

**PROPUESTA DE UNA TÉCNICA HCI (HUMAN COMPUTER INTERACTION)  
BASADA EN EL MODELAMIENTO ROBOTICO DE LOS MOVIMIENTOS DEL  
MIEMBRO SUPERIOR, EN UN ENTORNO DE REALIDAD AUMENTADA**

**LUIS EDUARDO BAUTISTA ROJAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

**PROPUESTA DE UNA TÉCNICA HCI (HUMAN COMPUTER INTERACTION)  
BASADA EN EL MODELAMIENTO ROBOTICO DE LOS MOVIMIENTOS DEL  
MIEMBRO SUPERIOR, EN UN ENTORNO DE REALIDAD AUMENTADA**

**LUIS EDUARDO BAUTISTA ROJAS**

**Trabajo de investigación, para optar al título de  
Magister en ingeniería de Sistemas e Informática  
Grupo de Investigación en Física Computacional de la Materia Condensada -  
FICOMACO**

**Director del proyecto:**

**HARODL PAREDES**

**Físico, Ph. D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

Dedicado a:

A mi padre del cielo,  
quién permitió la cristalización de este sueño. Por disponer en mi vida, los  
recursos, las personas y las situaciones necesarias para hacerlo realidad.

A mis Padres y familia,  
por el respaldo y paciencia durante el desarrollo de este trabajo de  
investigación. Por permanecer con su apoyo incondicional,  
en los momentos más difíciles.

A mi compañera,  
Por Compartir este sueño conmigo y apoyarlo incondicionalmente.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos los amigos que aportaron su granito de arena en el desarrollo de este trabajo.

Al grupo de Investigación FICOMACO, liderado por el profesor Harold Paredes, por apoyar mi propuesta de investigación. Por su constante dedicación, orientación y por su preocupación por formarme como investigador.

A el ingeniero Nelson Santamaría, por su valiosa colaboración y orientación.

A el ingeniero Geobanny Morillo, por su invaluable colaboración en el desarrollo de este trabajo.

A los profesores y compañeros de la Escuela de Diseño Industrial por depositar su confianza y por permitirme hacer parte de su familia.

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>15</b>
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	<b>20</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 Taxonomía Gestual</b> .....	<b>21</b>
2.1.1 Definición de Gesto.....	22
2.1.2 Clasificación de los Gestos.....	22
2.1.3 Características especiales .....	23
<b>2.2 Sensores</b> .....	<b>24</b>
2.2.1 Sensores Corporales .....	24
2.2.2 Sensores Visuales.....	25
<b>2.3 Sistemas de Reconocimiento</b> .....	<b>26</b>
2.3.1 Reconocimiento de patrones .....	26
2.3.2 Análisis Estadístico .....	27
<b>2.4 Técnicas de Interacción basadas en visión</b> .....	<b>27</b>
<b>2.5 Síntesis del Capítulo</b> .....	<b>31</b>
<b>3. DESARROLLO DE LA TECNICA</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1 Estudio del Agarre</b> .....	<b>33</b>
3.1.1 Manipulación de Objetos en RA.....	33
3.1.2 Modelo de Agarre .....	33
<b>3.2 Tareas de Manipulación</b> .....	<b>34</b>
3.2.1 Fase de Pre-agarre .....	34
3.2.2 Fase de Agarre: .....	34
3.2.3 Fase de Manipulación: .....	35
<b>3.3 Taxonomía del Agarre</b> .....	<b>35</b>
<b>3.4 Diseño de la Técnica</b> .....	<b>37</b>
3.4.1 Descripción del Framework .....	37
3.4.2 Dominio de la Aplicación.....	38
3.4.3 Alcance Tecnológico .....	50
3.4.4 Respuesta del sistema.....	54
3.4.5 Gestos.....	55
<b>4. SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL</b> .....	<b>62</b>
<b>4.1 Rastreo Monocular</b> .....	<b>63</b>
4.1.1 Adquisición de Video.....	64
4.1.2 Filtrado o Adecuación .....	65
4.1.3 Segmentación .....	72
4.1.4 Reconocimiento .....	75
<b>4.2 Estimación de Profundidad</b> .....	<b>76</b>
4.2.1 Función de profundidad.....	76
4.2.2 Aplicación del Filtro de Kalman .....	77
<b>4.3 Resultados Obtenidos</b> .....	<b>80</b>
4.3.1 Herramientas .....	81

4.3.2	Escenario.....	81
4.3.3	Procedimiento.....	82
4.3.4	Resultados.....	83
<b>5.</b>	<b>MODELO DEL MIEMBRO SUPERIOR.....</b>	<b>91</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelo de Rocon y Pons.....</b>	<b>91</b>
5.1.1	Segmentos del MS.....	92
5.1.2	Movimientos del Miembro Superior.....	93
5.1.3	Articulaciones del MS.....	94
<b>5.2</b>	<b>Ampliación del Modelo.....</b>	<b>98</b>
5.2.1	Trabajo relacionado.....	99
5.2.2	Modelo de la Mano.....	102
<b>5.3</b>	<b>Modelo Complementado.....</b>	<b>107</b>
5.3.1	Cinemática Directa.....	109
5.3.2	Modelo inverso.....	110
<b>5.4</b>	<b>Evaluación del Modelo.....</b>	<b>121</b>
5.4.1	Fotogrametría Bidimensional – Triangulación Estéreo.....	122
5.4.2	Protocolo de toma de datos.....	122
5.4.3	Resultados.....	126
<b>6.</b>	<b>APLICACIÓN MODELO REALIZADA.....</b>	<b>139</b>
<b>6.1</b>	<b>Diagrama de Procesos.....</b>	<b>139</b>
6.1.1	Proceso del Sistema de visión.....	139
6.1.2	Proceso de Posición de Brazo.....	140
6.1.3	Proceso de Funciones de Manipulación.....	140
<b>6.2</b>	<b>Interfaz Gráfica de Usuario.....</b>	<b>141</b>
<b>6.3</b>	<b>Pruebas de Manipulación.....</b>	<b>142</b>
<b>7.</b>	<b>Aplicación Prototipo – DAR.....</b>	<b>145</b>
7.1	Interfaz Gráfica de Usuario.....	145
7.2	Controles.....	146
7.3	Espacio de trabajo.....	147
7.4	Funciones extra ( deshacer y eliminar).....	147
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>148</b>
	<b>TRABAJO FUTURO.....</b>	<b>151</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>152</b>

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Realidad Aumentada. [42].....	16
Figura 2 Dispositivos de Interacción. [31]. ....	16
Figura 3. Clasificación de los Gestos. [92]. ....	23
Figura 4. Esquema de la TUI dibujados Ishi. ....	28
Figura 5. Guante usado en [111]. ....	28
Figura 6. Juego de Mesa en [112]. ....	29
Figura 7. Aplicación en [113]. ....	29
Figura 8. VisionWand. Aplicación en [130]. ....	29
Figura 9. Técnica usada en WARS [131]. ....	30
Figura 10. Técnica usada en FingerARTip [134]. ....	31
Figura 11. Árbol de la Taxonomía del Agarre propuesta por Cutkosky [36]. ....	36
Figura 12. Agarre de Pinza Inferior. [37] .....	36
Figura 13. Framework Diseño de Interacciones Gestuales. [73]. ....	37
Figura 14. Diagrama de Dominio de la Aplicación. ....	39
Figura 15. Espacio de trabajo en posición sedente. ....	40
Figura 16. Área de trabajo en posición sedente. ....	41
Figura 17. Área de trabajo en posición sedente. ....	41
Figura 18. Entorno de trabajo - Iluminación. ....	42
Figura 19. Entorno de trabajo. ....	43
Figura 20. Espacio de trabajo. ....	46
Figura 21. Capturas de los registros de video para la observación. ....	47
Figura 22. Diagrama de Tareas. ....	48
Figura 23. Diagrama de Alcance Tecnológico. ....	50
Figura 24. Dispositivos de Entrada. ....	51
Figura 25. Diagrama de Respuesta del Sistema. ....	54
Figura 26. Diagrama de Gestos. ....	55
Figura 27. Marcadores de Color. ....	56
Figura 28. Acción de crear un Plano. ....	57
Figura 29. Acción de selección de un objeto. ....	57
Figura 30. Sistema de coordenadas para el rastreo. ....	63
Figura 31. Arquitectura del Sistema de Rastreo. ....	64
Figura 32. Webcam Genius eface 1300. ....	64
Figura 33. Una de la serie de imágenes tomadas en el proceso de calibración. ....	65
Figura 34. Resultados de la calibración. Parámetros Extrínsecos. ....	68
Figura 35. Extracción de la componente Cb y Cr de la imagen. ....	69
Figura 36. Componente Cb y Cr de la Imagen. Histograma Inicial e Histograma Ecuilizado. ....	70
Figura 37. Variaciones en la imagen antes y después de ecualizar el histograma. ....	71
Figura 38. Proceso de Umbralización. Fuente: Autor .....	73
Figura 39. Variaciones en la imagen. Imagen original (izquierda), antes de umbralizar (centro) ....	74
Figura 40. Reconocimiento de los marcadores en la imagen procesada. ....	75
Figura 41. Región de búsqueda del marcador proporcionada por el filtro de Kalman. ....	77

Figura 42. Diagrama de bloques del Filtro de Kalman aplicado a la localización de objetos en visión artificial. ....	78
Figura 43. Cámara Kodak Easy Share M530. Fuente: Kodak. ....	81
Figura 44. Configuración del espacio para la toma de datos. Vista Superior y vista Frontal. ....	81
Figura 45. Interfaz gráfica de la aplicación de triangulación. ....	82
Figura 46. Estimación de la Posición en X, Y e Z del marcador rojo VS Posición Real del Marcador. ....	84
Figura 47. Desviación Estándar presentada en la toma de datos para la posición en X,Y e Z del marcador rojo. ....	85
Figura 48. Error Absoluto presentado en la estimación de posición del marcador rojo. ....	86
Figura 49. Estimación de la Posición en X,Y e Z del marcador Azul VS Posición Real del Marcador. ....	88
Figura 50. Desviación Estándar presentada en la toma de datos para la posición en X, Y e Z del marcador Azul. ....	88
Figura 51. Error Absoluto presentado en la estimación de posición del marcador azul. ....	89
Figura 52. Movimientos del Miembro superior basado en el modelo de Rocon y Pons. [1]. ....	92
Figura 53. Planos anatómicos del cuerpo. [39].....	93
Figura 54. Movimientos del Hombro. A. Extensión-Flexión. B. Abducción-Aducción. C. Rotación. [6] .....	95
Figura 55. Movimientos del Codo.....	96
Figura 56. Movimientos de la mano, .....	97
Figura 57. Modelo de Rocon y Pons. [1].....	97
Figura 58. Modelo Simplificado de Walairacht. [9]. ....	99
Figura 59. Modelo Simplificado de Veber y Bajd. [11] .....	100
Figura 60. Modelo Simplificado de Chen, [12] .....	101
Figura 61. Segmentos y Articulaciones del Modelo Simplificado.....	105
Figura 62. Modelo Complementado de 10 GDL.....	108
Figura 63. Grafica del Modelo Complementado de 11 GDL. Posición Inicial. ....	110
Figura 64. Una iteración de FABRIK en el escenario Backward para la solución del modelo de 10 GDL. ....	113
Figura 65. Una iteración de FABRIK en el escenario Forward para la solución del modelo de 10 GDL. ....	115
Figura 66. Modelo se múltiples efectadores finales y múltiples sub-bases.....	115
Figura 67. Aplicación de las restricciones angulares. ....	118
Figura 68. Captura de la Aplicación desarrollada en Matlab para solucionar el modelo Inverso... 119	
Figura 69. Resolución de modelo Inverso. Imagen capturada de por la webcam del sistema (izquierda). Modelo en 3D brazo (derecha).....	120
Figura 70. Resolución de modelo Inverso. Modelo en el plano XY e XZ (izq), Imágenes de la posición del brazo (der).....	120
Figura 71. Puntos o marcas anatómicas de referencia. [38].....	123
Figura 72. Vista Superior del Área de trabajo, posición de las cámaras y del usuario. ....	124
Figura 73. Visualización del Modelo Esquelético y Marcadores suberificales usados en fotogrametría. ....	125
Figura 74. Par estéreo de fotografías usadas en la triangulación.....	126
Figura 75. Comparación del Modelo del Brazo Vs Brazo Real. Vista Frontal y Superior. ....	126
Figura 76. Distribución de Errores Absolutos del Codo en cada eje de coordenadas. ....	127
Figura 77. Distribución de Errores Absolutos del Codo en cada eje de coordenadas. ....	128
Figura 78. Distribución de la norma de los Errores Absolutos del codo.....	128
Figura 79. Distribución de Errores Absolutos de la muñeca en cada eje de coordenadas. ....	129

Figura 80. Distribución de Errores Absolutos del Codo en cada eje de coordenadas .....	130
Figura 81. Distribución de la norma de los Errores Absolutos de la Muñeca.....	130
Figura 82. Distribución de Errores Absolutos de la articulación MCP del dedo Índice en cada eje de coordenadas. Eje X, Y e Z, respectivamente. ....	131
Figura 83. Distribución de Errores Absolutos del MCP del Índice en cada eje de coordenadas. .	131
Figura 84. Distribución de la norma de los Errores Absolutos del CMP del índice.....	132
Figura 85. Distribución de Errores Absolutos de la articulación TMC del dedo Pulgar en cada eje de coordenadas. Eje X, Y e Z, respectivamente. ....	132
Figura 86. Distribución de Errores Absolutos del TMC del Pulgar en cada eje de coordenadas...	133
Figura 87. Distribución de la norma de los Errores Absolutos del TCM del Pulgar. ....	133
Figura 88. Distribución de la norma de los Errores Absolutos del TCM del Pulgar. ....	135
Figura 89. Ángulos del antebrazo y muñeca en rotación sobre X.....	137
Figura 90. Ángulos del Hombro, antebrazo y muñeca en rotación sobre Y.....	137
Figura 91. Ángulos del Hombro, antebrazo y muñeca en rotación sobre Z. ....	138
Figura 92. Diagrama de procesos de la aplicación en Matlab®.....	139
Figura 93. Proceso de Visión. ....	140
Figura 94. Proceso de Posición del Brazo. ....	140
Figura 95. Proceso Funciones de Manipulación .....	140
Figura 96. Interfaz Aplicación RA en Matlab ®. ....	141
Figura 97. Grupo de Controles de la aplicación. ....	141
Figura 98. Control de Profundidad y Zona de Trabajo de la aplicación. ....	142
Figura 99. Interfaz de la aplicación desarrollada en Unity ®.....	146
Figura 100. Disposición de las zonas en la interfaz de la aplicación. ....	146

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Criticidad de las Tareas.....	49
Tabla 2. Tiempos promedio en cada una de las etapas del sistema. ....	53
Tabla 3. Coordenadas de Color de los marcadores.....	56
Tabla 4. Longitud de los Segmentos. [1].....	92
Tabla 5. Parámetros de DH para el Modelo de Rocon y Pons. [1] .....	98
Tabla 6. Parámetros de DH para el dedo pulgar y demás dedos, respectivamente. [11].....	100
Tabla 7. Ángulos de Movimiento de las articulaciones. [13] .....	103
Tabla 8. Análisis de Componentes Principales para modelos Simplificados de la Mano. [16] .....	104
Tabla 9. Simplificación de los componentes de la Mano. ....	104
Tabla 10. Parámetros de DH para el modelo simplificado de la mano. ....	106
Tabla 11. Articulaciones y movimientos por articulación del Modelo ampliado. ....	108
Tabla 12. Parámetros de DH para el modelo complementado del MS. ....	109
Tabla 13. Tiempos promedio en la resolución del algoritmo.....	121
Tabla 14. Set de marcadores usados en el MS. ....	123
Tabla 15. Distribución de Errores Absolutos del Codo en cada eje de coordenadas. ....	127
Tabla 16. Distribución de Errores Absolutos de la Muñeca en cada eje de coordenadas. ....	129
Tabla 17. Distribución de Errores Absolutos del MCP Índice en cada eje de coordenadas. ....	131
Tabla 18. Distribución de Errores Absolutos del TCM Pulgar en cada eje de coordenadas.....	132

**TITULO:** PROPUESTA DE UNA TÉCNICA HCI (HUMAN COMPUTER INTERACTION) BASADA EN EL MODELAMIENTO ROBOTICO DE LOS MOVIMIENTOS DEL MIEMBRO SUPERIOR, EN UN ENTORNO DE REALIDAD AUMENTADA\*

**AUTOR:** LUIS EDUARDO BAUTISTA ROJAS\*

**PALABRAS CLAVE:** Realidad Aumentada, HCI, Interacción, visión monocular.

## RESUMEN

La Realidad Aumentada (RA), es una tecnología que permite superponer virtualmente información de cualquier tipo, sobre un escenario capturado de la realidad, dicha información puede ser 2D o 3D. El principal mecanismo de interacción en la RA es el uso de marcadores fiduciales para ubicar y registrar el objeto en 3D. De otro lado las interacciones entre un sistema informático y el usuario son estudiadas por la disciplina conocida como HCI (Human Computer Interacción), proponiendo nuevas formas de plantear esta relación de manera más confortable.

