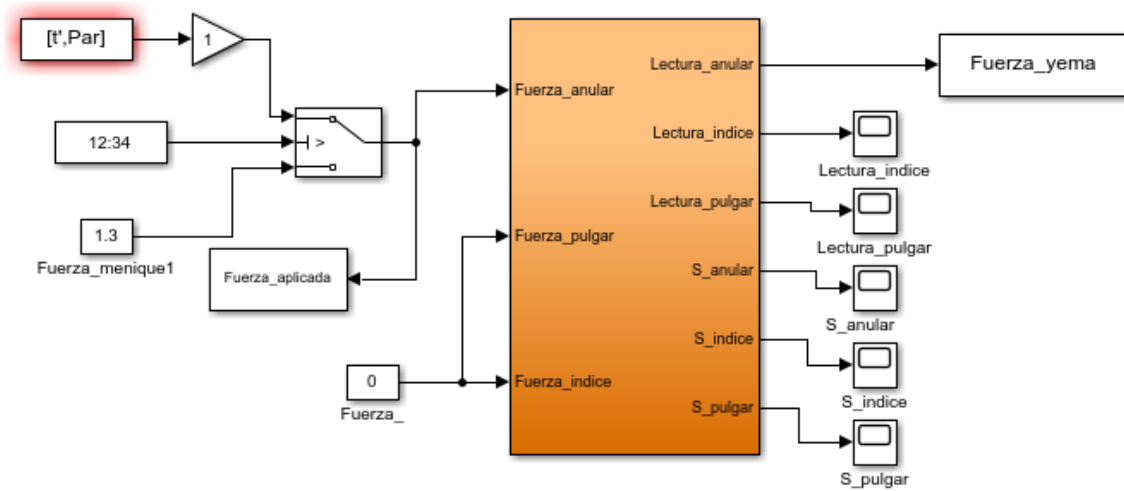
$$tf_{p1} = \frac{-3486s + 3243}{s^2 + 41.73s + 1.876e - 07}$$

- b) Modelamiento dinámico para estimar la fuerza ejercida en un punto de la yema del dedo como función de la fuerza aplicada al deslizador, para cada dedo.

El procedimiento para identificar un modelo dinámico que relacione la fuerza aplicada al deslizador con la fuerza ejercida en un punto sobre la yema en contacto con un objeto, por cada dedo, es similar al descrito para la posición. Sin embargo, ya que la posición de los dedos se bloquea en contacto con el objeto, en esta prueba si se pudieron usar señales pseudoaleatorias binarias mediante el esquema mostrado en la Figura 19.

Es de aclarar que, debido al alto coste computacional, se realizara el proceso de identificación y control de mano prototipo virtual, teniendo en cuenta los dedos anular, índice y pulgar; no se tendrán en cuenta los dedos corazón y meñique.

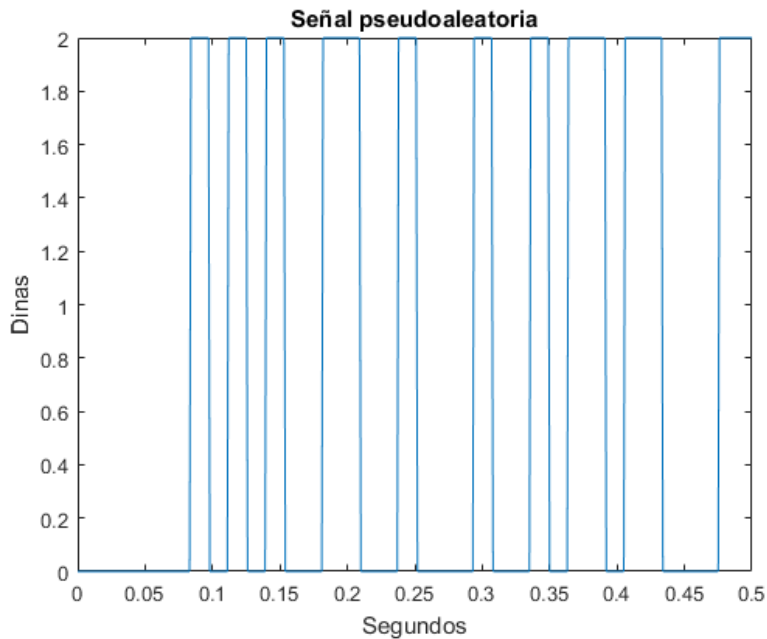
Figura 19 Esquema para identificación del modelo de la mano



Fuente autor.

La señal de fuerza aplicada en el proceso de identificación varía entre el límite inferior de 0 dinas, y el límite superior de 2 dinas, como se observa en la Figura 20.

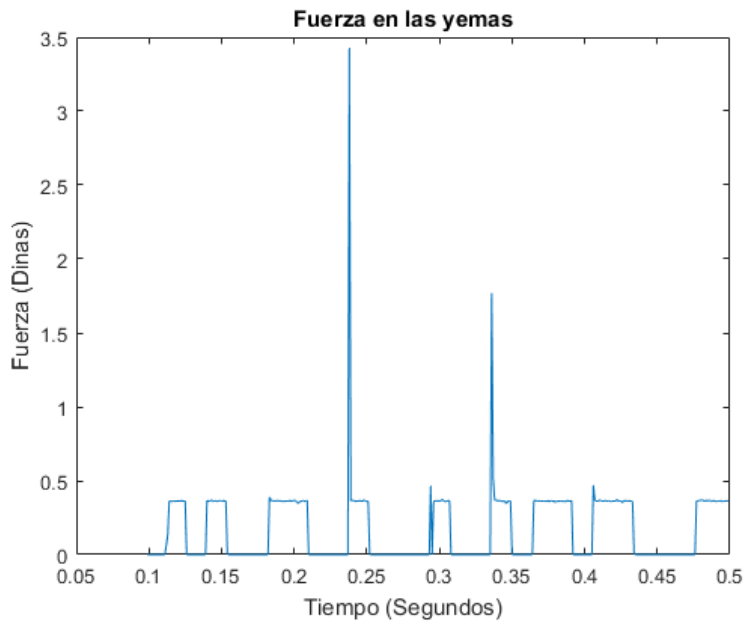
Figura 20 Fuerza aplicada al deslizador



Fuente autor.

Como señal de salida, se obtiene la variación de la fuerza registrada en la yema, ilustrada en la Figura 21.

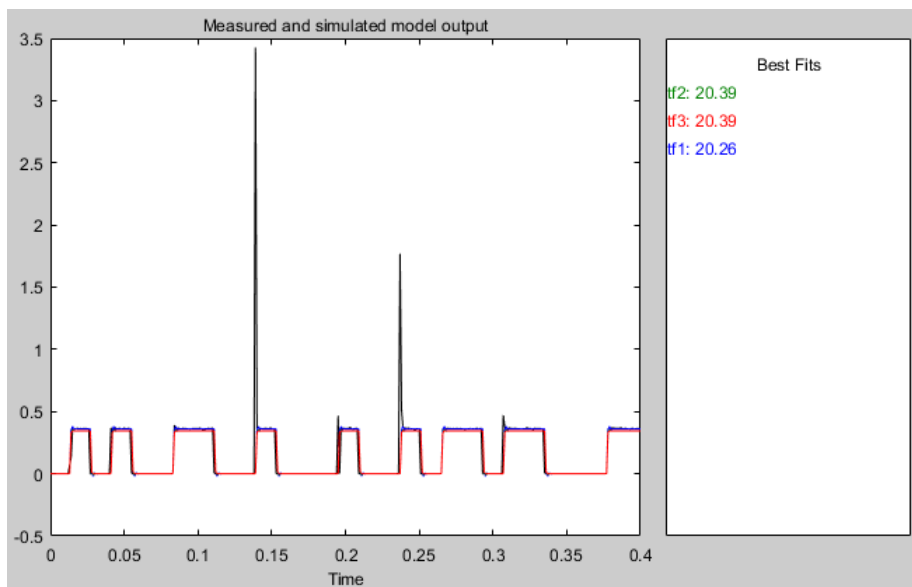
Figura 21 Fuerza aplicada por la yema



Fuente autor.

Utilizando el *toolbox* de identificación de *Matlab* se obtienen tres modelos para distintas estructuras de polos y ceros, cuyo desempeño resultó ser similar: tf_1 con dos polos y un cero, tf_2 con dos polos, y tf_3 con un polo. En la Figura 22 se ilustra el valor estimado de cada modelo.

Figura 22 Modelo en función de transferencia del dedo anular



Fuente autor.

A continuación, se muestran los modelos identificados tf_{f1} , tf_{f2} y tf_{f3} :

$$tf_{f1} = \frac{3855s + 2.428e06}{s^2 + 3089s + 1.346e07}$$

$$tf_{f2} = \frac{1.401e06}{s^2 + 3881s + 8.125e06}$$

$$tf_{f3} = \frac{564.3}{s + 3272}$$

1.5 Selección de técnicas de control

Teniendo en cuenta las características de la mano virtual y los modelos identificados, se procede a la selección de algunas estrategias de control a implementar en el prototipo virtual. Para ello se realiza una revisión del estado del arte de técnicas de control para agarres de poder que dio origen a este proyecto, donde se identificaron aportes que permiten agarres de poder en manos robóticas. Los aportes hallados en la base de datos *Scopus* se obtuvieron mediante las palabras clave: *grasp*, *hand*, *robotic*, y *control*. Entre los aportes se encontraron técnicas como: PID [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26] y [27]; PID difuso [14], [20] y [21]; impedancia [28], [29], [30], [3], [31], [32], [22], [33], [34], [35] y [36]; lógica difusa [37], [38] y [27]; LQR [39] y [40]; modo deslizante [41], [42], [43] y [44]; y *adaptive backstepping* [45].

En la Tabla 1 se detallan aspectos de cada uno de los aportes encontrados, tal como criterio de calidad, modelo del objeto, modelo de la mano, técnica de control, efector final, evaluación del controlador y sensores.

Tabla 1 Características de técnicas de control

Criterio de calidad	Modelo objeto	Modelo mano	Técnica de control	Efector final	Evaluación del controlador	Sensores
Tiempo de prevención de deslizamiento y pérdida del objeto Ref. [14]	No específica	Dinámica de la mano $M\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + D\theta = Bu - If$ Donde M es la inercia equivalente, C amortiguación efectiva del motor, D rigidez del sistema, B cociente de la constante de par y la resistencia de armadura del motor, u entrada de voltaje al motor, f fuerza ejercida por el ambiente, I distancia entre el punto de contacto y la junta rotacional	$Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control PID difuso	Yemas de tres dedos (pulgares, índice y el medio)	Ajuste de fuerza de agarre y deslizamiento del objeto.	Resistencia de detección de fuerza FSR.
Fuerza de agarre que evite el deslizamiento y deformación del objeto (reflejo biónico) Ref. [46]	No específica	Modelo dinámico de un dedo $M(\dot{q})\ddot{q} + C(\dot{q}, q)\dot{q} = \tau - JF - c\dot{q} - k_s q$ Donde $M(\dot{q})$ es la matriz de inercia, $C(\dot{q}, q)$ vector de fuerza centrífuga y Coriolis, τ torque de entrada, J matriz de mapa de fuerza, F matriz de fuerza, y k_s torque de torsión del resorte	$Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control PI adaptativo	Yema de los cinco dedos	Ajuste de fuerza de agarre y deslizamiento del objeto. (Reflejo biónico)	Resistencia de detección de fuerza FSR. Sensor de Polivinilideno para detectar rigidez.
Prevenir deslizamiento Ref. [15]	No específica	No específica, pero requiere el modelo cinemático de la mano	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control PID en modo deslizante con prevención de deslizamiento	Yema de los 5 dedos	Deslizamiento del objeto.	No específica

<p>Precisión en la posición Ref. [28]</p>	<p>Formulación de Lagrange $M_O(r_O)\dot{v}_O + C_O(r_O, \dot{r}_O)v_O + G_O(r_O) = F_O + F_e$ Donde M_O es la matriz de inercia, C_O fuerza centrífuga y Coriolis, G_O fuerza de gravedad, F_O fuerza resultante aplicada al objeto, y F_e otras fuerzas externas aplicadas al objeto</p>	<p>Formulación de Lagrange $M_{hnd}(q)\ddot{q} + C_{hnd}(q, \dot{q})\dot{q} + G_{hnd}(q) = \tau_{hnd} - J_{hnd}^T F_c$ Donde M_{hnd} es la matriz de inercia de los dedos robóticos; C_{hnd} matriz de fuerza centrífuga y Coriolis; G_{hnd} fuerza de gravedad; τ_{hnd} torques de entrada J_{hnd} matriz jacobiana, y F_c fuerza de contacto</p>	<p>$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia</p>	<p>Yemas de los cinco dedos</p>	<p>Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.</p>	<p>No especifica</p>
<p>Mantener fuerza en los puntos de contacto frente a variaciones de rigidez del objeto Ref. [24]</p>	<p>Virtual frame $X = (K, L, S)$ K rigidez, L longitud de las yemas al centro del marco virtual, y S lectura táctil yemas</p>	<p>No específica, pero requiere el modelo del dedo</p>	<p>$Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control PID</p>	<p>Yemas de los cinco dedos</p>	<p>Ajuste de fuerza en puntos de contacto, para evitar deformación del objeto ante variaciones de rigidez.</p>	<p>Sensor de fuerza Tekscan</p>
<p>Cierre de fuerza Ref. [29]</p>	<p>Virtual frame $X = (K, L, S)$ K rigidez, L longitud de las yemas al centro del marco virtual, y S lectura táctil yemas</p>	<p>No específica, pero requiere el modelo del dedo</p>	<p>$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia</p>	<p>Yemas de los cinco dedos</p>	<p>Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.</p>	<p>Sensor de fuerza BioTac</p>

Evitar daños en el objeto ante cambios en la rigidez y tamaño de este Ref. [30]	No especifica	No especifica, pero requiere el modelo	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia	Yema de tres dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	No requiere
Tiempo de asentamiento, respuesta estable Ref. [39]	No especifica	Modelo de la mano – Bond graph $\dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t)$ $\vec{y}(t) = C\vec{x}(t)$ Donde A es la matriz de estados resultante, B matriz de ganancia (entrada) y C matriz de ganancia (salida)	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control LQR	No especifica	Seguimiento de trayectoria	No especifica
Cumplimiento. Ref. [3]	No especifica	No especifica, pero lo requiere	$Vc = Fuerza$ $Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	Sensor de fuerza ATI Nano 17
Garantizar estabilidad en el agarre Ref. [47]	No especifica	Modelo dinámico (manipuladores) $B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_{el} = \tau$ Donde $B(q)$ es la matriz de inercia; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ vector de fuerza centrífuga y Coriolis; q, \dot{q}, \ddot{q} vector de posición, velocidad y aceleración; $g(q)$ vector de gravedad; τ_{el} tensión del cable y τ torque	$Vc = Fuerza$ $Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Dos lazos de control PI fuerza y PD posición	Yemas de dos dedos (pulgar e índice)	Ajuste de fuerza de agarre, posición y deslizamiento del objeto.	Resistencia de detección de fuerza FSR. Codificador incremental de posición (0 a 255)
Logro de tareas Ref. [48]	No especifica	Modelo dinámico (manipuladores) $B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + e(q) = \tau$	$Vc = Fuerza$ $Vc = Posición$	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de	No especifica

		Donde $B(q)$ es la matriz de inercia; $C(q, \dot{q})\dot{q}$ vector de fuerza centrífuga y Coriolis; q, \dot{q}, \ddot{q} vector de posición, velocidad y aceleración; $g(q)$ vector de gravedad; $g(q)$ vector de torsión elástica y τ torque	$Vm = Voltaje$ Control PD		la fuerza de contacto.	
Validación de prótesis Ref. [49]	No específica	No específica, pero lo requiere	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control PD	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria	No específica
Validación de prótesis Ref. [25]	No específica	No específica, pero lo requiere	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control PID	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria	No específica
Interactividad Ref. [31]	No específica	No específica, pero lo requiere	$Vc = Fuerza$ $Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	Sensor de posición, fuerza y corriente
Cumplimiento. Fuerza que no deforme, dañe y evite la pérdida del objeto. Ref. [16]	No específica	Ecuación dinámica de la mano: $M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = \tau - K\theta - J^T f$ Donde $\theta, \dot{\theta}$ y $\ddot{\theta}$ denotan el vector del ángulo, velocidad angular y aceleración angular; $M(\theta)$ es la matriz de inercia; $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ es el vector de Coriolis y fuerza centrífuga; τ es el vector de torques; K es el vector de rigidez del resorte equivalente; J es la matriz jacobiana.	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control PID	Yemas de dos dedos (pulgar e índice)	Seguimiento de trayectoria	No específica

Cumplimiento. Fuerza que no deforme, dañe y evite la pérdida del objeto. Ref. [36]	No especifica	Ecuación dinámica del dedo: $M(q)\ddot{q} + c(\dot{q}, q)\dot{q} + Kq = \tau + w$ Donde q es la coordenada lagrangiana, $M(q)$ es la matriz de masa e inercia del dedo, $c(\dot{q}, q)$ vector de fuerza centrífuga y Coriolis, τ es el vector de torque de entrada en las falanges producidas por $w = JF$, J matriz de seguimiento de fuerza, Kq es el torque del resorte.	$Vc = Fuerza$ $Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia en modo deslizante	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	No especifica
Prevenir deslizamiento del objeto. Ref. [37]	No especifica	No especifica	$Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control difuso	Yemas de los cinco dedos	Convergencia de la fuerza de contacto.	Resistencia de detección de fuerza FSR.
Estabilidad en el agarre. Ref. [17]	No especifica	Modelo dinámico del dedo: $M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + D\dot{q} + K(q - q_0) = \tau_c + \tau_e + \tau_a$ Donde q_0 es la posición; K matriz de rigidez, D matriz diagonal de disipación, $M(q)$ matriz de inercia, $C(q, \dot{q})$ matriz de fuerza centrífuga y Coriolis, τ_a señal de control, τ_c disturbios de contacto, y τ_a disturbios desconocidos.	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ VC=Angulo VM=Voltaje PID con observador no lineal	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria	No especifica
Cumplimiento. Limitación de fuerza en el agarre. Ref. [50]	No especifica	No especifica, pero lo requiere.	$Vc = Fuerza$ $Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	Sensor piezoresistivo

			Cascada, externo PID (posición) e interno PI (velocidad)			
Cumplimiento. Fuerza que no deforme, dañe y evite la pérdida del objeto. Ref. [18]	No especifica	Análisis cinemático DH para cada dedo. Modelo cinético: $M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = T - K\theta - J^T f$ Donde M=masa, f=fuerza de contacto, T=pares externos que afectan articulación, M matriz de inercia 3x3, J matriz de transposición jacobiana, K matriz de rigidez del resorte, C matriz fuerza centrípeta y Coriolis 3x1.	$Vc = Fuerza$ $Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Dos lazos de control. PID fuerza y PID ángulo.	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	Resistencia de detección de fuerza FSR. Enconder.
Aplicar fuerza deseada al objeto Ref. [32]	No especifica	Modelo de la articulación de los dedos $\frac{d\theta(t)}{dt} = w(t)$ $\frac{dw(t)}{dt} = \frac{1}{T}w(t) + \frac{K.K_\theta}{T}U - \frac{K.K_\theta}{T}T_f$ Donde θ ángulo motor, w velocidad angular, U entrada del sistema, T constante eléctrica del motor, K ganancia del bucle abierto del sistema de dedos, T_f par de fricción no lineal del sistema de dedos, K_θ relación de conducción	$Vc = Fuerza$ $Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia, con modo deslizante adaptativo	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	No especifica
Estabilidad en el agarre Ref. [26]	No especifica	Función de transferencia de un dedo $G_i(s) = \frac{K_i}{\tau_{p,i}s + 1}$ Donde $\tau_{p,i}$ pares de polos estables, y K_i ganancia del motor DC	$Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control PID	Yemas de tres dedos (pulgares, índice y medio)	Convergencia de la fuerza de contacto.	No especifica

<p>Máximo sobreimpulso, tiempo de subida y error en estado estacionario.</p> <p>Ref. [19]</p>	<p>No especifica</p>	<p>Ecuación dinámica mano:</p> $\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta)$ <p>Modelo servomotor</p> $\frac{\dot{\theta}(s)}{v(s)} = \frac{Kt}{(J * L)s^2 + (J * R + L * B)s + (Kt * Ke)}$	<p>$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$</p> <p>PID con sintonización PSO</p>	<p>Yemas de los cinco dedos</p>	<p>Seguimiento de trayectoria</p>	<p>No especifica</p>
<p>Tiempo de establecimiento</p> <p>Ref. [45]</p>	<p>No especifica</p>	<p>Modelo dinámico</p> $\dot{x}_1 = x_2$ $\dot{x}_2 = au(t) - aF_c - aB_{eff}x_2 - aF_s(x_1)$ <p>Donde $u(t)$ entrada de control, B_{eff} coeficiente de fricción viscoso, F_s fuerza de resorte restauradora, a depende del radio y momento de inercia.</p>	<p>$Vc = Posición$ $Vc = Presión$ $Vm = Voltaje$</p> <p>Control en cascada Externo: <i>Adaptative backstepping</i> Interno: PID</p>	<p>Yemas de tres dedos</p>	<p>Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.</p>	<p>No especifica</p>
<p>Tiempo de establecimiento y error de estado estacionario</p> <p>Ref. [51]</p>	<p>No especifica</p>	<p>Ecuación dinámica</p> $\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_d \\ \frac{d}{dt} i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_s} & w_{re} \\ -w_{re} & -\frac{r_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\lambda_m}{L_s} \end{bmatrix}^T w_{re}$ <p>Donde d/dt es el operador, i_d corriente en el eje d, i_q corriente en el eje q, r_s resistencia del estator, L_s autoinductancia del estator,</p>	<p>$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$</p> <p>Control predictivo</p>	<p>Yemas de los cinco dedos</p>	<p>Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.</p>	<p>Cámaras <i>Basler Company</i></p>

		w_{re} velocidad eléctrica, v_d voltaje en el eje d, v_q voltaje en el eje q, y λ_m flujo magnético permanente.				
Aplicar fuerza deseada al objeto Ref. [22]	No especifica	Modelo de la articulación de los dedos $\frac{d\theta(t)}{dt} = w(t)$ $\frac{dw(t)}{dt} = \frac{1}{T}w(t) + \frac{K \cdot K_\theta}{T}U - \frac{K \cdot K_\theta}{T}T_f$ Donde θ es el ángulo del motor, w velocidad angular, U entrada del sistema, T constante eléctrica del motor, K ganancia del bucle abierto del sistema de dedos, T_f par de fricción no lineal del sistema de dedos, y K_θ relación de conducción	$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia, con modo deslizante adaptativo	Yemas de todos los dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	No especifica
Cumplimiento. Fuerza no dañe el objeto. Ref. [43]	Modelo de referencia (compatibilidad mano-objeto) – Virtual mass spring damper $\frac{r_e(s)}{H(s)} = \frac{G_f}{s^2 + K_s s + K_i}$ donde $K_s = 2\zeta w_n$ y $K_i = w_n$. Los escalares ζ y w_n son la relación de amortiguamiento y la frecuencia natural respectivamente. Por lo tanto, se utilizarán diferentes K_s , K_i y G_f para obtener niveles de cumplimiento.	Modelo general $M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D_f = \tau$ Donde M es la masa, V velocidad, G gravedad, D_f perturbaciones e incertidumbres (fricción), y τ pares de accionamiento externo	$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control de modo deslizante integral (postura y tarea)	Yemas de tres dedos (pulgar, índice y anular)	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	Sensor de fuerza

Asegurar estabilidad en el agarre Ref. [33]	Virtual frame $X = (K, L, S)$ Donde K es la rigidez, L longitud de las yemas al centro del marco virtual, y S lectura táctil yemas	No especifica	$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia	Yemas de tres dedos (pulgar, índice y medio)	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	Sensor de fuerza BioTac
Estabilidad de la fuerza de agarre Ref. [20]	No especifica	Modelo de la mano $M\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + D\theta = Bu - If$ Donde M es la inercia, C amortiguación efectiva del motor, D rigidez del sistema, B cociente del par del motor y resistencia de la armadura del motor, u entrada de voltaje motor, f fuerza ejercida por el entorno, I distancia entre el punto de contacto y la junta rotacional	$Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control PID difuso	Yemas de tres dedos (pulgar, índice y medio)	Convergencia de la fuerza de contacto.	Resistencia de detección de fuerza FSR.
Seguridad en el agarre, evitar pérdida y daño del objeto Ref. [38]	No especifica	No especifica	$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control difuso	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	Resistencia de detección de fuerza FSR.
Seguimiento de fuerza y respuesta estable fuerza/par	No especifica	Modelo dinámico de cada dedo $M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau + J^T(\theta)f_e$	$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	No especifica

Ref. [34]		Donde $M(\theta)$ es la matriz de inercia, $C(\theta, \dot{\theta})$ fuerza centrífuga, $G(\theta)$ gravedad, τ vector de torque, y $J^T(\theta)$ jacobiana	Control de impedancia			
Estabilidad en el agarre, y evitar daño del objeto Ref. [21]	No especifica	Modelo dinámico de cada dedo mediante método de lagrange $M(q)\ddot{q} + H(\dot{q}, q) = \tau - JF_L - \tau_f(\dot{q}) - T_R$ Donde $M(q)$ es la matriz de inercia, $q = [\theta_1(t) \ \theta_2(t) \ \theta_3(t)]^T$, $H(\dot{q}, q)$ vector de Coriolis y fuerza centrífuga, τ torque, F_L vector fuerzas de contacto, J matriz de fuerzas externas, y $\tau_f(\dot{q})$ fricción	$Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control PID difuso	Yemas de los cinco dedos	Convergencia de la fuerza de contacto.	No especifica
Estabilidad en el agarre Ref. [35]	No especifica	No especifica, pero lo requiere	$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control de impedancia con modo deslizante adaptativo	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	No especifica
Estabilidad en el agarre Ref. [52]	No especifica	Acoplamiento cinemático entre articulaciones: $x_s = l_1\theta_1 + l_2(\theta_1 + \theta_2)$ $\ddot{x}_s = l_1\ddot{\theta}_1 + l_2(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2)$ Donde x posición del punto final, l_1 y l_2 longitudes del enlace, y θ_1 y θ_2 ángulos entre enlaces.	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control PD con compensación de gravedad e hipótesis <i>virtual spring damper</i>	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria	No especifica

Estabilidad en el agarre Ref. [53]	No especifica	No especifica, pero lo requiere	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control PID	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria	No especifica
Estabilidad en el agarre Ref. [22]	No especifica	No especifica, pero lo requiere	$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control PID	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	No especifica
Cumplimiento Ref. [44]	No especifica	Modelo general de un robot $M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + D_f = \tau$ Donde M es masa, V velocidad, G gravedad, D_f representa incertidumbres y disturbios y fricción, y τ representa el vector de torque.	$Vc = Posición$ $Vc = Fuerza$ $Vm = Voltaje$ Control modo deslizante integral	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria y convergencia de la fuerza de contacto.	Sensor de fuerza
Estabilidad Ref. [40]	No especifica	No especifica	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control LQR	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria	No especifica
Fuerza de agarre Ref. [54]	No especifica	No especifica, pero lo requiere	$Vc = Posición$ $Vm = Voltaje$ Control PID	Yemas de los cinco dedos	Seguimiento de trayectoria	No especifica
Cumplimiento	No especifica	No especifica, pero lo requiere	$Vc = Posición$	Yemas de tres dedos	Seguimiento de trayectoria	No especifica

Ref. [23]			$V_m = \text{Voltaje}$			
			Control PID			

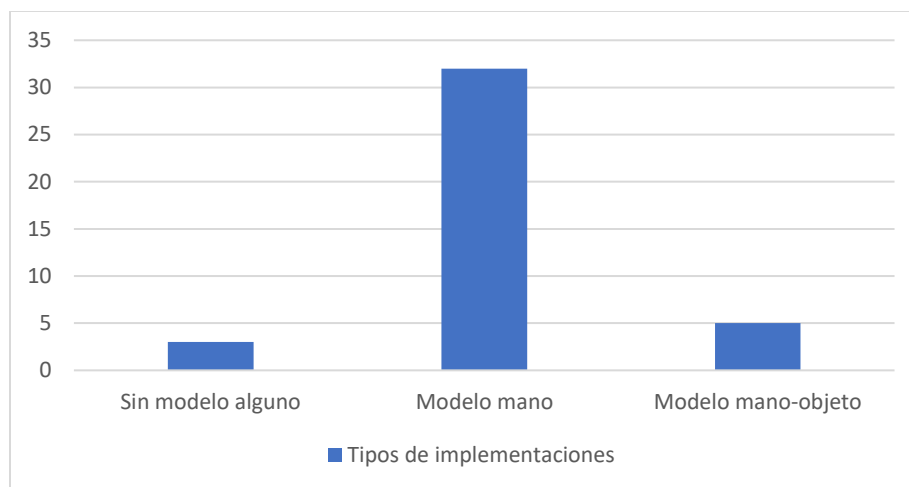
Fuente autor.

Estos aportes se pueden clasificar de acuerdo a su tipo de implementación, ya sea una técnica de control basada en el modelo de objeto, modelo de la mano, modelo mano-objeto o sin modelo alguno.

Teniendo en cuenta las técnicas de control halladas, como se ilustra en la Tabla 1, se procede a clasificar estas con base al tipo de modelo que requieren, tal como se expresó anteriormente. En la Figura 23 se ilustra dicha clasificación, se observa en gran medida las implementaciones con el modelo de la mano, seguido por el modelo mano objeto y sin modelo alguno; no se encontraron implementaciones que requieran únicamente del modelo del objeto.

Algunos aportes como se ilustra en la Figura 23, requieren de un modelo del objeto, sin embargo, tales técnicas de control implementadas tienen como principio el agarre de precisión, mediante el cálculo del centro de masa y la estimación de los puntos de contacto, ejecutando el agarre con la finalidad de evitar la deformación del objeto; en estas se implementan la técnica de *virtual frame*.

Figura 23 Tipos de implementaciones



Fuente autor.

Por lo tanto, se eligen cuatro técnicas de control, en agarres de poder: control PID difuso [21], control PI adaptativo [46], control en cascada [47], y control por impedancia [3], las cuales tienen como objetivo el control de fuerza en las yemas de los dedos. En la sección 1.6.1 se presentará una breve descripción de estas.

1.6 Pruebas de control en mano virtual

En este apartado se da a conocer la implementación de las técnicas de control en el prototipo de mano virtual, los lazos de control y las respuestas en el seguimiento de consignas constantes de control de fuerza, además de las características particulares de cada técnica.

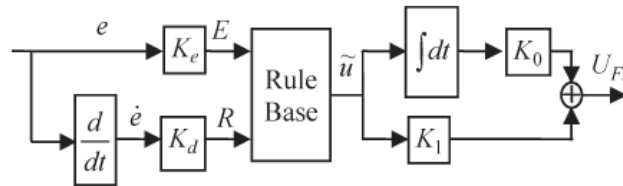
1.6.1 Técnicas de control con modelo de mano

1.6.1 Control PI difuso

Para evitar la saturación del integrador en el control PID, la acción de control se reduce mediante integración condicional, calculo inverso, etc. Sin embargo, estas técnicas presentan un tiempo muerto significativo en el proceso, lo que requiere un esfuerzo de ajuste adicional. El autor [55] propone un método de ajuste basado en la saturación de un control PID a través de reglas difusas, el cual adopta una propiedad de saturación inherente, con lo cual se busca respuesta de seguimiento suaves, como se muestra en [21]. Se busca mitigar el sobreimpulso de manera efectiva; y mantener un desempeño robusto cuando ocurre la saturación de entrada. Esta estrategia de control es implementada por [21], en el seguimiento de una fuerza de referencia, con una respuesta suave que evite datos o pérdida del objeto.

En la Figura 24 se presenta el esquema de control del PI difuso, se tiene una base de reglas de dos dimensiones E y R, que normalmente se elige como una base de regla lineal de manera similar a como se ilustra en la Figura 24, donde las etiquetas lingüísticas son negativo grande (NL), negativo medio (NM), negativo pequeño (NS), cero (ZR), positivo pequeño (PS), positivo medio (PM) y positivo grande (PL). Se utilizan las funciones de membresía triangular estándar.

Figura 24 Esquema de control PID difuso



Fuente [55].

Figura 25 Base de reglas difusas

R/E	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR

Fuente [55].

El modelo de salida de la base de reglas en la ecuación (1):

$$\sigma = E + R = K_e e + K_d \dot{e} = K_e (e + \alpha \dot{e}) \quad (1)$$

Donde $K_e = \frac{1}{|\max(e)|}$, $K_d = \alpha K_e$, $K_1 = \beta K_0$. El modelo matemático del controlador PID difuso se puede derivar fácilmente en la ecuación (2):

$$U_{FZ} = K_0 \int u dt + K_1 u = K_0 \left(\int u dt + \beta u \right) \quad (2)$$

Las reglas son siempre finitas en la aplicación del mundo real, como se muestra en la Figura 25, que muestra claramente el efecto acotado. Por lo tanto, u debe incluir efectos tanto saturados como no saturados, como se muestra en la ecuación (3):

$$u = \text{sat}(\sigma) = \begin{cases} \text{sgn}(\sigma) & |\sigma| > 1 \\ g(\sigma) & |\sigma| \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

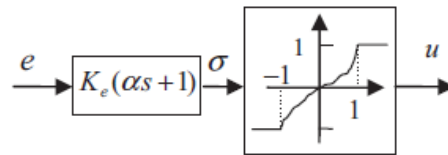
Considerando la descripción en frecuencia de (1), se tiene la ecuación (4).

$$\tilde{\sigma}(s) = K_e(1 + \alpha s)E(s) \quad (4)$$

Donde $g(\sigma)$ es una función no lineal que se describe a continuación:

Integrando (3) y (4), se tiene la estructura equivalente de la base de reglas, como se muestra en la Figura 26; la cual genera una saturación a la entrada del controlador u con base a la señal de error e .

Figura 26



Fuente autor.