Se propone una técnica de interacción, que plantea el uso del miembro superior (MS) como mecanismo de interacción para la manipulación directa de objetos 3D en un entorno de realidad aumentada. En esta propuesta desarrolló un sistema de captura de datos necesario para reconstruir los movimientos del brazo. Dicho sistema se desarrolló en dos partes, primero un sistema de Visión artificial de bajo costo que permite la ubicación de objetos esféricos de tamaño conocido, en un espacio 3D y sincronizado con el mundo real. La posición de dichos objetos esféricos (marcadores) ubicados en los dedos índice y pulgar alimentan de datos un modelo de 10 GDL del brazo. Dicho modelo reconstruye la posición del brazo mediante la resolución del modelo inverso usando un algoritmo iterativo. El modelo planteado fue comparado mediante un sistema de fotogrametría bidimensional por triangulación, los resultados obtenidos muestran la precisión necesaria para la manipulación, tiempos de procesamiento bajos.

Posteriormente se desarrolló una aplicación modelo en Matlab® usando las variación de los ángulos de las articulaciones del MS arrojadas por la solución del modelo, como datos de entrada para la funciones de manipulación del objeto. Posteriormente, se desarrolló una aplicación en el motor gráfico Unity 3D orientado a su uso en aplicaciones de escritorio y web.

---

\*Trabajo de Investigación

\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Maestría en Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: P.hD. Harold Paredes.

**TITLE:** A TECHNICAL PROPOSAL HCI (Human Computer Interaction) ROBOTIC BASED MODELING OF UPPER LIMB MOVEMENTS IN AUGMENTED REALITY ENVIRONMENT\*

**AUTHOR:** LUIS EDUARDO BAUTISTA ROJAS\*

**KEY WORDS:** Augmented reality, HCI, Interaction, monocular visión.

## SUMARY

The Augmented Reality (AR) is a technology that allows overlaying virtually any type of information, captured onstage reality, this information may be 2D or 3D. This technology has gained ground in recent years and is seen as one of the most advance technology in the immediate future. The mechanism of interaction in the RA is the use of fiducial markers to locate and register the object in 3D. Interactions between a computer system and the user are studied by HCI (Human Computer Interaction) discipline, proposing new ways to raise this in a more comfortable relationship.

A technique interaction was proposed, which proposed the use of upper limb (UL) as an interaction mechanism for direct manipulation of 3D objects in augmented reality environment. To build and develop this proposal we developed a data capture system necessary for the system to recognize the movements of the arm and it can perform the interaction. This system was developed in two parts, first artificial vision system low cost enabling location of known size spherical objects in 3D space and synchronized with the real world. The spherical objects position (markers) located on the index finger and thumb, feed data to models 10 DOF arm developed. The model arm position reconstructed by solving the inverse model using an iterative algorithm. The model proposed was compared using a two-dimensional photogrammetry system for triangulation, the results show the precision required for the handling, processing times low.

An application was developed in Matlab ® using the variation of joint angles of the MS dropped by the solution of the model. This application replaces the use of fiducial markers and allows basic manipulation of objects in an environment of RA. An application was developed in Unity 3D game engine designed to use in desktop and web applications.

---

\*Master's of Degree Thesis Work

\* Physico-Mechanical Engineering Faculty. School of Informatic Engineering. Advisor Ph.D. Harold Paredes.

## INTRODUCCION

En la historia del desarrollo de la tecnología informática podemos encontrar la aparición de diversos dispositivos de interacción como teclados, mouse, touch-screens, entre otros, que han servido como dispositivos mediadores en la comunicación [83]. Sin embargo la evolución y tendencia de los dispositivos tecnológicos cotidianos apunta a la interacción de manera intuitiva y natural [84]. Es de esta forma como se visualiza la comunicación entre usuarios y dispositivos buscando la forma más intuitiva posible y propendiendo al uso mínimo o ausente de hardware de mediación en la interacción [85].

La disciplina encargada de estudiar la relación hombre computador e investigar y proponer nuevas formas de hacer la relación más comfortable permitiéndoles a los usuarios realizar sus trabajos con más eficiencia y satisfacción, teniendo en cuenta los factores humanos presentes, es denominada HCI - Human Computer Interaction) [86].

En los últimos años se ha desarrollado un tipo de interacción denominada Realidad Aumentada (RA) [84]. Esta tecnología les permite a los usuarios superponer virtualmente información de cualquier tipo, sobre un escenario capturado de la realidad [42].



Figura 1. Realidad Aumentada. [42].

Según Roussou [87] en los entornos integrados por seres humanos y ordenadores, el término interacción se ha definido de diversas formas, dependiendo de si el contexto es operacional, mecánico, práctico, educacional, social, artístico o recreativo. Sin embargo se reconoce como una propiedad inherente de cualquier entorno interactivo multimedia o de RV que incluye actividades y respuestas físicas, sensoriales y mentales [87].

Existen diversas formas de interacción en los sistemas de RA, algunas basadas en dispositivos denominados *trackers* (rastreadores) que se usan como mecanismo de interacción entre la realidad y la información a superponer (ver figura 2). Sin embargo la interacción se orienta al uso del cuerpo como dispositivo de interacción.



Figura 2 Dispositivos de Interacción. [31].

Siguiendo la perspectiva marcada por la tecnología [88], y teniendo en cuenta que la Realidad Aumentada ha alcanzado al menos un nivel de desarrollo suficiente

[84] y comprendiendo que el uso de los movimientos naturales es la mejor forma de mejorar la interacción con un sistema [85], se plantea el uso del miembro superior como mecanismo de interacción. Este mecanismo de interacción se analizará ampliamente dentro este trabajo de investigación.

Algunos autores como Dorfmüller [89], han realizado estudios de este tipo, sin embargo no se han desarrollado aún lo suficiente para permitirles a los usuarios mantener una experiencia de uso satisfactoria. Se considera que los sistemas de interacción basados en visión han alcanzado un nivel de desarrollo bastante destacado [90], sin embargo mejoras sustanciales se pueden plantear usando sistemas de interacción que combinen diferentes tipos de dispositivos [84].

El presente trabajo plantea el manejo el miembro superior como mecanismo de interacción para la manipulación directa de objetos en un entorno de realidad aumentada 3D. En el capítulo 2 de este documento, se realiza una revisión del estado actual de las diversas técnicas, dispositivos y demás elementos presentes en el proceso de interacción en entornos de RA. Resultado de dicha revisión, se orienta la investigación al planteamiento de una técnica de interacción que permita la interacción con los objetos mediante los movimientos naturales del miembro superior, que use la menor cantidad de recursos (hardware, software), y que plantee una solución alterna al uso de marcadores fiduciales<sup>1</sup> como mecanismo de interacción.

En el capítulo 3, se inicia el desarrollo de la técnica planteada, se inicia con el estudio de agarre para la manipulación de objetos, mediante lo cuál se define el modelo de agarre, las tareas de manipulación y la taxonomía del agarre a usarse en el desarrollo del proyecto. Seguidamente se inicia el desarrollo de la técnica usando el marco de desarrollo titulado “*A framework for research and design of gesture-based human computer interactions*”, elaborado por Karam [73], donde metodológicamente se desarrolla la técnica, teniendo en cuenta los factores

---

<sup>1</sup> Objetos que permiten el rastro en 3D en un sistema de visión. Usados en RA para insertar objetos en la imagen. [42]

presentes en la interacción y ahora llevados a un entorno de realidad aumentada 3D en este trabajo.

Para llevar a cabo el desarrollo de la técnica se elabora un sistema de captura de datos, necesario para que el sistema reconozca los movimientos del brazo y se pueda realizar la interacción. Dicho sistema se desarrolló en dos partes, primero un sistema de Visión artificial de bajo costo que permite la ubicación de objetos esféricos de tamaño conocido, en un espacio 3D y sincronizado con el mundo real, en el capítulo 4 se expone el desarrollo de dicho sistema basado en el campo de Color YCbCr para el reconocimiento del color y el uso del filtro de Kalman para el mejoramiento del tiempo de respuesta en el rastreo 3D de los objetos. La posición de dichos objetos esféricos (marcadores) ubicados en los dedos índice y pulgar alimentan de datos al modelos de 10 GDL del brazo desarrollado. El modelo desarrollado se basó en el modelo de Rocon y Pons [3] con 7GDL complementado con una síntesis del trabajo de modelos de la mano relacionados con aprehensión desarrollado por Cobos [8,13]. En el capítulo 5 se desarrolla el modelo planteado que reconstruye la posición del miembro superior con 10 GDL, mostrando una precisión alta y tiempo de solución bajo, comparado con algunos modelos de su tipo. Para la resolución del modelo inverso se implementó el algoritmo de FABRIK [71,72], un algoritmo iterativo que permite la resolución de la cadena inversa de 10 grados de libertad con dos ramificaciones en tiempo bastante cercanos al tiempo real con el mínimo de singularidades, además de permitir soluciones de posiciones y movimientos más naturales que otros algoritmos de su tipo.

Posteriormente en el capítulo 6, se muestra la aplicación desarrollada en Matlab, donde se manipula un objeto en un entorno de 3D, mediante los movimientos del brazo. Sin embargo, notando el bajo desempeño de la herramienta, ya que no está diseñada para el manejo de graficas 3D en tiempo real, además de esto presenta una baja escalabilidad y aplicación en entornos de escritorio o web, se desarrolló una segunda aplicación especialmente para su uso en entorno de escritorio o web. Dicha aplicación denominada *DAR*, se desarrolló usando una simplificación de la técnica planteada en el motor de desarrollo Unity3D, especialmente diseñado para

objetos 3D con renderización en tiempo real. *DAR* permite la manipulación de objetos usando una metáfora de juego para un rompecabezas 3D, sobre un plano definido por el usuario. *DAR* se desarrolló especialmente para entornos web, mediante el uso de la webcam del computador en uso.

Finalmente, en los capítulos 7 y 8 se exponen las conclusiones del trabajo realizado, así mismo se expone el trabajo futuro a realizar en búsqueda de el mejoramiento de la técnica y las posibles aplicaciones inmediatas de la misma.

# 1. OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

Proponer una técnica de HCI (Human Computer Interaction) basado en los movimientos del miembro superior descritos mediante métodos de modelamiento robótico, que permita la interacción del usuario, en un entorno de realidad aumentada.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Describir el estado actual de la HCI (Human Computer Interaction), basada en los movimientos corporales del miembro superior, aplicados en entornos de Realidad Aumentada (R.A.) con el fin de determinar los principales elementos presentes en la comunicación entre usuario final y un sistema.

Adaptar el modelo cinemático del miembro superior propuesto por Rocon y Pons, que describa en 10 grados de libertad los movimientos del miembro superior, orientado a usarse en la implementación de una técnica de interacción persona-sistema en un entorno de RA.

Proponer una técnica de HCI, basada en el modelo desarrollado, orientado a la interacción en un entorno de RA, mediante los movimientos del miembro superior.

Comparar la precisión en la estimación de la posición del miembro superior obtenida con la técnica propuesta, contrastado con la estimación obtenida mediante fotogrametría bidimensional.

Diseñar una aplicación informática que permita la manipulación de objetos virtuales en un entorno de realidad aumentada, mediante una interfaz basada en la técnica de interacción propuesta.

## **2. ESTADO DEL ARTE**

Se realizó una continua revisión del estado actual teniendo en cuenta los tópicos mas relevantes en relación con el proyecto, dichos tópicos inician con la definición de la interacción como una tarea fundamental dentro de un sistema de RA, seguidamente se revisan los tópicos en referencia a la taxonomía gestual, posteriormente se describen los tipos de sensores y las técnicas de reconocimiento mas usadas en este tipo de aplicaciones. Finalmente se muestran las técnicas de interacción que mediante movimientos corporales, uso de sensores de visión y técnicas de reconocimiento, permiten al usuario manipular objetos dentro de aplicaciones y entornos de realidad aumentada. De la misma manera en el desarrollo del documento se realizan revisiones del trabajo relacionado en cada uno de los tópicos correspondientes.

La interacción dentro de la real aumentada, es una tarea fundamental no considerada de gran por algunos de los principales autores [31,88,90], sin embargo teniendo en cuenta la relevancia de esta tarea, el autor propone un enfoque que incluye la interacción como tarea fundamental [108], dicho enfoque fue presentado en el VIII Congreso Internacional de Electrónica y Tecnologías de Avanzada – CIETA 2011, organizado por la Universidad de Pamplona. Así mismo dicho trabajo fue elegido para la publicación en la Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada en el Volumen 1 de 2011.

A continuación capitulo se realizará una descripción de la revisión de la literatura asociada a las técnicas de interacción, gestos relacionados, tecnologías de adquisición y reconocimiento aplicadas en la realidad aumentada.

### **2.1 Taxonomía Gestual**

Durante los últimos años se ha realizado una amplia investigación sobre el análisis de los gestos aplicados para la interacción en diversos campos. A continuación se resumen las más importantes definiciones de gesto y algunos enfoques de

clasificación, así mismo se define un gesto espacial en 3D y sus características importantes.

### **2.1.1 Definición de Gesto**

En la literatura se encuentran varias definiciones de gesto, sin embargo se va a centrar la revisión en la temática respectiva a la interacción humano-computadora.

Harrison y Bly [91], describen como partes esenciales de un gesto a: el *movimiento, la Actividad y la Acción*. El autor describe los movimientos como la forma más sencilla de movimiento que pueda ser interpretada semánticamente, Actividad, como la secuencia de movimientos o configuraciones estáticas y las acciones como las entidades que la persona usa para describir lo que esta sucediendo. Turk [116] acuña una definición basada en la “*expresión*” de los movimientos, “*Los gestos son expresivos, son una agrupación significativa de movimientos*”, sin embargo es interesante observar la distinción realizada por el autor acerca de la diferencia entre gesto y postura, definida como la posición o configuración estática del cuerpo humano. De otro lado, centrado en los movimientos descritos físicamente, Pavlovic [117] introduce la siguiente definición “*sea un vector que describe el gesto de las manos y/o los brazos y su posición espacial dentro de un entorno en el tiempo en el espacio de parámetros, un gesto es representado por una trayectoria en el parámetro espacio durante un intervalo adecuadamente definido*”, ésta definición nos permite reconocer dos componentes esenciales, la construcción del modelo de gesto dentro del parámetro vectorial, y la definición del intervalo espacial de interacción. Es destacable que dentro de las definiciones encontradas es la única que plantea una relación espacial asociada al gesto.

### **2.1.2 Clasificación de los Gestos**

Centrado en los movimientos de la mano, Francis [92], plantea la taxonomía enfocada en los movimientos. El esquema planteado se observa en la figura 3. Donde se indican especialmente los gestos para manipulación, dichos gestos descritos con más profundidad por Quek [118], quién define el gesto manipulador

como “aquella cuyo propósito es el control de una entidad mediante la aplicación de una estrecha relación entre los movimientos reales del brazo de la mano / gesticulando con la entidad que está siendo manipulada”, ésta definición introduce una relación directa entre el gesto y la manipulación, asociada con el movimiento del objeto.

Kessler [119] realiza una aclaración considerada pertinente en relación a la diferencia existente entre el término “manipulación” usado dentro del contexto de la robótica, y que hace referencia para dicho contexto, como la relación de planteada para el control del movimientos, sin embargo dentro del HCI la manipulación interpreta movimientos orientados a controlar objetos.



Figura 3. Clasificación de los Gestos. [92].

### 2.1.3 Características especiales

Dentro de los diferentes sentidos humanos, juega un papel importante la proyección, definida como el conocimiento de la posición de las partes del cuerpo en relación a otras partes vecinas [93], debido a la retroalimentación que se proporciona del estado del cuerpo y los movimientos realizados. Las técnicas de interacción relativas al cuerpo proporcionan:

- Un marco de referencia del mundo real sobre el cual trabajar.
- Un sentido mas directo y preciso de control
- El usuario no tiene que ver directamente lo que esta haciendo

## **2.2 Sensores**

Es indispensable la realización de movimientos como acción esencial de un gesto, dicho movimiento se puede cuantificar por medio de diversas cantidades físicas mediante el uso de sensores. Para usar gestos como entrada, dichos gestos deben cuantificarse con cierto grado de precisión. El tipo de sensor se selecciona teniendo en cuenta la aplicación, los tipos de gestos, la infraestructura y el costo. A continuación se describen algunos tipos de sensores típicos que se pueden aplicar para capturar gestos espaciales en 3D. La descripción se categoriza en: *Sensores Corporales* y *Sensores Visuales*.

### **2.2.1 Sensores Corporales**

Se acostumbra el uso de sensores ubicados en el cuerpo o en la mano y proporciona información directa del cuerpo cuando se producen los movimientos.

Algunas técnicas usan sensores hápticos que funcionan como retroalimentadores de las aplicaciones orientadas en su gran mayoría a realidad virtual[121], Robles de la Torre [120], muestra la necesidad y el uso de dichos tipos de sensores, sin embargo, los usuarios manifiesta incomodidad en la preparación previa para su uso y durante la realización de las pruebas.

Gran cantidad de técnicas se basan en el uso de guantes [94], para la captura de movimientos, algunas de ellas también tienen en cuenta los movimientos de los dedos [95], [96]. Dichos sistemas ofrecen una precisión alta y una amplia gama de movimiento, además de velocidades bastante bajas. También se ha desarrollado trajes con rastreadores ópticos o electromecánicos [97,98], que permiten el seguimiento del cuerpo entero. El propósito principal de estos enfoques es la captura de movimiento para la animación de personajes, sin embargo es demasiado costoso, los equipos son complejos de usar y no permiten la interacción de manera fluida. Sin embargo estos enfoques requieren el uso de hardware complejo y costoso, además su uso no es sencillo debido a los cables y

la necesidad de conexión directa con un computador, impidiendo los movimientos libres del usuario.

Rekimoto [100] desarrolló un dispositivo de reconocimiento de gestos de la mano en forma de pulsera, con sensores de aceleración para detectar en antebrazo y gestos de la mano. Amento [99], desarrollo un dispositivo portátil ubicado en la muñeca para adquirir lo gestos suaves tales como tocar, frotar y mover rápidamente.

### **2.2.2 Sensores Visuales**

Existen diversas clases de sensores visuales, sin embargo se va a centrar la revisión en el uso de sistemas de visión basados en cámaras de gama media y baja. Esta categoría de sensores esta descrita por el uso de cámaras que basan su captura en el color, las formas, y las texturas. Las técnicas basadas en la segmentación de color parten de la selección del campo de color adecuado, según su uso, Terrillon[122] revisa detenidamente dichos campos de color y hace algunas recomendación acerca de los dispositivos adecuados para este tipo de captura. También se evidencia la influencia de la iluminación en los sensores de visión, Martin y Crowley[123] desarrollan un sistema robusto para que mitiga dichas variaciones, sin embargo presenta un complejo entorno de uso. En general, la segmentación de color puede ser confusa, si el fondo de la imagen mantiene el mismo tono del objeto rastreado, también estos sistemas asumen que la cámara no se mueve, facilitando la substracción del fondo. Para la detección basada en la forma, generalmente se parte del conocimiento previo del objeto a rastrear, Krueger[124], muestra una recopilación de técnicas basadas en este enfoque, y evidencia la independencia del color y la iluminación en la detección de los objetos.

Los principios de segmentación nombrados anteriormente, se usan en diversas técnicas, por ejemplo se han usado superficies como el escritorio para realizar el seguimiento de la posición de la mano [102], usando superficies transparentes para determinar la posición, en este sistema el sistema de visión estéreo esta

posicionado sobre el escritorio apuntando hacia abajo y permite capturar la posición 3D de la yema de los dedos. Otros sistemas como el desarrollado por Nefian [101], captura los gestos faciales y labios como interfaz de control. También Staner y Auxier desarrollaron un sistema portátil basado en visión que captura gestos, en este sistema es notable que usan una cámara en el pecho para capturar los movimientos de la mano, mientras que la mayoría de los enfoques usan varias cámaras ubicadas alrededor del usuario (techo, mesa, paredes). Malik y Laszlo [103], desarrollaron un dispositivo de entrada basado en visión de bajo costo que permiten la interacción a dos manos, el sistema requiere un color de fondo específico sobre la superficie plana. Varias interfaces basadas en gestos semafóricos y sistemas de visión se han desarrollado [104,105,106], usando sistemas infrarrojos y estereoscópicos complejos. Algunos sistemas han desarrollado la detección de diversas actividades, posturas corporales [107], mediante el rastreo de gestos del cuerpo completo con múltiples cámaras. De las técnicas anteriormente expuestas es frecuente que se relacione el tiempo de cálculo de los algoritmos de reconocimiento de gestos son generalmente un cuello de botella para el desarrollo de una aplicación en tiempo real, así mismo es frecuente el uso de sistemas estéreo.

## **2.3 Sistemas de Reconocimiento**

Revisando la literatura relacionada se pudo observar una clasificación frecuente de los sistemas de reconocimiento, descrita en: El reconocimiento de patrones y el análisis estático, a continuación se mostrarán algunas de las técnicas más sobresalientes en este campo.

### **2.3.1 Reconocimiento de patrones**

Este enfoque se basa en crear una relación de coincidencia entre el objeto analizado y un patrón existente en el sistema. Es uno de los métodos más sencillos para el reconocimiento de gestos semafóricos. Una de las técnicas más difundidas es el Distorsión de tiempo dinámico DTW[126,127], usada en diversas aplicaciones con resultados positivos, tiempos de procesamiento bajos y gran precisión, sin embargo no se puede implementar sin la creación de una base de

patrones de correspondencia, también requiere la implementación de un sistema de clasificación y entrenamiento para garantizar la efectividad.

### **2.3.2 Análisis Estadístico**

En términos de funcionamiento las técnicas de análisis estadístico funcionan de la misma manera que las técnicas de reconocimiento de patrones, sin embargo se usan métodos estadísticos para la asignación de la función de reconocimiento, los métodos pueden ser teoría de probabilidad bayesiana o modelos ocultos de Markov dentro de los más relevantes. Este enfoque es ampliamente usado para reconocer gestos semafóricos [128] y en algunas aplicaciones que reconocen la postura y orientación de los objetos [129]. Al igual que el enfoque relacionado anteriormente, presenta la necesidad de crear una base de patrones de reconocimiento, y aunque presenta precisión en el reconocimiento, el tiempo de procesamiento puede incrementarse afectando el desempeño del sistema.

### **2.4 Técnicas de Interacción basadas en visión**

Diversas técnicas se han desarrollado utilizando enfoques variados, a continuación se relacionan las técnicas destacadas que se basan en sistemas de visión monocular, y se han aplicado en entornos de RA.

Ishii [110] desarrolló el concepto de interfaces de usuario tangibles (TUIs), que son interfaces donde los usuarios pueden manipular la información digital mediante objetos físicos y controlar los sistemas mediante los movimientos realizados por dichos objetos. Sin embargo esta técnica depende de la presencia de objetos físicos que emulan la presencia del objeto virtual, así mismo también se basan en el uso de marcadores fiduciales, necesarios para realizar la manipulación de objetos, unos de ellos para introducir acciones de control. UN problema general es la oclusión de los marcadores, que impide el reconocimiento del mismo y por lo tanto la desaparición del objeto por falta de rastreo.

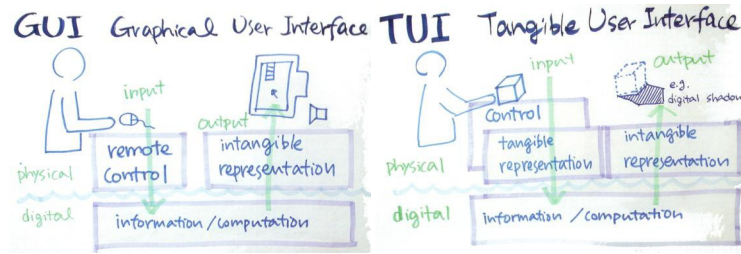


Figura 4. Esquema de la TUI dibujados Ishi.

Dorfmüller [111], desarrolló un sistema de tracking basado en la cinemática tridimensional del dedo índice y un sistema de visión estereoscópico. Con 6 seis grados de libertad y rastreadores esféricos refractivos ubicados en puntos estratégicos de un guante, el usuario interactuaba con un juego virtual de ajedrez. Permitía la interacción del usuario y la manipulación de las piezas en tiempo real.

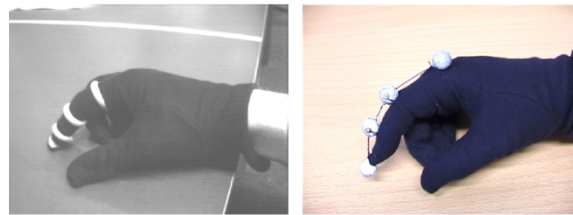


Figura 5. Guante usado en [111].

Song [112], desarrolló un sistema de tracking basado en visión estereoscópica que permitía la interacción del usuario por medio del uso del dedo índice, el sistema le permitía interactuar con un juego de mesa. Un motor de software permitía la simulación de efectos físicos, colisiones y gravedad sobre las piezas del juego. El tiempo de respuesta del mecanismo de tracking es bastante bajo comparado con la interacción ofrecida por dispositivos habituales como mouse y teclado, sin embargo en evaluaciones con los usuarios resultó ser más agradable y divertido de usar.

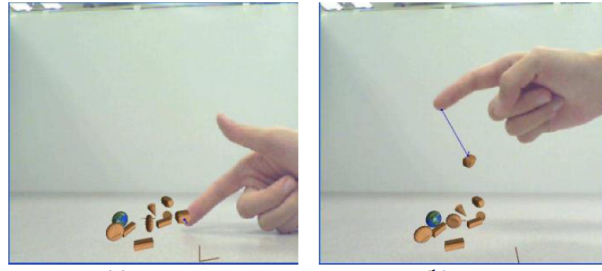


Figura 6. Juego de Mesa en [112]

Lee y Chun [113], Presenta un enfoque de interacción basado en visión sin el uso de marcadores, denominado Mouse Tangible. Con este método el usuario puede manipular objetos superpuestos sobre un sistema de coordenadas ubicado en la palma de la mano, con la otra mano se realiza la manipulación del objeto mediante gestos reconocidos por el sistema. Usa sistema de gestos semafórico con asignación de un gesto para cada acción.



Figura 7. Aplicación en [113]

Xiang[130] desarrollo VisionWand, diseñado como un sistema que por medio de la mano permitía controlar objetos 2D en grandes pantallas, se utilizaron dos cámaras para el seguimiento de las posiciones 3D de los extremos de una varita, presenta un funcionamiento sencillo, sin embargo los errores de seguimiento ocasionados por las condiciones de iluminación son frecuentes.

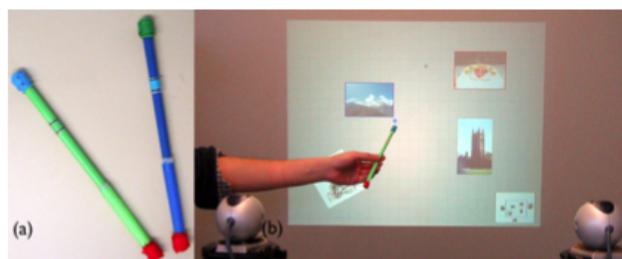


Figura 8. VisionWand. Aplicación en [130]

Park y Lee [131] desarrollaron un sistema de interacción portátil alternativo desarrollado para un entorno de asistencia en la reparación de vehículos, denominado WARS. Este sistema usa los movimiento de las manos combinado con la orientación de la vista, para interactuar con el objeto. En esté trabajo se desarrollaron pruebas preliminares, pero se encuentra en una etapa temprana de desarrollo en entorno controlado. Mantiene el uso de marcadores fiduciales para posicionar y orientar el objeto aumentado. También hace uso de un casco de RA, y un rastreador infrarrojo de pupila. Las pruebas realizadas, fueron orientadas únicamente a la selección de objetos, demostrando las limitaciones propias de un sistema de alta complejidad.

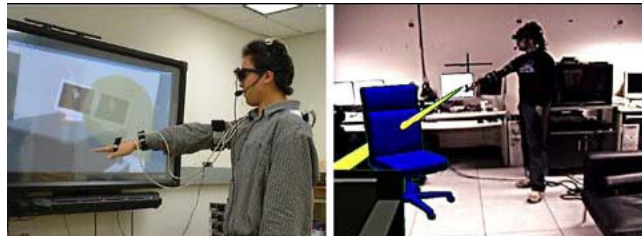


Figura 9. Técnica usada en WARS [131].

Reitinger [132] desarrollo una técnica orientada a la interacción con diversos tipos de datos médicos asistiendo a médicos en la practica y planificación de cirugías hepáticas, permitiendo la manipulación de estructuras anatómicas. Se observa una interacción superior a la presentada en aplicaciones 2D o 3D de escritorio, los cirujanos presentaron mayor familiaridad con esta herramienta. Este herramienta mejora notablemente la visualización asistiva del paciente. Se usan rastreadores infrarrojos sobre esferas que reflejan a un sistema de visión monocular de alta resolución.

Fernández [133] plantea un sistema de interacción a dos manos para manipular objetos localizados mediante un marcador fiducial. El enfoque planteado se basa en el uso de una red neuronal mediante clasificadores de reconocimiento entrenada bajo distintas condiciones de luz. Los autores presentan una técnica de reconocimiento que reduce el comportamiento negativo del reconocimiento frente

a los cambios de iluminación. Sin embargo mantiene el uso de marcador fiducial y tiene altos requerimientos computacionales para su ejecución.

Buchmann [134], el autor se utiliza un modelo simplificado de la mano para interpolar la posición del dedo índice y el pulgar usando tres marcadores fiduciales sobre un guante negro, llamado FingerARTip. Es notable la simplificación presentada, ya que el autor enfatiza en el agarre de objetos, siendo tema pertinente para esta revisión. Dicha simplificación presenta un modelo con aprehensión digital usando el índice y el pulgar. También hace uso de un casco de RA, sincronizando la observación del usuario con la orientación del objeto. Es destacable la inclusión de una retroalimentación háptica, que mejoró el desempeño del usuario.



Figura 10. Técnica usada en FingerARTip [134].

## 2.5 Síntesis del Capítulo

La revisión de la literatura realizada permitió identificar algunas características presentes en las técnicas de interacción aplicadas en RA. En la revisión de los sistemas de RA, se identificó que la interacción es una etapa fundamental en la relación de manipulación con objetos en entornos de realidad aumentada.

También se pudo evidenciar que los gestos de manipulación son mas eficientes para la interacción sea directa o indirecta con los objetos, dichos gestos se presentan en los movimientos cotidianos de manipulación de objetos y se consideran eficientes debido a la presencia de la propiocepción considerada como fundamental para mantener una retroalimentación acerca de las acciones que se están realizando.

En la revisión de los dispositivos técnicos usados se consideró que los sensores corporales aunque presentan grandes amplitudes de movimiento y alta precisión, introducen hardware incomodo, cables que requieren conexión directa a un computador, e que impiden los movimientos naturales del usuario. La orientación de uso de estos tipos de sensores se encamina a la captura de movimientos corporales generales usados en animación de personajes.