Ahora se procede con el análisis de las ganancias. Se sustituye la ecuación (3) en (2), y se obtiene:

$$\begin{aligned} U_{FZ} &= K_0 \int \text{sat}(\sigma) dt + K_1 \text{sat}(\sigma) = K_0 \int \text{sat}(\sigma) dt + K_0 \beta \text{sat}(\sigma) \\ &= \begin{cases} K_0 \int \text{sgn}(\sigma) dt + K_0 \beta \text{sgn}(\sigma) & |\sigma| > 1 \\ u_1 & |\sigma| \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

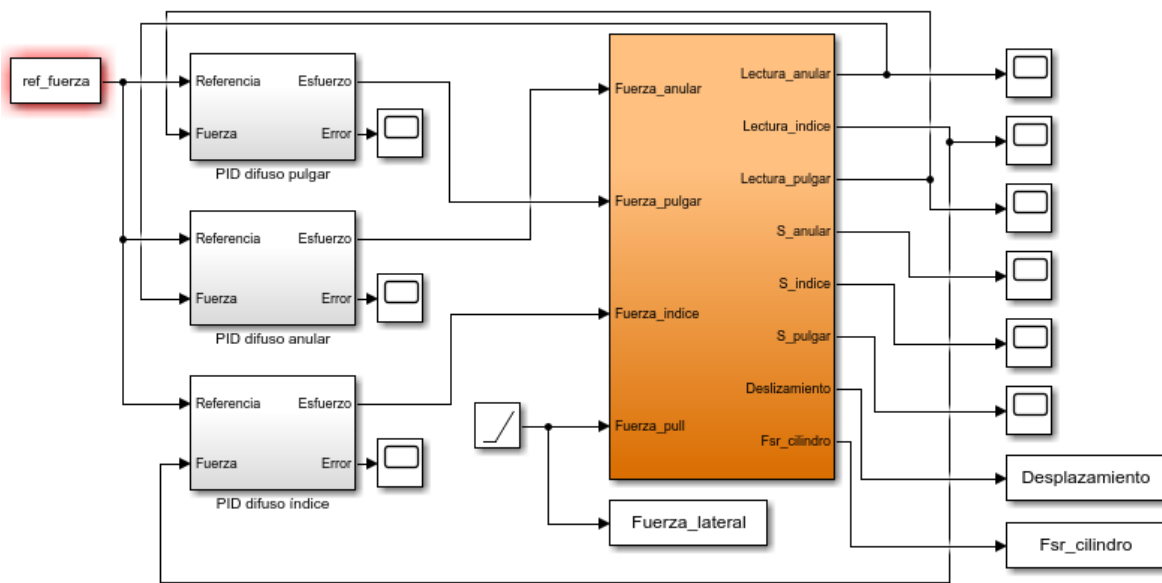
Donde u_1 se define como:

$$u_1 = K_{FZ} \left(e + \frac{1}{\alpha + \beta} \int e dt + \frac{\alpha \beta}{\alpha + \beta} \dot{e} \right) \quad (6)$$

Donde $K_{F_Z} = K_0 K_e (\alpha + \beta) \frac{B}{A}$. El controlador en la ecuación (6) es un tipo PID, K_{F_Z} es la ganancia proporcional, $\alpha + \beta$ y $\frac{\alpha\beta}{\alpha+\beta}$ son las constantes integral y derivativa, respectivamente; siendo $B = A = \frac{1}{3}$.

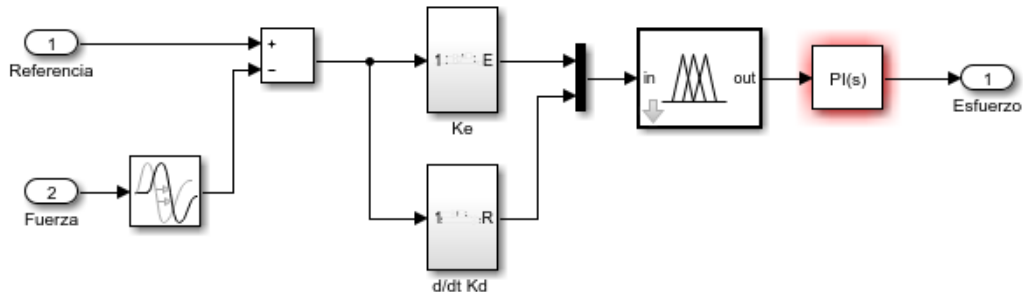
Se presenta el esquema implementado en la Figura 27 con base al aporte de [55], en el control de fuerza de agarre para los dedos anular, pulgar e índice. En la Figura 28 se observa el bloque de reglas difusas con entrada E y R , y salida U (*out*), donde K_e y K_d las constantes de saturación. Un bloque de retardo de tiempo es implementado, como solución a problemas en la compilación del esquema en *Simulink*.

Figura 27 Esquema de control PI difuso en Simulink



Fuente autor.

Figura 28

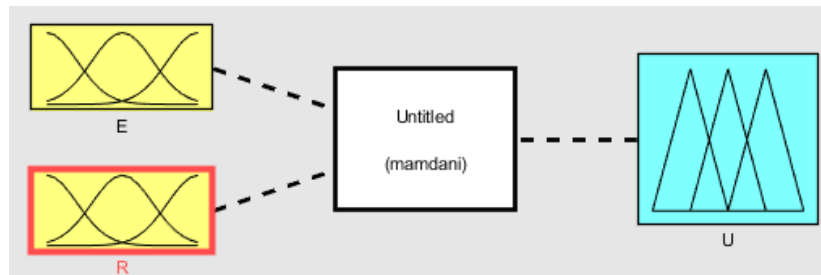


Fuente autor.

La base de reglas difusas ilustradas en la Figura 25 se implementan en *Simulink*, como se muestra en la Figura 30 para E , Figura 31 para R y Figura 32 para U . En la Figura 29 se

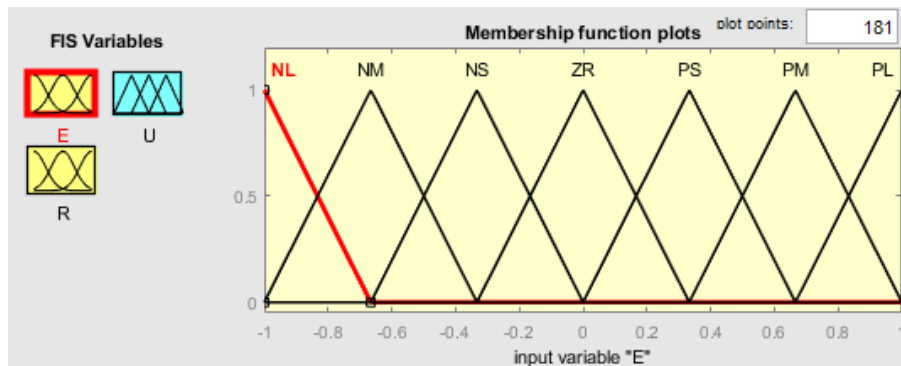
ilustra el esquema del bloque de la base de reglas difuso. En la Figura 33 se ilustra la superficie de entrada E y B, respecto a la salida U.

Figura 29 Esquema difuso



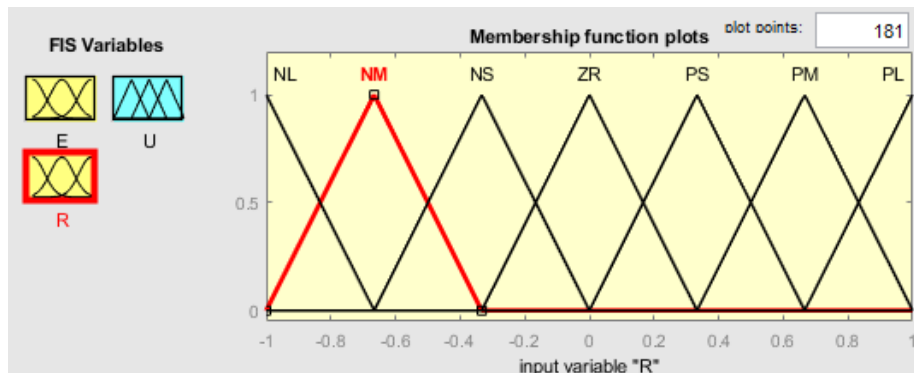
Fuente autor.

Figura 30 Reglas de entrada E



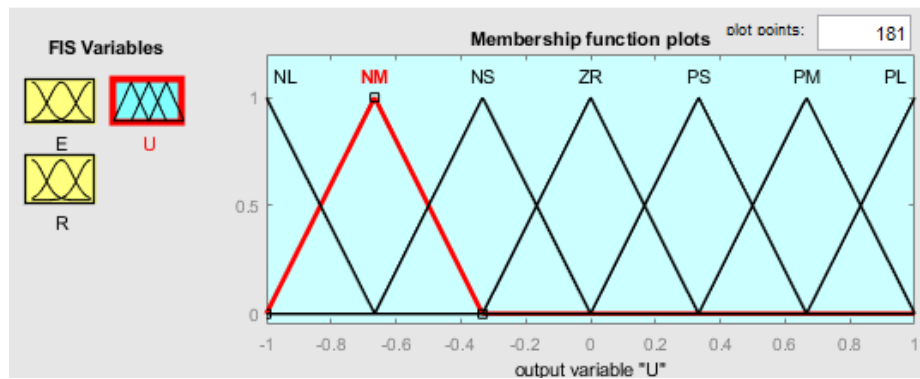
Fuente autor.

Figura 31 Reglas de entrada R



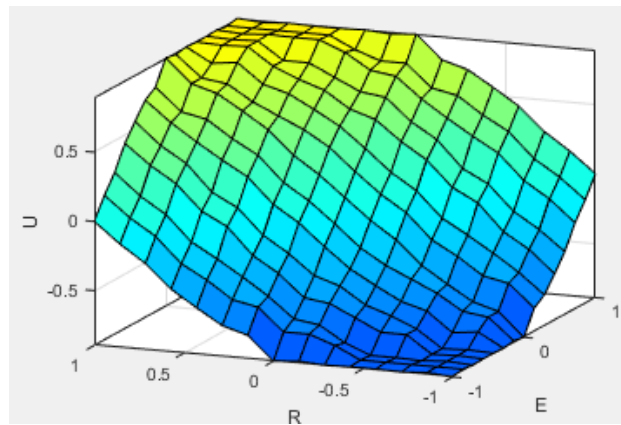
Fuente autor.

Figura 32 Salida U



Fuente autor.

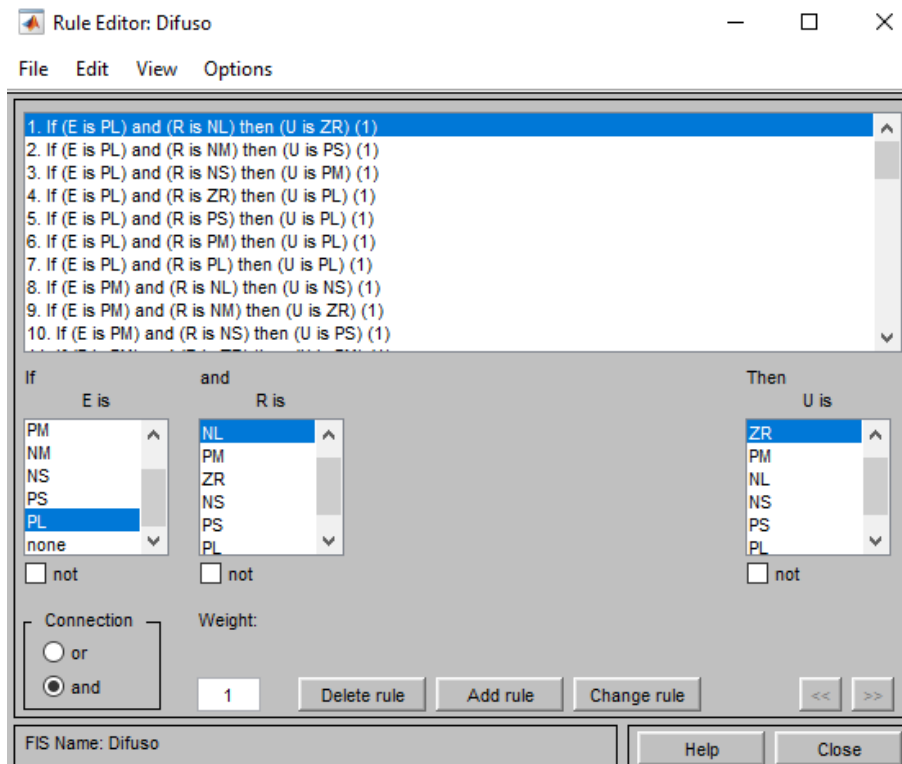
Figura 33 Superficie difusa



Fuente autor.

Las reglas difusas son configuradas en el *toolbox fuzzy* de *Matlab*, como se ilustra en la Figura 34, con base a las reglas definidas por [55] en la Figura 25.

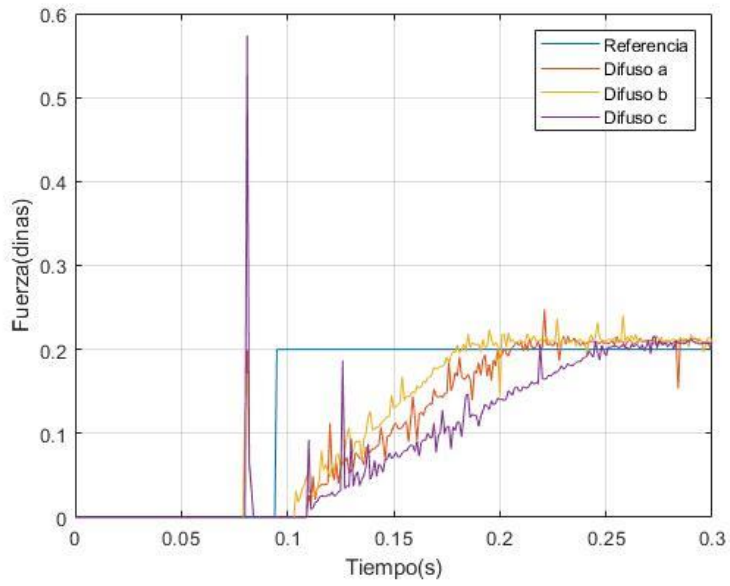
Figura 34 Conjunto de reglas difusas



Fuente autor.

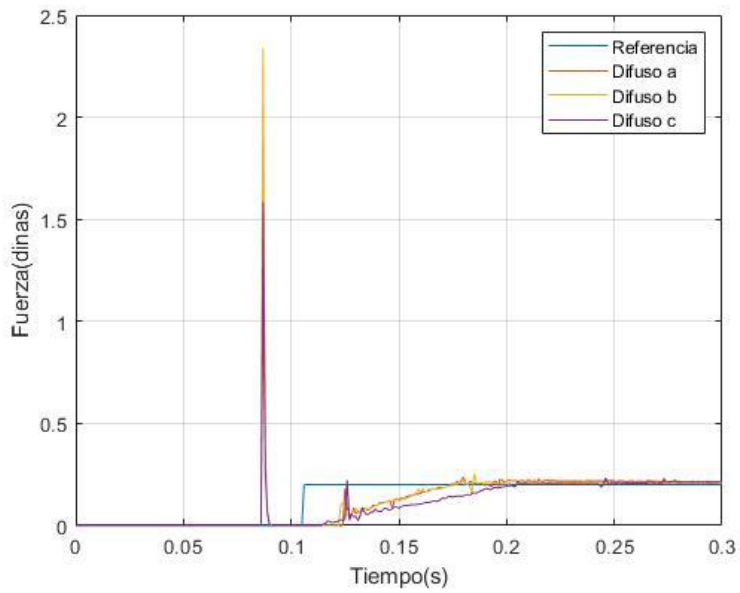
Es configurado el control PI difuso de tres maneras diferentes, variando el valor de saturación de las reglas difusas con los rangos de: Pi difuso a [-8 8], Pi difuso a [-12 12] y Pi difuso a [-20 20]. El control Pi es sintonizado por síntesis directa con base al aporte de [56]. Se obtienen las siguientes respuestas de los controladores difuso a (Figura 35), difuso b (Figura 36) y difuso c (Figura 37), para los dedos anular, índice y pulgar.

Figura 35 Dedo anular



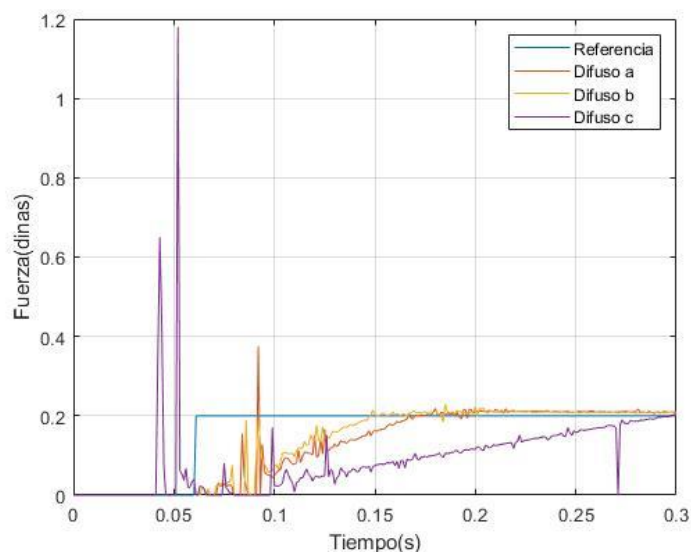
Fuente autor.

Figura 36 Dedo pulgar



Fuente autor.

Figura 37 Dedo índice



Fuente autor.

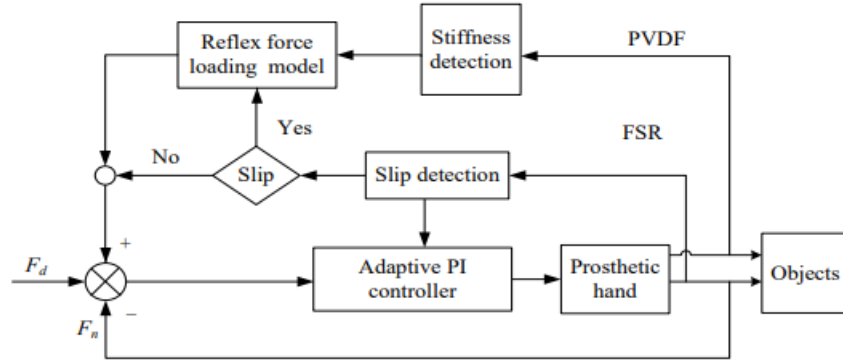
1.6.2 Control PI adaptativo

El único medio de asegurar una mano protésica más versátil, es emplear un controlador que pueda ajustar de forma adaptativa la ganancia de retroalimentación en base al deslizamiento detectado, mientras restringe la fuerza de agarre deseada de acuerdo con una estimación de la rigidez del objeto [46]. En este aporte se presenta un control del reflejo biónico basado en una mano protésica impulsada por un tendón poco activado, cuyo el propósito es permitir al controlador ajustar la fuerza de agarre, para evitar el deslizamiento y limitar la deformación de los objetos.

Cuando una mano protésica agarra un objeto, la fuerza de agarre no es constante, por lo tanto, debe tener una función de adaptación al deslizamiento para ajustar la fuerza de agarre en tiempo real. Una vez que ocurre el deslizamiento, según lo detecta mediante el sensor resistivo de fuerza FSR, y la fuerza de agarre se actualiza inmediatamente, simultáneamente la fuerza de agarre de referencia se modifica de acuerdo con la rigidez del objeto, según lo detecta el sensor fluoruro de polivinilideno (PVDF), utilizando un controlador adaptativo PI.

El sistema de reflejo de agarre diseñado se muestra en la Figura 38. Cuando se detecta un deslizamiento, la fuerza de reflejo se define casi inmediatamente, para garantizar que la mano protésica reaccione de inmediato. Si la fuerza de reflejo se carga demasiado lenta, el objeto continuara resbalando y podría caer. Se emplea la señal de deslizamiento para ajustar los parámetros del controlador PI adaptativo para cumplir con los requisitos del control de reflejo rápido [46].

Figura 38 Esquema de control PI adaptativo



Fuente [46].

Los parámetros del controlador se pueden ajustar de acuerdo a la detección de deslizamiento, de la siguiente manera:

$$k_p(t) = k_p + \Delta k_p \quad (7)$$

$$k_i(t) = k_i + \Delta k_i \quad (8)$$

Donde k_i y k_p son los parámetros iniciales del controlador PI, Δk_p y Δk_i son los parámetros de ajuste, los cuales pueden ser ajustados acorde a la siguiente ecuación (9):

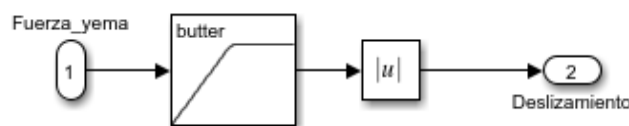
$$\Delta k_d = \begin{cases} k_{d \max} & a_d Q(t) + b_d > k_{n \max} \\ a_d Q(t) + b_d & k_{d \min} < a_d Q(t) + b_d < k_{d \max} \\ k_{d \min} & a_d Q(t) + b_d < k_{d \min} \end{cases} \quad (9)$$

Donde d es p e i , y a_d y b_d son determinadas por $k_{d \max}$, $k_{d \min}$ y $Q(t)$. $Q(t)$ es un variable proporcional al deslizamiento.

En la implementación de este aporte, no se tendrá en cuenta la detección de la rigidez (*Stiffness deteccion*), dado que el objeto a simular no es deformable, debido al alto coste computacional. Se tendrá en consideración la adaptación de las ganancias del controlador y la fuerza de referencia en base al deslizamiento detectado (*Slip deteccion*).

En la detección de deslizamiento se utiliza un filtro Butterworth pasa altas de grado 8, con lo cual se obtienen los componentes de alta frecuencia en la lectura de fuerza, y de esta manera detectar la presencia del deslizamiento, en frecuencias superiores a 10KHz como en [46], ilustrado en la Figura 39.

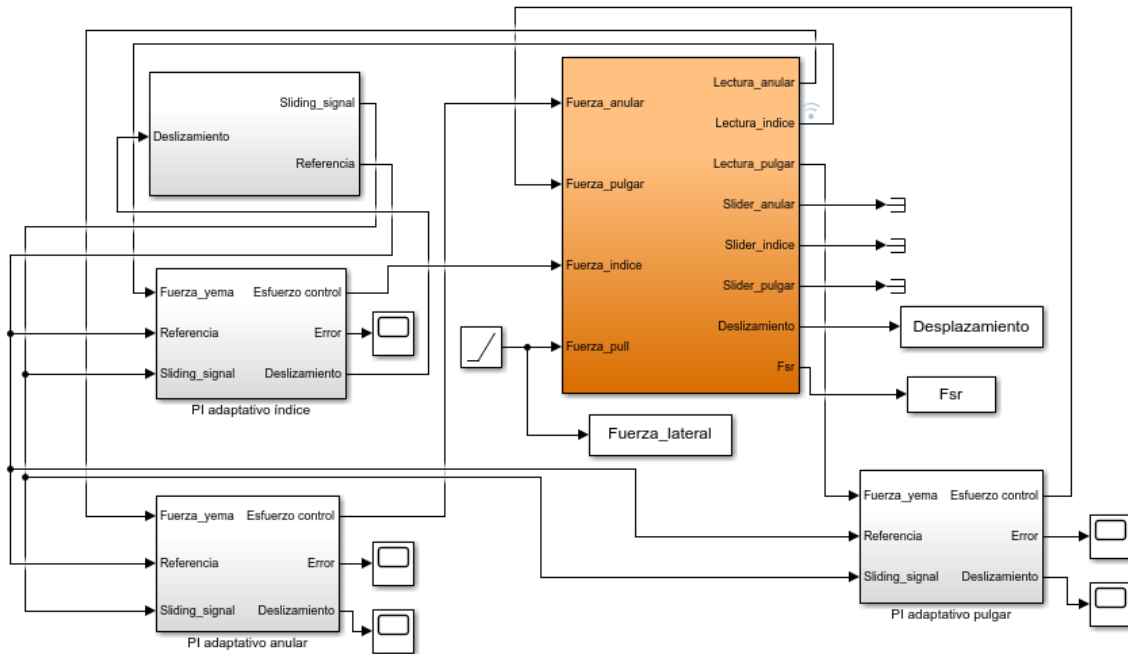
Figura 39



Fuente autor.

El esquema de control se muestra en la Figura 40, donde se observan los bloques de control para el dedo índice, anular y pulgar, con base al aporte de [46]; además de la *sfunction* del modelo de la mano en Adams, y el bloque para la generación de la nueva fuerza de referencia en la detección de deslizamiento.

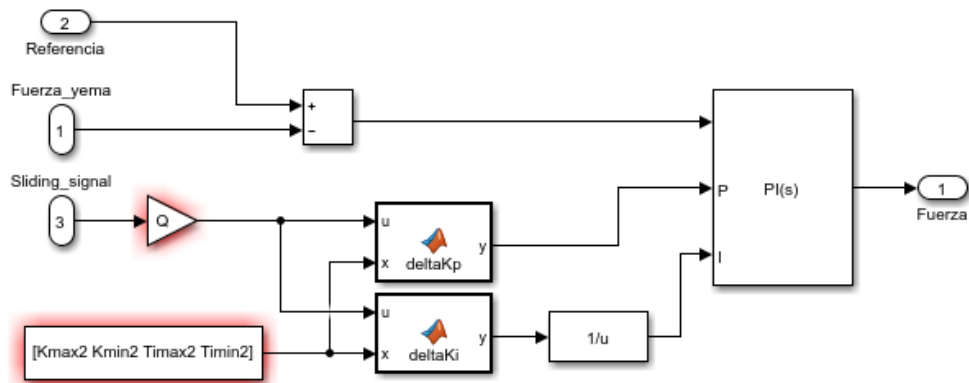
Figura 40 Esquema de control PI adaptativo en Simulink



Fuente autor.

Para hallar los valores iniciales de las constantes del controlador, se implementa el método de sintonización por síntesis directa de [56]. Las constantes del controlador definidas en las ecuaciones (7) y (8), con base a (9), se muestran en la Figura 41, donde los valores mínimos se hallan por síntesis directa, y el valor máximo es definido por prueba. Las funciones ΔK_p y ΔK_i representan la ecuación (9), estas dependen del valor de la señal de deslizamiento, y Q representa una ganancia de la señal de deslizamiento.

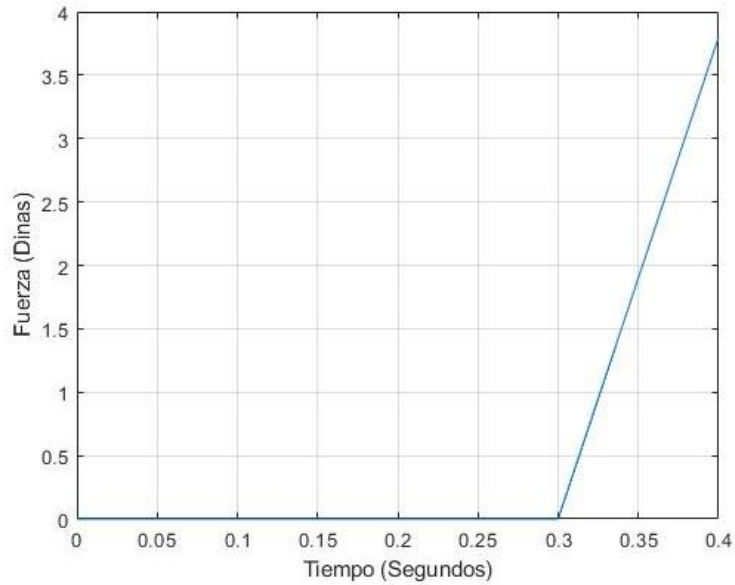
Figura 41 Esquema de adaptación de ganancias del controlador



Fuente autor.

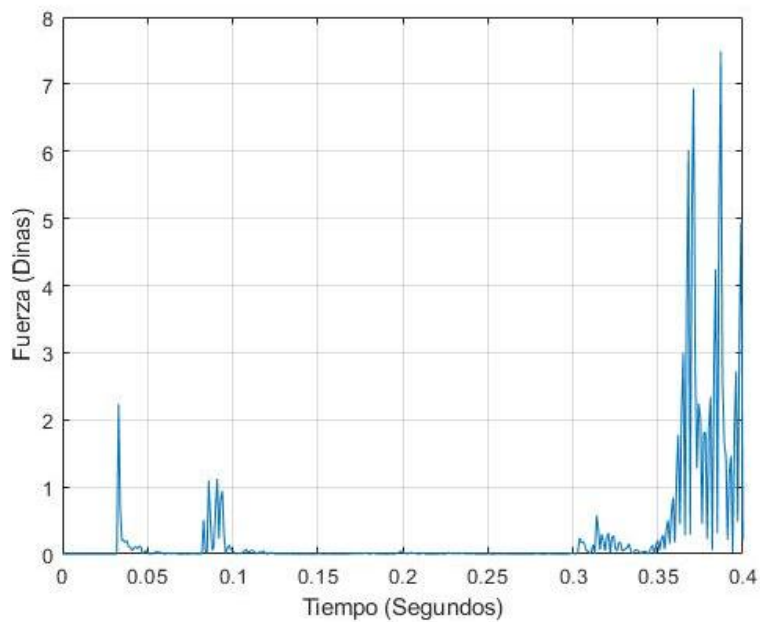
Al aplicar una fuerza lateral, como se ilustra en la Figura 42, donde a partir de $t=0.3$ segundos se inicia la aplicación de la fuerza; el filtro muestra el inicio del deslizamiento como se ilustra en la Figura 43. Se observa una señal de $t=0$ a $t=0.1$, la cual se debe al proceso inicial del agarre del objeto, y al tener una fuerza de agarre estable se minimiza la señal a partir de $t=0.1$ hasta $t=0.3$.

Figura 42 Fuerza lateral aplicada



Fuente autor.

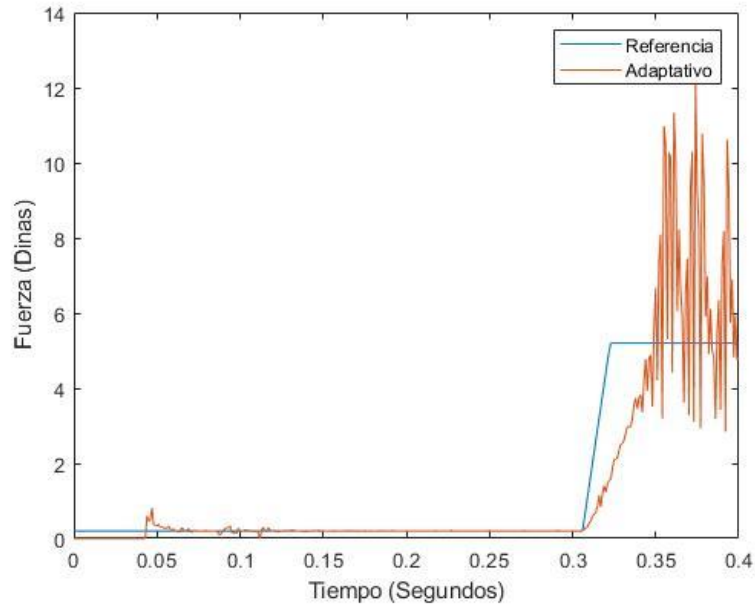
Figura 43 Señal del filtro pasa altas



Fuente autor.

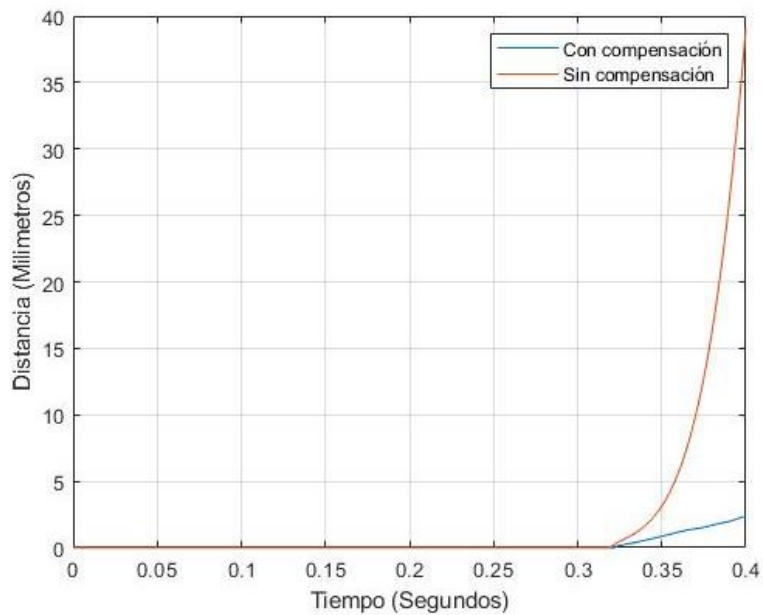
Al detectar el deslizamiento el controlador, se genera un cambio de la señal de referencia en el agarre, como se ilustra en la Figura 44. Se lleva a cabo una comparación detectando deslizamiento y sin detectarlo, observándose un mayor deslizamiento sin compensación como se ilustra en la Figura 45.

Figura 44



Fuente autor.

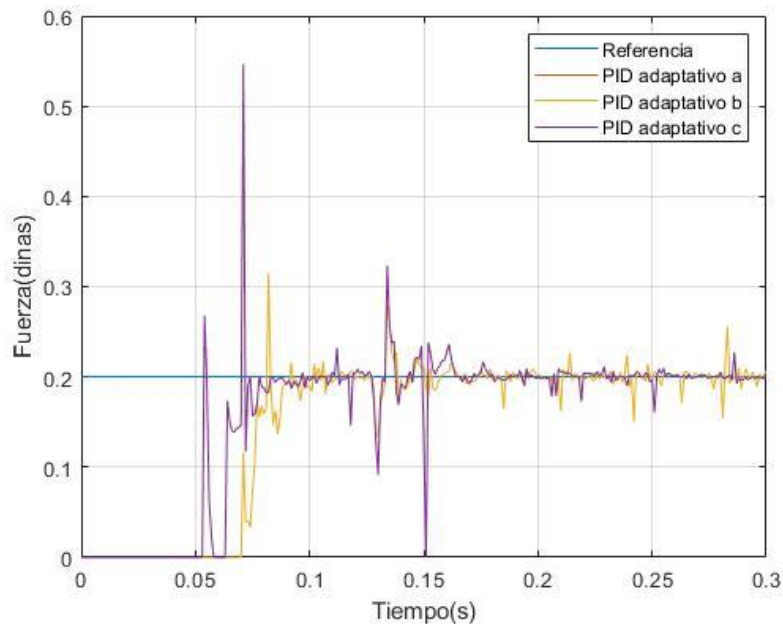
Figura 45



Fuente autor.

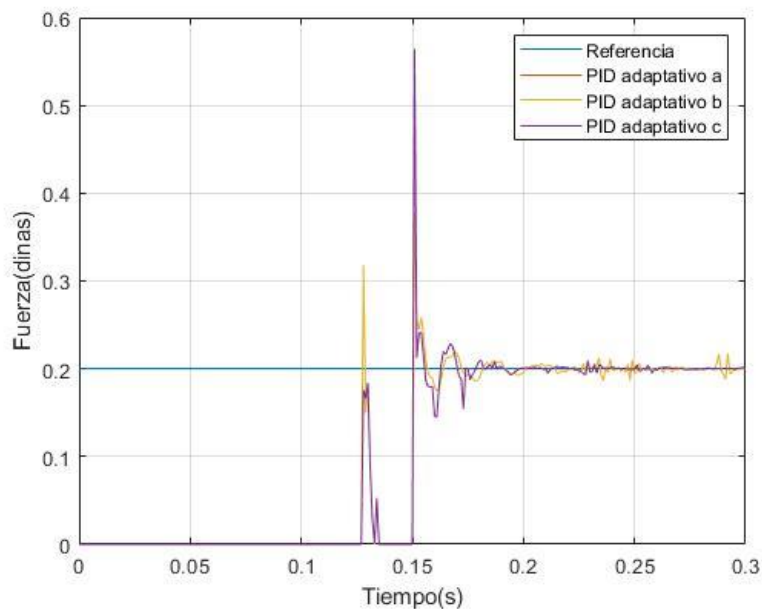
A continuación, se ilustra la simulación de los controladores adaptativo a (Figura 46), adaptativo b (Figura 47) y adaptativo c (Figura 48), en el seguimiento de una fuerza constante de contacto de 0.2 dinas.

Figura 46 Control adaptativo dedo anular



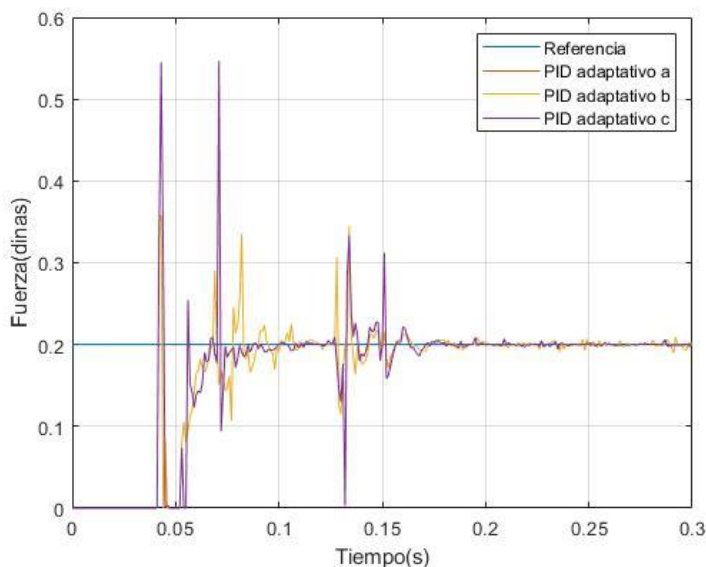
Fuente autor.

Figura 47 Control PI adaptativo dedo pulgar



Fuente autor.

Figura 48 Control PI adaptativo dedo índice



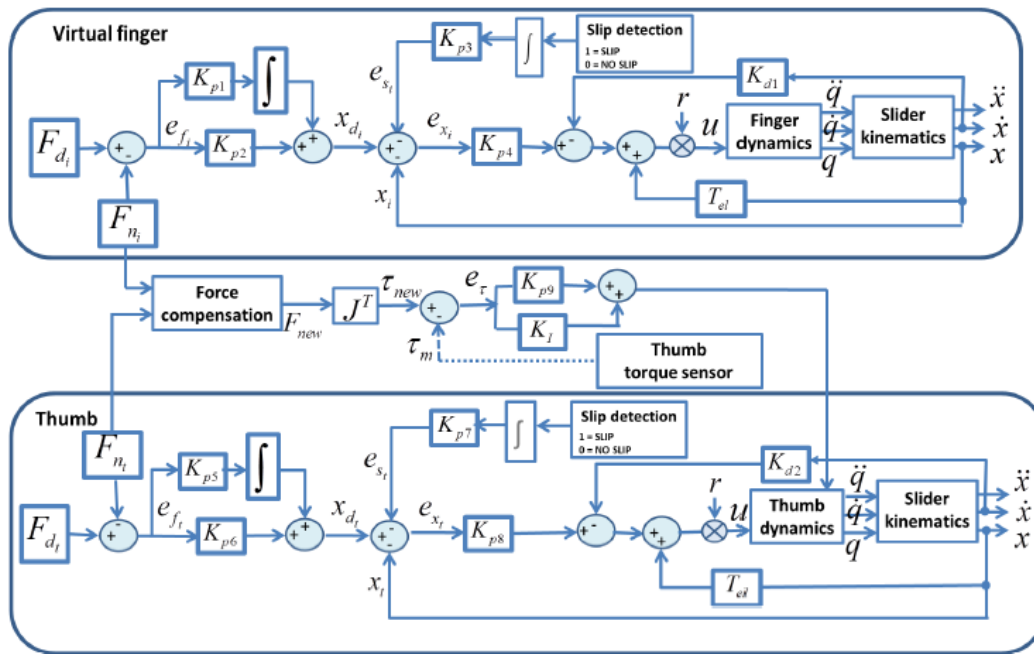
Fuente autor.

1.6.3 Control en cascada

Con la finalidad de evitar el deslizamiento de los objetos y regular la fuerza en el agarre, en [47] se propone un sistema para la detección de deslizamiento durante el agarre, y una estrategia para la regulación de la fuerza de agarre. El esquema de control se muestra en la Figura 31. Se tiene un control en cascada, con un control PI en el lazo de fuerza y un proporcional en el lazo de velocidad, en este último la referencia depende de la detección del deslizamiento, con lo cual se tiene un compensador de fuerza de agarre frente al deslizamiento del objeto. El concepto de dedo virtual se refiere a los dedos índice, corazón, anular y meñique.

En el esquema ilustrado en la Figura 49, F_{d1} es la fuerza de referencia, K_{p1} y K_{p5} son las constantes integrales, y K_{p2} y K_{p6} son las constantes proporcionales del controlador PI. K_{p3} y K_{p7} son las constantes del compensador frente al deslizamiento. K_{p4} y K_{p8} son las constantes proporcionales, y K_{d1} y K_{d2} son las constantes derivativas del lazo de posición.

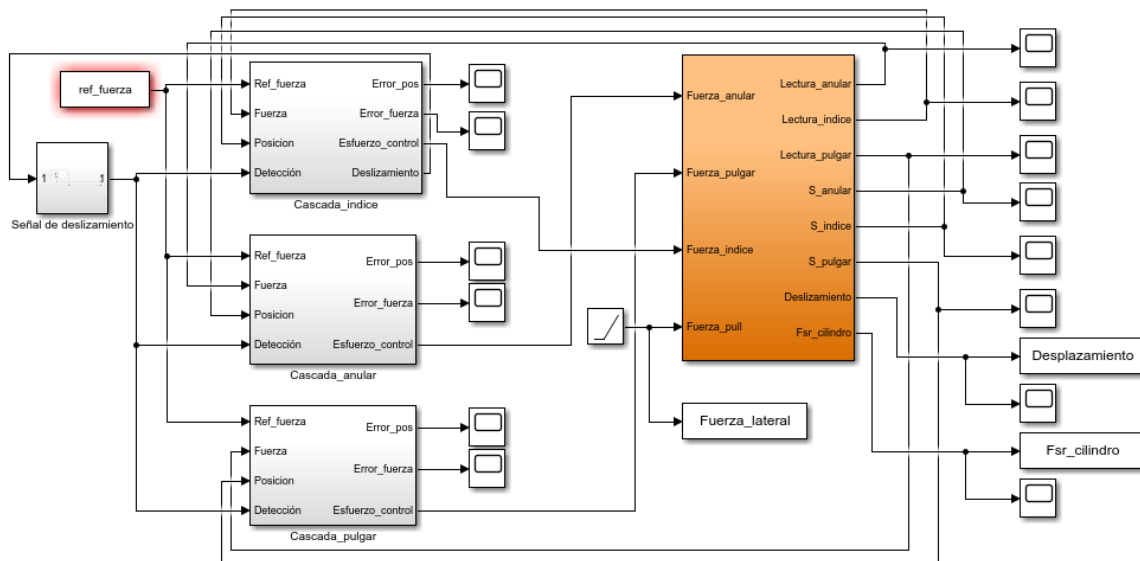
Figura 49 Esquema de control en cascada



Fuente [47].

En el proceso de implementación en un entorno se tiene la detección de deslizamiento, como se muestra en la Figura 50, con base al aporte de [47]. Se tiene un controlador para cada dedo (anular, índice y pulgar). La fuerza de compensación no se tendrá en cuenta en la implementación.

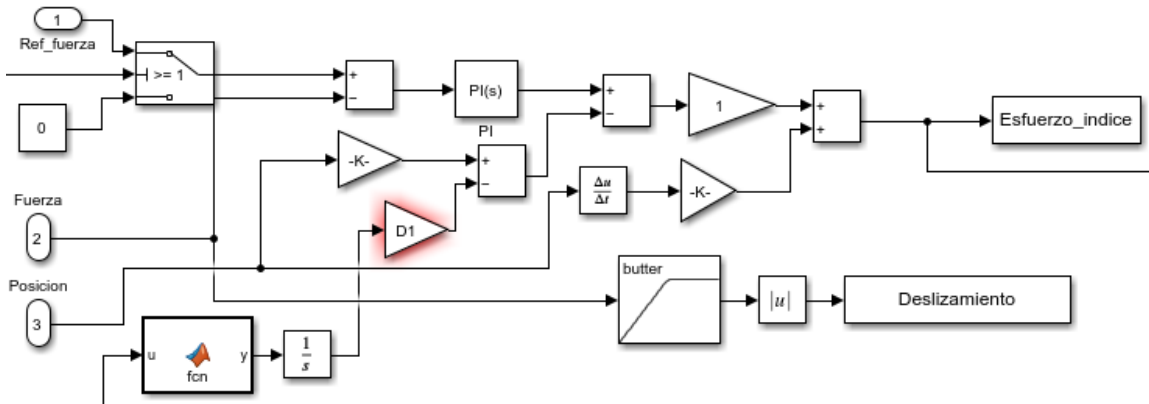
Figura 50 Esquema de control Cascada en Simulink



Fuente autor.

Se observa en la Figura 51 el lazo de control de fuerza y posición, la ganancia de detección de deslizamiento, y el filtro Butterworth para la detección de deslizamiento (*butter*). La entrada detección toma valor de 1 al detectar deslizamiento y 0 en caso contrario.

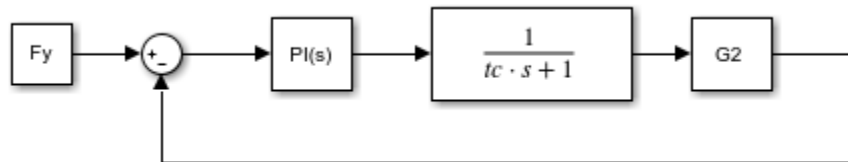
Figura 51



Fuente autor.

El lazo de control PI es sintonizado por modelo interno con base al modelo de la mano, para lo cual se tiene el esquema mostrado en la Figura 52.

Figura 52



Fuente autor.

Donde G_2 es definido como:

$$G_2 = K_2 \quad (10)$$

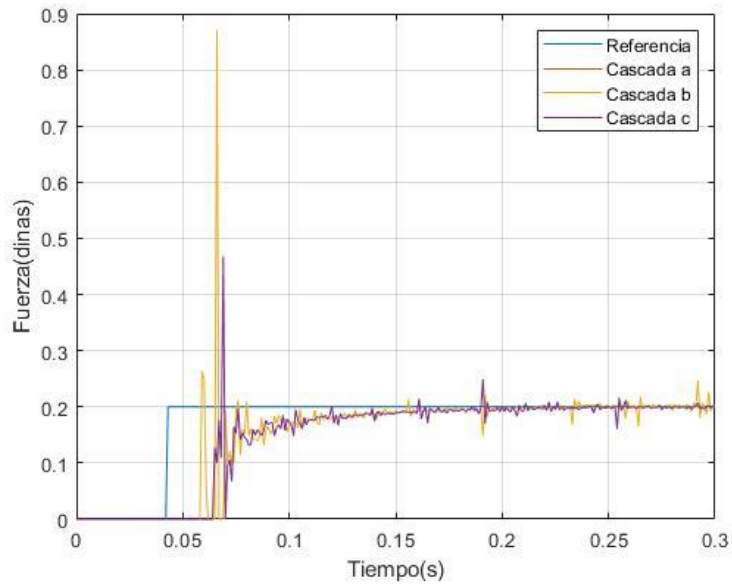
Luego se halla G_c con la finalidad de una señal de salida igual a la referencia, con lo cual se define la ecuación (11); esta se iguala a la estructura de un control PI, obteniéndose la ecuación (12), donde $K_c = \frac{\tau_c}{K_2 \tau_{c2}}$.

$$G_c = \left(\frac{\tau_c s + 1}{\tau_{c2} s} \right) \frac{1}{K_2} = \frac{\tau_c}{K_2 \tau_{c2}} \left(1 + \frac{1}{\tau_c} s \right) \quad (11)$$

$$PI = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_c} s \right) \quad (12)$$

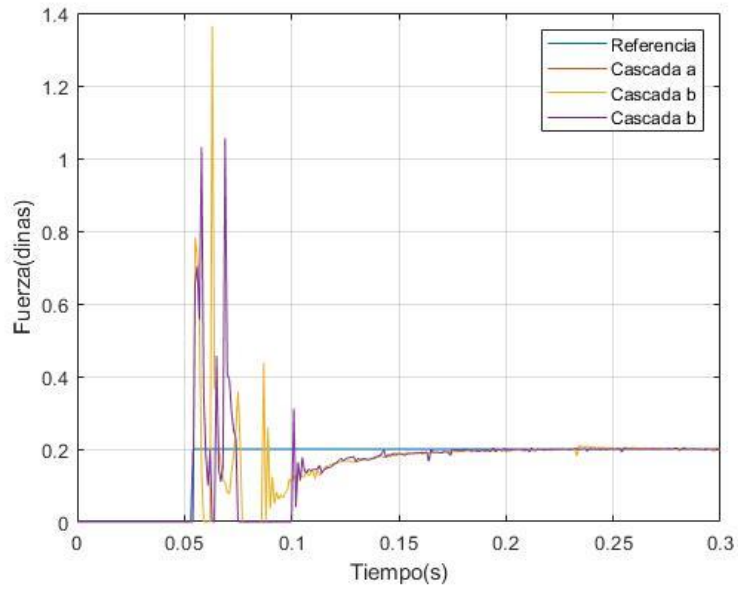
A continuación, se ilustran las pruebas de seguimiento de una fuerza constante de 0.2 dinas, para el controlador cascada a, cascada b y cascada c, en las Figuras 53, 54 y 55.

Figura 53 Control cascada dedo anular



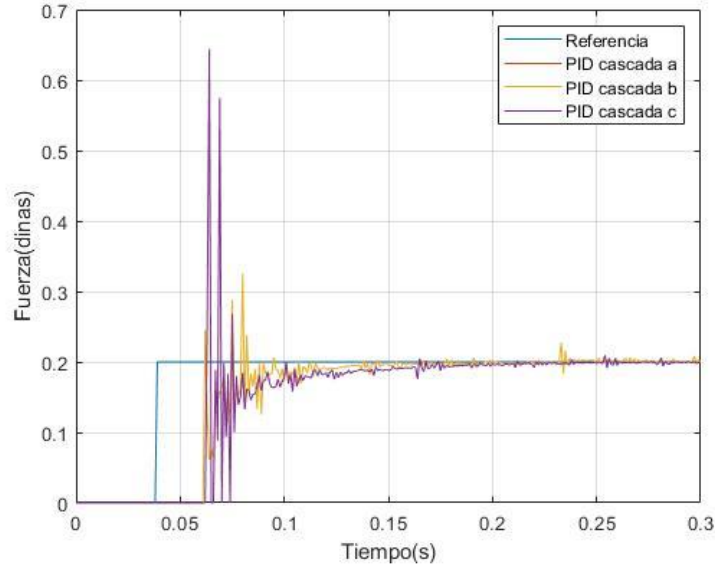
Fuente autor.

Figura 54 Control cascada dedo pulgar



Fuente autor.

Figura 55 Control cascada dedo índice



Fuente autor.

1.6.4 Control por impedancia

El objetivo de control por impedancia es establecer una relación dinámica deseada especificada por el usuario, denominada impedancia objetivo, entre la posición del efector final (x), en este caso la posición del deslizador, y la fuerza de contacto f . En [3] se implementa un control por impedancia, donde el control de fuerza de contacto se logra indirectamente mediante un control de la posición. El objetivo es estimar cuánto debería ser la posición deseada, la cual se controla con un PID, para que se ejerza una determinada fuerza de contacto. según el algoritmo de Seraji [57]. La dinámica de impedancia viene dada en el plano cartesiano por la ecuación (13), donde $e = f_r - f$ es la diferencia entre una fuerza de referencia f_r y la fuerza de contacto y x_r es una referencia de posición definida para “penetrar en el ambiente” una cantidad constante.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + k(x - x_r) = e \quad (13)$$

Si la fuerza de contacto ejercida sobre el objeto o ambiente se modela en función de considerar al objeto como un medio elástico con coeficiente de rigidez k_e ubicado en una posición x_e , se puede expresar x en términos de e , como:

$$x = \frac{1}{k_e}f + x_e = \frac{1}{k_e}[f_r - e] + x_e \quad (14)$$

Sustituyendo (14) en (13), se obtiene la ecuación diferencial fuerza error.

$$m\ddot{e} + b\dot{e} + (k + k_e)e = mf_r + bf_r + kf_r - k_e k(x_r - x_e) \quad (15)$$

Dado que f_r es constante, el error de seguimiento de fuerza en estado estable se obtiene a partir de la ecuación (15), como:

$$e_{ss} = \frac{k}{k + k_e} [f_r + k_e(x_e - x_r)] = k_{eq} \left[\frac{f_r}{k_e} + x_e - x_r \right] \quad (16)$$

La fuerza de contacto en régimen permanente ejercida sobre el entorno se puede obtener como:

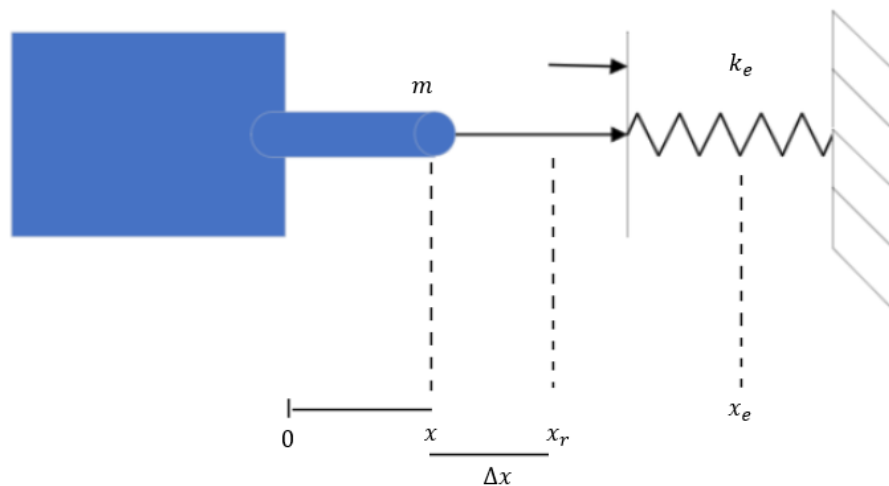
$$f_{ss} = f_r - e_{ss} = k_{eq} \left[\frac{f_r}{k} + x_r - x_e \right] \quad (17)$$

De la ecuación 16, se obtiene la trayectoria de referencia necesaria para lograr error de seguimiento de fuerza constante igual a cero como:

$$x_r = x_e + \frac{f_r}{k_e} \quad (18)$$

La Figura 56 permite ilustrar la relación entre las variables de la ecuación 18. Esta ecuación se explica así: si conocemos la localización precisa del ambiente x_e , y el valor exacto de la constante de rigidez del ambiente k_e , se puede sintetizar la referencia de posición x_r a partir de la ecuación 18.

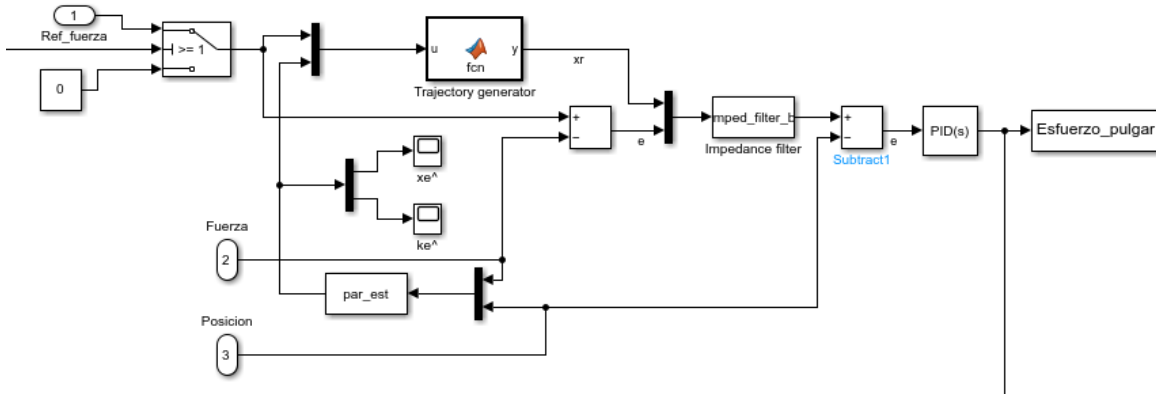
Figura 56 Esquema



Fuente autor.

El aporte en Seraji [57] justamente es la construcción de un sistema dinámico adaptativo con el cual estimar los parámetros \hat{x}_e y \hat{k}_e a partir de la posición y la fuerza, que se implementa en el bloque par_est del esquema en la Figura 57. En la misma figura, el bloque Generador de trayectoria implementa la ecuación 18, mientras que el bloque Filtro de impedancia implementa la ecuación 13.

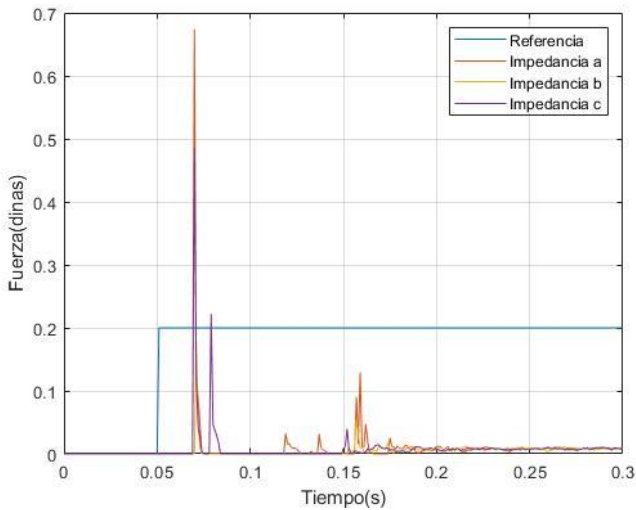
Figura 57 Esquema de control



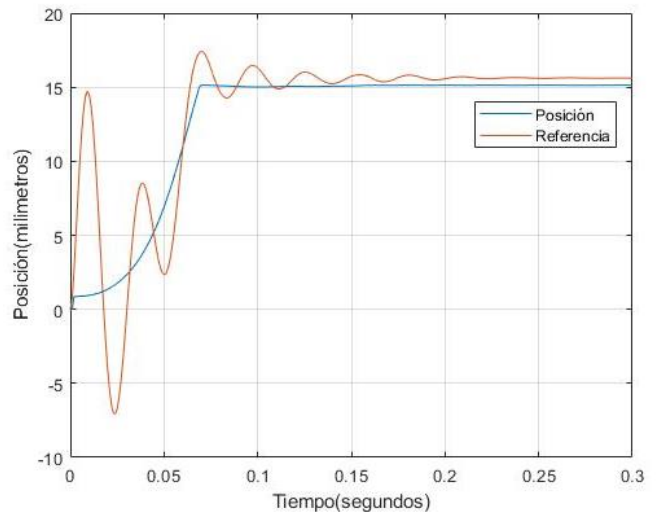
Fuente autor.

A continuación, se muestra el seguimiento de una fuerza constante de 0.2 dinas en el agarre, de los controladores impedancia a, impedancia b e impedancia c, en las Figuras 58, 57 y 59; con el respectivo seguimiento de trayectoria.

Figura 58 Control impedancia dedo anular



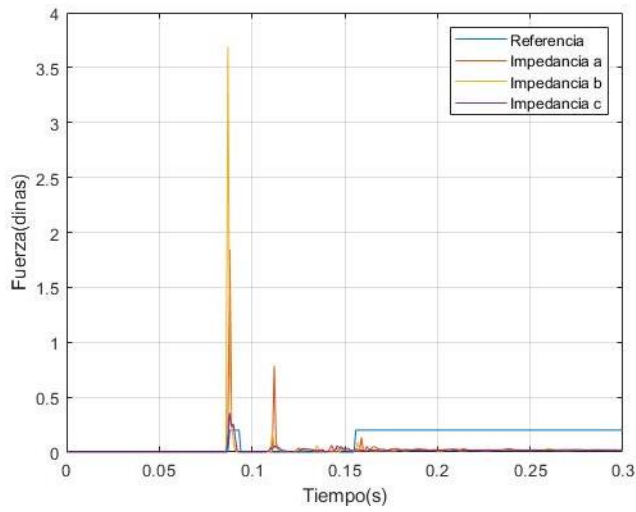
a) Seguimiento de fuerza



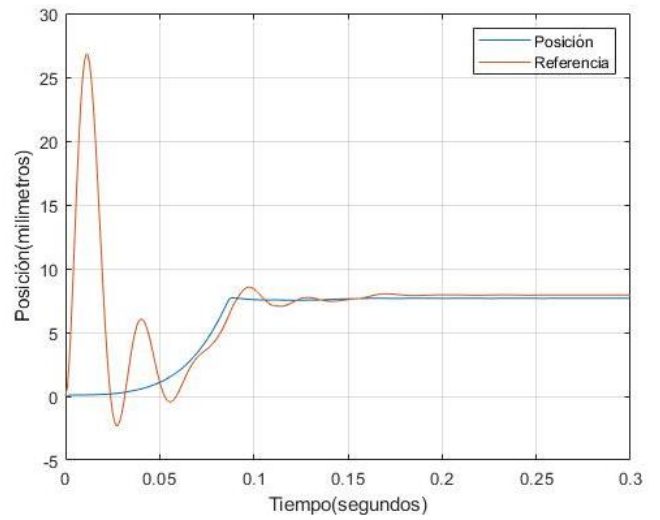
b) Seguimiento de trayectoria

Fuente autor.

Figura 59 Control impedancia dedo pulgar



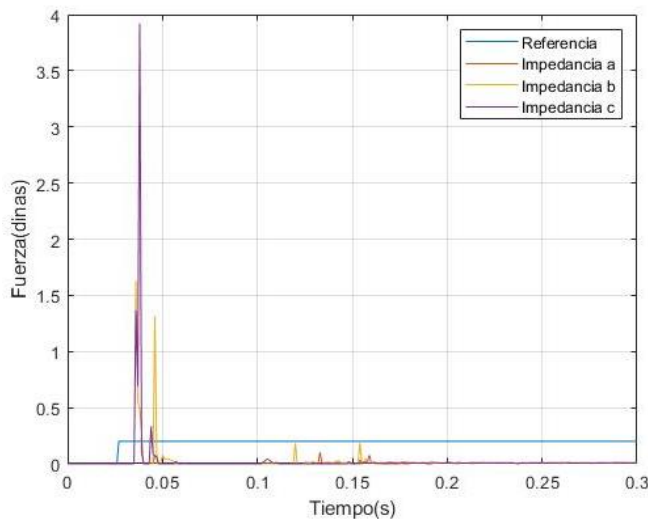
a) Seguimiento de fuerza



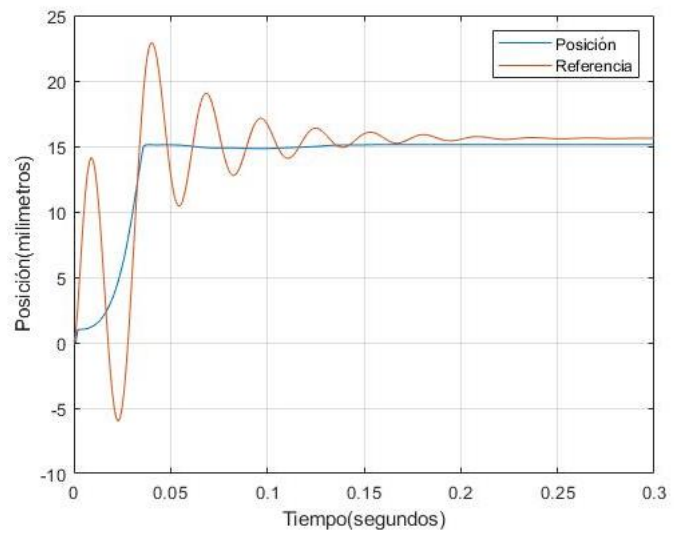
b) Seguimiento de trayectoria

Fuente autor.

Figura 60 Control impedancia dedo índice



a) Seguimiento de fuerza



b) Seguimiento de trayectoria

Fuente autor.

Capítulo II

Métricas de desempeño

Resumen: *En el presente capítulo se identifican métricas que permitan medir el desempeño de técnicas de control en la ejecución de agarres de poder en manos robóticas. Se describe cada métrica identificada, y se implementan en las técnicas de control seleccionadas en el capítulo I.*

Habiendo seleccionado las técnicas de control para agarres de poder, se procede a realizar una búsqueda de métricas que permitan evaluar el desempeño de tales técnicas.

2.1 Identificación de características de desempeño

En la identificación de características que permitan medir el desempeño de las técnicas de control en el agarre de poder, se encontró un estándar reciente de métricas de rendimiento y métodos de prueba para manos robóticas [12], que da a conocer algunas características para medir el desempeño y su método de prueba; donde se resalta la información de valor que puede ser proporcionada por las métricas de desempeño, sobre las capacidades de rendimiento en tareas y funciones de las manos robóticas, lo cual permite tener una visión para mejorar el diseño *hardware* y *software* de estas.

En [12] se definen las métricas de desempeño: fuerza del dedo, fuerza de agarre, resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre, sensibilidad al tacto, eficiencia de agarre, calibración de fuerza, seguimiento de la fuerza del dedo, manipulación con la mano, y estimación de la pose del objeto. En [58] se encuentran métricas como: distancia entre puntos de contacto y el centro de masa, área de agarre, forma de agarre, máxima fuerza resistida, y postura de las falanges de los dedos. En [59] se encuentran métricas como: volumen de agarre, oblicuidad y energía de agarre.

De las métricas encontradas en la literatura, se seleccionan aquellas que permitan medir características en el desempeño de agarres de poder, por tanto, se excluyen aquellas enfocadas al desempeño mecánico y agarres de precisión. Con esos criterios de exclusión, se eligen en este trabajo las métricas que son útiles en la evaluación del desempeño de las técnicas de control en los agarres de poder: resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre, eficiencia del agarre, seguimiento de fuerza y energía del agarre, correspondientes al estándar [12]. A continuación, se describen cada una de estas métricas seleccionadas.

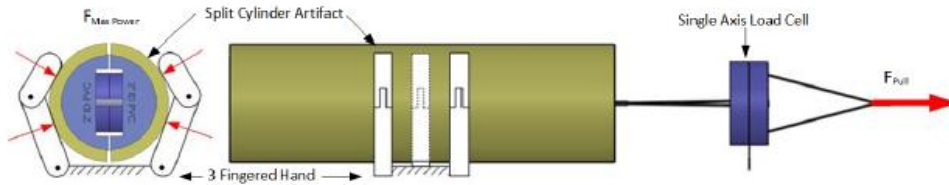
2.1.1 Resistencia al deslizamiento

Es una medida de la capacidad de una mano robótica para resistir el deslizamiento, cuyo objetivo es analizar las propiedades inherentes de fricción de la superficie de la mano. Con coeficientes de fricción altos, los dedos tendrán conos de fricción amplios en las áreas de contacto con un objeto. Este comportamiento permitiría que las fuerzas de fricción

contribuyan a la fuerza de agarre, produciendo una mayor resistencia al deslizamiento y, en general, una mayor eficiencia energética durante la ejecución del agarre.

Para su cálculo, se emplea un cilindro para el agarre de poder, eliminando el comportamiento indeseable del bloqueo de los dedos frente al objeto [12]. La configuración de agarre en esta prueba se ilustra en la Figura 61. Se observa dentro del cilindro las celdas de cargas para medir fuerza, y la celda de carga (*single axis load cell*) para medir la fuerza de tracción (F_{pull}).

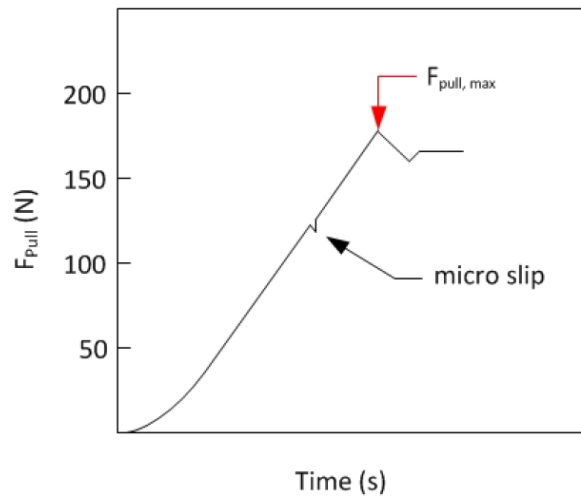
Figura 61 Ambiente de métrica de resistencia al deslizamiento



Fuente [12].

La medida de interés en esta prueba es la fuerza de tracción máxima F_{pull} , obtenible, antes del deslizamiento de la mano, bajo una fuerza de agarre máxima. En la Figura 62 se observa la presencia del deslizamiento (*micro slip*), al aplicar una fuerza de tracción al cilindro.

Figura 62 Deslizamiento.