Así mismo los sensores visuales presentan bajo uso de hardware especializado, sin embargo el tiempo de desempeño de los algoritmos de reconocimiento son en general un cuello de botella, además la mayoría de técnicas presentadas usan sistemas estereoscópicos (dos cámaras), también se observa en las aplicaciones de RA el frecuente uso de reconocimiento por visión debido a el uso indispensable de una cámara, por esta razón no se observan con relevancia la presencia de otros tipos de reconocimiento.

Se considera que el uso de un sistema monocular puede ser viable como sistema de sensor visual, correspondiente para la localización de los objetos. Sin embargo variables como las condiciones de luz, pueden ocasionar lecturas incorrectas y fallos temporales de rastreo. También se considera posible reemplazar los marcadores fiduciales para la localización de los objetos aumentados.

Se observa el reiterado uso de los marcadores fiduciales en el posicionamiento y orientación de los objetos, sin embargo se considera que este método puede ser reemplazado para facilitar y hacer mas comprensiva la manipulación de objetos de RA.

### **3. DESARROLLO DE LA TECNICA**

#### **3.1 Estudio del Agarre**

##### **3.1.1 Manipulación de Objetos en RA**

La manipulación de objetos en un entorno de Realidad Aumentada se puede realizar mediante diversas técnicas [31]. Sin embargo en este trabajo se eligió el tipo de manipulación mixta, que es el uso de combinado de interacción de control directo y control físico. El control directo, se realiza mediante el uso del miembro superior como mecanismo de interacción. Debido a esto, es necesario conocer la forma de manipulación de objetos de manera que se pueda plantear la interacción con los mismos, cómo si se tratase de un objeto real [32]. Las tareas de manipulación de objetos, se realizan mediante el uso del extremo del miembro superior, determinado por la Mano y cada uno de los dedos del usuario [34].

##### **3.1.2 Modelo de Agarre**

Como se ha descrito anteriormente describir las tareas de manipulación es altamente complejo, generalmente tienen asociaciones de cadenas cinemáticas abiertas y cerradas, las limitaciones matemáticas, grados de libertad redundantes, y las singularidades [35]. Además, existen no linealidades en las condiciones de contacto entre los dedos y objetos captado. Para evitar el análisis inmanejable e indeterminado se tomaron las siguientes suposiciones, muchas de las cuales también se encuentran en los análisis actuales de la manipulación de destreza:

Una única forma de captación del objeto, ya que no se puede tener contacto físico con el objeto [35].

- Funciones de contacto con cinemática linealizada.
- Análisis estático (sin inercia y viscosidad).
- Contacto sin efectos físicos deslizamiento o rodadura entre los dedos y el objeto.
- No se usan casos de agarre con alto grado de redundancia o muy restringidos.

### **3.2 Tareas de Manipulación**

Según [34] se definen tres tareas necesarias poder manipular objetos:

- Pre-agarre
- Agarre
- Manipulación.

Kang [36], también muestra los puntos de interrupción de las tareas anteriores, definidos como los momentos en los cuales se detienen las tareas o cambian de estado. Dichas tareas están descritas por una serie de acciones descritas a continuación:

#### **3.2.1 Fase de Pre-agarre**

Se define como una combinación de la trayectoria de la mano (hand transportation) y cambios temporales en los parámetros de los eslabones de los dedos a la espera de la intención (hand preshape). La trayectoria se ve influenciada por la distancia del objeto a la mano, mientras que los cambios en los parámetros del dedo dependen de la forma del objeto. Las dos etapas anteriores, hand transportation y hand preshape, se realizan en paralelo.

#### **3.2.2 Fase de Agarre:**

Terminada la fase de Pre-agarre, inicia la fase de agarre estático, cuando la mano toca y tiene dominio estable sobre el objeto. El tipo de agarre empleado puede ser

identificado en esta fase y puede ser representado usando la jerarquía de agarre propuesta por Cutkosky [36].

### **3.2.3 Fase de Manipulación:**

La fase de manipulación se caracteriza por los movimientos de la mano resultado del movimiento útil del objeto relativo al entorno. El agarre es escogido por el usuario basado en la movilidad y destreza requerida para manipular el objeto. Una acción de manipulación puede tan ser simple como trasladar el objeto con respecto al entorno o tan compleja como transportar y manejar con precisión el objeto con la yema de los dedos cambiando la posición de ambos con respecto al entorno.

### **3.3 Taxonomía del Agarre**

La taxonomía de agarre esta diseñada para facilitar el reconocimiento del agarre humano basada en los datos sensoriales observados. Se han realizado trabajos significativos para clasificar el agarre, dichas clasificaciones son inicialmente de naturaleza descriptiva y sirven como guía para selección de requerimientos en tareas de agarre (tales como la cantidad de energía comparada con la destreza).

En la taxonomía propuesta por Cutkosky [36] (a continuación), el agarre es primero dividido en Agarre de tipo Palmar o no-Palmar (en función si hay o no contacto con la palma de la mano durante la interacción). El agarre de tipo No-palmar es a su vez subdividido en Agarre Con yema de los dedos (cuando únicamente las yemas están envueltas en el agarre) o Agarre compuesto no-palmar (si ambas yemas y otros segmentos de dedo están envueltos en el agarre), dicha clasificación puede observarse en la figura 11.

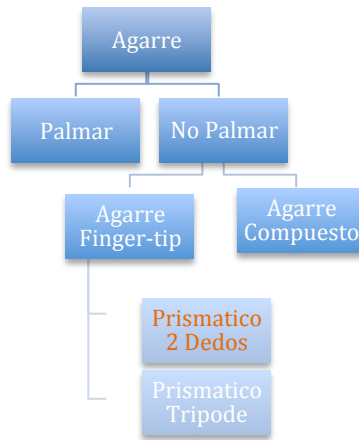


Figura 11. Árbol de la Taxonomía del Agarre propuesta por Cutkosky [36].

Feix en su trabajo [37], hace una revisión de las taxonomías de agarre, reafirmando en gran parte el trabajo de Cutkosky. Dichas tareas se basan en los requerimientos de fuerza vs precisión. Para los objetos en entornos de realidad aumentada no se observa el uso de fuerza en su manipulación, debido a su naturaleza “virtual”, por lo tanto se consideran las taxonomía basadas en la precisión, ya que los movimientos de manipulación tienen dicho origen. Analizando dichos tipos de agarré se decidió utilizar un agarré de dos dedos (Pulgar e Índice) con requerimientos de precisión, posición opuesta de los dedos como soporte, y realizando un movimiento de aducción para el agarre. Dicho agarre es denominador por Feix como Pinza inferior y se muestra en la figura 12.



Figura 12. Agarre de Pinza Inferior. [37]

### 3.4 Diseño de la Técnica

Basado en el anterior estudio de la manipulación de objetos se comienza el desarrollo de el Diseño de la técnica, siguiendo los parámetros planteados en el Framework denominado “*A framework for research and design of gesture-based human computer interactions*”, desarrollado por María Karam [73].

#### 3.4.1 Descripción del Framework

A continuación, se presenta el marco teórico para la comprensión y el diseño de las interacciones basadas en gestos y los métodos utilizados en su desarrollo. El framework desarrollado por Karam [73], permite avanzar ordenadamente en el planteamiento de una técnica de interacción teniendo en cuenta las fases propias y elementos presentes en la interacción.

Este framework tiene dos propósitos: orientar la investigación y el diseño de los gestos, y proporcionar una estructura para los sistemas de gestos y la comprensión de sus conceptos relacionados entre sí.

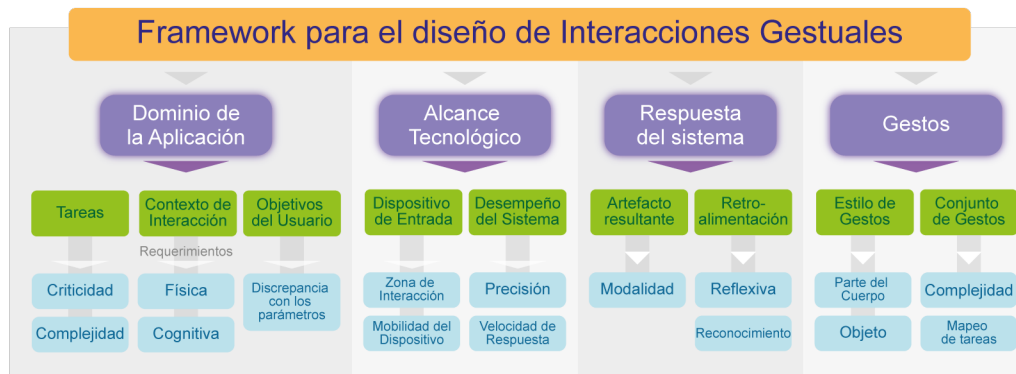


Figura 13. Framework Diseño de Interacciones Gestuales. [73].

En el desarrollo del presente capítulo, se describen los principales componentes de este framework, realizando posteriormente el desarrollo y aplicación para el

diseño que se plantea. El framework esta organizado por categorías y subcategorías que agrupan una serie de parámetros que definen valores asociados con la información específica de cada categoría, tal como se observa en la figura 13.

### **3.4.2 Dominio de la Aplicación**

Debido a la importancia de conocer a fondo el dominio de la aplicación sobre la cual se desarrolló esta técnica, se detallan las tecnologías aplicables, las tareas, escenarios y contextos disponibles para la Realidad Aumentada.

Baillof, describe a la realidad aumentada (RA) como la visión directa o indirecta de un entorno físico del mundo real, cuyos elementos se combinan con elementos virtuales para la creación de una realidad mixta a tiempo real. Consiste en un conjunto de dispositivos que añaden información virtual a la información física ya existente. Esta es la principal diferencia con la realidad virtual, puesto que no sustituye la realidad física, sino que sobreimprime los datos informáticos al mundo real [41].

Azuma define tres características esenciales en la realidad aumentada [42]:

- Combina elementos reales y virtuales.
- Es interactiva en tiempo real.
- Está registrada en 3D.

En el dominio de la aplicación de la realidad aumentada, se identifican tres sub-categorías que permiten tener en cuenta el usuario y las tareas que son posibles dentro de un dominio de aplicación dado, dichas sub-categorías son: el contexto de interacción, las características de las tareas y los objetivos del usuario.



Figura 14. Diagrama de Dominio de la Aplicación.

### 3.4.2.1 Contexto de Interacción

Un primer elemento dentro del dominio de aplicación, considera los parámetros para describir el contexto de interacción. Dey & Abowd [74], definen el contexto de interacción como *“Cualquier información que puede ser utilizado para caracterizar la situación de una entidad. Una entidad es una persona, lugar u objeto que se considera relevante para la interacción entre un usuario y una aplicación, incluyendo el usuario y las aplicaciones propias”*.

Para el caso de este trabajo, el contexto de interacción se ubica dentro de la Realidad Aumentada. Descrita anteriormente como la mezcla existente entre la realidad y los datos virtuales que puedan ser superpuestos.

Teniendo en cuenta las características físicas del espacio de aplicación, Kang [43] menciona la presencia de dos espacios diferentes de interacción. Basados en los movimientos del miembro superior, Kang establece un **Espacio Cercano** y un **Espacio Lejano**. El espacio Cercano manipula objetos presentes dentro del rango de alcance de los brazos permitiendo su interacción intuitiva, dicho espacio se describe como el espacio de manipulación y puede definirse como el espacio adecuado de trabajo. Se debe mencionar que para este proyecto se tomará el espacio cercano como espacio de interacción. Así mismo, los objetos que están fuera del alcance de los brazos, se localizan en el Espacio Lejano.

Se identifican dos parámetros para describir el contexto de interacción: los requisitos físicos y los requerimientos cognitivos.

### a. Requerimientos físicos

Dentro de los requerimientos físicos se encuentran: el nivel de movimiento físico necesario y las restricciones a la circulación física u otras limitaciones, determinadas por un escenario físico. Como escenarios se plantean dos básicamente:

*El uso sedente frente a un computador de escritorio o portátil:* En esta posición es necesario aclarar que el usuario se ubicará en una posición sedente frente al computador. Teniendo en cuenta la posición sedente descrita en la figura 15, donde se muestran las distancias adecuadas a las cuales el usuario deberá ubicarse. Para describir adecuadamente el entorno físico se hace una relación de las zonas de alcance óptimas para los miembros superiores. Esta zona describe el espacio adecuado para la manipulación de objetos evitando la adopción de posturas forzadas e incómodas para el usuario mejorando el confort al realizar la tarea.

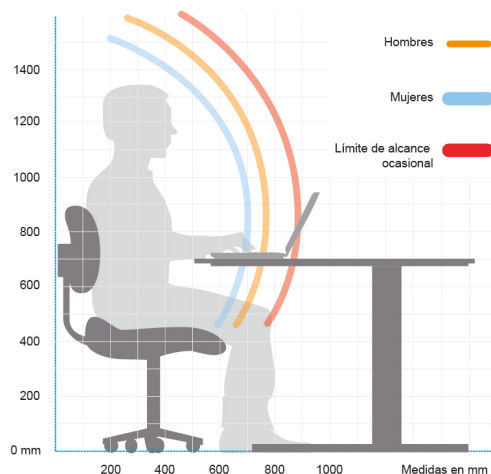


Figura 15. Espacio de trabajo en posición sedente.

La norma UNE-EN ISO 9241-5 recomienda que los objetos a manipular en la zona de trabajo se ubiquen a una distancia superior de 35 cm del usuario, creando un espacio adecuado tal y como se visualiza en la figura 16.

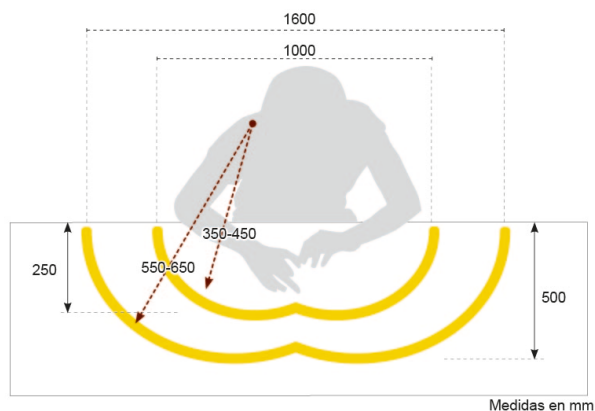


Figura 16. Área de trabajo en posición sedente.

*El usuario frente a una pantalla de gran tamaño:* El usuario podrá ubicarse en una posición de pie frente a la pantalla, teniendo en cuenta la distancia mínima requerida. Ver figura 17.

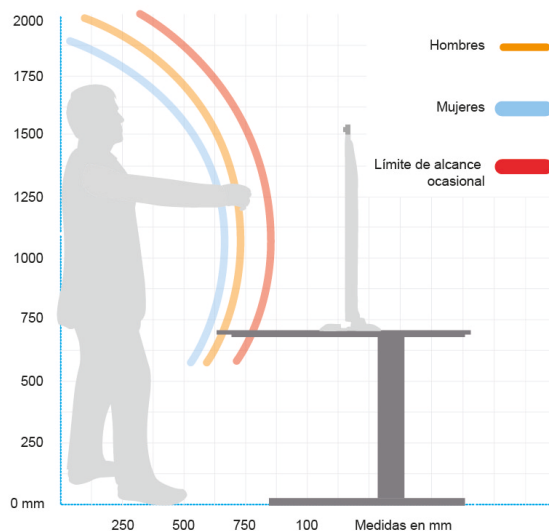


Figura 17. Área de trabajo en posición sedente.

*Espacios generales de aplicación:* Se plantea el uso de la técnica en entornos bajo techo con iluminación artificial controlada. Para un entorno de iluminación artificial controlada se plantea un sistema de iluminación general, basados en las tablas de iluminación sugeridas para puestos de trabajo por Maradei y Espinel [75], Los valores sugeridos para estos entornos oscilan entre 250 lux y 500 lux.