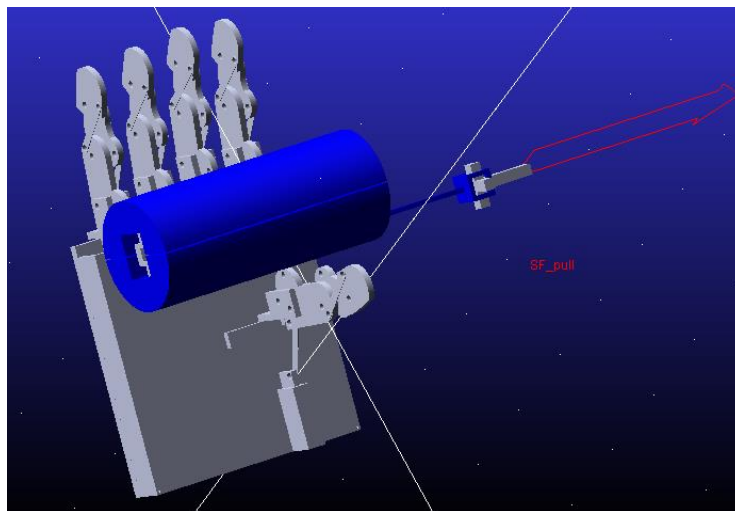
Fuente [12].

Prueba de la métrica en el ambiente virtual

Al prototipo de mano virtual se le incorpora un objeto cilíndrico para el agarre de poder, como ilustra en la Figura 63. Se ejecuta el agarre, y se aplica gradualmente una fuerza de tracción F_{pull} al cilindro, provocando el deslizamiento del objeto.

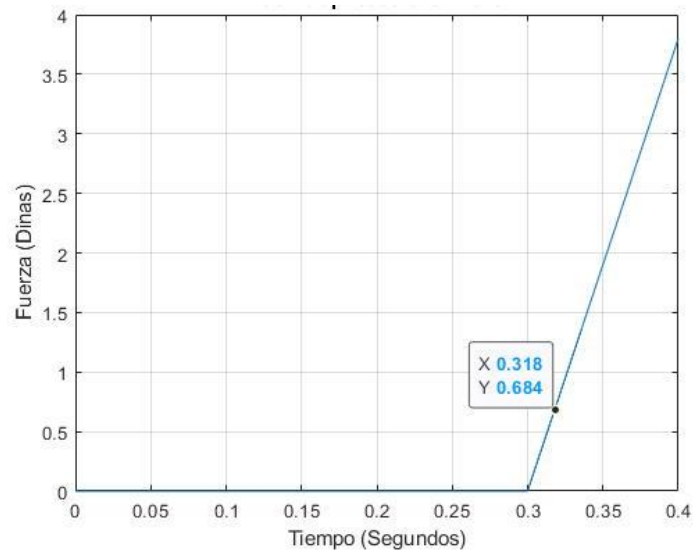
A modo de ejemplo se implementa el control PI adaptativo a, descrito en el capítulo I. Al aplicar una fuerza de tracción ilustrada en la Figura 64, se observa el inicio del deslizamiento del objeto para una fuerza de tracción de 0,684 dinas en $t=0,318$ segundos ilustrado en la Figura 65, frente a la fuerza aplicada al cilindro ilustrada en la Figura 66. Por tanto, la resistencia al deslizamiento del control PI adaptativo en la presente prueba es de 0,684 dinas, siendo esta la fuerza a partir de la cual se provoca el deslizamiento continuo del objeto.

Figura 63 Ambiente virtual



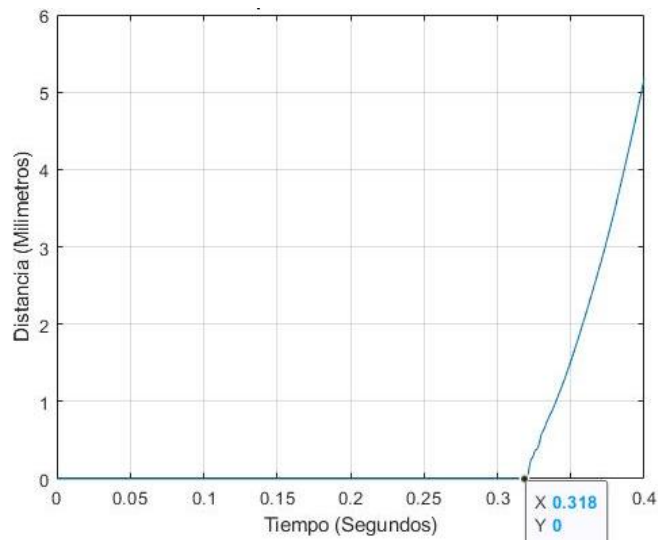
Fuente autor.

Figura 64 Fuerza de tracción



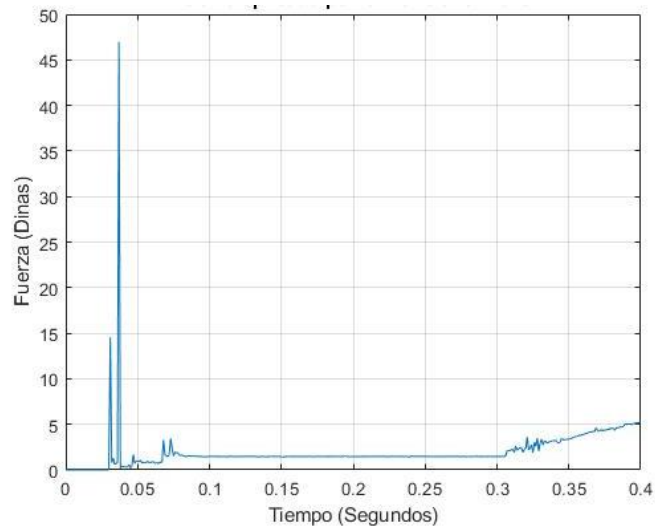
Fuente autor.

Figura 65 Deslizamiento



Fuente autor.

Figura 66 Fuerza de agarre (Fuerza entre las caras del cilindro)

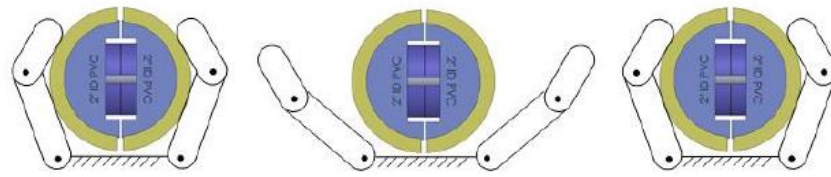


Fuente autor.

2.1.2 Tiempo de ciclo de agarre

Es una medida del tiempo mínimo requerido para que una mano robótica parta de una posición inicial y logre el agarre completo del objeto. Esta medida proporcionará información sobre el desempeño en cuanto a velocidad de apertura/cierre de una mano [12]. El esquema del ciclo de agarre de poder se ilustra en la Figura 67, donde la mano parte de una posición de apertura y luego entra en contacto con el objeto en el proceso de agarre.

Figura 67 Esquema del ciclo de agarre



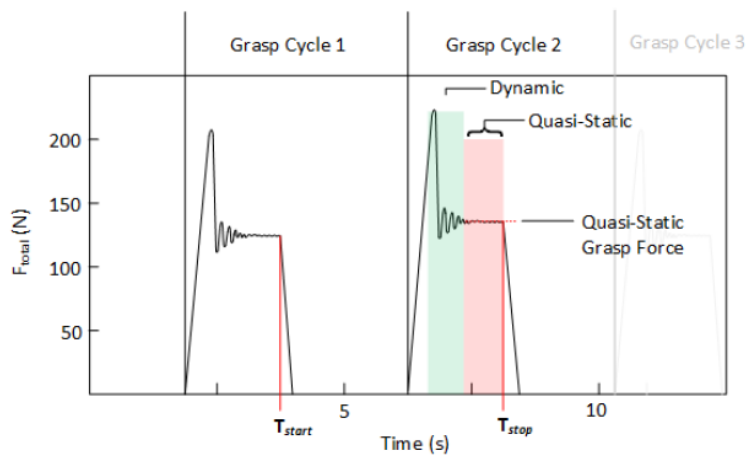
Fuente [12].

Considerando la Figura 68, donde se presentan dos ciclos de agarre consecutivos, se define el tiempo de ciclo de agarre $T_{grasp\ cycle}$ como:

$$T_{grasp\ cycle} = T_{stop} - T_{start} \quad (19)$$

Donde T_{start} es el tiempo de inicio del cierre de los dedos de la mano, y T_{stop} es el tiempo donde se obtiene una fuerza cuasi estática en el agarre, cuya lectura es en las celdas de carga. Las fuerzas de agarre cuasi estáticas (fuerza de agarre constante luego del transitorio) se eligen para la evaluación, ya que eliminan los efectos de impacto y proporcionan una estimación más precisa del tiempo requerido para alcanzar un objeto. En la Figura 68 se observa la fuerza cuasi estática en los dos ciclos de agarre, donde se toma T_{start} cuando la mano esta completamente abierta, y T_{stop} al obtener una fuerza cuasi estática en el agarre.

Figura 68 Representación de regiones de fuerza dinámica y cuasi estática durante los ciclos de agarre.

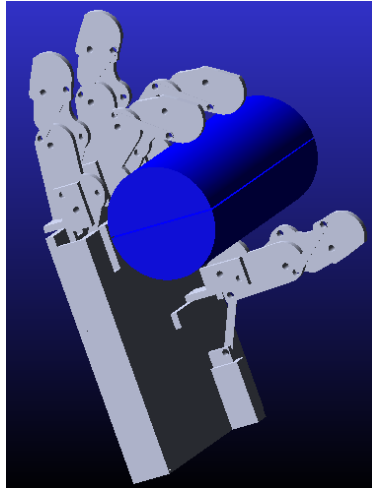


Fuente [12].

Cálculo de la métrica en el ambiente virtual

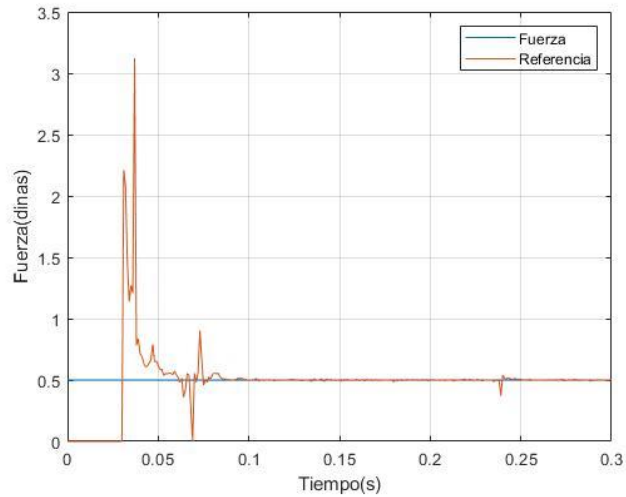
Se implementa el control PI adaptativo a, definiéndose una fuerza de referencia en el agarre de 0.5 dinas en el entorno virtual. Una vez agarrado el objeto como se ilustra en la Figura 69, se toma el valor del tiempo del agarre hasta obtener una fuerza estable con bajas variaciones; con lo cual se obtiene un tiempo de ciclo de agarre de 0.081 segundos, como se ilustra en la Figura 70.

Figura 69 Ambiente virtual



Fuente autor.

Figura 70 Presencia de fuerza cuasi estática



Fuente autor.

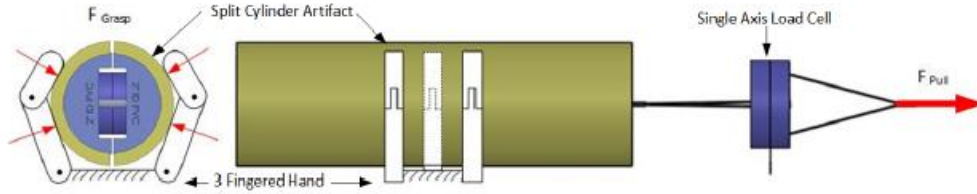
2.1.3 Eficiencia de agarre

Es una medida de la capacidad de la mano para regular la fuerza de agarre en presencia de fuerzas crecientes de perturbación del objeto, que provoquen el deslizamiento o pérdida de este, mientras se minimiza el esfuerzo general requerido. Esta medida proporcionará las capacidades de control y detección de una mano con respecto a la minimización del deslizamiento y la eficiencia al agarrar objetos en presencia de perturbaciones externas.

La configuración general para esta prueba se muestra en la Figura 71. El objeto cilíndrico se usa para medir la fuerza de agarre interna F_{grasp} entre ambas caras del cilindro, mientras se aplica una fuerza de tracción F_{pull} paralela al cilindro. Esta prueba supone que la mano del

robot es capaz de detectar fuerzas de deslizamiento, y aumenta F_{grasp} a medida que aumenta F_{pull} .

Figura 71 Configuración de eficiencia de agarre, F_{grasp} y F_{pull} .



Fuente [12].

En este método de prueba, se ordena a la mano que realice un agarre inicial utilizando la fuerza mínima requerida para restringir el artefacto $F_{grasp,min}$. Luego, el F_{pull} aumenta constantemente, acercándose finalmente a $F_{pull,max}$, como se define en la prueba de resistencia al deslizamiento. F_{grasp} y F_{pull} se registran durante toda la prueba. F_i representa la fuerza en las n celdas de carga al interior del cilindro, las cuales miden la fuerza en forma axial.

$$F_{grasp} = \sum_{i=1}^n F_i \quad (20)$$

Para cada ciclo de prueba, se calcula la eficiencia de agarre (E_{grasp}) en cada punto con base al tiempo de muestreo, recolectado de la fuerza de agarre inicial $F_{grasp,min}$ hasta alcanzar $F_{pull,max}$. Se calcula la eficiencia de agarre como:

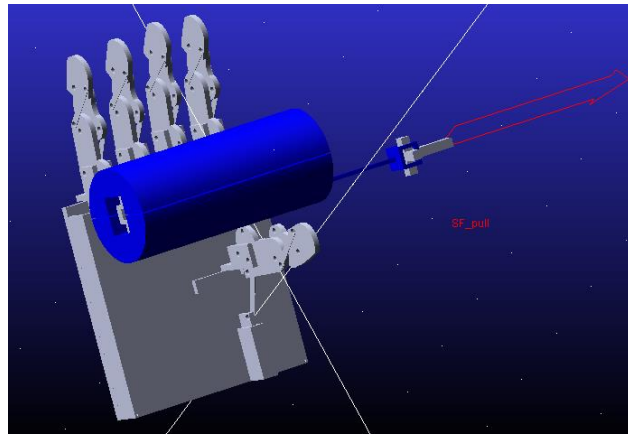
$$E_{grasp} = \sum_{i=1}^n \frac{F_{pull}}{F_{grasp}} \quad (21)$$

Prueba de métrica en ambiente virtual

Se realiza el agarre de un cilindro como se ilustra en la Figura 72, y al obtener una fuerza cuasi estática se aplica gradualmente una fuerza de tracción F_{pull} , observando el valor de fuerza a partir del cual se produce el deslizamiento continuo.

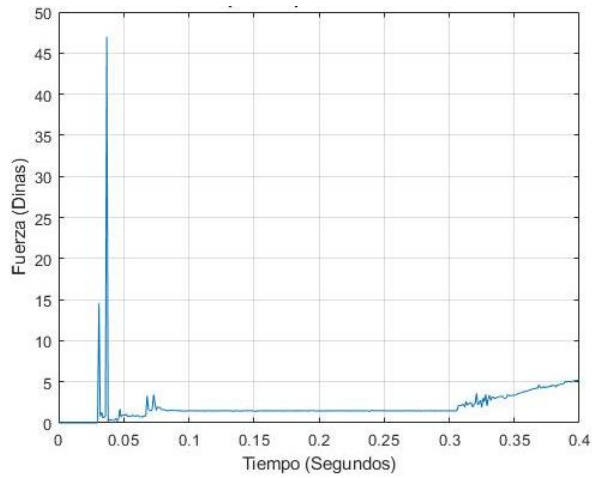
Un control PI adaptativo se implementa, se agarra el objeto hasta obtener una fuerza cuasi estática, posteriormente se aplica una fuerza de tracción paralela al cilindro como se ilustra en la Figura 74. Se observa el desplazamiento de cilindro en $t=0.318$ segundos como se ilustra en la Figura 73 b), tras ello se genera un cambio en la fuerza de agarre para contrarrestar el deslizamiento, como se ilustra en la Figura 73 a).

Figura 72 Ambiente virtual

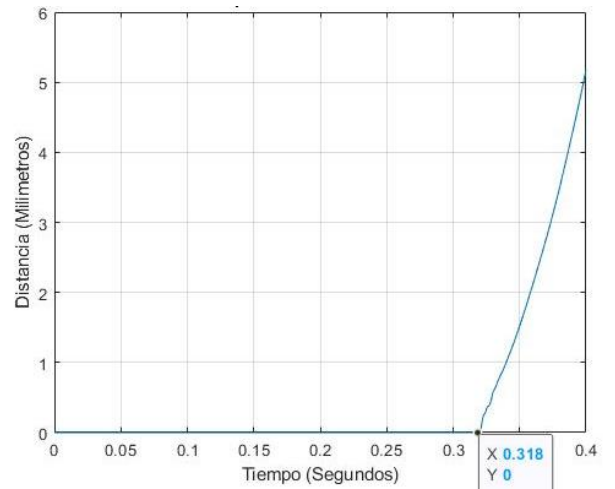


Fuente autor.

Figura 73 Fuerza entre caras del cilindro a) y Valor de deslizamiento b)



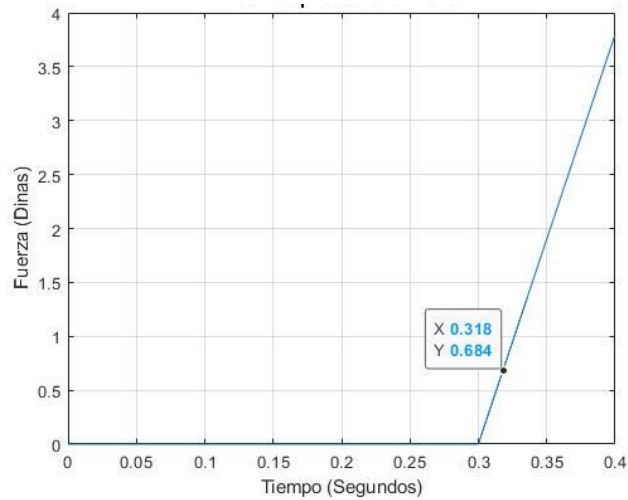
a)



b)

Fuente autor.

Figura 74 Fuerza de tracción



Fuente autor

Se toma los valores de la fuerza de agarre F_{grasp} y la fuerza de tracción F_{pull} , se suma su cociente en cada punto de la interacción. En el presente caso de estudio, F_{grasp} es la fuerza de contacto entre las caras del cilindro, donde se simula una celda de carga.

2.1.4 Seguimiento de la fuerza

Es una medida respecto a la capacidad de aplicar fuerzas de contacto deseadas al objeto. Esta capacidad es particularmente importante para algoritmos de control en manipulación y agarre robóticos de última generación, que utilizan enfoques de control basados en la fuerza. Además, esta capacidad se puede utilizar para la planificación de agarre basada en contacto, y la localización de objetos.

El método de prueba busca capturar el desempeño de seguimiento de fuerza de un dedo individual de una mano robótica. La prueba comienza ordenando al dedo bajo prueba que siga un perfil de fuerza deseado al contacto con un dispositivo conectado a una celda de carga de referencia. Para ello se tienen en consideración los siguientes conceptos:

- Magnitud de la fuerza

Se calcula el error cuadrático medio (RMSE) entre las magnitudes de fuerza deseadas ($\|Fd\| \in R$) y las medidas por el sensor de fuerza de referencia ($\|Fl\| \in R$) para los datos recopilados. En el caso de una celda de carga de un solo eje, la fuerza del sensor debe aplicarse a lo largo del eje de la celda de carga. Para hallar el valor RMSE se tomó como referencia a [60].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (22)$$

- Dirección de fuerza

Se calcula el RMSE entre la dirección de fuerza deseada ($\|Fd\| \in R^{3 \times 1}$) y la dirección medida por la celda de carga externa ($\|Fl\| \in R^{3 \times 1}$). Esta medida tiene tres dimensiones (una para cada eje) y, por lo tanto, requiere el uso de una celda de carga de tres ejes. Nota: Solo se realiza en manos robóticas con suficientes grados de libertad.

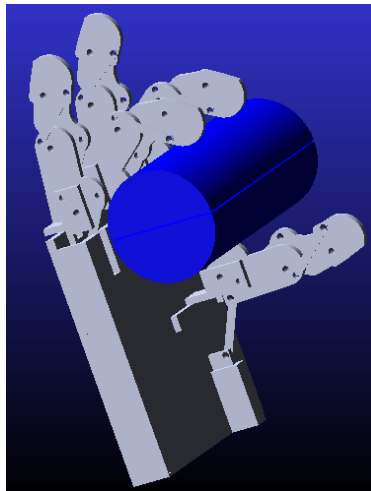
- Sobreimpulso

Se calcula el máximo sobreimpulso ($\|F_{peak}\| \in R$) de la magnitud de la fuerza de contacto medida por el sensor de referencia. Esta medida dará un límite superior a la respuesta de control del dedo.

Cálculo de la métrica en el ambiente virtual

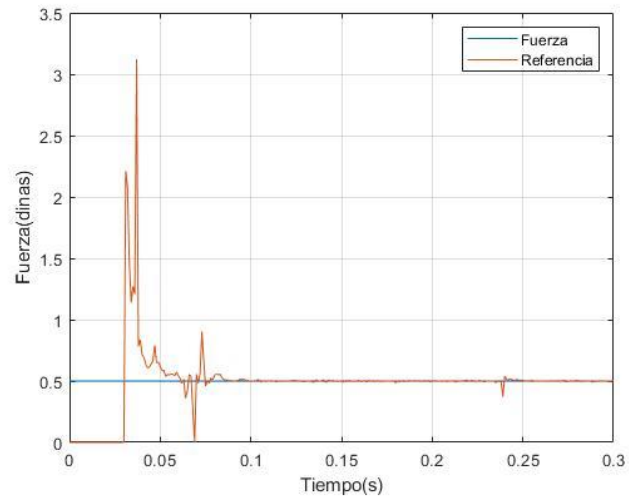
Se implementa un control PI adaptativo en el agarre de un cilindro como se ilustra en la Figura 75, con una fuerza de referencia constante de 0.5 dinas; durante el agarre se obtiene un sobreimpulso de 3.127 dinas como se ilustra en la Figura 76. Al calcular el valor del error medio cuadrático se obtiene un valor de 0.3087 dinas.

Figura 75 Ambiente virtual



Fuente autor.

Figura 76 Seguimiento de fuerza constante



Fuente autor.

Capítulo III

Índice de desempeño

Resumen: En el presente capítulo se propone un índice compuesto en función de métricas de desempeño, que brinde como resultado un valor que permita analizar la incidencia de un controlador en el agarre de poder. Luego se valida el índice de compuesto en la evaluación del desempeño de técnicas de control en agarres de poder, en una mano prototipo virtual.

En la búsqueda de un indicador que permita medir el desempeño de técnicas de control, se define una fórmula matemática en función de las métricas de resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre, eficiencia del agarre, y seguimiento de la fuerza. Lo cual consta de las siguientes etapas: 1) análisis de datos, 2) propuesta de un índice compuesto dependiente de las métricas de desempeño, y 3) validación del índice compuesto en la evaluación de técnicas de control.

3.1 Análisis de datos

Se presentan los datos obtenidos en las pruebas de las métricas de desempeño en el entorno virtual, presentados en el capítulo II. En la implementación de las métricas se utilizan cuatro enfoques de control: PI adaptativo, PI difuso, cascada e impedancia. En cada enfoque se utilizan tres series de parámetros de sintonía diferentes, cada una de las cuales logra la tarea de control, pero buscando (sin un método específico) una buena sintonía, una sintonía no muy buena, y otra intermedia (con base en la respuesta transitoria del seguimiento a las consignas), de tal manera que se cuenta con un total de 12 muestras de controladores denominados: control PI adaptativo a, control PI adaptativo b, control PI adaptativo c, control PI difuso a, control PI difuso b, control PI difuso c, control adaptativo a, control impedancia b, control impedancia b, control impedancia c, control en cascada a, control en cascada b, y control en cascada c.

3.1.1 Resistencia al deslizamiento

En el cálculo de índice es conveniente normalizar los datos obtenidos, por tanto, se implementa el método de normalización de re-escalamiento [61], con base a la siguiente ecuación:

$$\text{Valor_normalizado}_{q_c}^t = \frac{x_{q_c}^t - \min_c(x_{q_c}^t)}{\max_c(x_{q_c}^t) - \min_c(x_{q_c}^t)} \quad (23)$$

Donde $\max_c(x_{q_c}^t)$ y $\min_c(x_{q_c}^t)$ es el valor máximo y mínimo del valor $x_{q_c}^t$ obtenido en el momento t, y $x_{q_c}^t$ es el valor por normalizar.

En la Tabla 2 se muestran los datos experimentales. Se observa el mayor desempeño en el control cascada c y el menor desempeño en el PI adaptativo c.

Tabla 2 Datos – Resistencia al deslizamiento

Controlador	Resistencia al deslizamiento (dinas)
1. Control PI adaptativo a	0.532
2. Control PI adaptativo b	0.532
3. Control PI adaptativo c	0.304
4. Control PI difuso a	0.456
5. Control PI difuso b	0.456
6. Control PI difuso c	0.456
7. Control en cascada a	0.684
8. Control en cascada b	0.684
9. Control en cascada c	0.950
10. Control impedancia a	0.684
11. Control impedancia b	0.684
12. Control impedancia c	0.684

Fuente autor.

3.1.2 Tiempo de ciclo de agarre

En la Tabla 3 se muestran los valores de tiempo de ciclo de agarre, donde el mayor desempeño es logrado por el control cascada a y b, presentan el más bajo valor del tiempo; y el más bajo desempeño lo presenta el control difuso c, puesto que tiene el valor más alto de tiempo de ciclo de agarre.

Tabla 3 Datos – Tiempo de ciclo de agarre

Controlador	Tiempo ciclo de agarre (segundos)
1. Control PI adaptativo a	0.163
2. Control PI adaptativo b	0.163
3. Control PI adaptativo c	0.174
4. Control PI difuso a	0.222
5. Control PI difuso b	0.205
6. Control PI difuso c	0.279
7. Control en cascada a	0.147
8. Control en cascada b	0.147
9. Control en cascada c	0.166
10. Control impedancia a	0.300
11. Control impedancia b	0.300

12. Control impedancia c	0.300
--------------------------	-------

Fuente autor.

3.1.3 Eficiencia del agarre

En la Tabla 4 se muestran los valores de la eficiencia de agarre. El mayor desempeño es logrado por el control adaptativo c, al presentar el valor más alto de eficiencia; y el control en cascada b tiene el valor más bajo de eficiencia.

Tabla 4 Datos – Eficiencia del agarre

Controlador	Eficiencia de agarre (%)
1. Control PI adaptativo a	0.315
2. Control PI adaptativo b	0.266
3. Control PI adaptativo c	3.466
4. Control PI difuso a	3.157
5. Control PI difuso b	3.108
6. Control PI difuso c	3.151
7. Control en cascada a	1.066
8. Control en cascada b	0.236
9. Control en cascada c	0.518
10. Control impedancia a	65.099
11. Control impedancia b	89.001
12. Control impedancia c	29

Fuente autor.

3.1.4 Seguimiento de fuerza

En la Tabla 5 se observan los valores de sobreimpulso, donde el mayor desempeño es logrado por el control adaptativo a y b, al tener el menor sobreimpulso; y el control impedancia a tiene el más bajo desempeño al presentar el mayor sobreimpulso.

Tabla 5 Datos – Sobreimpulso

Controlador	Sobreimpulso (dinas)
1. Control PI adaptativo a	0.350
2. Control PI adaptativo b	0.350
3. Control PI adaptativo c	0.553
4. Control PI difuso a	0.848
5. Control PI difuso b	1.252
6. Control PI difuso c	1.113

7. Control en cascada a	0.853
8. Control en cascada b	0.853
9. Control en cascada c	0.723
10. Control impedancia a	1.383
11. Control impedancia b	1.832
12. Control impedancia c	1.587

Fuente autor.

De igual forma se procede con error medio cuadrático, como se muestra en la Tabla 6, donde el mayor desempeño es logrado por el control cascada a y b, con el valor más bajo de error; y el menor desempeño lo presenta el control adaptativo c, al tener el mayor valor de error medio cuadrático.

Tabla 6 Datos – Error medio cuadrático

Controlador	Error medio cuadrático (dinas)
1. Control PI adaptativo a	0.454
2. Control PI adaptativo b	0.454
3. Control PI adaptativo c	0.927
4. Control PI difuso a	0.275
5. Control PI difuso b	0.395
6. Control PI difuso c	0.849
7. Control en cascada a	0.270
8. Control en cascada b	0.270
9. Control en cascada c	0.554
10. Control impedancia a	0.712
11. Control impedancia b	1.143
12. Control impedancia c	1.470

Fuente autor.

Una vez llevadas a cabo las mediciones de las métricas, en cada uno de los controladores; se procede a dar a conocer las variantes en el proceso de desarrollo de un indicador compuesto de desempeño, y la propuesta de este en la evaluación del desempeño de controladores en agarres de poder en manos robóticas.

3.2 Propuesta de un indicador de desempeño

Un indicador es un dato o un conjunto de datos que ayudan a medir objetivamente la evolución de un proceso o una actividad [62]. Este debe cumplir con características como: pertinencia, validez, fiabilidad, comparabilidad, comunicabilidad, resistencia a la manipulación y factibilidad. Habitualmente los indicadores no se operan de forma individual, se manejan formando parte de sistemas estructurados de indicadores, que permitan medir el

grado de cumplimiento de los objetivos planteados. Es deseable que estos sistemas satisfagan características como: completitud, pertinencia, simplicidad, precisión y utilidad. Se distinguen dos tipos de indicadores, simples y compuestos; el indicador simple se define como una función de una o más variables que conjuntamente miden una característica; y el indicador compuesto, se define como una combinación matemática de indicadores simples [61].

Con la finalidad de definir un indicador de desempeño para evaluar la incidencia de técnicas de control en el agarre de poder, se implementa una metodología propuesta en [61] y [63], que permite el desarrollo de estos. A continuación, se describen en la Tabla 7 las etapas para la construcción de un indicador compuesto:

Tabla 7 Etapas – Indicador compuesto

Etapa	Definición
1. Desarrollo de un marco conceptual teórico	Proporciona la base para la selección y combinación de indicadores simples utilizados en la construcción del IC.
2. Selección de un conjunto de indicadores simples	La selección debe basarse en la mensurabilidad, la cobertura de las unidades de análisis, la pertinencia de los indicadores que se utilizan para medir el fenómeno y la relación entre ellos.
3. Tratamiento de datos	El tratamiento de datos consiste en imputar datos faltantes, examinar la presencia de valores atípicos y transformar datos sesgados.
4. Análisis multivariante	Se aplica para estudiar la estructura subyacente de los datos, evaluar la idoneidad de los indicadores simples seleccionados y guiar las elecciones metodológicas posteriores.
5. Normalización de los datos	Debe llevarse a cabo para hacer comparables los indicadores simples.
6. Ponderación y agregación de indicadores simples	Debe realizarse siguiendo las líneas del marco conceptual teórico definido.
7. Análisis de incertidumbre y sensibilidad del IC	Se realiza para evaluar la calidad y robustez del IC teniendo en cuenta las diferentes elecciones metodológicas realizadas durante su construcción.
8. Identificación de indicadores simples con el IC	Deben identificarse los indicadores simples que afectan positiva o negativamente al valor final del IC para cada unidad de análisis. La transparencia, tanto en el proceso como en los resultados, es primordial para un buen análisis y una buena formulación.
9. Visualización de resultados	Esta etapa debe recibir una especial atención, dado que la visualización del IC puede influir en su interpretación.

Fuente [61].

Teniendo en cuenta las etapas para la construcción de un indicador compuesto, se procede a implementarlas en el desarrollo de un IC, que permita evaluar la incidencia de una determinada técnica de control en el agarre de poder. A continuación, se presentan cada una de las etapas:

3.2.1 Desarrollo de un marco conceptual teórico

El marco conceptual debe ser lo más inteligible y detallado posible para disponer de una mejor definición del IC y las relaciones entre los indicadores simples que lo componen. Para ello, es necesario tener categorizado de forma amplia, el contexto de análisis y tener comprensión del fenómeno a medir [61]. En el presente proyecto de investigación, el contexto de análisis se centra en la búsqueda de un indicador, que permita la evaluación del desempeño de técnicas de control en el agarre de poder en manos robóticas.

En la evaluación del desempeño de los controladores para el agarre de objetos, hasta el momento en la literatura los trabajos encontrados proponen un determinado controlador, evalúan su desempeño en cuanto a la finalidad del controlador, tal como seguimiento de consignas de posición y fuerza, sin tener en consideración métricas de desempeño del agarre tales como: resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre, y eficiencia del agarre. 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 una característica de desempeño del agarre.

Con el indicador compuesto se espera brindarle al diseñador una perspectiva sobre el desempeño de las estrategias de control en agarres de poder, y con ello facilitar la toma de decisión acerca de la estrategia más adecuada para el logro de una característica de desempeño del agarre.

3.2.2 Selección de un conjunto de indicadores simples

La calidad de un IC es consecuencia directa de la calidad de los indicadores simples que lo definen. Por ello, los indicadores simples deben seleccionarse en base a su calidad, relevancia, disponibilidad y frecuencia con la que se muestrean. El sistema de indicadores debe cumplir ciertas propiedades que permitan medir el grado de cumplimiento de los objetivos planteados en el estudio [61].

En la búsqueda de indicadores simples relevantes en la construcción del indicador compuesto, se encontraron las métricas descritas en el Capítulo II: resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre, eficiencia de agarre, y seguimiento de fuerza.

En la Tabla 8 se aprecian las unidades de medida y características de los cinco indicadores simples (métricas), que forman parte del indicador compuesto a proponer.

Tabla 8 Indicadores simples

Métrica	Unidades	Características
Resistencia al deslizamiento	Dinas	Representa la fuerza de tracción máxima soportada por la mano antes de presentarse el deslizamiento del objeto agarrado.
Tiempo de ciclo de agarre	Segundos	Representa el tiempo mínimo que le toma a la mano el cierre y apertura, en el proceso de agarre de un objeto.
Eficiencia del agarre	Porcentual	Representa el cambio de la fuerza aplicada por la mano frente a la presencia del deslizamiento del objeto.
Seguimiento de fuerza (error)	Dinas	Representa el error en el seguimiento de fuerza de referencia aplicada a un objeto.
Seguimiento de fuerza (sobrepulso)	Dinas	Representa el máximo sobrepulso obtenido en el seguimiento de una fuerza de referencia.

Fuente autor.