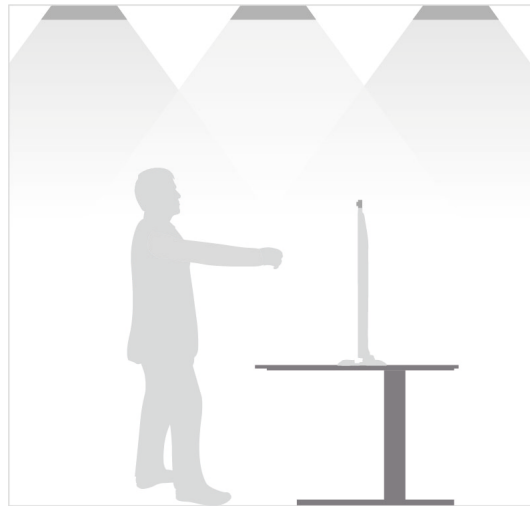


Figura 18. Entorno de trabajo - Iluminación.

#### **b. Requerimientos Cognitivos:**

En el contexto de interacción planteado se debe tener en cuenta al usuario como pieza fundamental para la interacción. De esta manera, según Granollers [76], los requerimientos cognitivos hacen parte de la comprensión de los factores humanos presentes en la interacción. El proceso cognitivo se reconoce como la adquisición, mantenimiento y uso de la información. Norman [77], plantea un modelo psicológico de las variables cognitivas presentes en la interacción. A continuación en la figura 19 se describen dichas variables.

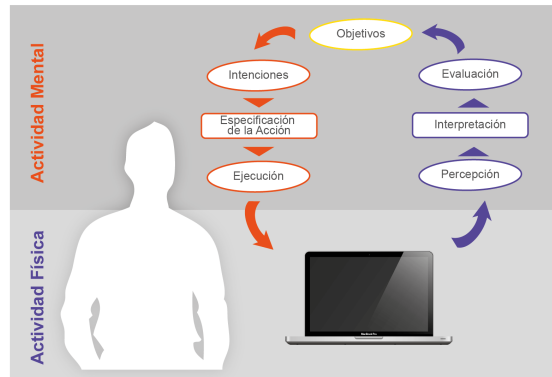


Figura 19. Entorno de trabajo.

- **Sensación y Percepción:**

Se entiende por **sensación** al proceso de captación del estímulo físico del ambiente (luz, sonido, etc.) y su posterior conversión en estímulos nerviosos que recorrerán los canales sensoriales hasta llegar al sistema nervioso central. De otro lado la percepción para referirse al proceso por el que asignamos significado a los estímulos que han entrado a nuestro sistema cognitivo captados por nuestros sistemas sensoriales.

La sensación como proceso de recolección de información para el usuario presenta dos sistemas fundamentales, el sistema visual que permite la interpretación de la imagen y el sistema auditivo que interpreta los sonidos.

La imagen captada por el usuario debe interpretarse en un entorno de tres dimensiones, y para nuestro caso una superposición sobre la realidad capturada por la cámara. Además de esto se presenta la atención, otro proceso que interviene en la interpretación de la imagen.

Mientras que la visión es actualmente el sentido dominante para la comunicación entre los sistemas interactivos y las personas, el oído está asumiendo un grado de importancia cada vez mayor. Como hemos visto con la visión, lo que oímos no se trata sólo del sonido que recibimos, sino de la interpretación que del mismo

realizamos. Para el desarrollo del proyecto se establece el adecuado uso e interpretación las imágenes y sonidos necesarios para garantizar la adecuada interacción.

**La percepción:** El cerebro no registra el mundo externo en tres dimensiones, más bien construye una representación interna de los acontecimientos físicos externos tras haber analizado sus componentes con anterioridad. Este proceso se denomina percepción. Para nuestro proyecto es fundamental la percepción adecuada de la profundidad ya que se interactuará con objetos en tres dimensiones y el usuario debe mantener continuamente la percepción adecuada para mantener la ubicación espacial.

**La Memoria:** La memoria humana participa prácticamente en todos los actos de la interacción de la persona con el sistema. La memoria operativa es necesarias para que el usuario, almacene la forma de realizar las acciones de manipulación. Debido a que las acciones de manipulación son tres, las acciones necesarias para la interacción se aprenden en el entrenamiento. Las funciones generales a realizar son:

- La retención de información.
- El apoyo en el aprendizaje de nuevo conocimiento.
- La comprensión del ambiente en un momento dado.
- La formulación de metas inmediatas.
- La resolución de problemas.

### **Representación del conocimiento**

Durante el proceso de interacción con el entorno las personas hacen uso de su de información previa captada y almacenada en la memoria de largo plazo, de esta forma es cómo percibimos la profundidad, interpretamos los volúmenes y formas.

## **Modelo Mental**

Cuando una persona aprende a interactuar con un sistema (en el sentido más amplio del término no tiene porque ser interactivo) adquiere conocimiento sobre su funcionamiento y de las relaciones estructurales entre sus componentes [76] . Los investigadores han llamado a este conocimiento “modelo mental” del sistema. En el desarrollo del proyecto se busca iniciar del modelo mental que los usuarios puedan tener para la manipulación de objetos en la realidad. De esta forma se busca mantener el modelo mental aplicado a objetos virtuales.

El nivel de procesamiento cognitivo presentado es relativamente bajo ya que se parte del modelo mental presente en el usuario, la memoria necesaria para realizar las acciones es poca debido al reducido número de acciones, la percepción de profundidad es apoyada por las indicaciones que presenta la interfaz de usuario el escenario tridimensional.

### **3.4.2.2 Características de las tareas.**

Las tareas se consideran el principal objetivo o resultado al que se destina un gesto de controlar. El elemento de trabajo consiste en una descripción de la tarea, según lo determinado por el diseño.

Para la descripción de las tareas de manipulación se usó la técnica conocida como El análisis jerárquico de tareas (HTA Hierarchical Task Analysis) desarrollado por Annett y Duncan [78] es la técnica de análisis de tareas más difundida para el análisis de HCI.

Para realizar la observación en el desarrollo de las tareas, se realizó una sesión con usuarios aplicando combinación de dos métodos. Los usuarios realizaron tareas de translación y rotación de un objeto físico sobre una superficie

debidamente demarcada, ver figura 20. El usuario realizó las siguientes acciones de manipulación de un objeto:

- Agarrar el objeto con una sola mano.
- Mover sobre el eje X (demarcado en la superficie) el objeto desde el punto A al B.
- Mover sobre el eje Y ( verticalmente hacia arriba) el objeto.
- Regresarlo a su posición inicial.
- Mover sobre el eje Z (Profundidad ) hasta el punto C.
- Mover sobre el eje Y.
- Regresarlo a su posición inicial.
- Moverlos sobre el eje X hacían la izquierda hasta el punto D.
- Moverlo sobre el eje Y (verticalmente hacia arriba).
- Regresarlo s su posición inicial.
- Rotar el objeto para hacer coincidir los colores, rotar en los ejes X, Y Z.

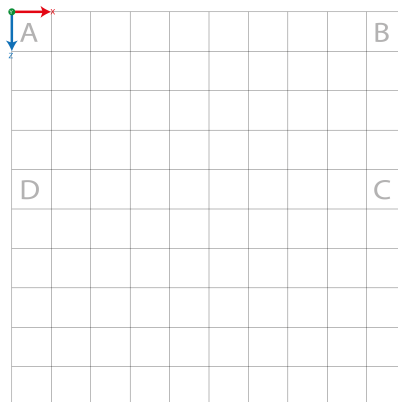


Figura 20. Espacio de trabajo.

Los observación se registró en grabaciones de video de la secuencia de tareas y “pensar en voz alta” las acciones que se iban desarrollando, tal como se observa en la figura 21.

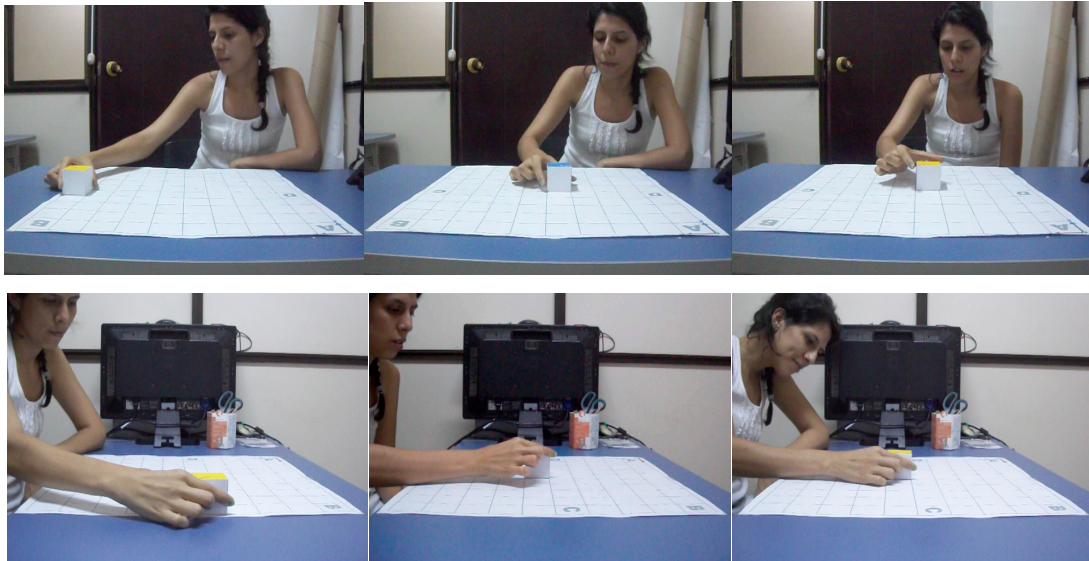


Figura 21. Capturas de los registros de video para la observación.

Las tareas a describirse se orientan a la manipulación primaria de objetos, es decir, a los movimientos necesarios para realizar cambios de posición, rotación en ejes principales y escalado del objeto.

Teniendo en cuenta las observaciones realizadas y la literatura, se plantearon las formas de manipulación para los objetos. A continuación la descripción de las tareas básicas de manipulación:

### **Tareas de Manipulación**

Dichas tareas se describen mas ampliamente en la sección 3.2. Para continuar con las tareas específicas de la manipulación se explicarán a continuación la secuencia para cada una de ellas. Los objetivos a alcanzar por el usuario, en términos de manipulación son:

#### *Pre-agarre:*

- Ubicar mediante los movimientos corporales necesarios el miembro superior justo en el lugar necesario para comenzar el agarre del objeto.

**Agarre:**

- Realizar el movimiento indicado para coger el objeto.

**Manipulación:**

- Trasladar el objeto sobre el eje X
- Trasladar el objeto sobre el eje Y
- Trasladar el objeto sobre el eje Z
- Rotar el objeto con respecto al eje X
- Rotar el objeto con respecto al eje Y
- Rotar el objeto con respecto al eje Z
- Escalar el objeto con respecto a los ejes principales (X,Y,Z) y proporcionalmente.

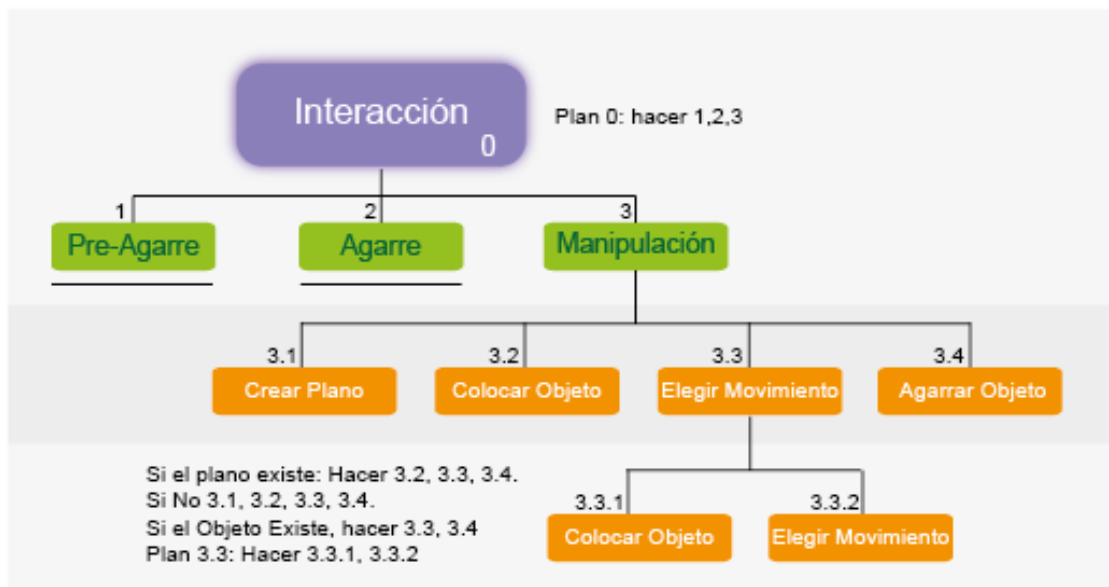


Figura 22. Diagrama de Tareas.

Una vez que hemos definido para la tarea, podemos considerar los parámetros individuales que definen la tarea. Se han identificado dos parámetros para la caracterización de las tareas que son esenciales para el diseño de interacciones exitosas gesto: *criticidad* y *complejidad*.

### a. Criticidad

Este parámetro se refiere al nivel explícito de importancia asociado con una tarea individual. A nivel de las tareas críticas se puede expresar como bajo, medio o alto de acuerdo a la clasificación de tareas específicas. Dentro de las tareas críticas para la manipulación se pueden enunciar:

- Creación de un plano espacial para la ubicación del Objeto virtual.
- Agarre del Objeto (indispensable para la manipulación).

### b. Complejidad

Se considera la complejidad como el número de decisiones o los pasos necesarios para completar una sola tarea clasificado en bajo, medio o alto.

A continuación se relaciona en número de pasos, la complejidad indicada para cada tarea:

Tabla 1. Criticidad de las Tareas.

<i>TAREA</i>	<i>Numero de Pasos</i>
Pre- Agarre	1 Pasos
Agarre	1 Pasos
Manipulación	
Crear Plano	3 Pasos
Crear Objeto	2 Pasos
Mover Objeto	2 Pasos
Rotar Objeto	2 Pasos
Escalar	3 Pasos

### 3.4.2.3 Objetivos del Usuario

El proceso de manipulación tiene como centro la consecución de los objetivos del usuario en términos de acciones y tareas a cumplir. Dichos objetivos son determinados por el usuario y hacen parte de los requisitos de interacción. Para la

determinación de los objetivos es necesario observar claramente el contexto de interacción para definir la precisión necesaria.

**Objetivos:**

- Colocar objetos de RA sobre el espacio 3D.
- Interactuar de manera natural con dichos objetos. Mover, Rotar, escalar.

**3.4.3 Alcance Tecnológico**

Para este numeral se describen dos secciones: Los Dispositivos de entrada y el desempeño del sistema.



Figura 23. Diagrama de Alcance Tecnológico.

**3.4.3.1 Dispositivos de entrada**

El dispositivo considerado para permitir la interacción con el usuario que compone el sistema de visión artificial, descrito ampliamente en el capítulo 4 . Dicho sistema de visión alimenta con coordenadas espaciales, al modelo que simula el movimiento del miembro superior descrito en el capítulo 5. En la Figura 24, se observan los dispositivos de entrada.

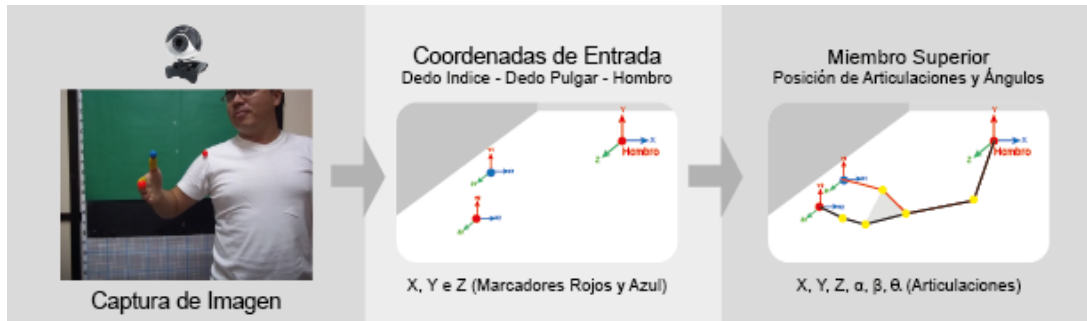


Figura 24. Dispositivos de Entrada.