3.2.3 Tratamiento de datos

El tratamiento de los datos se centra en el estudio de la calidad de los indicadores candidatos a definir en el IC. Para ello, los indicadores se analizan a nivel univariante con los siguientes objetivos: calcular datos estadísticos descriptivos de los indicadores, identificar valores faltantes, y aplicar las técnicas de imputación de datos si se considera adecuado. A continuación, se dan a conocer los pasos propuestos para el tratamiento de datos en [61]:

a) Imputación de datos

Consiste en la sustitución de valores no medidos o faltantes en una observación, por otros valores con un determinado método de imputación, como lo sugiere [64]. En el presente proyecto de investigación, no ha sido necesario la imputación de datos, puesto que se han logrado medir todos los indicadores en cada una de las técnicas de control.

b) Análisis descriptivo de los indicadores

Consiste en obtener datos estadísticos de los indicadores, como: la media, desviación estándar, asimetría y curtosis. En la Tabla 9 se aprecian los datos estadísticos descriptivos básicos del comportamiento de cada uno de los indicadores simples. Se tienen cuatro técnicas de control y cada una se sintonizo con tres series de valores diferentes; con lo cual se tiene una muestra de 12 controladores para el análisis de las cinco métricas.

Tabla 9 Tratamiento de datos

Métrica	N	Media	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
Resistencia al deslizamiento	12	0.592	0.162	0.398	0.680
Tiempo de ciclo de agarre	12	0.214	0.061	0.491	-1.695
Eficiencia de agarre	12	16.532	28.524	1.926	2.693
Sobreimpulso	12	0.975	0.451	0.383	-0.652
Error	12	0.648	0.367	1.001	0.289

Fuente autor.

El coeficiente de asimetría indica si la mayoría de los datos se encuentran por encima de la media, por debajo de la media o distribuidos con un mismo número de elementos por encima y por debajo de la media. Observando la Tabla 9, todos los indicadores simples presentan una cola de distribución de sus datos por encima de la media.

El coeficiente de curtosis indica el grado de concentración de los datos alrededor de la media. Observando la Tabla 9, la eficiencia de agarre posee la mayor concentración de datos respecto a la media, y el tiempo de ciclo de agarre los datos más dispersos respecto a la media.

La desviación estándar indica el grado de dispersión de los datos alrededor de la media. Observando la Tabla 9, la eficiencia de agarre posee la mayor dispersión de datos alrededor de la media, y el tiempo de ciclo de agarre la menor dispersión.

3.2.4 Análisis multivariante

Ocasionalmente se seleccionan indicadores simples de una forma aleatoria, prestando poca atención a las posibles relaciones entre ellos. Esto puede conducir a la construcción de ICs con un mensaje confuso y equivocado para las partes interesadas. Algunos analistas denominan esta situación como indicadores ricos con escasa información. Es por ello por lo que la naturaleza de los datos subyacentes, deben analizarse con mucho cuidado, previamente a la construcción del IC. El uso de técnicas multivariantes permite evaluar la idoneidad del conjunto de datos, y facilitar la comprensión de las elecciones metodológicas tomadas durante el proceso de construcción del indicador [61].

La información debe agruparse y analizarse como mínimo en función de dos dimensiones del conjunto de datos: los indicadores individuales que son los que definen el concepto multidimensional que se pretende medir, y las unidades de análisis que corresponden a cada una de las observaciones, sobre las cuales se miden los indicadores simples definidos [61]. Los pasos a seguir para aplicar un análisis multivariante como un análisis exploratorio son:

- Cálculo de la matriz de correlaciones: si las correlaciones entre los indicadores simples son bajas, es muy probable que no compartan factores comunes.
- Identificar el número de factores necesarios para representar el conjunto de datos y el método para calcularlos.

- Aplicar si es necesario, una rotación sobre los factores para facilitar la interpretación de los resultados.

Para poder aplicar el análisis multivariante se deben cumplir una serie de supuestos, enumerados a continuación, sin embargo, estos supuestos se descuidan con frecuencia en el desarrollo de indicadores compuestos [61].

- Poseer un numero de observaciones suficientemente grande.
- Que no haya sesgo de selección de las variables.
- Que no haya datos atípicos.
- Correlación fuerte entre las variables.

A continuación, se da a conocer la información agrupada con respecto a los indicadores individuales y grupales:

1) Información agrupada con respecto a los indicadores individuales

Lo compone la matriz de correlación, la prueba de esfericidad de Barret, la rotación de factores, y la extracción de componentes principales.

a) Matriz de correlación

Se calcula la matriz de correlación, ilustrada en la Tabla 10, la cual permite conocer el grado de correlación entre cada uno de los indicadores simples. Se tomo un total de 12 muestras por cada indicador simple. Se observa una moderada correlación entre la eficiencia y el ciclo de agarre, el ciclo de agarre y el sobreimpulso, la eficiencia y el sobreimpulso

Tabla 10 Matriz de correlación

	Resistencia deslizamiento	Tiempo de Ciclo de agarre	Eficiencia	Sobreimpulso	Error
Resistencia deslizamiento	1				
Ciclo de agarre	0.027	1			
Eficiencia	0.266	0.752	1		
Sobreimpulso	0.248	0.836	0.774	1	
Error	0.034	0.726	0.566	0.604	1

Fuente autor.

b) Prueba de esfericidad de Bartlett

El test de esfericidad de Bartlett pone a prueba la hipótesis de que las variables analizadas no está correlacionadas en la muestra o dicho de otro modo, que la matriz de correlación es la identidad (las intercorrelaciones entre las variables son cero). Este estadístico se distribuye asintóticamente según una distribución χ^2 con $\frac{p(p-1)}{2}$ grados de libertad. Valores altos del estadístico, asociados a valores pequeños de significatividad, permitirán rechazar la hipótesis

nula y concluir que las variables de la muestra están suficientemente correlacionadas entre sí para realizar el análisis factorial. Cabe destacar, que, aunque esta no permitirá rechazar la hipótesis nula, podrían calcularse los factores, aunque estos serían completamente espurios y no responderían a correlaciones presentes entre las variables [65].

Para comprobar el grado de relación conjunta entre las variables hay que realizar la prueba de adecuación de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) que permite valorar el grado en que cada una de las variables es predecible a partir de las demás. Este estadístico se distribuye en valores entre 0 y 1, y cuanto mayor es el valor, más relacionadas estarán las variables entre si. Kaiser recomienda considerar la matriz apropiada para realizar la factorización cuando el valor de este indicador sea mayor o igual que 0,8 [65].

Se utiliza para probar la hipótesis nula, que afirma que las variables no están correlacionadas en la población. Es decir, comprueba si la matriz de correlación es una matriz identidad. Si las variables están correlacionadas, entonces la prueba debe presentar un valor superior al límite de 0.05 [66]. En este caso se rechaza la hipótesis nula y se continua con el análisis.

En el presente caso de estudio se utilizó el programa *IBM SPSS Statistics 25* [67], con lo cual se obtiene un valor de significancia de 0.026 y un KMO de 0.545, lo cual indica una correlación baja entre las métricas.

c) Rotación de factores

Para mejorar la interpretación de los resultados a partir de la solución inicial, se aplica procedimientos de rotación de factores. Se trata de que cada uno de los indicadores, tenga una correlación lo más próxima posible a la unidad con uno de los factores y próxima a cero con el resto. Por tanto, cada factor tendrá una correlación alta con un grupo de variables y baja con el resto, y de esta forma facilitar la interpretación de los factores [61].

Existen dos formas básicas de realizar la rotación de factores: rotación ortogonal y rotación oblicua. En la primera los ejes se rotan de forma que quede preservada la correlación entre los factores. Entre los diferentes procedimientos de rotación ortogonal el método Varimax normalizado es el más aplicado y conocido, y se obtiene maximizando la suma de varianzas de las cargas factoriales al cuadrado, dentro de cada factor una vez normalizadas con la normalización de Kaiser. En la rotación oblicua los ejes no son ortogonales con lo que se pierde una propiedad deseable para los factores, pero es un método interesante si se consigue una asociación más nítida de cada indicador con el factor correspondiente. El método de rotación oblicua más usado es el denominado Oblimin con la normalización de Kaiser [61].

En el presente proyecto de investigación se implementa el tipo de rotación ortogonal, con el fin de mejorar la interpretación de los factores, aplicando una rotación Varimax, obteniéndose un porcentaje de varianza explicado por los dos primeros componentes del 84.268%, como se observa en la Tabla 11.

d) Extracción del número de componente principales

La idea central del análisis de componentes principales es conseguir la simplificación de un conjunto de datos, generalmente cuantitativos, procedentes de un conjunto de variables interrelacionadas. Este objetivo se alcanza obteniendo, a partir de combinaciones lineales de las variables originalmente medidas, un nuevo conjunto de igual número de variables, no correlacionadas, llamadas componentes principales (CP) en las cuales permanece la variabilidad presente en los datos originales, y al ordenarlas decrecientemente por su varianza, permite explicar el fenómeno de estudio con las primeras CP.

Con ello se consigue: a) sintetizar la información procedente de un volumen importante de datos recogidos en una investigación en particular; b) crear nuevos indicadores o índices, representados por las CP; y c) utilizar el ACP como paso previo a otras técnicas [68].

En la Tabla 11 se ilustran los autovalores calculados con sus correspondientes porcentajes de varianza explicada, donde se aprecia dos componentes explicando el 84.268% de la varianza. La tabla de autovalores iniciales se obtiene utilizando la herramienta estadística *IBM SPSS Statistics 25* [67].

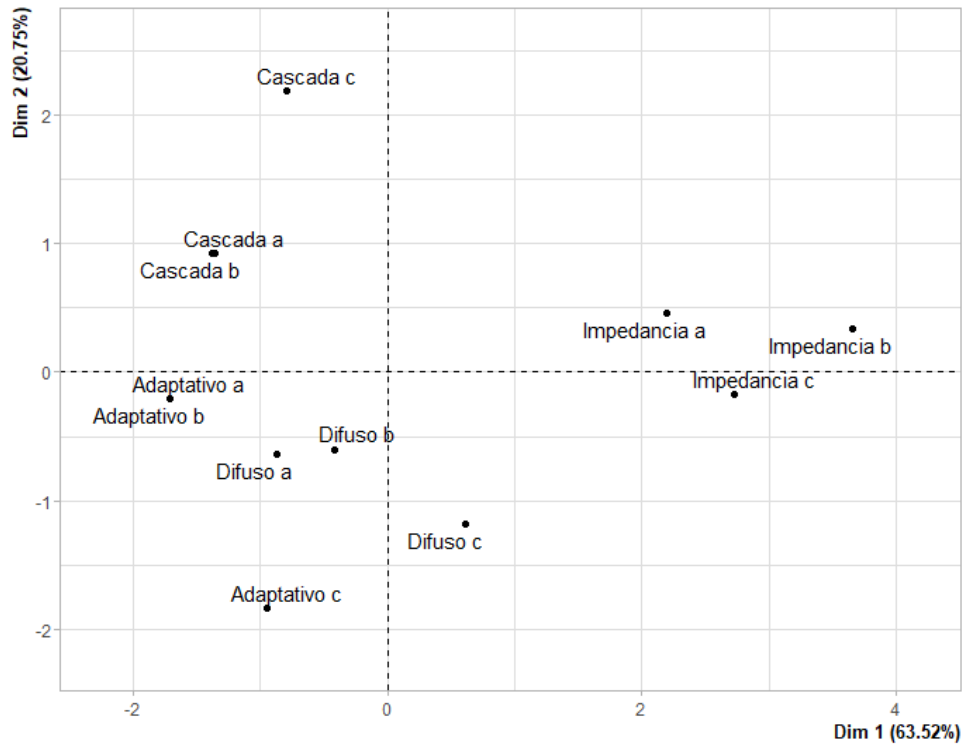
Tabla 11 Autovalores iniciales

Componente	Autovalores iniciales		
	Total	% de varianza	% acumulado
1	3.176	63.522	63.522
2	1.037	20.746	84.268
3	0.428	8.557	92.825
4	0.239	4.784	97.609
5	0.120	2.391	100.000

Fuente autor.

Tomando dos componentes principales con base al criterio de Kaiser, el cual se basa en retener aquellos factores que tienen autovalores que exceden de la media del conjunto de todos los autovalores [61]; los cuales explican el 84.268% de la varianza, para ello se implementa la herramienta de análisis estadístico *R Commander* [69] en el análisis de componentes principales. Se obtiene el plano principal con los 12 controladores y los dos componentes principales, que se pueden denominar dimensiones, como se ilustra en la Figura 77. De esta gráfica se concluyen dos hechos. El primero, que se comprueba la hipótesis subyacente en este trabajo de investigación, la cual es que el tipo de técnica de control empleado tiene incidencia en el desempeño del agarre de poder, lo cual se evidencia notando que las diferentes estrategias de control aparecen en racimos diferenciados en la figura 70. El segundo hecho, es que sería posible identificar algún grado de similitud entre técnicas de control diferentes como en los casos del control cascada y difuso, los cuales aparecen en racimos con centros similares en la figura 77.

Figura 77 Dimensiones

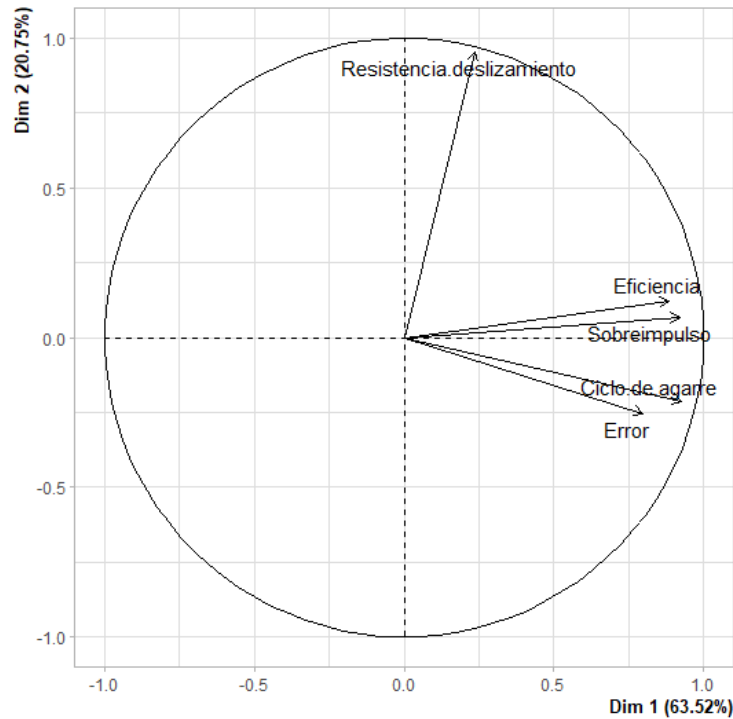


Fuente autor.

La información en la tabla 10 también puede interpretarse de forma gráfica como en la figura 78, donde la cercanía entre vectores refleja la mayor correlación entre componentes.

La matriz de cargas factoriales ilustrada en la Tabla 12, describe la orientación en dos dimensiones (componentes principales), de cada uno de los indicadores simples, como se ilustra en la Figura 78.

Figura 78 Correlación entre indicadores simples



Fuente autor.

Tabla 12 Matriz de cargas factoriales

Indicadores simples	Componentes	
	1	2
Eficiencia	0.797	0.510
Error	0.075	0.791
Resistencia al deslizamiento	-0.101	-0.825
Ciclo de agarre	0.794	0.395
Sobreimpulso	0.902	-0.304

Fuente autor.

2) Información agrupada con respecto a las unidades de análisis

Se compone del análisis de conglomerados o *cluster*, es cuál es la denominación de un grupo de técnicas multivariantes cuyo objetivo es agrupar una serie de objetos en conglomerados a partir de la información que proporcionan los propios individuos. Los conglomerados obtenidos deben ser heterogéneos entre ellos y homogéneos dentro de ellos, por tanto, tendrán la particularidad de que los objetos que pertenezcan a una misma categoría sean lo más parecido posible entre ellos, y a la vez lo más diferente posible a los de otras categorías. Además, los grupos deben ser exhaustivos y exclusivos. El análisis de conglomerados también se utiliza en el desarrollo de IC para agrupar la información en unidades de análisis, que presentan características similares en los diferentes indicadores individuales. Además, el

análisis se puede tratar como: herramienta de diagnóstico, que sirve para explorar el impacto de las elecciones metodológicas realizadas durante la fase de construcción del IC; método de diseminación de información del IC, que no pierde las dimensiones de los indicadores individuales; y método de selección de grupos de unidades de análisis, para la imputación de datos faltantes [61].

En el proyecto de investigación no se implementa, puesto que solo se cuenta con 6 muestras de datos, y muy pocos comparten características para establecer conglomerados.

3.2.5 Normalización de los datos

La normalización de los datos es un paso previo a cualquier tipo de agregación de los indicadores simples. Los objetivos de la normalización son:

- Ajustar datos para evitar diferentes unidades de medida.
- Ajustar datos para que no tengan diferentes rangos de variación.
- Ajustar datos al presentarse una distribución asimétrica o ante la presencia de datos atípicos.

Los dos primeros objetivos se deben cumplir con el fin de no mezclar diferentes tipos de datos en el análisis. El tercer objetivo es necesario que se cumpla, solo en el caso en que se esté usando un modelo que asuma normalidad en los datos. La desviación de la normalidad está provocada a menudo, por la presencia de valores atípicos que alteran datos estadísticos descriptivos como la media, desviación estándar o el coeficiente de correlación, causando posteriormente malas interpretaciones [61].

Los principales métodos de normalización son: ranking, estandarización, re-escalamiento, distancia a una unidad de análisis referencial, categorización de escalas, categorización de valores por encima o por debajo de la media, y métodos de indicadores cíclicos [61].

En el presente proyecto de investigación se acoge el re-escalamiento, el cual permite aplicar datos cuantitativos, ajuste de los indicadores a la misma escala de medida, mantiene las distancias relativas, y ajuste de los indicadores al mismo rango de variación.

La expresión matemática que describe la normalización por re-escalamiento, se define como:

$$I_{qc}^t = \frac{x_{qc}^t - \min_c(x_{qc}^t)}{\max_c(x_{qc}^t) - \min_c(x_{qc}^t)} \quad (24)$$

Donde $\max_c(x_{qc}^t)$ y $\min_c(x_{qc}^t)$ es el valor máximo y mínimo del valor x_{qc}^t obtenido para todas las unidades de análisis en el momento t.

En la sección 3.1 del presente capítulo, se llevó a cabo el proceso de normalización de cada uno de los indicadores simples, implementando dicha técnica de normalización de datos.

3.2.6 Ponderación y agregación de indicadores simples

La ponderación constituye la etapa crucial de la composición de un índice compuesto (IC). Consiste en asignar pesos a los indicadores simples, para posteriormente agregarlos en un único valor que represente el índice global. La asignación de pesos se puede hacer de forma equitativa, o bien estableciendo diferentes factores de peso, que indiquen la importancia relativa que se le quiere dar a los indicadores simples en el índice global, la significatividad, fiabilidad u otras características de los datos subyacentes [61].

Los pesos también deben elegirse de tal forma que se refleje la calidad estadística de los datos. Muchas veces se suelen asignar pesos elevados a datos estadísticamente fiables con una amplia cobertura. Sin embargo, este método podría sesgar los resultados hacia aquellos indicadores que son fácilmente disponibles, penalizando la información que es estadísticamente problemática de identificar y de medir. El método de ponderación elegido tiene un gran impacto sobre el valor final del IC. Por ello, la etapa de ponderación debe ser más explícita, transparente y justificada posible [61].

Se presentan distintas técnicas de ponderación como lo son: i) ponderación equitativa, ii) ponderación basados en modelos estadísticos y iii) ponderación basados en modelos participativos. No existe una metodología de ponderación objetiva, común y única para la construcción de un IC, como consecuencia, los pesos deben seleccionarse de acuerdo con el marco conceptual teórico subyacente, que define el concepto que se está midiendo, como lo sugiere [61].

En el presente proyecto de investigación se implementa la ponderación equitativa y basado en modelos participativos, asignando un peso igual a cada uno de los indicadores simples, y luego reasignando sus pesos con base al análisis multivariante previamente realizado, con la finalidad de discriminar aquellos indicadores simples que aportan baja información o redundante. Este análisis se complementa a través de un algoritmo de optimización propuesto por [70], el cual permite hallar nuevos pesos de cada indicador simple.

Se aplica la agregación lineal y geométrica, como método de agregación, sumando los indicadores simples, y con ello obtener el valor de un indicador compuesto IC, con base al análisis previo. Por tanto, se tiene la ecuación 25.

$$Id = p1Rd + p2Tc + p3Ea + p4Sm + p5Er \quad (25)$$

Donde *Rd* Resistencia al deslizamiento, *Tc* Tiempo de ciclo de agarre, *Ea* Eficiencia, *Sm* Sobreimpulso y *Er* Error.

De esta manera cada indicador simple tendrá un efecto en el indicador compuesto, proporcional a su desempeño; ejemplo, un alto valor de eficiencia aumentará el valor del indicador compuesto. Por tanto, los indicadores simples *Tc*, *Sm* y *Er* presentan un efecto inverso en el indicador compuesto de la ecuación 25, puesto que un alto valor en estos indicadores (tiempo de ciclo de agarre, sobreimpulso y error) implican un bajo desempeño del controlador. De esta manera, se propone asignarles un offset a tales indicadores simples,

y con ello a menores valores de error, sobreimpulso y tiempo de ciclo de agarre, mayor desempeño reflejara el indicador compuesto. En la ecuación 26, se muestra el offset en los indicadores simples.

$$Id = p1Rd + p2(1 - Tc) + p3Ea + p4(1 - Sm) + p5(1 - Er) \quad (26)$$

Los pesos de cada indicador simple en conjunto obtendrán un valor máximo ideal de 1, como se muestra en la ecuación 27; puesto que los valores de los indicadores simples se normalizaron en la Sección 3.1 del presente capítulo.

$$p1 + p2 + p3 + p4 + p5 = 1 \quad (27)$$

Aplicando el método de ponderación equitativa y modelos participativos, se propone asignar pesos equitativos, pero luego modificar el valor de los pesos teniendo en cuenta que se debería disminuir el peso de componentes que tengan correlaciones altas, conservando el cumplimiento de la ecuación 27. Para este fin, se calcula el grado de significancia de la correlación mediante los valores p , tales que se considera correlación significativa si $p < 0.05$. Este análisis se muestra en la Tabla 13.

Tabla 133 Valores p para corroborar hipótesis de no correlación.

	Sobreimpulso	Error	ResDes	Tiecic	Efic
Sobreimpulso	1	0,037592838	0,437950442	0,000701741	0,003153619
Error	0,037592838	1	0,91551407	0,00754949	0,05508825
ResDes	0,437950442	0,91551407	1	0,934592055	0,402489647
Tiecic	0,000701741	0,00754949	0,934592055	1	0,004779859
Efic	0,003153619	0,05508825	0,402489647	0,004779859	1

Fuente autor.

En la Tabla 13 se remarcan en azul los componentes con correlación significativa, y en verde los dos componentes con la correlación mas significativa (los menores p).

Por esta razón se asignan los siguientes pesos, con lo que al sobre impulso se le resta importancia, pero se compensa en tiempo de ciclo y eficiencia. Se ha considerado también que es mas importante el tiempo de ciclo pequeño que la eficiencia por interpretación física del problema.

$$p1 = 0.2, p2 = 0.25, p3 = 0.25, p4 = 0.1 \text{ y } p5 = 0.2.$$

En seguida, de acuerdo con el método participativo, se aumentará el peso al indicador de resistencia al deslizamiento por cuanto se considera que, en un agarre de poder, el principal objetivo es que el objeto no deslice. Se compensará la sumatoria con el error de seguimiento ya que se considera que no es tan importante que se llegue de forma precisa a la consigna de posición o fuerza. Los pesos quedan:

$$p1 = 0.32, p2 = 0.25, p3 = 0.25, p4 = 0.1 \text{ y } p5 = 0.08.$$

3.2.7 Análisis de sensibilidad del IC

Los métodos de análisis de sensibilidad (GSA) basados en el cálculo de varianzas presentan algunas ventajas, como: distinguir mediante el uso de coeficientes de sensibilidad, los principales factores que afectan a la sensibilidad del IC; distinguir los efectos principales de los efectos de orden superior; recoger la influencia de todo el rango de variación de cada factor de entrada; tratar a los factores de forma agrupada y facilitar su interpretación [61].

Los métodos basados en el cálculo de varianzas se centran, principalmente, en la estimación de los coeficientes de sensibilidad de cada factor input X_i sobre el factor output Y :

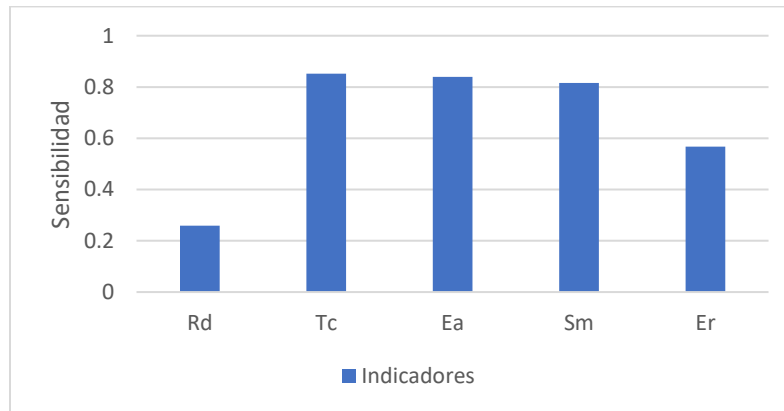
$$S_i = \frac{V(f_i(X_i))}{V(Y)} = \frac{V_{x_i}(E_{X \sim i}(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (28)$$

Donde $f_i(X_i)$ es el término aditivo de la descomposición de la función $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_Q)$ mediante la representación HDMR. Estos coeficientes de sensibilidad son los efectos principales o pesos efectivos, y cuantifican la importancia de un factor input X_i sobre el factor output Y [61]. En esta sección se han considerado como factores de entrada del modelo el conjunto de indicadores simples, y factor de salida el IC. De esta manera, el modelo se ha formulado como $Y = IC = f(X_1, X_2, \dots, X_Q)$, donde X_i son los indicadores simples, $i = 1, \dots, Q$.

El objetivo del GSA aplicado a este proyecto de investigación es estimar los coeficientes de sensibilidad de primer orden o efectos principales, para cada indicador simple que reflejen el efecto de este en el proceso de construcción del IC. El efecto principal de cada indicador simple, S_i se considera una medida de la importancia del indicador simple sobre el IC, por las siguientes razones: proporciona una definición precisa del concepto de importancia de un indicador simple, ya que mide la reducción esperada en la varianza de un IC que se produce al fijar el indicador simple X_i , $V_{x_i}(E_{X \sim i}(Y|X_i))$; y trata de un modelo libre de supuestos, se puede usar incluso cuando la técnica de agregación utilizada para la construcción del IC no sea lineal, por tanto, a diferencia del coeficiente de correlación de Pearson o Spearman, no se ve limitado por los supuestos de linealidad, como lo explica [61].

En el análisis de sensibilidad del presente proyecto de investigación, se implementó el algoritmo propuesto en [70], para entender la influencia de cada indicador simple sobre indicador compuesto. El algoritmo utiliza regresiones adicionales para descomponer la influencia de cada variable dentro de la influencia causada por la correlación, y la influencia causada por la estructura del indicador compuesto. La Figura 79 ilustra el coeficiente normalizado de sensibilidad de cada indicador simple, se observa un valor similar en el tiempo de ciclo de agarre, eficiencia y sobreimpulso; el error presenta un valor medio, y la resistencia al deslizamiento un valor bajo.

Figura 79 Sensibilidad



Fuente autor.

3.2.8 Identificación de los indicadores simples con el IC

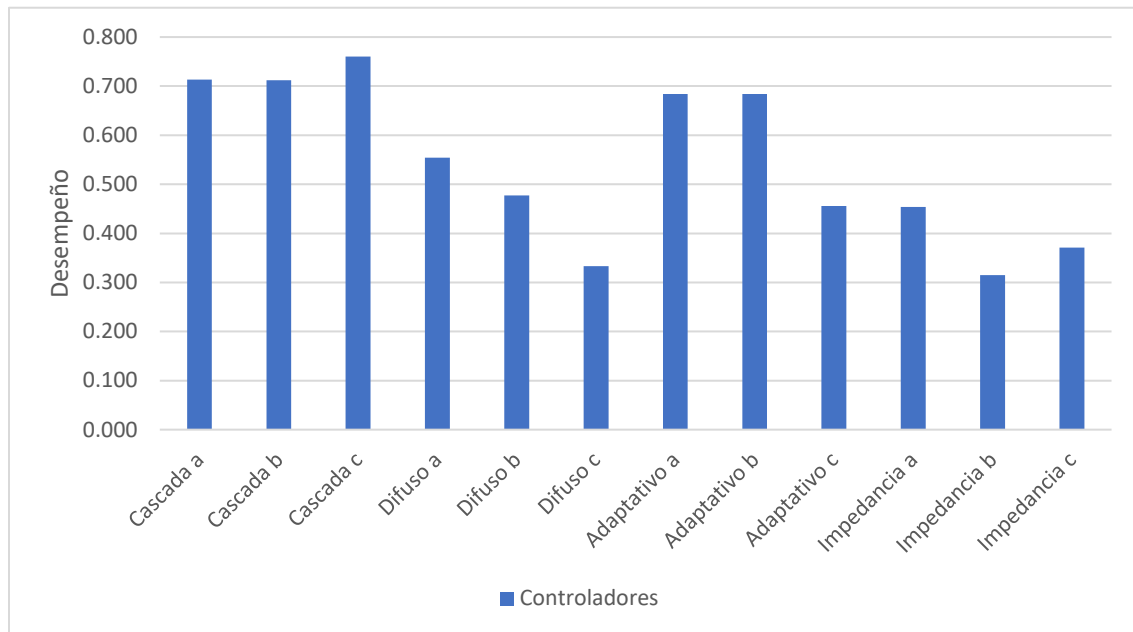
En la etapa de ponderación y agregación de los indicadores simples, se observó como el error, el sobreimpulso y el tiempo de ciclo de agarre, afecta negativamente el valor del indicador compuesto. Puesto que como se explicó en la sección 3.2.6 de presente capítulo, el tener un valor bajo de los indicadores nombrados, debería reflejar un alto valor del indicador compuesto, y en caso de tener un valor alto de tales indicadores, debería reflejar un bajo valor del indicador compuesto. Por esta razón, se asigna un offset al error, sobreimpulso y tiempo de ciclo de agarre.

Los indicadores de resistencia al deslizamiento y eficiencia, al presentar un alto valor, reflejan en el indicador compuesto un alto valor. Por tanto, estos indicadores presentan un valor proporcional al desempeño.

3.2.9 Visualización de los indicadores simples con el IC

El indicador compuesto propuesto con base al método de ponderación equitativa y modelos participativos, es implementado en el análisis de desempeño de 12 controladores, con lo cual se obtiene un valor como se ilustra en la Figura 80, donde se observa el desempeño global teniendo en consideración los indicadores simples del error, sobreimpulso, resistencia al deslizamiento, eficiencia y tiempo de ciclo de agarre; donde el controlador cascada c) presente el mayor desempeño, y el impedancia b) el menor desempeño.

Figura 80 Valores IC



Fuente autor.

3.3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de los controladores con el más alto y más bajo desempeño en cada una de las métricas; y el valor de desempeño.

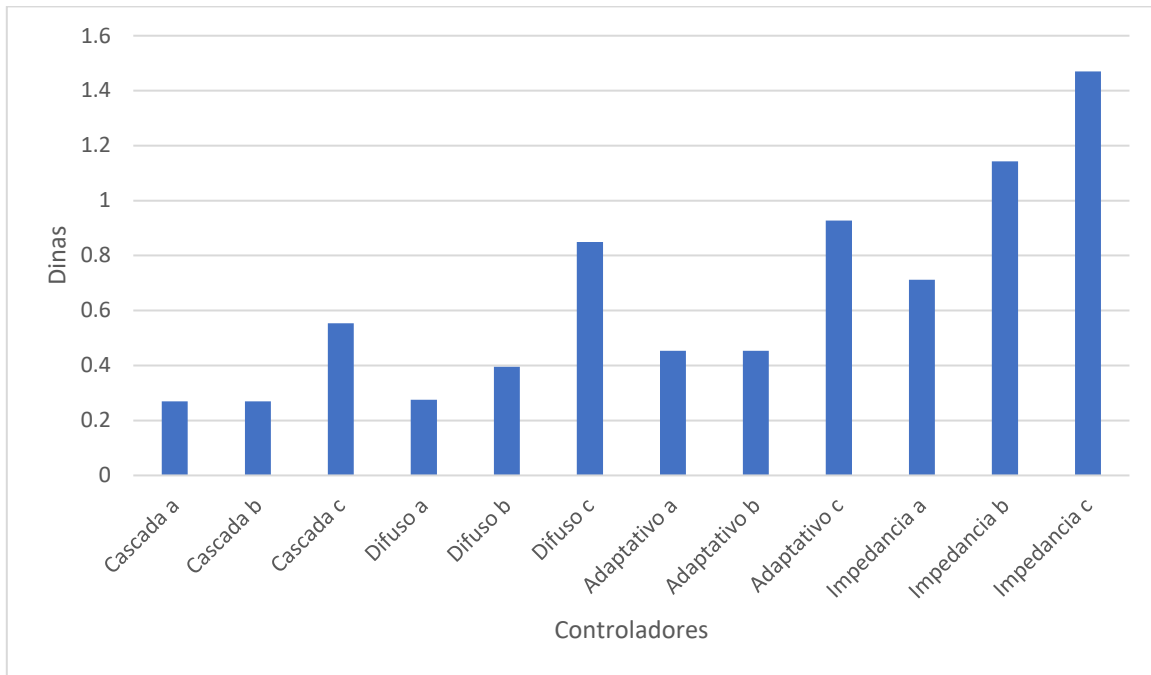
3.3.1 Comparación de estrategias frente a métricas individuales

Las cuatro estrategias de control implementadas (PI adaptativo, PI difuso, cascada e impedancia), se sintonizaron con tres series de parámetros diferentes, obteniéndose doce controladores para pruebas de desempeño. Se presenta el controlador con más alto y más bajo desempeño en cada una de las métricas.

a) Error

El controlador con el menor valor de error medio cuadrático es el controlador cascada a), y el que mayor valor presenta es el impedancia c), como se ilustra en la Figura 81.