### a. Zona de Interacción

En el capítulo anterior se describió la zona de interacción, que básicamente se presenta como la zona necesaria para la manipulación de un objeto en un espacio de trabajo adecuado [75].

Para la determinación se observa que no existe contacto físico con el dispositivo de interacción. Pero se debe determinar una velocidad mínima de movimiento en términos de longitud, para garantizar la percepción del movimiento del objeto de manera natural. Esta velocidad es determinada mediante la Ley de Fitts, que establece el tiempo requerido para mover el cursor, para este caso los punteros de selección, dicho tiempo crece logarítmicamente con la distancia y disminuye con el tamaño del objetivo, tal como se observa en la ecuación 1.

$$T = a + b \log_2 ( D / S + 1 ) \quad (1)$$

Ecuación que define la Ley de Fitts.

**T** es el tiempo medio necesario para completar el movimiento.

**a** representa el tiempo de inicio / parada en segundos para un dispositivo determinado

**b** mide la velocidad inherente del dispositivo

**D** es la distancia desde el punto inicial hasta el centro del objetivo.

**W** es el ancho del objetivo medido sobre el eje del movimiento.

## **b. Movilidad**

Se determina para el dispositivo de entrada cámara web, un movilidad de 0 ya que es una cámara fija, dispuesta en la unidad de computo a la cuál está conectada.

### **3.4.3.2 Desempeño del Sistema**

Un segundo elemento se utiliza para describir las tecnologías de apoyo se refiere a varias medidas de desempeño asociadas con el sistema de reconocimiento. Este parámetro no se refiere al dispositivo de entrada, pero considera el procesamiento necesario para el reconocimiento del movimiento con respecto al sistema. Se utilizaron los siguientes parámetros utilizados para medir el desempeño.

#### **a. Precisión del sistema**

La precisión del sistema se determinó de dos maneras. Inicialmente se evaluó la determinación de la profundidad obtenida mediante la estimación de profundidad realizada a los marcadores de color. De la misma manera se realizaron evaluaciones comparativas para el modelo del brazo planteado. Dichos análisis se observan en el capítulo 5. Así mismo se considera que teniendo en cuenta el dominio de la aplicación, la precisión obtenida es suficiente para la realización de tareas de manipulación de mediana precisión.

Es necesario mencionar que debido a la naturaleza del sistema de visión, el manejo de la iluminación es de suma importancia, ya que puede afectar la precisión.

## b. Velocidad de respuesta del sistema

Se realizaron mediciones en cada una de las etapas del sistema, a modo de determinar el tiempo de procesamiento, en la tabla 2, se relacionan los tiempos de procesamiento medidos para las etapas correspondientes:

**Etapas de Entrada:** Es el tiempo que le toma al sistema reconocer la entrada, (marcadores en 3D) realizado por el sistema de visión artificial.

**Etapas de reconocimiento:** Tiempo que le toma al sistema tomar la entrada y realizar el cálculo de la posición del brazo. Para la resolución del algoritmo se realiza un promedio de 16 iteraciones por segundo.

**Etapas de Respuesta:** Tiempo que le toma al sistema determinar el movimiento del objeto en función de la posición y movimiento del brazo.

Tabla 2. Tiempos promedio en cada una de las etapas del sistema.

<i><b>Etapas</b></i>	<i><b>Tiempo</b></i>
Etapa de Entrada	0,04439 segundos
Etapa de Reconocimiento	0,015625 segundos
Etapa de Respuesta	0,08368 segundos
<b>Tiempo Total</b>	<b>0,143695 segundos</b>

Es de mencionar que estos tiempos pueden variar en la etapa de entrada, debido a la localización del ROI, que disminuye el tiempo de entrada del sistema. En la etapa de reconocimiento las variaciones se pueden presentar por la definición de la solución más adecuada del modelo del brazo teniendo en cuenta las restricciones angulares de cada articulación.

### 3.4.4 Respuesta del sistema



Figura 25. Diagrama de Respuesta del Sistema.

La respuesta final del sistema es el resultado final de interacción del gesto, estas respuestas expresadas como estímulos perceptuales o sensoriales provenientes del sistema y que comunican la ejecución de una acción. Los parámetros que describen la respuesta del sistema son:

#### 3.4.4.1 Modalidad

La modalidad muestra los tipos de respuesta presentados a las acciones realizadas por el usuario. En el diseño de la técnica se plantea 3 modalidades de respuesta:

**Visual:** Como modalidad principal. Usando variaciones para indicar la acción realizada.

**Audio:** Como modalidad de apoyo. Usando sonidos cortos asociados a las tareas para realizar la confirmación por un segundo medio de la acción realizada.

#### 3.4.4.2 Retroalimentación

La retroalimentación es necesaria para permitirle al usuario confirmar la realización satisfactoria de la tarea. A continuación, se describen tres etapas de retroalimentación como respuesta de un sistema:

**Audio:** Se presentan sonidos cuando se realizan acciones como la selección, des selección, inserción de objetos, eliminación de objetos.

**Color:** Se realiza el cambio de color transparente del objeto. Cambio a color rojo cuando se selección a para movimiento, color verde para rotaciones y color naranja para escalado.

**Ubicación:** Se presenta una barra lateral para mostrar la ubicación en profundidad de los marcadores y de los objetos en la zona de trabajo.

#### 3.4.5 Gestos

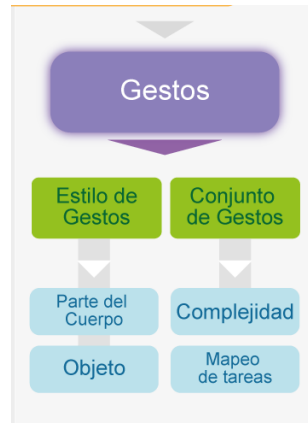


Figura 26. Diagrama de Gestos.

Los gestos se definen como los movimientos físicos reales que el usuario debe realizar para introducir una acción al sistema. Para la técnica planteada, se definieron los gestos teniendo en cuenta la tipología del agarre, el uso de gestos manipulativos.

### 3.4.5.1 Estilo de Gestos



#### a. Partes del Cuerpo

Se definió el miembro superior, como la parte del cuerpo asociada a la manipulación de los objetos. La descripción de los movimiento del brazo así como el modelo del brazo se describe con mayor profundidad en el capítulo 5 de este documento.

#### a. Objetos

Como objeto de apoyo al reconocimiento del gesto, se usaron los marcadores esféricos. Los marcadores propuestos, son de forma esférica, diámetro de 2 cm. El color de los marcadores Azul y Rojo, están definidos por las coordenadas de campo de color pigmento relacionadas en la tabla 3. Dichos marcadores se sujetan a los dedos por medio de puntas de guante de caucho, preferiblemente de un color no relacionado con el marcador.

Tabla 3. Coordenadas de Color de los marcadores.

MARCADOR	CYAN	MAGENTA	YELLOW	BLACK
	0%	88%	76%	76
	83%	54%	0%	0%

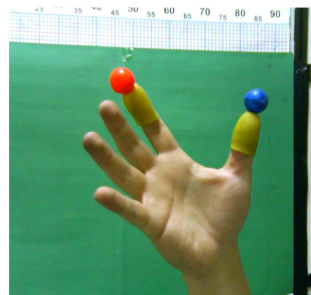


Figura 27. Marcadores de Color.

### 3.4.5.2 Conjunto de Gestos

**Clic:** Se utiliza para creación de puntos delimitadores del plano de trabajo en 3D.

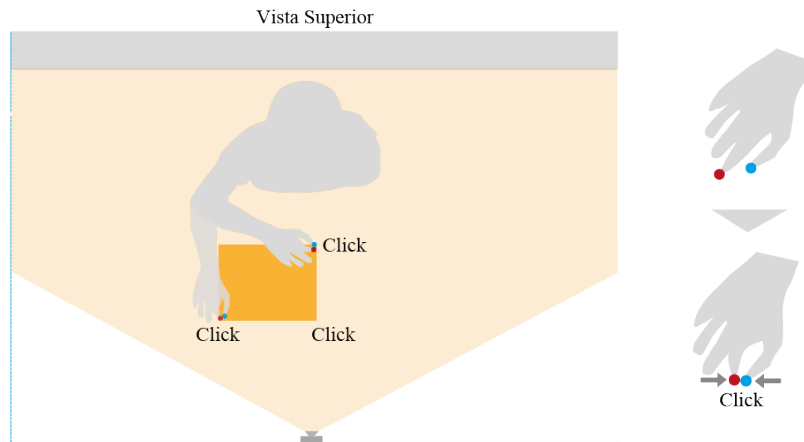


Figura 28. Acción de crear un Plano.

**Selección:** La selección de los objetos se realiza a modo de aprensión con los dos dedos, acercando los punteros para agarrar el objeto como si fuese real, tal como se observa en la figura 29.



Figura 29. Acción de selección de un objeto.

**Movimiento:** Realiza los cambio de posición de los objetos. Primero se debe realizar la selección del objeto y luego moverlo a voluntad. Dicho movimiento esta descrito por desplazamiento del conjunto de marcadores teniendo en cuenta el tiempo necesario aplicando le ley de Fitts (ver sección 3.4.3.1), relacionado en la ecuación 2.

$$\bar{r} = (\bar{P}2x + \bar{P}2y + \bar{P}2z) - (\bar{P}1x + \bar{P}1y + \bar{P}1z) \quad (2)$$

**Rotación:** La rotación de los objetos se realiza con una selección del objeto y posteriormente una rotación del mismo en el eje correspondiente como si éste fuera real. Esta función es basada en las variaciones de los ángulos de las articulaciones presentadas luego de la selección del objeto y se aplican sobre el eje de coordenadas local del objeto.

*Rotación en X:* Se realiza con el análisis de los movimiento del brazo en el plano Sagital (YZ), y se toman las variaciones de los ángulos de las articulaciones con respecto al plano en mención. Los ángulos que influyen en los movimientos de rotación en este eje, son básicamente los presentados en la muñeca (plano de la mano-TCM-CMC) y al antebrazo (Pronación y Supinación). En la ecuación 3 se describe el ángulo que origina la magnitud de rotación en X.

$$\alpha_x = C1 * \|\Delta\alpha1\| + C2 * \|\Delta\alpha2\| \quad (3)$$

C1 y C2 = Constantes de Perspectiva

$\alpha1$  = Angulo del Antebrazo en el plano (YZ)

$\alpha2$  = Angulo del Muñeca en el plano (YZ)

*Rotación en Y:* Se realiza con el análisis de los movimiento del brazo en el plano Transversal (XZ), y se toman las variaciones de los ángulos de las articulaciones con respecto al plano en mención. Los ángulos que influyen en los movimientos de rotación en este eje, son básicamente los presentados en la muñeca (plano de la mano-TCM-CMC), antebrazo (Flexión-Extensión) y hombro (Flexión-Extensión). En la Ecuación 4 se describe el ángulo que origina la magnitud de rotación en Y.

$$\alpha_y = C1 * \|\Delta\alpha1\| + C2 * \|\Delta\alpha2\| + C3 * \|\Delta\alpha3\| \quad (4)$$

C1, C2, C3 = Constantes de Perspectiva

$\alpha_1$  = Angulo del Hombro en el plano (XZ)

$\alpha_2$  = Angulo del Antebrazo en el plano (XZ)

$\alpha_3$  = Angulo de la Muñeca en el plano (XZ)

**Rotación en Z:** Se realiza con el análisis de los movimiento del brazo en el plano Frontal (XY), y se toman las variaciones de los ángulos de las articulaciones con respecto al plano en mención. Los ángulos que influyen en los movimientos de rotación en este eje, son básicamente los presentados en la muñeca (plano de la mano-TCM-CMC) y al antebrazo (Pronación y Supinación). En la Ecuación 5 se describe el ángulo que origina la magnitud de rotación en Z.

$$\alpha_x = C1 * \|\Delta\alpha_1\| + C2 * \|\Delta\alpha_2\| \quad (5)$$

C1 y C2 = Constantes de Perspectiva

$\alpha_1$  = Angulo del Antebrazo en el plano (XY)

$\alpha_2$  = Angulo del Muñeca en el plano (XY)

**Escalado:** El escalado inicia con un clic hecho antes de tocar el objeto, posteriormente se mueven los punteros en dirección y magnitud voluntaria para aumentar o disminuir el tamaño. Se plantea un escalado aplicado a una sola dimensión en dirección de su eje correspondiente, también se plantea un escalado proporcionar le todas las dimensiones.

**Escalado en X, Y, Z:** Se basa en el cambio de posición de los marcadores, que modifican la posición del eje de coordenadas del objeto con respecto al los ejes globales. Se esta variación se toma la proyección presente en el eje X, y e Z y se observan en la ecuación 6. La proyección se realiza sobre el sistema de coordenadas local y se describe en la ecuación 6.

$$\vec{r}_e = (\vec{P}_2x + \vec{P}_2y + \vec{P}_2z) - (\vec{P}_1x + \vec{P}_1y + \vec{P}_1z) \quad (6)$$

$$|Proy \vec{r}e_x| = \frac{\vec{r}e * \vec{x}}{|\vec{x}|}$$

$$|Proy \vec{r}e_y| = \frac{\vec{r}e * \vec{y}}{|\vec{y}|}$$

$$|Proy \vec{r}e_z| = \frac{\vec{r}e * \vec{z}}{|\vec{z}|}$$

*Escalado Proporcional:* Se realiza con el calculo de las proyecciones en todos los ejes y se describe en la ecuación 7.

$$E_p = \sqrt{Proy \vec{r}e_x + Proj \vec{r}e_y + Proj \vec{r}e_z} \quad (7)$$

### **Asignación de tareas**

Las acciones relacionadas a cada uno de los gestos, se encuentran definidas como uno a uno.

### **Tareas:**

1. Creación del Plano
2. Selección del Objeto
3. Manipulación
  - Movimiento Libre
  - Rotación en cada eje X, Y, Z.
  - Rotación en eje combinado ZY ó ZX.
  - Escalado en eje
  - Escalado Proporcional

Creación del Plano: Para la creación del plano deben realizarse tres “clic” o uniones de los punteros, uno por cada esquina del plano que se desea crear.

#### **a. Complejidad del Conjunto de Gestos**

La complejidad del conjunto de gestos se determina; con la cantidad o número de gestos y la complejidad física relacionada en la realización del gesto.

Se define un gesto uno a uno, lo que nos permite determinar una cantidad reducida de gestos. La complejidad física es reducida ya que la técnica plantea en uso de movimientos naturales de interacción física, lo que reduce la complejidad. Sin embargo, se considera necesario para la realización adecuada de los movimientos planteados, que la motricidad gruesa del usuario tenga un desarrollo normal.

#### 4. SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL

El rastreo o determinación de tres dimensiones a partir de imágenes, es un campo de amplia investigación, la mayoría de técnicas desarrolladas se centran en el uso de un par estereoscópico para la realización de dicha tarea [66]. Sin embargo para aplicaciones de baja complejidad computacional se requiere el uso de la menor cantidad de recursos, lo que lleva a plantear el uso de un sistema monocular. Dicha tarea es un gran desafío y ha sido abordada por gran cantidad de investigadores, quienes han clasificado varias formas de realizar dicha estimación [18],[19]. Por ejemplo, en el estudio de segmentación P. Gil, F. Torres y F.G. Ortiz, se desarrolló un método de segmentación mediante histogramas bidimensionales para diferentes espacios de color en [27], L. Fajardo documentó un amplio estudio de segmentación a través de fusión de regiones en [48], además de la implementación de varias técnicas de umbralizado de imágenes realizadas en [49]. En cuanto a modelos de detección de movimiento existen publicaciones, en las que se describen los procesos de detección de profundidad realizados por Alcantarilla, Bergasa, Barea, Lopez y Ocaña en [63], y las técnicas de rastreo en tres dimensiones de tipo monocular recopiladas por T. Gaspar y P. Oliveira en [28]. Así mismo Linderoth y Robersson estudian minuciosamente diferentes técnicas aplicadas a la investigación y la industria[19].