Figura 81 Error medio cuadrático

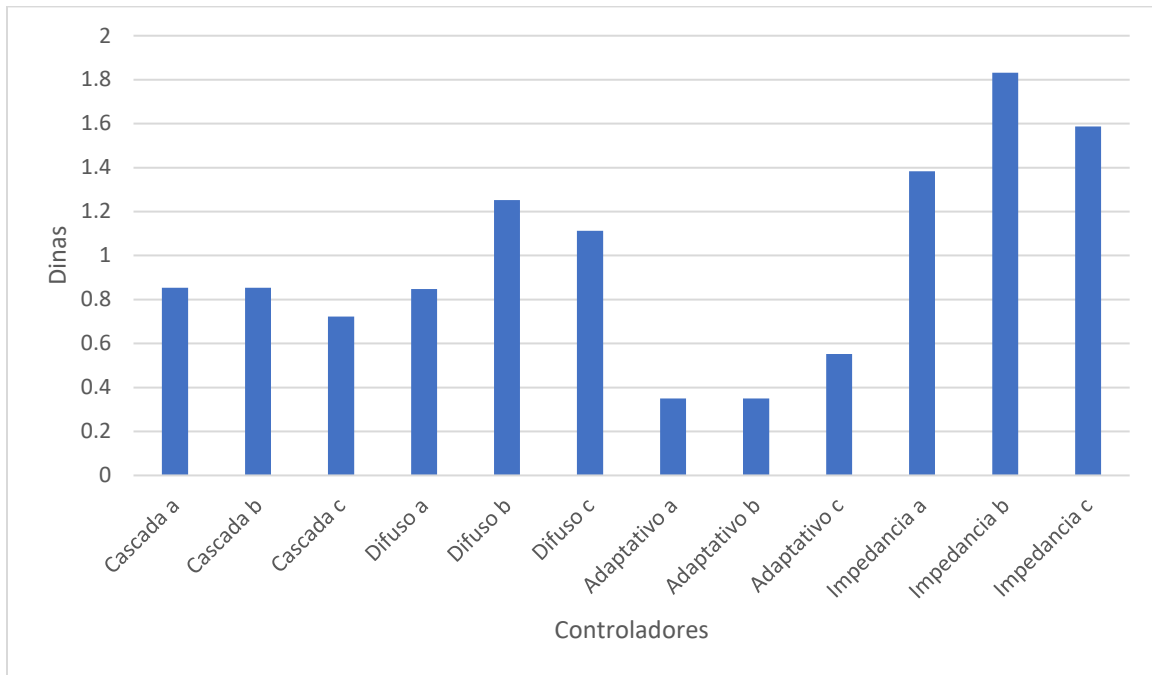


Fuente autor.

b) Sobreimpulso

El controlador con el menor valor de sobreimpulso es el controlador adaptativo a), y el que mayor valor presenta es el controlador impedancia c, como se ilustra en la Figura 82.

Figura 82 Sobreimpulso

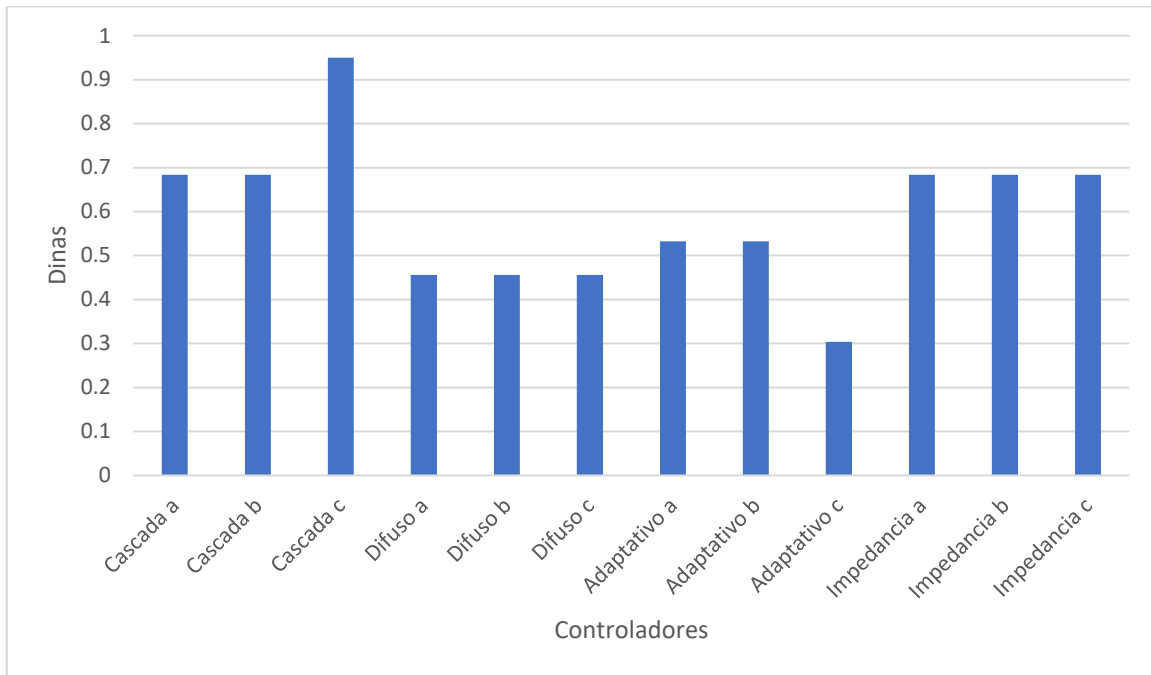


Fuente autor.

c) Resistencia al deslizamiento

El controlador con el mayor valor de resistencia al deslizamiento es el controlador en cascada c, y con menor valor el controlador en adaptativo c, como se ilustra en la Figura 83.

Figura 83 Resistencia al deslizamiento

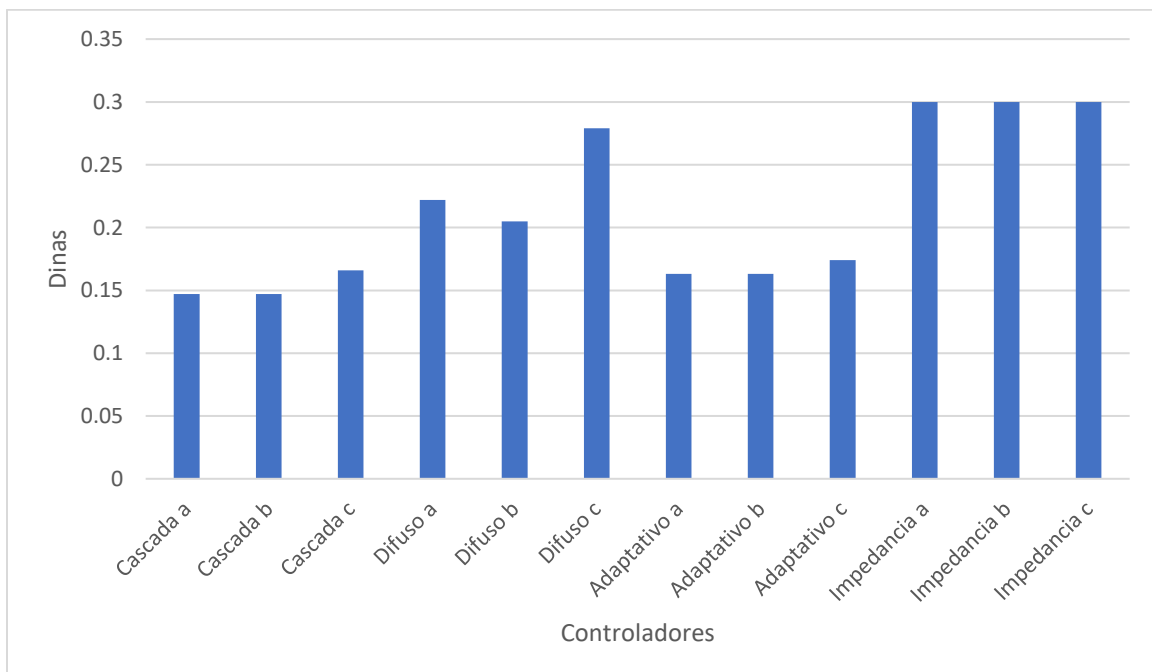


Fuente autor.

d) Tiempo de ciclo de agarre

El controlador con el menor valor de tiempo de ciclo de agarre es el controlador en cascada a y b, y con mayor valor el controlador impedancia a, b y c; como se ilustra en la Figura 84.

Figura 84 Tiempo de ciclo de agarre

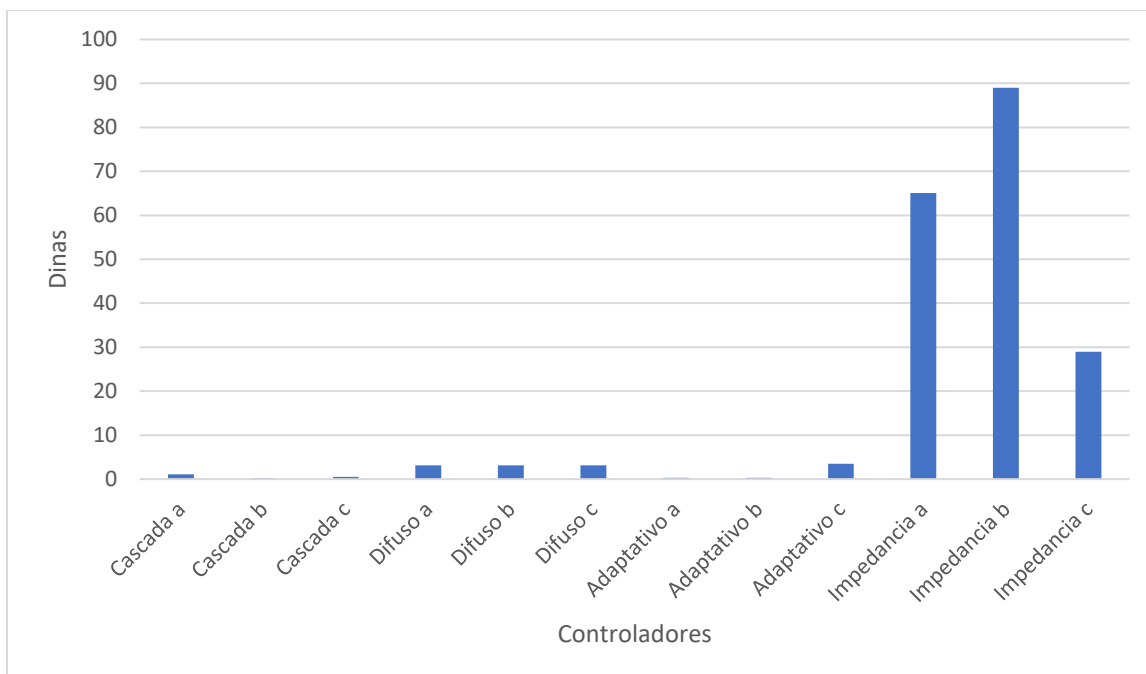


Fuente autor.

e) Eficiencia

El controlador con el menor valor de eficiencia es el controlador en cascada b, y con mayor valor el controlador impedancia b, como se ilustra en la Figura 85. En la Tabla 14 se dan a conocer en detalle los valores de la eficiencia de cada controlador.

Figura 85 Eficiencia



Fuente autor.

Tabla 14 Valores de la eficiencia

Controlador	Eficiencia
Cascada a	1,066
Cascada b	0,236
Cascada c	0,518
Difuso a	3,157
Difuso b	3,108
Difuso c	3,151
Adaptativo a	0,315
Adaptativo b	0,266
Adaptativo c	3,466
Impedancia a	65,099
Impedancia b	89,001

Impedancia c	29
--------------	----

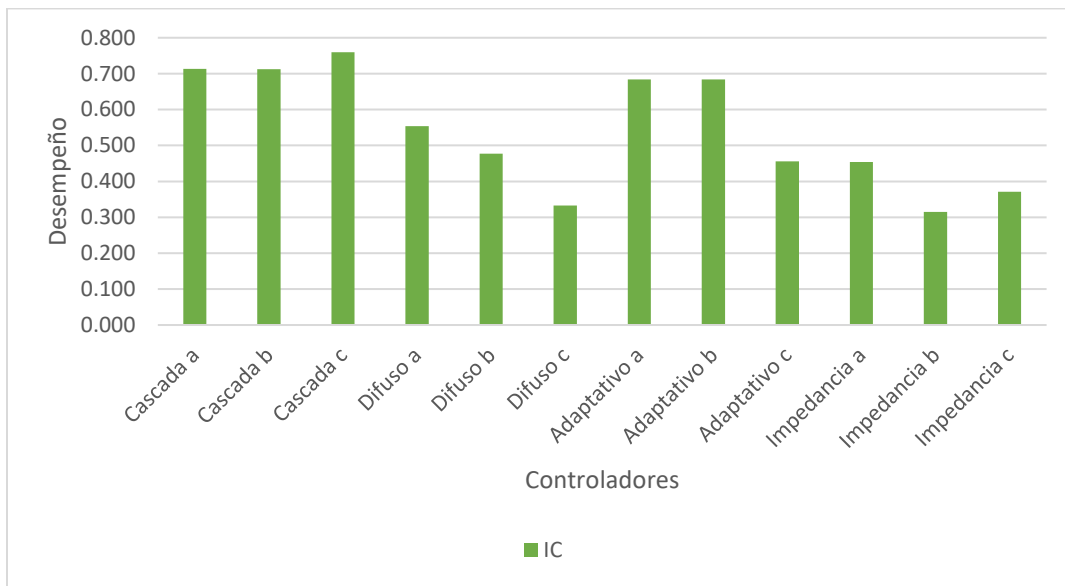
Fuente autor.

3.3.2 Indicador compuesto

El indicador IC califica el desempeño de los controladores cascada c, difuso a, difuso b, adaptativo a, adaptativo b, impedancia b e impedancia c, ilustrados en la Figura 86; se observa el desempeño de cada controlador de manera global con base a las cinco métricas de desempeño (eficiencia, tiempo de ciclo de agarre, error, sobreimpulso, y resistencia al deslizamiento), descritas en la ecuación 29. Se observa el mayor desempeño en los controladores cascada c y el valor más bajo desempeño en impedancia b.

$$Id = p1Rd + p2(1 - Tc) + p3Ea + p4(1 - Sm) + p5(1 - Er) \quad (29)$$

Figura 86 Valores de desempeño IC1



Fuente autor.

3.3.2.1 Discusión de resultados.

En este punto se da respuesta a la pregunta de investigación planteada en este trabajo. Se quería determinar si el tipo de estrategia de control tiene incidencia en la calidad de la funcionalidad del agarre de poder y si un indicador compuesto puede ayudar a un diseñador a decidir por la mejor estrategia de control para su mano robótica.

Como se ve en las figuras de 83 a 87, los indicadores simples por sí solos no ayudan mucho a la toma de decisión acerca de la estrategia de control mas adecuada. De hecho, si se utilizan métricas individuales basadas en el desempeño de seguimiento de la consigna, como el error cuadrático medio y el sobre impulso, las cuales son métricas utilizadas frecuentemente para evaluar el desempeño de una estrategia de control frente a otra, de las figuras 83 y 84 no es

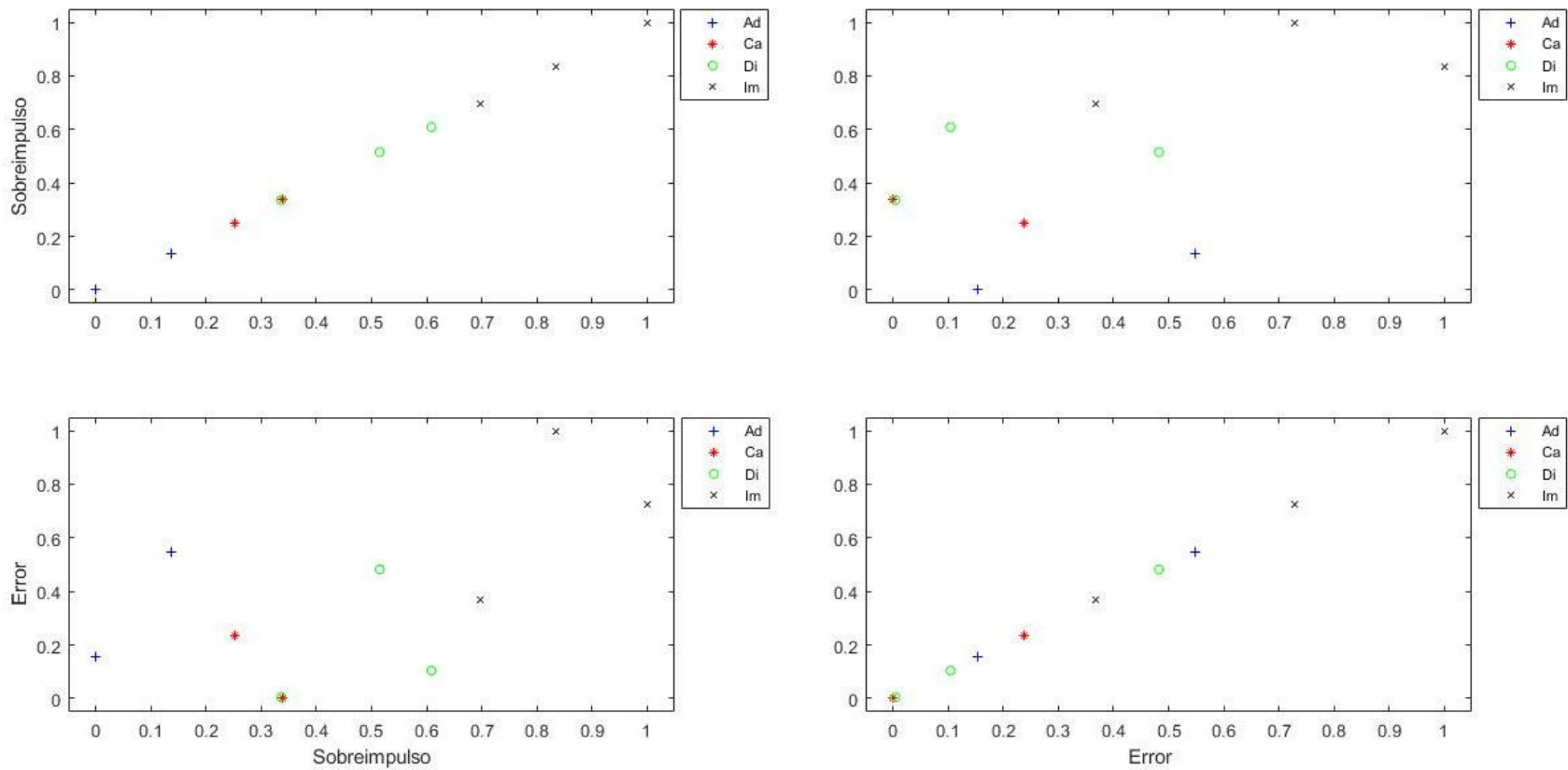
posible sacar ninguna conclusión útil. Esto tiene sentido físico, ya que, aunque se utilicen diferentes estrategias de control, es de esperar que todas pudieran cumplir la tarea de agarre de poder, pero la calidad del transitorio depende más de la correcta sintonización del controlador que de la estrategia de control en sí misma. Esto comprueba que, para el diseñador, esas métricas no son útiles para decidir acerca de una estrategia de control.

Por otro lado, con las métricas centradas en la calidad del agarre como son el tiempo de ciclo, la resistencia al deslizamiento o la eficiencia de las figuras 87 a 89, si es posible intuir que la técnica específica de control tiene una incidencia diferencial en estos indicadores.

Para analizar mejor estas dos últimas aseveraciones, en la Figura 87 se presenta de forma gráfica una matriz de relaciones entre los indicadores de seguimiento de referencia, error de seguimiento y sobre impulso, comprobando de la dispersión de puntos en las gráficas fuera de la diagonal principal, que no se puede establecer una relación entre técnica de control y esos indicadores. En la Figura 88 se presenta gráficamente una matriz de relaciones entre indicadores de calidad de agarre de poder: resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre y eficiencia. Por ejemplo, de la gráfica de fila 2 y columna 1 en la Figura 88 se puede ver que la técnica de control Cascada logra mayor resistencia de agarre con bajo tiempo de ciclo de agarre en comparación con otras técnicas de control. Esto tiene sentido físico ya que el enfoque de control cascada ajusta el par al actuador para responder al deslizamiento manteniendo la fuerza de agarre, caracterizándose por lograr rápidas respuestas gracias al lazo interno de control. Para la sintonía realizada del control de impedancia, donde se dejó constante el valor de consigna de penetración en el ambiente x_r , tiene sentido que la resistencia al deslizamiento sea la misma para las tres sintonías del PID, y que logre una resistencia al deslizamiento aceptable, pero con mayor tiempo de ciclo de agarre dado que no se está reaccionando al deslizamiento, pero sí se obliga a hacer una fuerza tal que sea suficiente para evitar que el objeto deslice. También tiene sentido que el enfoque difuso (fila 2, columna 1) tenga baja resistencia de agarre con tiempos de ciclo más grandes, ya que esa técnica busca evitar saturaciones y tener esfuerzos suaves de control, y no detecta deslizamiento.

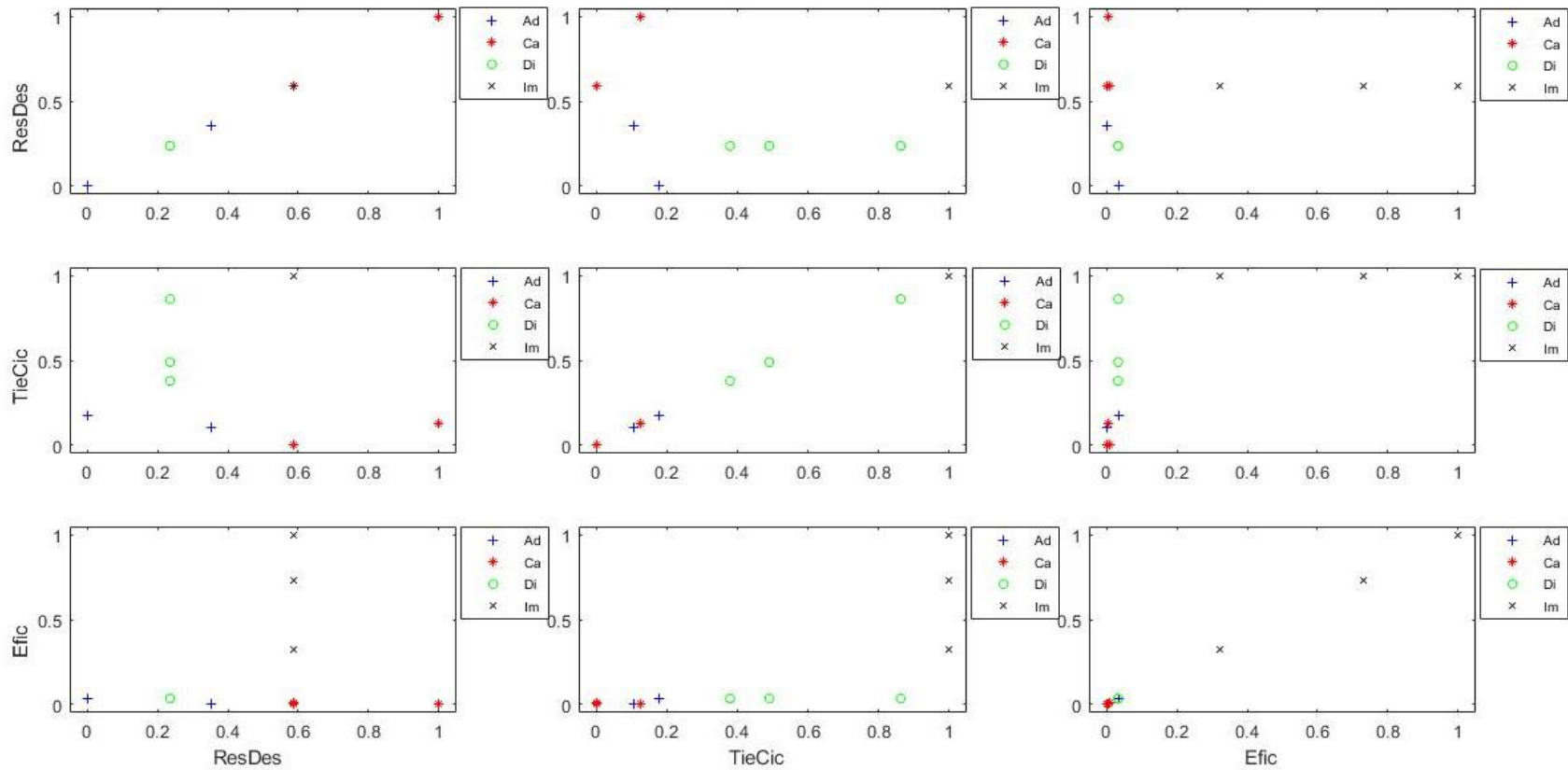
De la fila 3 y columna 2 en la Figura 88, se ve que la técnica impedancia tiene una mayor eficiencia que las demás estrategias, con un tiempo de ciclo alto. Esto indica que necesita menor fuerza de agarre para resistir la misma fuerza de tiro que las demás técnicas, pero que esa menor fuerza de agarre implica hacer la tarea de forma más lenta. Puede explicarse por el hecho de que esta estrategia de control utiliza en realidad una consigna de posición, tal que el error de fuerza es cero en la fase previa al agarre. Solo cuando se inicia el agarre del objeto, la consigna de posición se auto ajusta para seguir una determinada consigna de fuerza, con lo que tiene sentido que la tarea sea más lenta que aquellas estrategias que siguen consignas de fuerza desde antes del agarre y que pueden resultar más bruscas por esa razón.

Figura 87 Sobreimpulso y error



Fuente autor.

Figura 88 Resistencia al deslizamiento, tiempo de ciclo de agarre y eficiencia

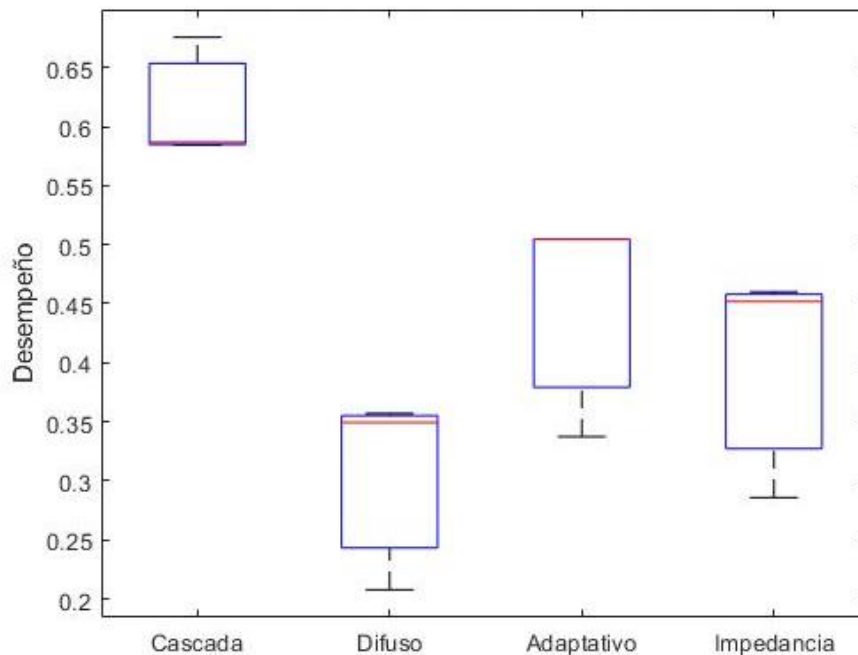


Fuente autor.

La anterior discusión con base en apreciación gráfica sirve para analizar el resultado cuantitativo que se obtiene mediante el indicador IC. Se calculó el diagrama de cajas y bigotes para las 12 observaciones del indicador como se muestra en la Figura 89.

Las medianas del indicador para cada tipo de estrategia de control se muestran mediante la línea roja en la Figura 89. El hecho de que sean diferentes entre sí comprueba que hay incidencia de la técnica de control en el desempeño del agarre de poder, tal como se ha advertido antes desde el análisis de componentes principales. Sin embargo, el indicador es sensible a diferentes sintonías de los parámetros de cada ley de control lo que se concluye al observar la dispersión grande de los valores alrededor de las medianas. En este trabajo se implementó un algoritmo presentado en [70], el cual buscaba optimizar los pesos de los indicadores simples teniendo en cuenta la sensibilidad. No obstante, ese algoritmo arrojó resultados insatisfactorios ya que cambiaba el significado físico de los pesos y tampoco reducía la dispersión debida a diferentes sintonías, razón por la cual sus resultados no se incluyeron en este trabajo. Se sugiere entonces que, si se van a probar conjuntos de parámetros de sintonía diversos, se defina un método para su variación con criterios que puedan ser incluidos en el indicador compuesto.

Figura 89 Desempeño del enfoque de control IC



Fuente autor.

Resulta interesante advertir las siguientes conclusiones del resultado del indicador IC según la gráfica en la Figura 89.

- En este trabajo en particular, el indicador IC privilegió el desempeño de resistencia al agarre y tiempo de ciclo de agarre sobre la eficiencia, minimizando la importancia de parámetros relacionados con el seguimiento de las consignas de los controladores

teniendo en cuenta que de alguna manera esos efectos están correlacionados con los indicadores de desempeño de agarre de poder. Es por esta razón que el mejor enfoque de control según IC es el cascada, ya que es el que tiene el mejor compromiso entre resistencia al deslizamiento y tiempo de ciclo. El siguiente mejor enfoque de control según IC es el adaptativo, por encima del de impedancia debido a que el control de impedancia tiene una respuesta demasiado lenta. El peor enfoque según IC es el difuso, ya que ese enfoque busca una ley de control muy suave que evite saturación del actuador.

- Los resultados obtenidos con IC tienen una clara relación con la interpretación física de los resultados que se discutió antes de forma gráfica, con lo que este método presentado en este trabajo permite cuantificar el desempeño de los diferentes enfoques de control en la tarea del agarre de poder, facilitando al diseñador la toma de decisiones.

Se advierte que el número de experimentos utilizados para el análisis de IC son muy pocos para un análisis riguroso de la incidencia de una determinada métrica en los indicadores compuestos. Sin embargo, la tendencia e interpretación mostrada en la discusión muestran que el método utilizado para el cálculo de IC puede ser usado por los diseñadores de controladores en este problema específico, con mayor peso analítico que la simple evaluación del controlador en función de seguimiento de consignas, que es el procedimiento comúnmente utilizado en los trabajos encontrados en el estado del arte como medio de evaluación de desempeño.

Conclusiones

- Las métricas de desempeño del agarre de poder utilizadas en trabajos previos se encuentran enfocadas a evaluar agarres de precisión, agarres de poder o calibración de la instrumentación; encontrando que esas métricas se proponen de manera individual evaluando aspectos separados deseables en el agarre de poder. Ninguno de los trabajos previos ha puesto en consideración la incidencia de la técnica de control utilizada. Este trabajo ha demostrado que el tipo de estrategia de control utilizada tiene incidencia en el desempeño del agarre de poder, y que por lo tanto es un aspecto para tener en cuenta por parte de un diseñador de manos robóticas.
- Para un diseñador de controladores para la tarea específica del agarre de poder con una mano robótica, no se encontró la existencia de métricas que le permitan tomar una decisión acerca de qué enfoque de control, entre varios disponibles, puede ser el más adecuado para el fin perseguido, siendo el criterio utilizado para valorar el controlador, el cálculo de indicadores de desempeño del seguimiento de consignas, como es lo usual en la práctica de la teoría de control. Este trabajo ha demostrado que, si bien una determinada estrategia de control podría lograr un buen desempeño de seguimiento de consignas, esto no necesariamente implica un desempeño adecuado del agarre de poder, con lo que se pone en evidencia la necesidad de un instrumento que combine indicadores de desempeño de la tarea de agarre con indicadores de seguimiento de consignas. Las métricas individuales podrían llegar a ser demasiadas como para que la decisión sobre una estrategia de control particular sea clara.
- En este trabajo se ha presentado un procedimiento para la construcción de un indicador compuesto para la evaluación de los controladores en el agarre de poder que combina la información de desempeño del agarre con la información del seguimiento de consignas en un único indicador que facilita la selección de la estrategia de control adecuada a su hardware disponible al arrojar un único valor indicativo del desempeño logrado.
- Se ha mostrado que el resultado del indicador compuesto propuesto tiene relación estrecha con los puntos fuertes que cada estrategia enfatiza, con lo que se considera que es un instrumento confiable para la toma de decisiones. Dado que cada caso de estudio particular tiene un énfasis y unas limitaciones particulares, el procedimiento ilustrado en este trabajo muestra cómo construir el indicador como función del desempeño que se considere deseable en cada caso particular.

Bibliografía

- [1] E. Noce *et al.*, “EMG and ENG envelope pattern recognition for prosthetic hand control.pdf,” *Journal of Neuroscience Methods*, pp. 38–46, 2019.
- [2] E. D. Engeberg, “A physiological basis for control of a prosthetic hand,” *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 8, pp. 6–15, 2013.
- [3] B. Zeng, S. Fan, L. Jiang, M. Cheng, and H. Liu, “Design and control of an anthropomorphic prosthetic hand with a cosmesis,” *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE ICMA 2016*, pp. 926–930, 2016, doi: 10.1109/ICMA.2016.7558686.
- [4] J. R. Napier, “The prehensile movements of the human hand,” *The Journal of bone and joint surgery. British*, vol. 38, pp. 902–913, 1956.
- [5] M. Controzzi, C. Cipriani, and M. C. Carrozza, “Design of Artificial Hands : A Review Design issues Grasp taxonomies,” *Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 95, pp. 219–246, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-03017-3.
- [6] R. L. Norton , and J. M. McCarthy, *Design of Machinery :An introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines*, vol. 125, no. 3. 2003.
- [7] M. I. Muñoz Muñoz and J. F. Solarte Paredes, “Application of the virtual spring damper hypothesis in the control of the position of a finger of an underacted robotic hand prosthesis: Simulation study,” 2017.
- [8] M. Serna Imbachí, “Evaluación de la usabilidad de una prótesis virtual de mano basada en un mecanismo de agarre adaptativo y gobernanda mediante señales EMGs,” Universidad del Cauca, 2018.
- [9] D. Hroncová, P. Frankovský, I. Virgala, and I. Delyová, “Kinematic Analysis of the Press Mechanism Using MSC Adams,” *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 7, pp. 312–315, 2014, doi: 10.12691/ajme-2-7-30.
- [10] C. Rubert, D. Kappler, A. Morales, S. Schaal, and J. Bohg, “On the relevance of grasp metrics for predicting grasp success,” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2017-Septe, pp. 265–272, 2017, doi: 10.1109/IROS.2017.8202167.
- [11] C. Rubert, B. León, and A. Morales, “Grasp Quality Metrics for Robot Hands Benchmarking,” *IEEE RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2014.
- [12] J. Falco, K. Van Wyk, and E. Messina, “Performance Metrics and Test Methods for Robotic Hands,” *DRAFT NIST Special Publication 1227*, p. 65, 2018.
- [13] W. Shaw-Cortez, D. Oetomo, C. Manzie, and P. Choong, “Tactile-based Blind Grasping: A Discrete-Time Object Manipulation Controller for Robotic Hands,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 1–1, 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2794612.
- [14] H. Deng, Y. Zhang, and X. G. Duan, “Wavelet transformation-based fuzzy reflex control for prosthetic hands to prevent slip,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 5, pp. 3718–3726, 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2643603.
- [15] B. A. Kent and E. D. Engeberg, “Robotic hand acceleration feedback to synergistically prevent grasped object slip,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 2, pp. 1–8, 2016.

- [16] X. G. Duan, Y. Zhang, and H. Deng, "A simple control method to avoid overshoot for prosthetic hand control," *2014 IEEE International Conference on Information and Automation, ICIA 2014*, no. July, pp. 736–739, 2014, doi: 10.1109/ICInfA.2014.6932749.
- [17] R. Garcia-Rosas, J. M. Portella-Delgado, Ying Tan, and D. Netic, "Nonlinear observer based control design for an under-actuated compliant robotic hand," *2016 Australian Control Conference (AuCC)*, pp. 21–26, 2016, doi: 10.1109/AUCC.2016.7867926.
- [18] Y. Xu, C. Jiang, and Y. Jie, "Compliance control for grasping with a bionic robot hand," *Proceedings of the 28th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2016*, pp. 5280–5285, 2016, doi: 10.1109/CCDC.2016.7531942.
- [19] W. F. Tarmizi *et al.*, "A Particle Swarm Optimization-PID controller of a DC Servomotor for Multi-Fingered Robot Hand," *2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation, ROMA 2016*, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ROMA.2016.7847837.
- [20] W. Guo, X. Sheng, D. Zhang, and X. Zhu, "Disturbance Observer-Based Fuzzy Control for Prosthetic Hands," *8th International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, vol. 2, pp. 329–337, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-22879-2.
- [21] H. Deng, H. Luo, R. Wang, and Y. Zhang, "Grasping Force Planning and Control for Tendon-driven Anthropomorphic Prosthetic Hands," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 15, no. 5, pp. 795–804, 2018, doi: 10.1007/s42235-018-0067-z.
- [22] T. Zhang, L. Jiang, and H. Liu, "A novel grasping force control strategy for multi-fingered prosthetic hand," *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, vol. 19, no. 6, pp. 1537–1542, 2012, doi: 10.1007/s11771-012-1173-4.
- [23] L. Lei, "The Intelligent Grasping Tactics of Dexterous Hand," *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, vol. 13th, no. December, pp. 10–12, 2014.
- [24] A. Delgado, C. A. Jara, and F. Torres, "In-hand recognition and manipulation of elastic objects using a servo-tactile control strategy," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 48, no. March, pp. 102–112, 2017, doi: 10.1016/j.rcim.2017.03.002.
- [25] S. Ebisawa, T. Mouri, S. Nakagawa, M. Adachi, H. Sakaeda, and H. Kawasaki, "Myoelectric Prosthetic Hand with Exteriority and Functionality," pp. 4–9, 2013.
- [26] M. Regoli, U. Pattacini, G. Metta, and L. Natale, "Hierarchical Grasp Controller using Tactile Feedback," *International Conference on Humanoid Robots*, pp. 387–394, 2016.
- [27] C. Li, J. Ren, H. Huang, B. Wang, Y. Zhu, and H. Hu, "PCA and deep learning based myoelectric grasping control of a prosthetic hand," *BioMedical Engineering OnLine*, pp. 1–18, 2018, doi: 10.1186/s12938-018-0539-8.
- [28] R. Boughdiri, H. Nasser, H. Bezine, N. K. M'Sirdi, A. M. Alimi, and A. Naamane, "Dynamic modeling and control of a multi-fingered robot hand for grasping task," *Procedia Engineering*, vol. 41, no. Iris, pp. 923–931, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.264.
- [29] M. Li, K. Hang, D. Kragic, and A. Billard, "Dexterous grasping under shape uncertainty," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 75, pp. 352–364, 2016, doi: 10.1016/j.robot.2015.09.008.
- [30] M. Beschi, E. Villagrossi, L. M. Tosatti, and D. Surdilovic, "Sensorless model-based object-detection applied on an underactuated adaptive hand enabling an impedance behavior," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 46, no. October 2016, pp. 38–47, 2017, doi: 10.1016/j.rcim.2016.11.005.

- [31] T. Zhang, S. Fan, J. Zhao, L. Jiang, and H. Liu, "Design and control of a multisensory five-finger prosthetic hand," *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, vol. 2014-June, no. June, pp. 3327–3332, 2014, doi: 10.1109/WCICA.2014.7053266.
- [32] T. Zhang, S. Fan, J. Zhao, L. Jiang, and H. Liu, "Multifingered robot hand dynamic grasping control based on fingertip three-axis tactile sensor feedback," *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, vol. 2015-March, no. March, pp. 3321–3326, 2015, doi: 10.1109/WCICA.2014.7053265.
- [33] M. Li, Y. Bekiroglu, D. Kragic, and A. Billard, "Learning of grasp adaptation through experience and tactile sensing," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, no. Iros, pp. 3339–3346, 2014, doi: 10.1109/IROS.2014.6943027.
- [34] T. Zhang, L. Jiang, S. Fan, X. Wu, and W. Feng, "Development and experimental evaluation of multi-fingered robot hand with adaptive impedance control for unknown environment grasping," *Robotica*, vol. 34, no. 5, pp. 1168–1185, 2016, doi: 10.1017/S0263574714002161.
- [35] L. Jiang, Q. Huang, D. Yang, S. Fan, and H. Liu, "A novel hybrid closed-loop control approach for dexterous prosthetic hand based on myoelectric control and electrical stimulation," *Industrial Robot: An International Journal*, 2018, doi: 10.1108/IR-12-2017-0209.
- [36] H. Luo, X. Duan, and H. Deng, "Sliding Mode Impedance Control of a Underactuated Prosthetic Hand," *Proceeding of the IEEE International Conference on Information and Automation*, no. July, pp. 726–729, 2014.
- [37] G. Sriram, A. N. Jensen, and S. C. Chiu, "Slippage control for a smart prosthetic hand prototype via modified tactile sensory feedback," *IEEE International Conference on Electro Information Technology*, pp. 225–230, 2014, doi: 10.1109/EIT.2014.6871766.
- [38] E. Rodriguez, D. Romero, and F. Martinez, "Fuzzy Control for Cylindrical Grasp in Anthropomorphic Hand," *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 10, no. 30, pp. 1485–1492, 2017.
- [39] S. H. Abbasi and A. Mahmood, "Bond Graph Modelling of a Customized Anthropomorphic Prosthetic Hand with LQR Control Synthesis," *20th International Multitopic Conference (INMIC 17)*, no. Inmic 17, pp. 1–6, 2017.
- [40] V. Kumar, E. Todorov, and S. Levine, "Optimal Control with Learned Local Models: Application to Dexterous Manipulation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 378–383, 2016.
- [41] E. D. Engeberg and S. G. Meek, "Adaptive sliding mode control for prosthetic hands to simultaneously prevent slip and minimize deformation of grasped objects," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 18, no. 1, pp. 376–385, 2013, doi: 10.1109/TMECH.2011.2179061.
- [42] R. Andrecioli and E. D. Engeberg, "Adaptive sliding manifold slope via grasped object stiffness detection with a prosthetic hand," *Mechatronics*, vol. 23, no. 8, pp. 1171–1179, 2013, doi: 10.1016/j.mechatronics.2013.10.006.
- [43] J. Jalani, N. Mahyuddin, G. Herrmann, and C. Melhuish, "Active robot hand compliance using operational space and Integral Sliding Mode Control," *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1749–1754, 2013, doi: 10.1109/AIM.2013.6584350.

- [44] G. Herrmann, J. Jalani, N. Mahyuddin, S. Khan, and C. Melhuish, “Robotic hand posture and compliant grasping control using operational space and integral sliding mode control,” *Robotica*, vol. 34, pp. 2163–2185, 2016, doi: 10.1017/S0263574714002811.
- [45] M. Farag, N. Z. Azlan, and S. Ahmad, “Cascade control of robotic fingers with anthropomorphic inspiration,” *Proceedings - 2016 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems, I2CACIS 2016*, no. October, pp. 168–173, 2017, doi: 10.1109/I2CACIS.2016.7885309.
- [46] H. Deng, G. Zhong, X. Li, and W. Nie, “Slippage and deformation preventive control of bionic prosthetic hands,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 2, pp. 888–897, 2016, doi: 10.1109/TMECH.2016.2639553.
- [47] F. Cordella *et al.*, “A force-and-slippage control strategy for a poliarticulated prosthetic hand,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2016-June, pp. 3524–3529, 2016, doi: 10.1109/ICRA.2016.7487533.
- [48] A. L. Ciancio *et al.*, “A bio-inspired force control for cyclic manipulation of prosthetic hands,” *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, vol. 2015-Novem, no. iii, pp. 4824–4827, 2015, doi: 10.1109/EMBC.2015.7319473.
- [49] H. Kawasaki, T. Mouri, K. Iwase, and H. Sakaeda, “Prosthetic Hand Control Using Speech and sEMG,” pp. 1136–1141, 2014, doi: 10.1109/ROBIO.2014.7090485.
- [50] G. Walck, R. Haschke, M. Meier, and H. J. Ritter, “Robot Self-Protection by Virtual Actuator Fatigue: Application to Tendon-driven Dexterous Hands During Grasping,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2200–2205, 2017.
- [51] W. C. Wang, T. H. Liu, and Y. Syaifudin, “Model Predictive Controller for a Micro-PMSM-Based Five-Finger Control System,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3666–3676, 2016, doi: 10.1109/TIE.2016.2543179.
- [52] A. Fassih, D. S. Naidu, S. Chiu, P. Kumar, and S. Ave, “Design and Control of an Underactuated Prosthetic Hand,” *Proceedings of the 11th International Conference on Applications of Electrical and Computer Engineering, ACA*, vol. 12, pp. 77–82, 2012.
- [53] D. A. Bennett, S. Member, S. A. Dalley, D. Truex, and M. Goldfarb, “A Multigrasp Hand Prosthesis for Providing Precision and Conformal Grasps,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, no. 4, pp. 1697–1704, 2015.
- [54] M. T. Leddy, S. Member, A. M. Dollar, and S. Member, “Preliminary Design and Evaluation of a Single-Actuator Anthropomorphic Prosthetic Hand with Multiple Distinct Grasp Types,” *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, vol. 7th, pp. 1062–1069, 2018.
- [55] X. Duan, H. Deng, and H. Li, “A Saturation-Based Tuning Method for Fuzzy PID Controller,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 11, pp. 5177–5185, 2013.
- [56] F. Castrillón Hernández and D. Castellanos-Cárdenas, “New tuning rules for PID controllers based on IMC with minimum IAE for inverse response processes,” *Dyna*, vol. 82, no. 194, pp. 111–118, 2015, doi: 10.15446/dyna.v82n194.46744.
- [57] H. Seraji, “Force Tracking in Impedance Control,” *The International Journal of Robotics Research*, pp. 97–117, 1997.

- [58] B. León, C. Rubert, J. Sancho-Bru, and A. Morales, “Characterization of Grasp Quality Measures for Evaluating Robotic Hands Prehension,” *IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA)*, pp. 3688–3693, 2014.
- [59] A. K. Goins, R. Carpenter, W. Wong, and R. Balasubramanian, “Evaluating the Efficacy of Grasp Metrics for Utilization in a Gaussian Process-Based Grasp Predictor,” *IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, no. Iros, pp. 3353–3360, 2014.
- [60] S. P. Neill and M. R. Hashemi, *Ocean Modelling for Resource Characterization*. 2018.
- [61] M. del C. Bas Cerda, *Methodological strategy for the construction of composite indicators in university management*. 2014.
- [62] C. tecnico A. 66 G. de la calidad y evaluacion Conformidad, “Quality management systems-Guide for the implementation of indicator systems,” *AENOR*, p. 30, 2003.
- [63] M. Nardo, M. Saisama, A. Saltelli, S. Tarantola, A. Hoffman, and E. Giovannini, “Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide,” *OECD Statistics Working Paper*, 2008.
- [64] F. Medina and M. Galván, *Imputación de datos: teoría y práctica*, vol. 4. 2007.
- [65] M. Aguado and L. Provecho, “Cómo realizar e interpretar un análisis factorial exploratorio utilizando SPSS.,” *REIRE Revista d Innovació i Recerca en Educació*, vol. 12, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1344/reire2019.12.227057.
- [66] A. Del, A. Factorial, and A. L. A. Investigación, “Aplicación del análisis factorial a la investigación de mercados. Caso de estudio,” *Scientia et Technica*, vol. 35, pp. 281–286, 2007.
- [67] Ibm, “IBM SPSS Statistics,” *SPSS Statistics*, 2021. <https://www.ibm.com/cos/products/spss-statistics/pricing>.
- [68] J. Almenara-Barrios, C. García-Ortega, J. L. González-Caballero, and M. J. Abellán-Hervás, “Creación de índices de gestión hospitalaria mediante análisis de componentes principales,” *Salud Publica de Mexico*, vol. 44, no. 6, pp. 533–540, 2002, doi: 10.1590/s0036-36342002000600005.
- [69] A. J. Sáez Castillo, “Métodos estadísticos con R y R Commander,” *Universidad de Jaén, Departamento de estadística e investigación operativa*, 2016.
- [70] W. Becker, M. Saisana, P. Paruolo, and I. Vandecasteele, “Weights and importance in composite indicators : Closing the gap,” *Ecological indicators*, vol. 80, no. February, pp. 12–22, 2017, doi: 10.1016/j.ecolind.2017.03.056.

Anexos

A. Métricas de desempeño

A.1 Resistencia al deslizamiento

a) Método de prueba

El método de prueba consta de los siguientes pasos:

1. Coloque un artefacto cilíndrico en la mano robótica usando una empuñadura envolvente a la máxima potencia con el mayor número posible de puntos de contacto mano-objeto.
2. Tire del cilindro a una velocidad controlada de fuerza creciente, registrando la fuerza hasta que se confirme visualmente el deslizamiento entre la mano y el cilindro.
3. Repita el proceso para el tamaño de muestra deseado.
4. Registre los datos del sensor de fuerza a lo largo de la prueba.
5. Calcular las medidas de rendimiento.
6. Repita este procedimiento de prueba en un rango de diámetros del cilindro que la mano robótica es capaz de agarrar.

A.2 Tiempo de ciclo de agarre

a) Método de prueba

El método de prueba consta de los siguientes pasos:

1. Sujete un artefacto de prueba de cilindro dividido en la orientación de fuerza dominante con la mano robótica bajo prueba, restringiendo el artefacto para evitar el movimiento cuando se suelta la mano de prueba.
2. Bajo control de posición, ordene a la mano que se abra por completo.
3. Bajo control de posición, ordene a la mano que se cierre completamente para inducir la saturación de control, produciendo la máxima fuerza de cierre.
4. Repita los pasos 1 y 2 a velocidades máximas de mano para el tamaño de muestra deseado.
5. Registre los datos del sensor de fuerza durante toda la prueba.
6. Calcular las medidas de rendimiento.

A.3 Eficiencia del agarre

a) Método de prueba

El método de prueba consta de los siguientes pasos:

1. Coloque un cilindro en la mano robótica con una fuerza mínima para resistir las fuerzas externas ($F_{grasp,min}$) y con el mayor número posible de puntos de contacto mano-objeto.
2. Tire del cilindro a una velocidad controlada de fuerza creciente, registrando la fuerza hasta que se confirme visualmente el deslizamiento entre la mano y el cilindro.
3. Repita el proceso para el tamaño de muestra deseado.
4. Registre los datos del sensor de fuerza a lo largo de la prueba.
5. Calcular las medidas de rendimiento.
6. Repita este procedimiento de prueba en un rango de diámetros de tubería que la mano robótica sea capaz de agarrar.

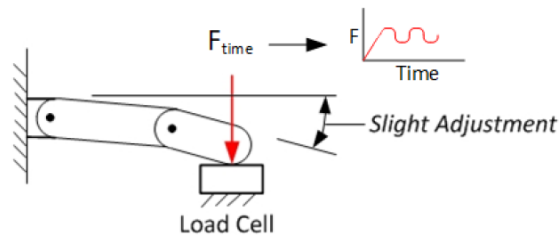
A.4 Seguimiento de la fuerza del dedo

a) Método de prueba

El método de prueba consta de los siguientes pasos:

1. Coloque el dedo robótico en una posición completamente extendida como se muestra en la Figura 90.
2. Una vez en esta configuración, el dedo se coloca para la yema sobre el punto de contacto en el sensor de fuerza con fuerza cero.
3. Bajo control de fuerza, se ordena al dedo que busque un perfil de fuerza definido.
4. Registre los datos del sensor de fuerza a lo largo de la prueba para seguir la fuerza de referencia fuerza.
5. Repita el proceso para seguir la fuerza de referencia de acuerdo con el tamaño de muestra deseado por dedo.
6. Calcular las medidas de rendimiento.

Figura 90 Configuración de prueba de seguimiento de fuerza



Fuente [12].

B. Tratamiento de datos

Análisis descriptivo de los indicadores

En la Tabla 15 se dan a conocer los diferentes datos estadísticos, necesarios para el análisis descriptivo de los indicadores simples. Para ello se utilizaron los siguientes comandos en Excel.

- Media: Se utilizó el comando PROMEDIO.
- Desviación estándar: Se utilizó el comando DESVEST.P.
- Asimetría: Se utilizó el comando COEFICIENTE.ASIMETRIA.
- Curtosis: Se utilizó el comando CURTOSIS.

Tabla 15

Métrica	N	Media	Desviación estándar	Asimetría	Curtosis
Resistencia al deslizamiento	12	0.583	0.158	0.596	1.379
Tiempo de ciclo de agarre	12	0.192	0.037	0.830	0.572
Eficiencia de agarre	12	1.996	1.305	-0.412	-2.035
Sobreimpulso	12	0.917	0.425	0.728	0.266
Error	12	0.492	0.209	0.947	0.140

Fuente autor.

C. Análisis multivariante

D.1 Matriz de correlación

Para hallar la matriz de correlación, se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Se normalizan los datos, como se muestra en la Figura 91.

Figura 91

	Resistencia deslizamiento	Ciclo de agarre	Eficiencia	Sobreimpuls	Error
Cascada a	0,588	0,000	0,257	0,339	0,000
Cascada b	0,588	0,000	0,000	0,339	0,000
Cascada c	1,000	0,144	0,087	0,251	0,432
Difuso a	0,235	0,568	0,904	0,336	0,008
Difuso b	0,235	0,439	0,889	0,608	0,190
Difuso c	0,235	1,000	0,902	0,514	0,881
Adaptativo a	0,353	0,121	0,024	0,000	0,280
Adaptativo b	0,353	0,121	0,009	0,000	0,280
Adaptativo c	0,000	0,205	1,000	0,137	1,000
Impedancia a	0,529	0,447	0,849	1,000	0,412
Impedancia b	0,529	0,545	0,811	0,768	0,065
Impedancia c	0,529	0,523	0,804	0,291	0,507

Fuente autor.

2. Se abre Excel, y se selecciona la barra de datos, como se muestra en la Figura 92.

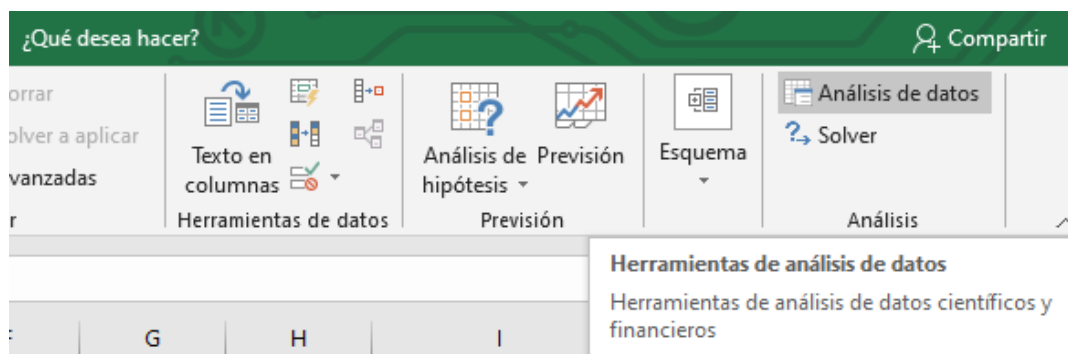
Figura 92



Fuente autor.

3. Se selecciona la ventana de análisis de datos, como se muestra en la Figura 93.

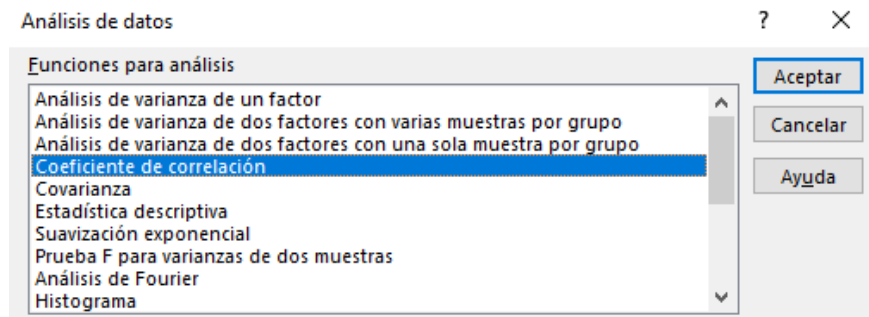
Figura 93



Fuente autor.

- Se selecciona el coeficiente de correlación.

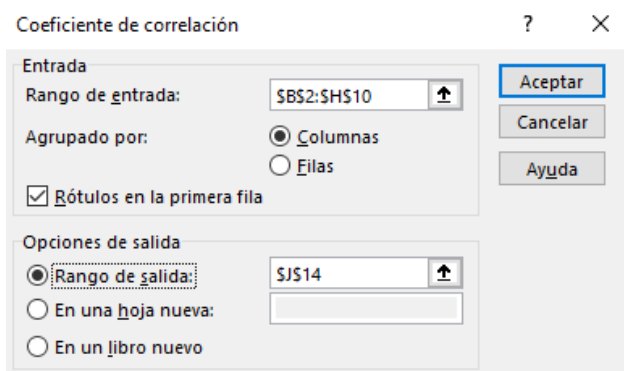
Figura 94



Fuente autor.

- Se selecciona el rango de entrada, con los datos no normalizados, y como rango de salida se define una casilla vacía cualquiera, como se muestra en la Figura 95.

Figura 95



Fuente autor.

- Finalmente se obtiene la matriz de correlación, como se muestra en la Figura 96.

Figura 96

	Resistencia	Ciclo de agar	Eficiencia	Sobreimpulso	Error
Resistencia	1				
Ciclo de agar	-0,325	1			
Eficiencia	-0,533	0,747	1		
Sobreimpuls	0,127	0,495	0,550	1	
Error	-0,369	0,367	0,401	-0,112	1

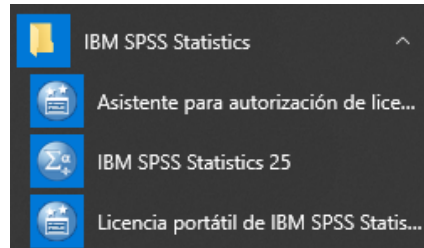
Fuente autor.

D.2 Extracción de componentes principales

En la extracción de componentes principales se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Se selecciona el programa *IBM SPSS Statistics*, como se muestra en la Figura 97.

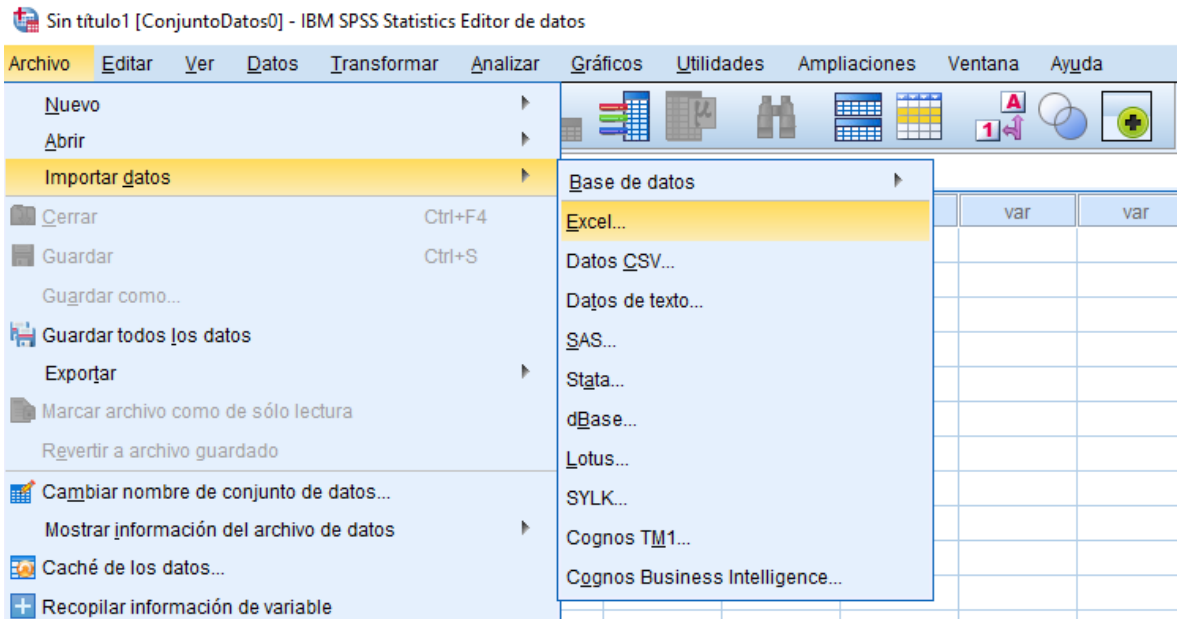
Figura 97



Fuente autor.

2. Se importan los datos en Excel mostrados en la Tabla 133, como se muestra en la Figura 98.

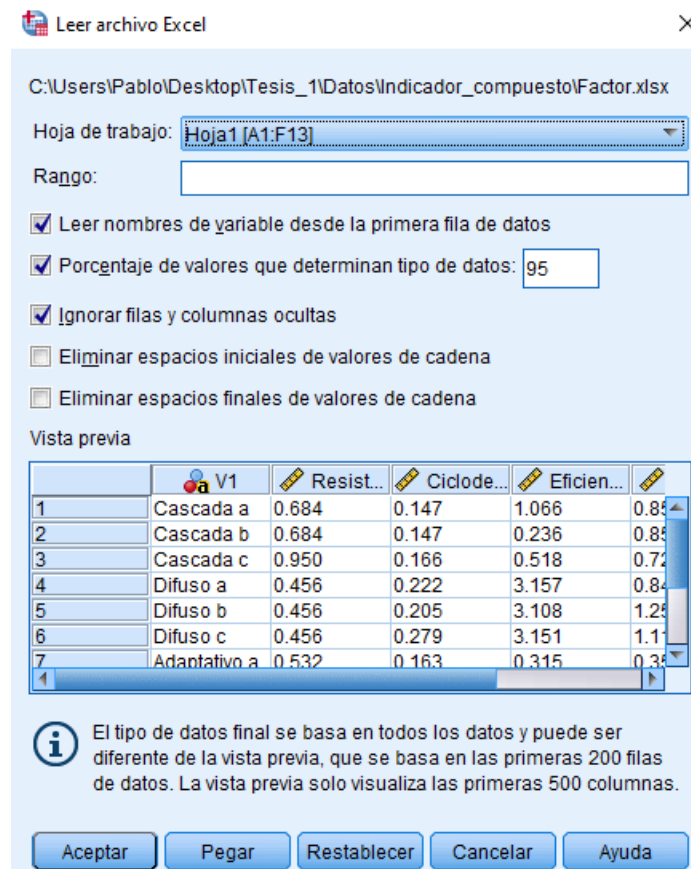
Figura 98



Fuente autor.

3. Se selecciona aceptar, como se muestra en la Figura 99.

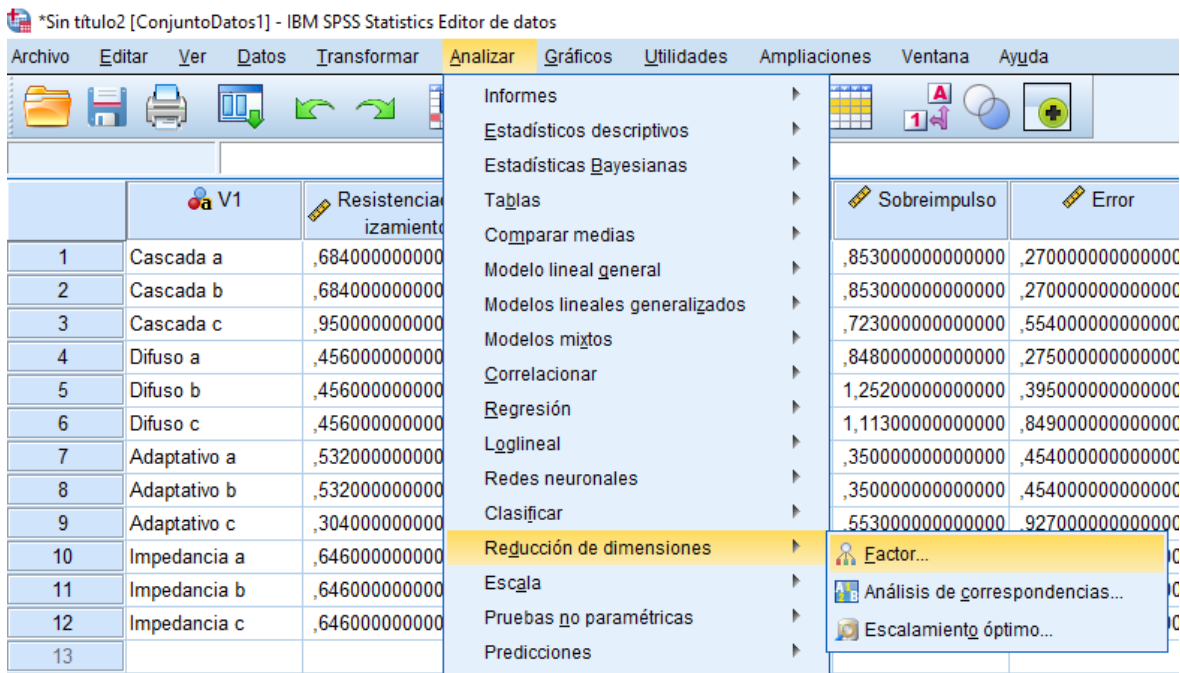
Figura 99



Fuente autor.

4. Se selecciona factor en reducción de dimensiones, como se muestra en la Figura 100.

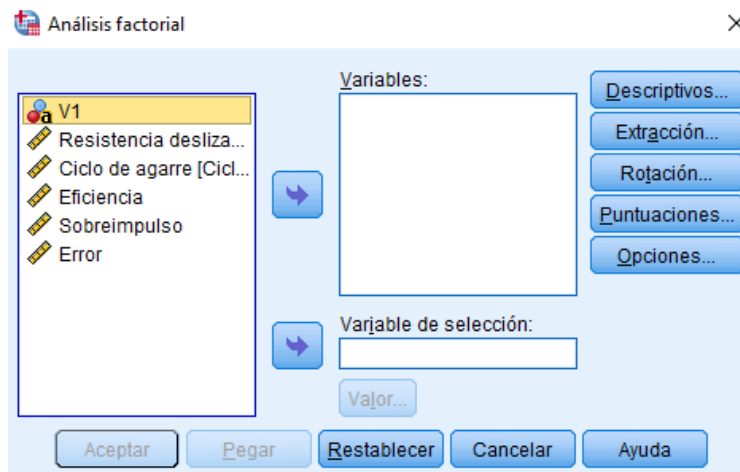
Figura 100



Fuente autor.

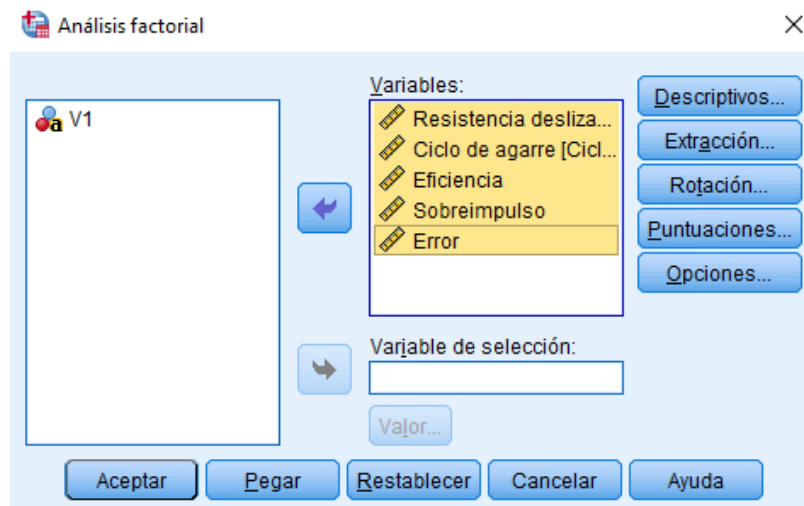
- Se seleccionan las variables, como se muestra en las Figuras 101 y 102.

Figura 101



Fuente autor.

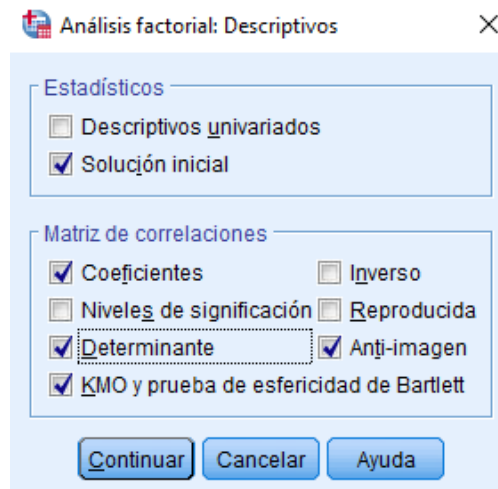
Figura 102



Fuente autor.

6. Se selecciona la prueba de esfericidad de Bartlett y los coeficientes en descriptivos, como se muestra en la Figura 103.