El sistema desarrollado localiza la posición en tres dimensiones, con respecto a la cámara, un objeto esférico de diámetro conocido el cual se llamará marcador. El sistema plantea el uso de una cámara web de bajo costo, para la adquisición del video. Posteriormente se realiza el tratamiento de la secuencia usando un método basado en la ecualización del histograma, para cada canal por separado, usando el campo de color YCbCr. El procesamiento de la imagen se realiza con la aplicación de ecualización y binarización aplicadas a los canales de color elegidos. El reconocimiento se realiza con la separación y etiquetado de zonas con forma circular y tamaño regular. Para mejorar la localización del marcador se implementó el filtro de Kalman [62], que permite aumentar la velocidad en la detección de los

objetos. Los resultados obtenidos se compararon con un sistema de fotogrametría bidimensional por triangulación. Así mismo, se realizó una comparación con un estudio similar desarrollado por Gaspar y Oliveira [28], quienes realizan estimaciones de profundidad de manera similar.

#### 4.1 Rastreo Monocular

Como se mencionó antes, el objetivo es determinar la posición en el espacio tridimensional de un objeto en tiempo real, a través de una sola cámara, para lo cual se ha determinado el sistema de coordenadas mostrado en la figura 30.

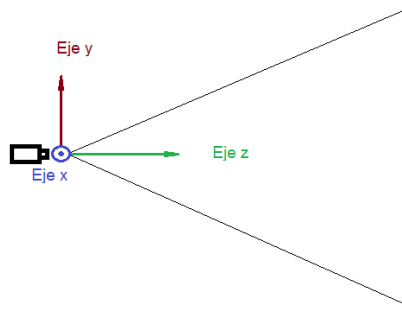


Figura 30. Sistema de coordenadas para el rastreo.

El procedimiento de rastreo de coordenadas en tres dimensiones, básicamente consiste en una secuencia de etapas retroalimentadas, en las cuales se hará la interpretación y/o transformación de los datos, el diagrama de la figura 31 muestra las etapas que se llevaron a cabo para realizar el rastreo, este ciclo se repetirá para cada fotograma hasta que el usuario detenga la aplicación.

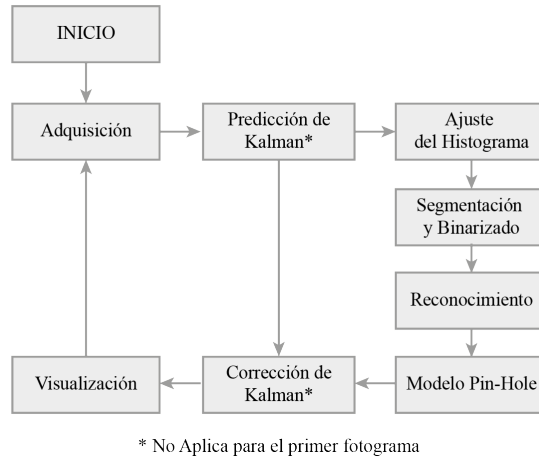


Figura 31. Arquitectura del Sistema de Rastreo.

#### 4.1.1 Adquisición de Video

En esta etapa se realiza la captura de la secuencia de video en tiempo real, que posteriormente va a ser procesada. Dicha adquisición se realizó usando el *Image Acquisition Toolbox* de MATLAB® y como dispositivo de captura una cámara web Genius *eFace* 1300 (ver figura 32), con ajuste de resolución para la captura de 1024x960 pixeles a 30 fps (fotogramas por segundo) y cuantizadas en un campo de color YCbCr. Se consideraron estas condiciones de adquisición para garantizar la precisión en las coordenadas y la velocidad de procesamiento computacional adecuada, teniendo en cuenta el estudio de Espinola [66], acerca del campo de color adecuado bajo ciertas condiciones.



Figura 32. Webcam Genius eface 1300.

## 4.1.2 Filtrado o Adecuación

### 4.1.2.1 Calibración de la Cámara

Antes de iniciar el proceso de rastreo, es necesario calcular algunos parámetros que son de gran importancia a la hora de determinar las coordenadas del objeto, y que influyen en el comportamiento de la imagen, éstos parámetros dependen directamente de la cámara y en especial de la forma de su lente. Dichos parámetros son básicamente; la distancia focal, distorsión radial y la distorsión tangencial. El estudio de los parámetros intrínsecos de una cámara fue realizado por Otero en [45], y su cálculo se hizo mediante una aplicación para MATLAB® desarrollada por Bouguetti en [47]. Las distorsiones radiales y lineales presentes en las secuencia capturada se corrigieron basados en los parámetros de la cámara [65]. Existen diversas técnicas [64], la gran mayoría basadas en fotogrametría o auto-calibración. Estos, dan la relación, respecto al sistema de coordenadas del usuario en lugar del sistema de coordenadas de la cámara [20].

En este trabajo se realizó una calibración basado en imágenes bidimensionales, tal como se observa en la figura 33. Las imágenes fueron tomadas teniendo en cuenta las recomendaciones de Zhang y Sturm [21].



Figura 33. Una de la serie de imágenes tomadas en el proceso de calibración.

Los parámetros a obtener son los siguientes:

*Parámetros Intrínsecos:* describen la geometría y óptica del conjunto de la cámara, así mismo determinan las distorsiones presentes en el lente.

*Longitud focal (fc):* Conocida también como distancia existente entre la cámara y el foco. *Punto principal (CC):* Se le denomina punto principal a las coordenadas del centro de la imagen. *Coefficiente de inclinación (alpha\_c):* El coeficiente de asimetría que define el ángulo entre los ejes X e Y. *Distorsiones(Kc):* Los coeficientes de distorsión de la imagen ( distorsiones radiales y tangenciales).

### **Determinación de los Parámetros Intrínsecos:**

Sea P un punto en el espacio de coordenadas del vector  $XXC = [X_c, Y_c, Z_c]$  en el marco de referencia de la cámara. Se proyecta el punto en el plano de la imagen, según los parámetros intrínsecos (fc, cc, alpha\_c, kc).  $X_n$  normaliza la proyección de la imagen (según el modelo pin-hole) :

$$x_n = \begin{bmatrix} X_c/Z_c \\ Y_c/Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

Después de incluir la distorsión de el lente, el nuevo punto de coordenadas normalizado  $X_d$  se define de la siguiente manera:

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + kc(1)r^2 + kc(2)r^4 + kc(5)r^6) x_n + dx \quad (9)$$

Donde dx muestra la distorsión tangencial:

$$dx = \begin{bmatrix} 2 kc(3) x y + kc(4) (r^2 + 2x^2) \\ kc(3) (r^2 + 2y^2) + 2 kc(4) x y \end{bmatrix} \quad (10)$$

Por lo tanto, Kc contiene el coeficiente de distorsión radial y tangencial. Una vez que la distorsión se aplica, la coordenada final del pixel  $x_{\text{pixel}} = [x_p; y_p]$  de la proyección sobre de P sobre el plano de la imagen es:

$$\begin{cases} x_p = \text{fc}(1) (x_d(1) + \text{alpha\_c} * x_d(2)) + \text{cc}(1) \\ y_p = \text{fc}(2) x_d(2) + \text{cc}(2) \end{cases} \quad (11)$$

Por lo tanto las coordenadas del  $x_{\text{pixel}}$  y  $X_d$  son relacionados entre si por la ecuación lineal:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \text{KK} \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde KK se conoce como la matriz de la cámara definida como:

$$\text{KK} = \begin{bmatrix} \text{fc}(1) & \text{alpha\_c} * \text{fc}(1) & \text{cc}(1) \\ 0 & \text{fc}(2) & \text{cc}(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Los resultados de la determinación de los parámetros intrínsecos de la cámara usada, son los siguientes:

```
Focal Length:    fc = [ 982.25259  983.28163 ] [ 13.43050  11.35951 ]
Principal point: cc = [ 647.79675  382.47468 ] [ 8.63543  16.45040 ]
Skew:           alpha_c = [ 0.00000 ] [ 0.00000 ] => angle of pixel axes = 90.00000 0.00000 degrees
Distortion:     kc = [ -0.12766  0.26196  0.00670  0.00433  0.00000 ] [ 0.01752  0.06008  0.00322  0.00315  0.00000 ]
Pixel error:    err = [ 0.25470  0.49131 ]
```

## Parámetros extrínsecos

Los parámetros extrínsecos crean una correlación, entre el sistema de coordenadas del mundo real y la cámara, determinando la posición y orientación de la cámara con respecto al sistema de coordenadas del mundo real.

**Rotaciones:** Definidas como  $Rc\_N$ .

**Translaciones:** Definidas como  $Tc\_N$ .

Sea P un punto en el espacio de coordenadas de los vectores  $XX = [X, Y, Z]$  en el marco de referencia de la grilla, entonces  $XXc = [Xc; Yc; Zc]$  es el vector de coordenadas de P en el marco de referencia de la cámara y  $XX$  y  $XXc$  están relacionados entre sí a través de la ecuación:

$$XXc = R_{c\_1} * XX + T_{c\_1} \quad (14)$$

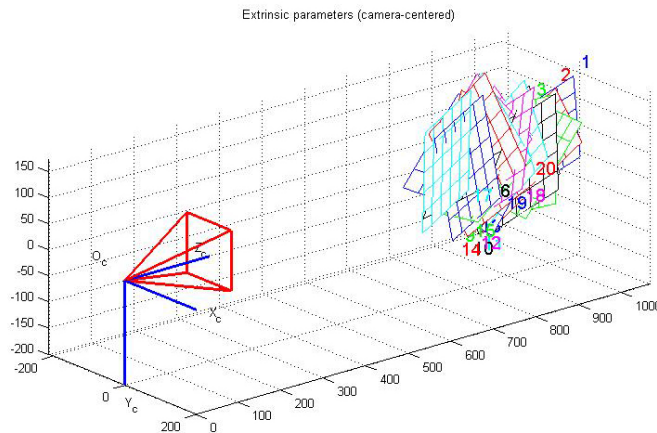


Figura 34. Resultados de la calibración. Parámetros Extrínsecos.

#### 4.1.2.2 Reflejo de la Imagen

Teniendo en cuenta que la imagen reflejada en la pantalla ha de representar los movimientos del usuario, se hace necesario reflejar la imagen capturada para mejorar la comprensión de la imagen observada. Para esto, se realizó un reflejo horizontal de la secuencia de imágenes capturadas.

#### 4.1.2.3 Separación de Componentes

Para disponer la imagen de manera adecuada para los procesos posteriores, se debe adecuar la adquisición en un campo de color que permita la segmentación por color. Teniendo en cuenta el trabajo de Espínola [66], dónde se comparan diversos campos de color, el Campo YCbCr, tiene un buen comportamiento frente

a cambios de iluminación y permite su uso en la segmentación basada en color. De otro lado, es necesario mencionar que el dispositivo de captura, permite la adquisición de manera nativa en campo de color YCbCr, lo que reduce costo de procesamiento al no tener que realizar conversiones a otros campos de color.

El campo de color YCbCr, es un campo que descompone la imagen en lo componentes de Luminancia (Y) y dos componentes de Cromancia, Cb y Cr indican el tono del color: Cb ubica el color en una escala entre el azul y el amarillo, Cr indica la ubicación del color entre el rojo y el verde.

Para su uso en el sistema desarrollado, se realizó una separación y extracción de canales o componentes mencionados anteriormente, tal como se observa en la figura 35.



Figura 35. Extracción de la componente Cb y Cr de la imagen.

#### 4.1.2.4 Ecuilizado del Histograma

Antes de iniciar la etapa de segmentación es necesario elaborar y ecualizar el histograma de cada uno de los canales por separado, para evitar el reconocimiento de objetos indeseados en el rastreo. Un histograma es una representación grafica de una variable en forma de barras, dónde la altura o eje vertical es proporcional a la frecuencia de los valores producidos, y la anchura o eje horizontal corresponde a los intervalos o valores de la clasificación[67].

La ecualización es una forma de manipulación del histograma, que reduce el contraste en las áreas muy claras o muy oscuras de la imagen, expandiendo los niveles de gris a lo largo de todo el intervalo [67]. La ecualización del histograma de una imagen es una herramienta de realce adaptativo muy útil para aumentar el contraste de imágenes con histogramas muy concentrados, ya sean imágenes oscuras o claras, permitiendo resaltar las zonas donde el marcador se diferencia del fondo.

Para esta aplicación, los colores que se desean reconocer son el rojo y el azul, por lo tanto se va a tomar como entrada, las componentes Cr y Cb de la imagen respectivamente, como se muestra en la figura 35. Seguidamente se calcula el histograma y ecualiza el histograma para cada componente por separado, como se observa en la figura 36.

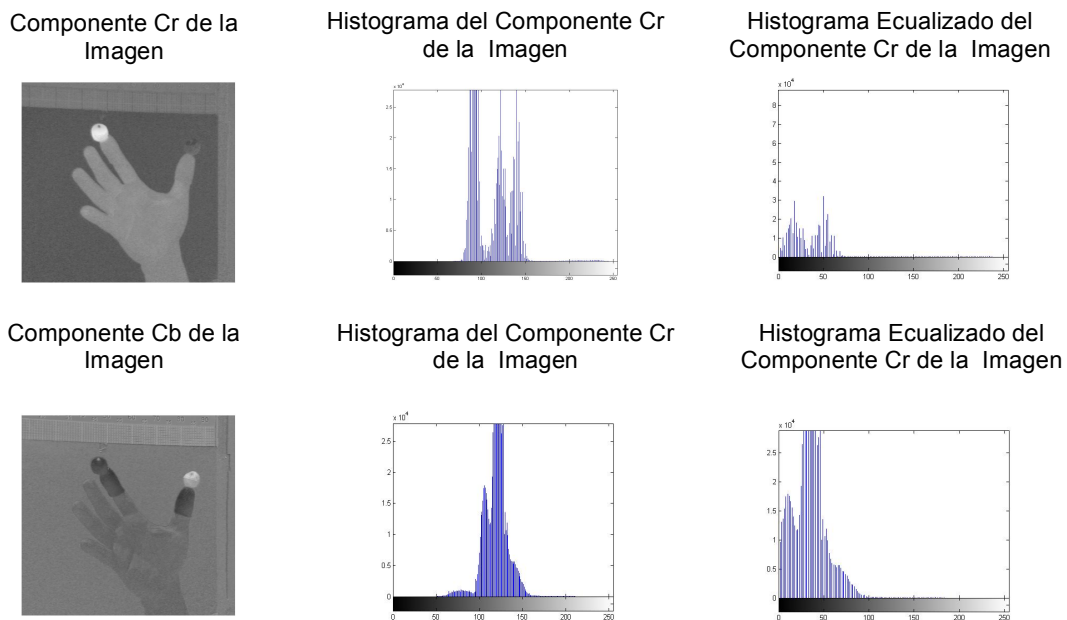


Figura 36. Componente Cb y Cr de la Imagen. Histograma Inicial e Histograma Ecualizado.

La ecualización del histograma se inicia con la normalización de los valores obtenidos del histograma original, posteriormente se aplica a la imagen la función de transformación, descrita en la ecuación 15.

Dada una imagen  $M \times N$ , con  $n_k$  pixeles para cada nivel  $r_k$ , la ecualización del histograma consiste en realizar la siguiente transformación sobre los niveles de intensidad de la imagen:

$$S_k = T(r_k) = (L - 1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \frac{L - 1}{MN} \sum_{j=0}^k n_j \quad (15)$$

5.

lo que resulta en una dispersión del histograma en un rango , para el intervalo  $[0, L-1]$ .

El resultado de la ecualización maximiza el contraste de una imagen sin perder información de tipo estructural, es decir, conservando su entropía<sup>2</sup>. En las figura 37 se ven reflejadas las variaciones en el contraste de las imágenes, disponiéndolas para un reconocimiento más óptimo de los marcadores.