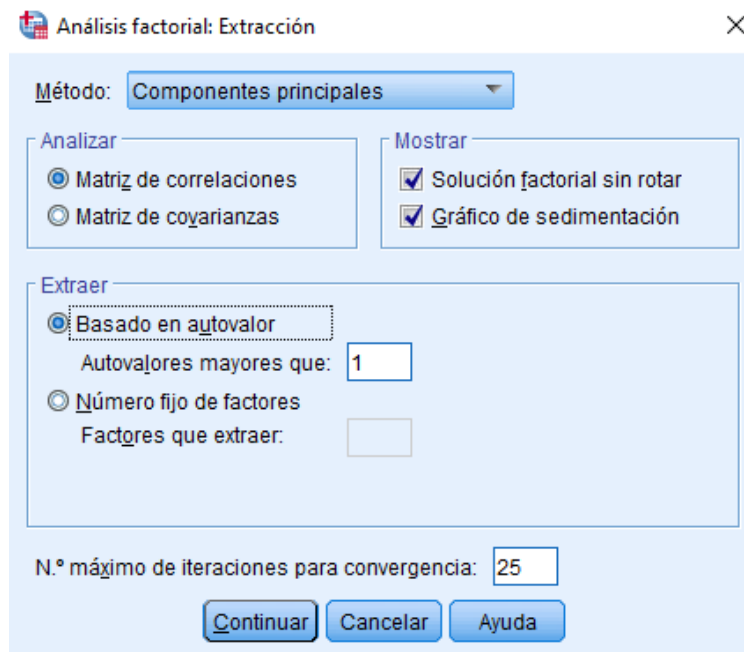
Figura 103



Fuente autor.

7. Se selecciona componentes principales en método de extracción, como se muestra en la Figura 104.

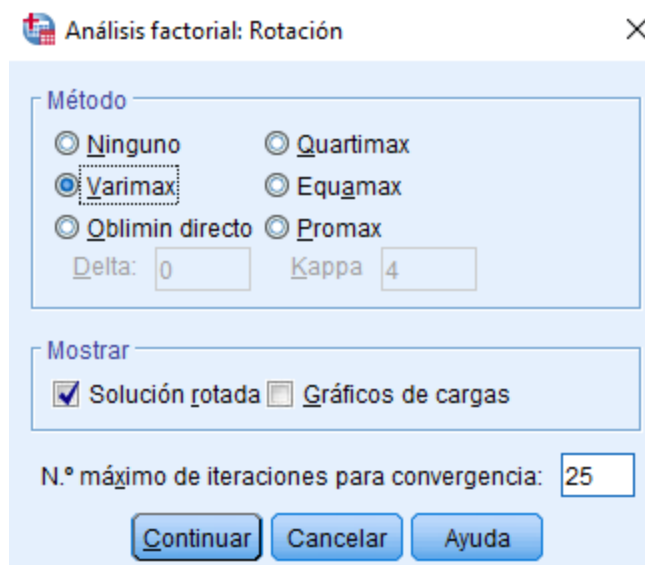
Figura 104



Fuente autor.

8. Se selecciona *Varimax* en método de rotación, como se muestra en la Figura 105.

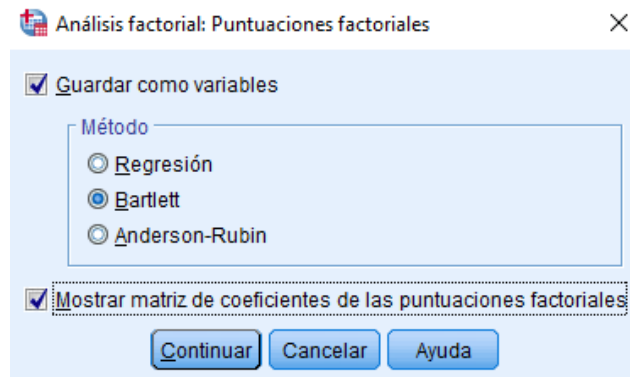
Figura 105



Fuente autor.

9. Se selecciona Bartlett como método para guardar las variables, como se muestra en la Figura 106.

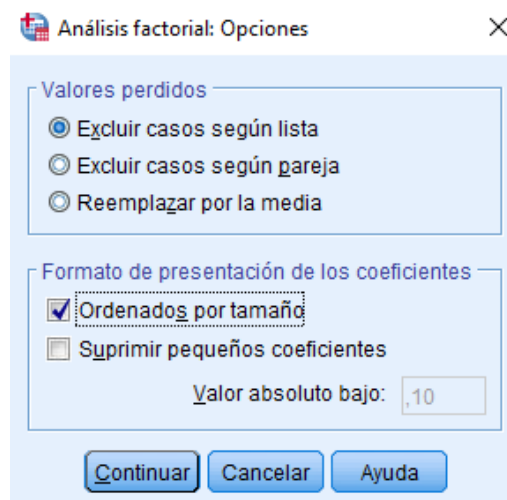
Figura 106



Fuente autor.

10. Se ordena por tamaño la presentación de los coeficientes, como se muestra en la Figura 107.

Figura 107



Fuente autor.

Con ello se obtiene la matriz de correlaciones (ver Figura 108), varianza total (ver Figura 109), el gráfico de sedimentación (ver Figura 110) y la matriz de componentes (ver Figura 111.).

Figura 108

Matriz de correlaciones^a

		Resistencia deslizamiento	Ciclo de agarre	Eficiencia	Sobreimpulso	Error
Correlación	Resistencia deslizamiento	1,000	,027	,266	,248	,034
	Ciclo de agarre	,027	1,000	,752	,836	,726
	Eficiencia	,266	,752	1,000	,774	,566
	Sobreimpulso	,248	,836	,774	1,000	,604
	Error	,034	,726	,566	,604	1,000

Fuente autor.

Figura 109

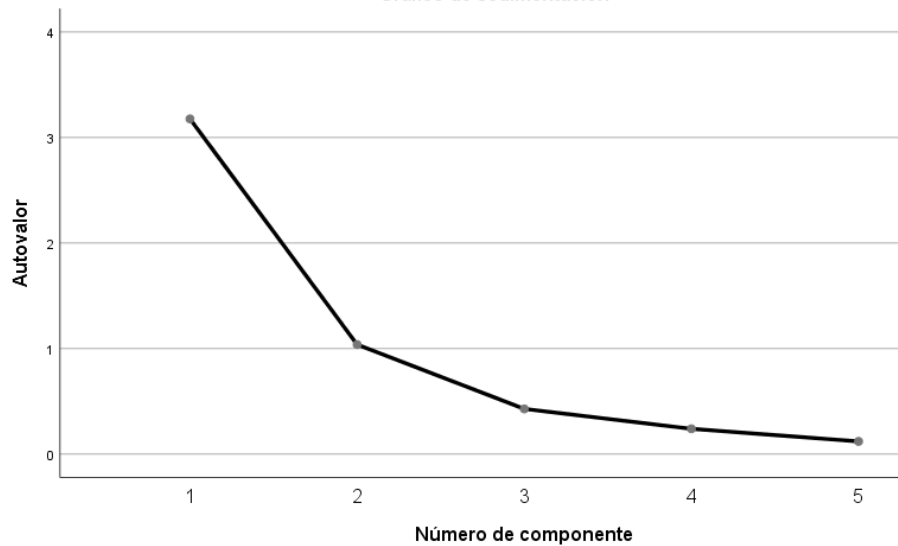
Varianza total explicada

Componente	Total	Autovalores iniciales		Sumas de cargas al cuadrado de la extracción			Sumas de cargas al cuadrado de la rotación		
		% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	3,176	63,522	63,522	3,176	63,522	63,522	3,105	62,109	62,109
2	1,037	20,746	84,268	1,037	20,746	84,268	1,108	22,159	84,268
3	,428	8,557	92,825						
4	,239	4,784	97,609						
5	,120	2,391	100,000						

Fuente autor.

Figura 110

Gráfico de sedimentación



Fuente autor.

Figura 111

Matriz de componente rotado^a

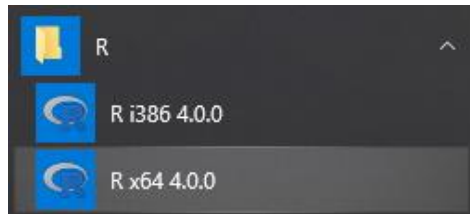
	Componente	
	1	2
Ciclo de agarre	,950	-,039
Sobreimpulso	,891	,234
Eficiencia	,846	,282
Error	,830	-,104
Resistencia deslizamiento	,059	,980

Método de extracción: análisis de componentes principales.
Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.

Fuente autor.

11. Se ejecuta el programa *R commander*, como se muestra en la Figura 112.

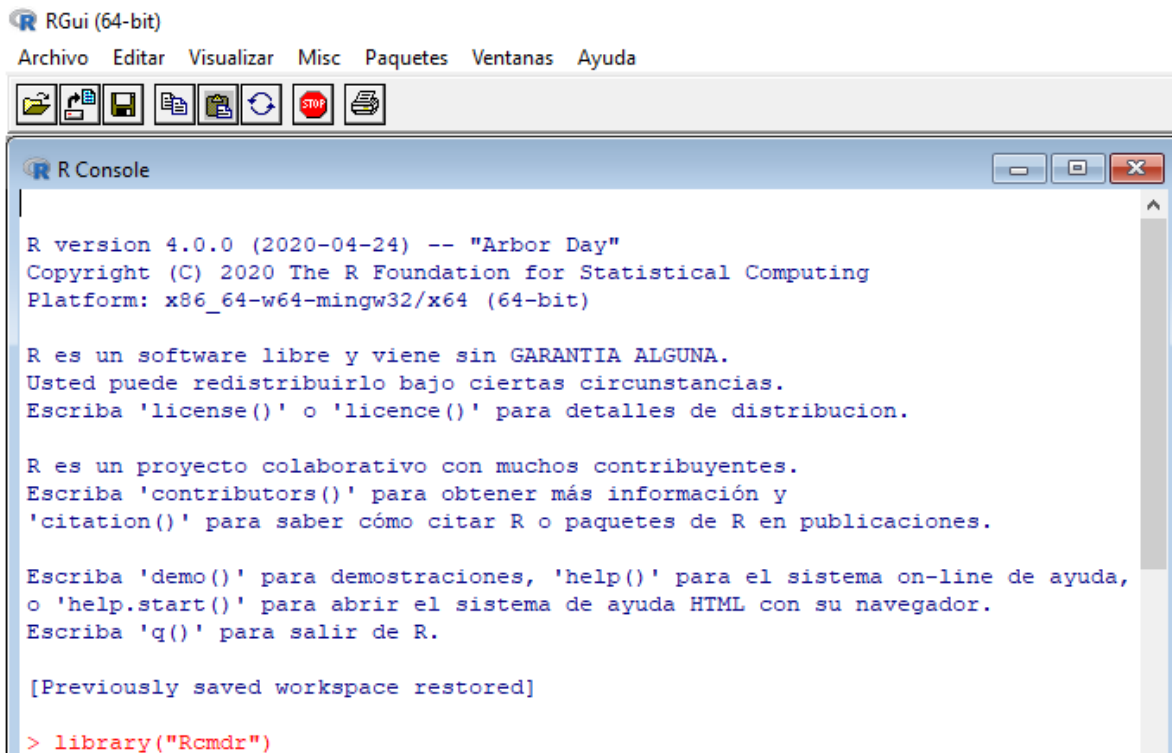
Figura 112



Fuente autor.

12. Se llama a la librería *Rcmdr*, como se muestra en la Figura 113.

Figura 113



Fuente autor.

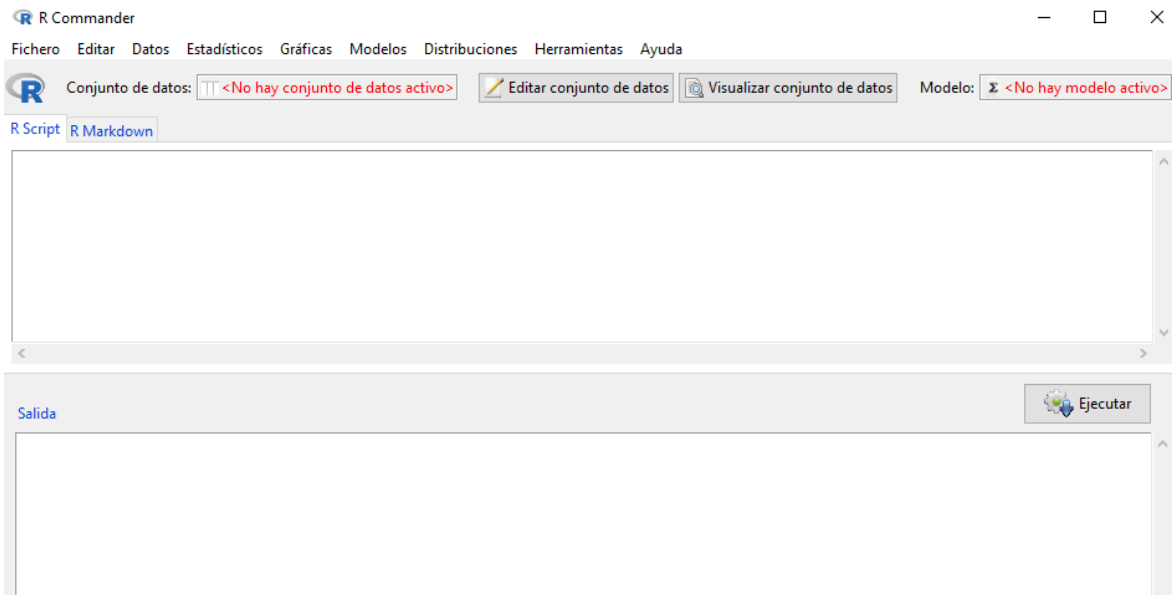
13. Se instala el paquete de *FactoMineR*, con los comandos mostrados en la Figura 114, y se ejecutan en la ventana de comandos, mostrada en la Figura 115.

Figura 114



Fuente autor.

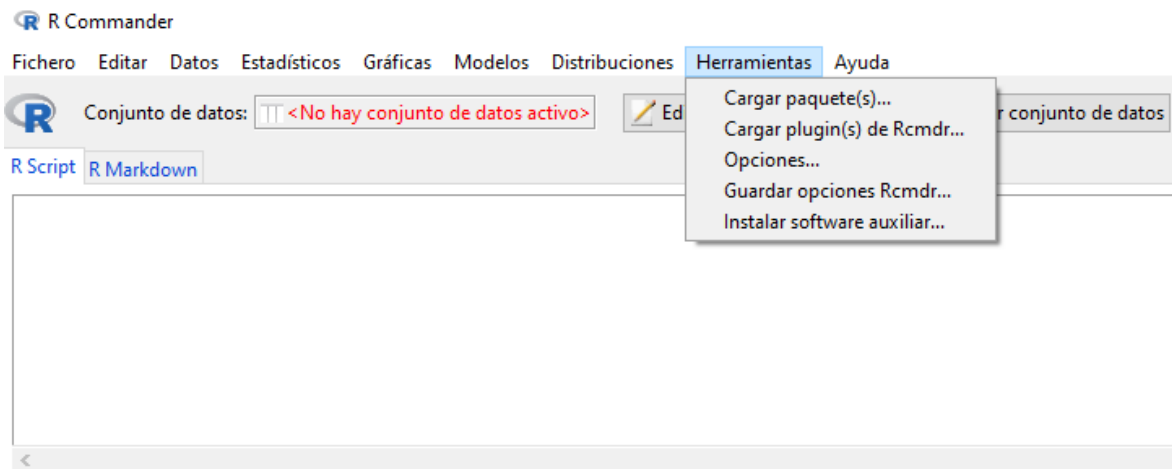
Figura 115



Fuente autor.

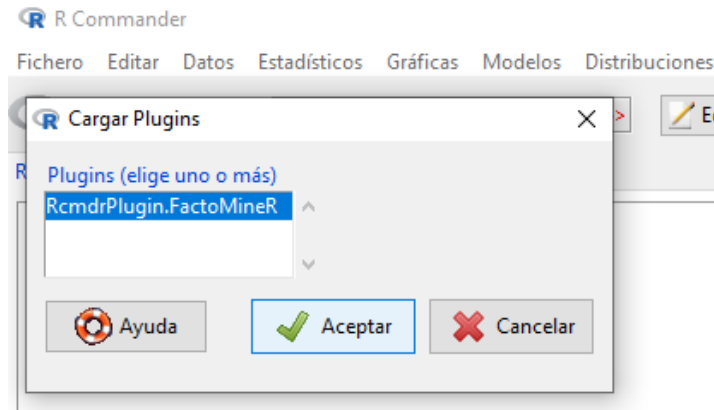
14. Se carga el Plugin de *FactoMineR*, como se muestra en las Figuras 116 y 117.

Figura 116



Fuente autor.

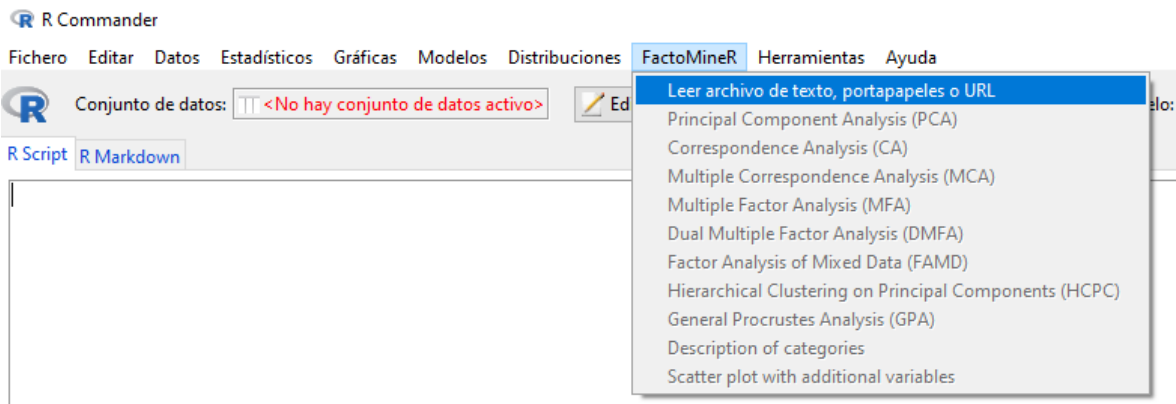
Figura 117



Fuente autor.

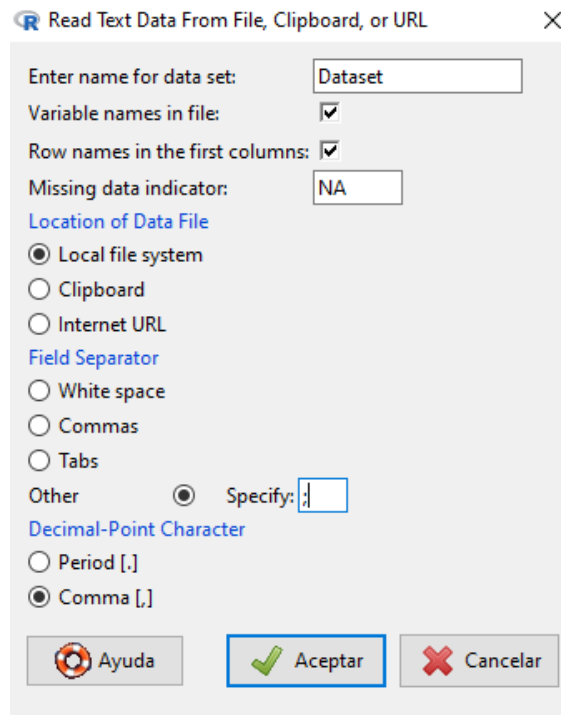
15. Ejecuta el plugin de *FactoMineR*, como se muestra en las Figuras 118 y 119.

Figura 118



Fuente autor.

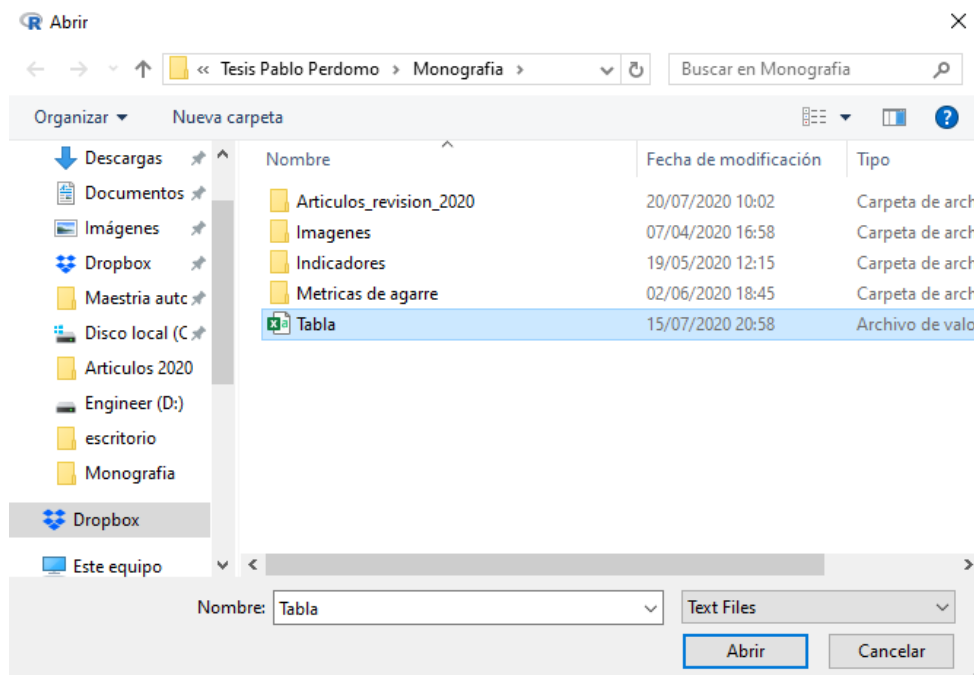
Figura 119



Fuente autor.

16. Se selecciona el archivo con los datos, el cual debe estar en .CSV archivo separado por comas, como se muestra en la Figura 120.

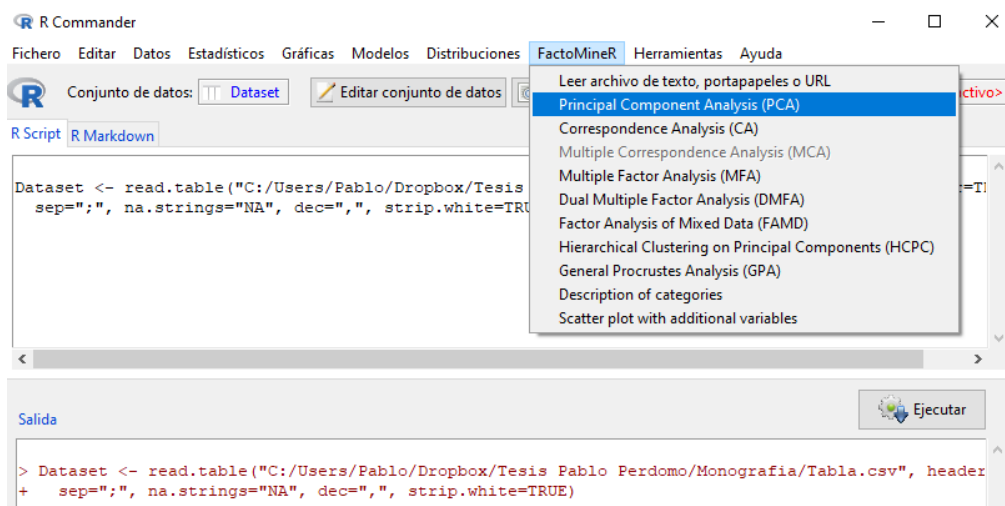
Figura 120



Fuente autor.

17. En el plugin de *FactoMineR* se selecciona *Principal Component Analysis*, como se muestra en la Figura 121.

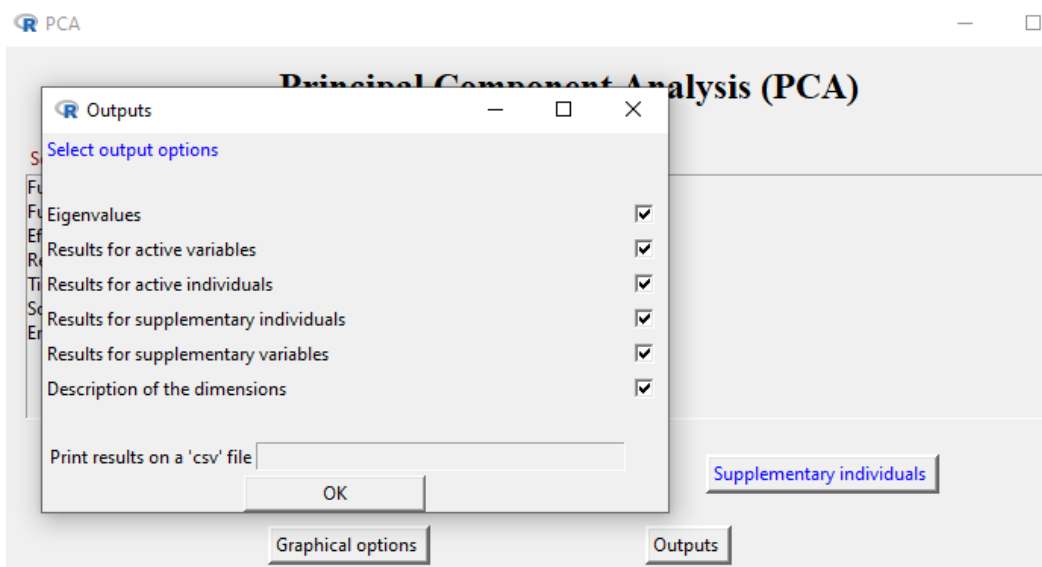
Figura 121



Fuente autor.

18. En *Outputs* se seleccionan todas las opciones, como se muestra en la Figura 122.

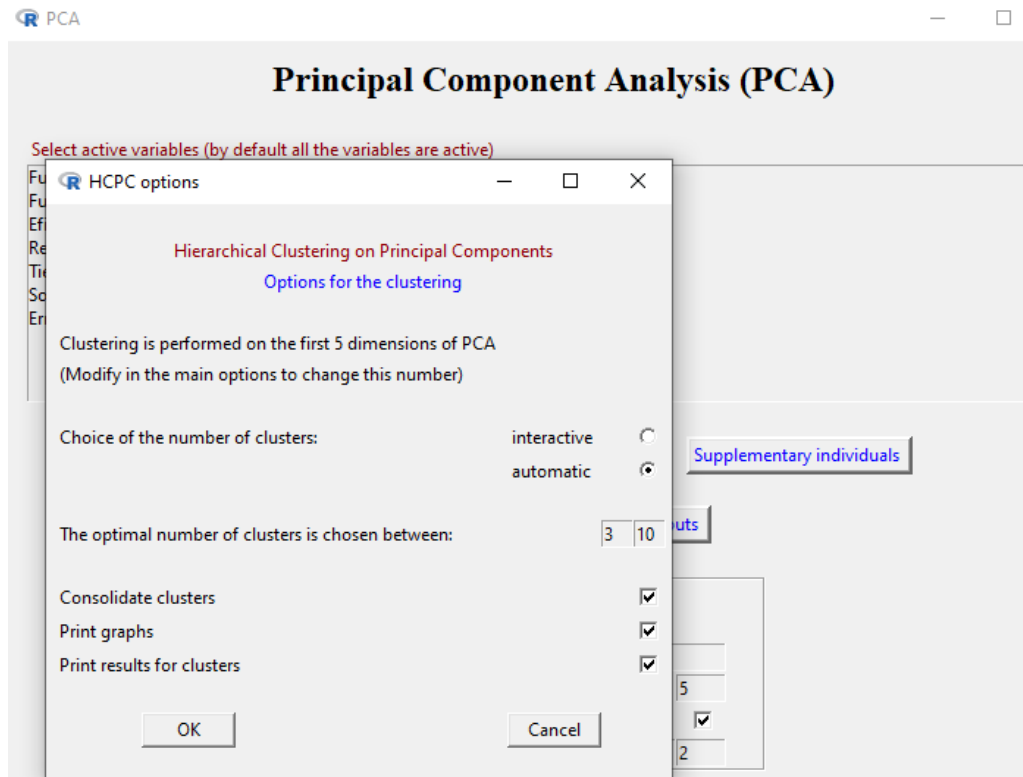
Figura 122



Fuente autor.

19. En *Graphical options* se implementa la configuración mostrada en la Figura 123.

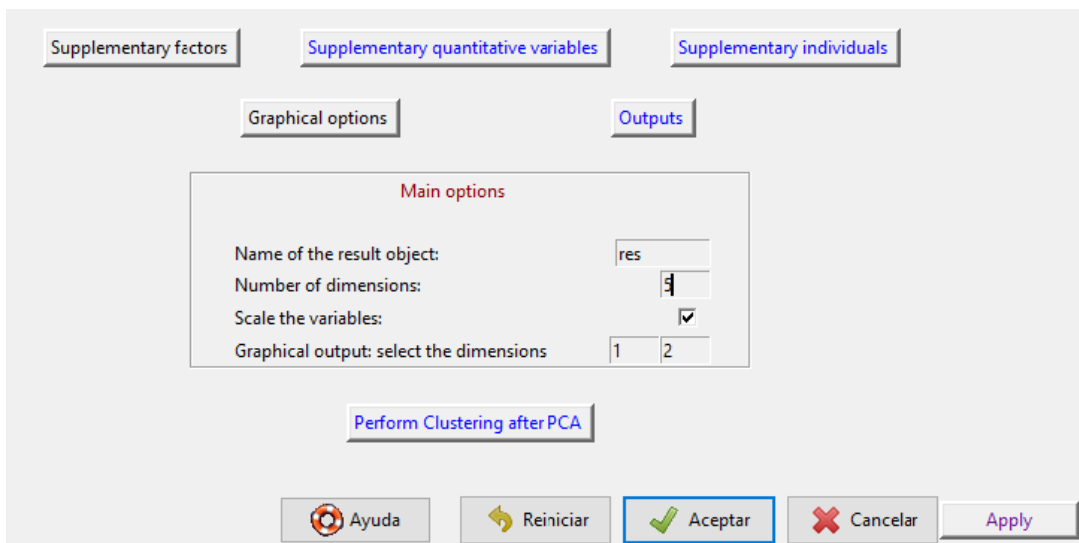
Figura 123



Fuente autor.

20. Se selecciona en aceptar, como se muestra en la Figura 124.

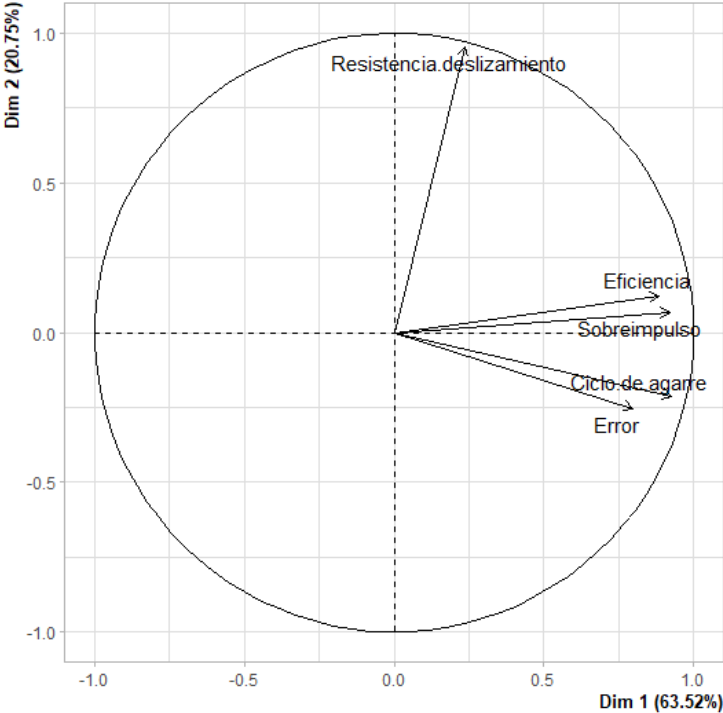
Figura 124



Fuente autor.

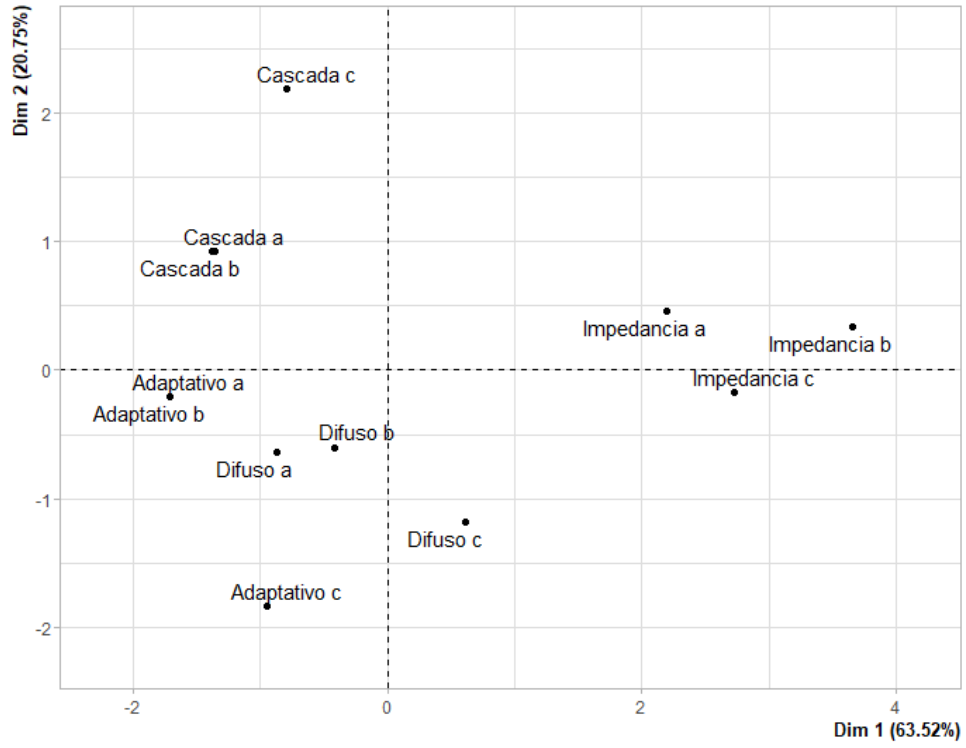
Con ello se obtienen las gráficas de correlación entre los indicadores simples y los controladores, como se muestra en las Figuras 125 y 126, con base a dos dimensiones o componentes principales. En la Figura 127 se observa una clasificación por grupos.

Figura 125



Fuente autor.

Figura 126



Fuente autor.

Figura 127