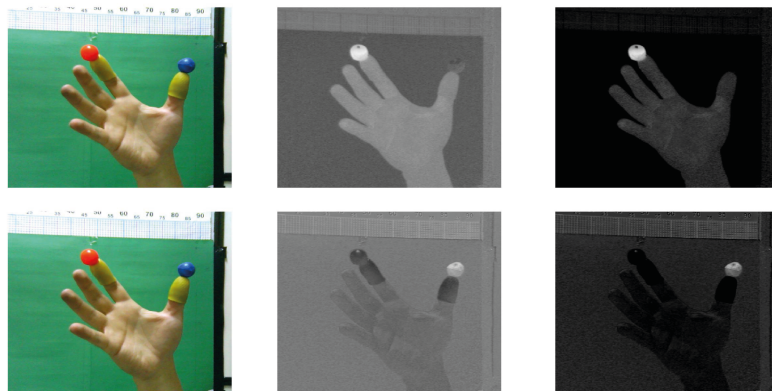


Figura 37. Variaciones en la imagen antes y después de ecualizar el histograma.

Imagen original (izquierda), Componente Cr (arriba), Componente Cb (abajo).

Como puede verse en la figura 37, la diferencia entre los marcadores y el fondo de la escena es más pronunciada en las componentes Cr y Cb con histograma ecualizado.

<sup>2</sup> Entropía: Cantidad de Información presente en una imagen.

### 4.1.3 Segmentación

La segmentación realiza un proceso de división de zonas de la imagen para la posterior extracción de información. Dicho problema es objeto de diversas investigaciones, tanto en segmentación en escala de grises como en segmentación de imágenes en color [22], [23], [24]. Las técnicas actuales de segmentación se pueden clasificar en dos grandes grupos, las técnicas basadas en la detección de bordes-contornos [25], [26] y las técnicas basadas en detección de regiones. Para este trabajo usaremos una técnica basada en la detección de regiones homogéneas con el fin de detectar la posición de los marcadores presentes en la imagen. Este proceso inicia con la adecuada Umbralización de los canales Cb y Cr, para exponer claramente la ubicación en la imagen de los marcadores y segmentar las áreas con presencia de los colores deseados.

#### 4.1.3.1 Umbralización

En esta etapa la secuencia de imágenes es sometida a un proceso de separación de regiones por color, se ha optado por utilizar el proceso de segmentación más sencillo, dado que esta aplicación debe trabajar a tiempo real, y por lo tanto, los algoritmos usados en la etapa de rastreo deben consumir la mínima cantidad posible de recursos computacionales.

La Umbralización es una técnica de segmentación ampliamente usada, muy útil cuando existe una diferencia notoria entre los objetos a extraer y el fondo de la escena [67], tal como se observa en la figura 38. La técnica se fundamenta en la similitud presente entre pixeles pertenecientes a un objetos y su diferencia con respecto a los demás, debido a esto la escena debe caracterizarse por un fondo uniforme y objetos diferenciables [68].

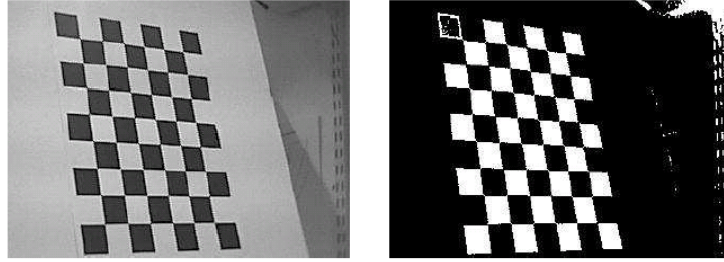


Figura 38. Proceso de Umbralización. Fuente: Autor

(Izquierda) Imagen Original en escala de grises. (Derecha) Imagen Umbralizada

Para obtener la segmentación mas adecuada se calculó un umbral para la componente que tuviera más peso o relevancia sobre los objetos de color rojo<sup>3</sup> y azul. Otsu determino la eficacia de su método, aplicado a la determinación del umbral optimo para la binarización de una imagen en escala de grises[69].

#### 4.1.3.2 Método de Otsu

El método de Otsu, es una técnica que utiliza procesos no paramétricos para obtener umbrales de forma óptima de acuerdo a algún criterio. Particularmente Otsu elige un umbral óptimo maximizando la varianza entre clases, mediante búsqueda exhaustiva. Otsu presenta grandes ventajas en de uso en ambientes reales, donde se presenta ruido, variaciones de iluminación, además de esto Otsu es completamente automático [69]. A continuación se explica el principio de funcionamiento del método de Otsu. Este método sostiene que un umbral  $t$  será optimo cuando la varianza entre dos rangos o clases de intensidades sea máxima, este umbral se define por medio de la ecuación 16.

$$t^* = \max\{\sigma^2(t)\} \quad (16)$$

Donde  $t^*$  es el umbral optimo y la varianza entre dos clases  $\sigma^2$  se define por medio de (16); una clase es una agrupación de intensidades que hacen referencia a una

---

<sup>3</sup> Si se desea utilizar un color diferente a rojo o azul es necesario utilizar las componentes Cb y Cr de manera combinada.

región, generalmente las clases están conformadas por los objetos a rastrear y el fondo de la escena.

$$\sigma^2 = \omega_1(\mu_1 - \mu_T)^2 + \omega_2(\mu_2 - \mu_T)^2 \quad (17)$$

$\mu_1$  y  $\mu_2$  son el promedio de las intensidades pertenecientes a las clases 1 y 2 respectivamente,  $\mu_T$  es el promedio total de intensidades en la imagen,  $\omega_1$  y  $\omega_2$  son las sumatorias de las probabilidades de que cada intensidad perteneciente a las clases 1 y 2 respectivamente aparezca en la imagen.

Una vez calculado el umbral  $t^*$ , se realiza el cálculo de la imagen binaria, teniendo en cuenta que; si un valor de intensidad de la componente de la imagen está por encima del umbral  $t^*$ , su respectiva imagen binaria tendrá un valor de uno 1, en caso contrario será cero 0. Para la aplicación del método de Otsu se tomaron las recomendaciones planteadas por Liao [70], quién desarrollo un algoritmo de Umbralización basado en el método de Otsu, disminuyendo el tiempo de procesamiento y optimizando la Umbralización multinivel. Los resultados obtenidos con la aplicación de Otsu, son bastante superiores con respecto a la Umbralización manual, permitiendo una reacción positiva frente a los cambios de iluminación.

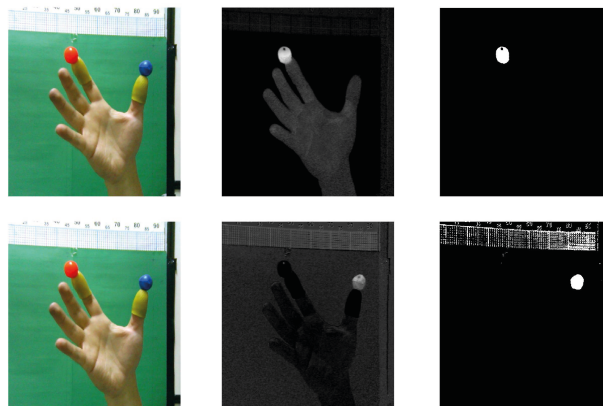


Figura 39. Variaciones en la imagen. Imagen original (izquierda), antes de umbralizar (centro) y después de Umbralizar (derecha). Componente Cr (arriba), Componente Cb (abajo).

En la figura 39 se puede observar la clara segmentación de los marcadores con respecto al fondo de la imagen, permitiendo determinar una zona de forma conocida que representa al marcador y permite ubicarlo dentro de la imagen.

#### 4.1.4 Reconocimiento

Una vez obtenida la imagen binaria se procede a detectar las regiones más grandes, mediante el conteo de píxeles de valor 0. Posteriormente se calcula el centroide y el diámetro de la región reconocida como marcador. Dicho proceso se realiza mediante el cálculo de la mayor cantidad de píxeles 0, presentes por cada fila y columna de la matriz de imagen y la selección de la mayor ponderación presente.

También es posible que el algoritmo reconozca otras regiones diferentes al objeto a rastrear por lo tanto es necesario aplicar un algoritmo que reconozca la forma del objeto y elimine aquellas regiones que no posean ninguna similitud a la forma de dicho objeto. Para esto se determino buscar la forma circular de cada uno de los marcadores, tal como se observa en la figura 40.

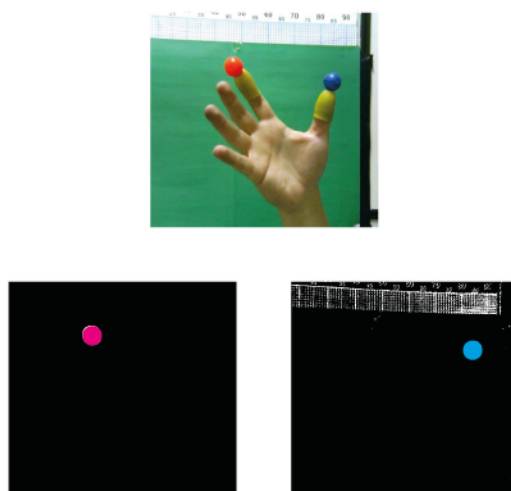


Figura 40. Reconocimiento de los marcadores en la imagen procesada.  
Imagen original (arriba), Marcador Rojo (izquierda), Marcador Azul (derecha).

## 4.2 Estimación de Profundidad

### 4.2.1 Función de profundidad

#### *Modelo Pin Hole*

Una vez ubicado el objeto en la imagen con su respectivo diámetro, se procede a aplicar las coordenadas en pixeles del objeto, a un modelo de mapeo inverso desarrollado en [47], en el cual se obtienen las coordenadas  $x$  e  $y$  del marcador en centímetros en función de su profundidad  $z$ , tal como se observa en las ecuaciones 18 y 19.

$$x = f(z) = X_n * z \quad (18)$$

$$y = f(z) = Y_n * z \quad (19)$$

Donde  $X_n$  y  $Y_n$  son las coordenadas normalizadas, obtenidas del modelo de mapeo inverso, dado que el plano  $XY$  del sistema de coordenadas está de frente a la cámara. Según [48] y [49] se espera que la variación de  $x$  e  $y$  sea mayor cuando el objeto está más cerca de la cámara que cuando está a una distancia más lejana de la misma.

Para obtener  $z$  se utiliza el diámetro del objeto en la imagen como variable de entrada, este se compara con su diámetro real (conocido) y mediante una aplicación especial del modelo *pin hole* desarrollada por Oliveira en [28] donde se obtiene el valor de la profundidad del objeto respecto a la cámara. La relación entre las coordenadas reales del objeto  $[x, y, z]$  y sus coordenadas en la imagen en pixeles  $[x_p, y_p]$  esta dada por [ 44].

$$x_p = f * \frac{x}{z} \quad (20)$$

$$y_p = f * \frac{y}{z} \quad (21)$$

$$r = f * \frac{R}{z} \quad (22)$$

Las ecuaciones 20 a 22, relacionan la posición en el espacio del marcador con su posición en la imagen por medio de la distancia focal  $f$ , de aquí, es posible relacionar una distancia entre dos puntos que se encuentren a la misma profundidad en el mundo real con su proyección en la imagen.

$R$  es el diámetro físico del marcador en centímetros y  $r$  es el diámetro en la imagen medido en pixeles, dado que estos parámetros junto con la distancia focal son conocidos es posible calcular la profundidad a la que se encuentra el marcador.

#### 4.2.2 Aplicación del Filtro de Kalman

El filtro de Kalman proporciona un buen medio para la estimación de una variable, de la que se dispone de medidas a lo largo del tiempo. Se trata de una técnica de estimación Bayesiana empleada para seguir sistemas estocásticos dinámicos observados mediante sensores ruidosos. En el campo de la Visión Artificial el filtro de Kalman se utiliza de manera recursiva para estimar la posición de un punto o característica en movimiento y la incertidumbre de la medida, en la siguiente imagen[50]. Además de esto, como puede verse en la figura 41, resulta ventajoso en el rastreo dado que el filtro proporciona una región de búsqueda reducida en la cual estará el marcador (ROI), eliminando la necesidad de buscarlo en toda la imagen.



Figura 41. Región de búsqueda del marcador proporcionada por el filtro de Kalman.

#### 4.2.2.1 Filtro de Kalman

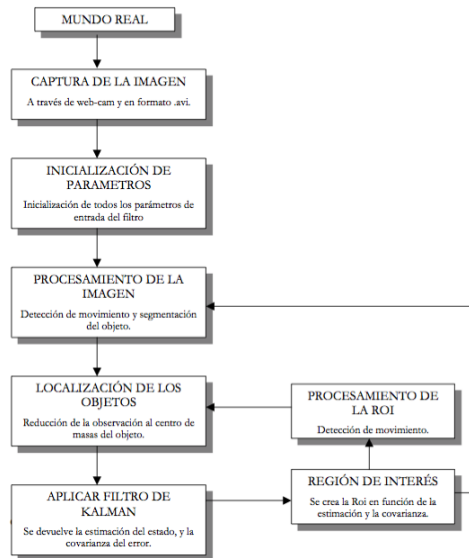


Figura 42. Diagrama de bloques del Filtro de Kalman aplicado a la localización de objetos en visión artificial.

El filtro está definido en dos etapas; la primera de predicción y la segunda de corrección, en la etapa de predicción el filtro estima la posición  $x$  e  $y$  del marcador en la imagen teniendo en cuenta su posición anterior y las ecuaciones que gobiernan su movimiento, 23, 24 y 25 son las ecuaciones cinemáticas de un objeto en dos dimensiones.

$$x = \begin{cases} x_{k+1} = x_k + v_{xk} * t \\ v_{xk+1} = v_{xk} \end{cases} \quad (23)$$

$$y = \begin{cases} y_{k+1} = y_k + v_{yk} * t \\ v_{yk+1} = v_{yk} \end{cases} \quad (24)$$

$$\forall k = 1, 2, 3 \dots \infty \quad (25)$$

En (23) y (24)  $x$  e  $y$  hacen referencia a los índices de los píxeles que determinan la posición del marcador en la imagen,  $V_x$  y  $V_y$  son las velocidades del marcador en

$x$  e  $y$  respectivamente,  $t$  es el tiempo transcurrido y  $k$  es la cantidad de fotogramas adquiridos en el instante  $t$ .

### Predicción

Para la predicción de la posición del marcador primero es necesario representar en espacio de estados el sistema dado por (23) y (24), para lo cual será necesario calcular las matrices de (26).

$$x_{k+1} = A * x_k + B * u_k + w_k \quad (26)$$

La ecuación (26) es la forma canónica de un sistema discreto en espacio de estados, donde relaciona un estado  $k+1$  con un estado anterior  $k$ , la matriz  $B$  relaciona un estado con su entrada de control  $u_k$ , y  $w_k$  es el ruido del proceso.

Dado que el sistema representado por (23) y (24) no posee ninguna entrada de control, la matriz  $B$  será nula, y los coeficientes de la matriz  $A$  estarán dados para satisfacer (27).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

### Corrección

Luego de hacer la predicción del estado, se hace la respectiva medición dada por (28).

$$z_k = H * x_k + v_k \quad (28)$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

La matriz  $H$  en las ecuaciones (28) y (29) relaciona la medida  $z_k$ , con el estado  $x_k$ , y  $v_k$  se representa el ruido de la medida. Luego de tener la medición del estado, se procede a hacer la corrección del mismo por medio de (30).

$$x_k = x_k^- + K_k * (z_k - H * x_k^-) \quad (30)$$

La matriz  $K$  es la ganancia de Kalman y establece la cantidad de influencia la estimación y la medida, y se calcula en base de la estimación a priori del estado según (31) y (32).

$$K_k = P_{k+1}^- * H^T * (H * P_{k+1}^- * H^T + R) \quad (31)$$

$$P_{k+1}^- = A * P_k * A + Q \quad (32)$$

$P$  es el estimador de la covarianza del error,  $R$  y  $Q$  son las matrices de varianza del error de la medida y del proceso respectivamente [50], [51].

### 4.3 Resultados Obtenidos

El fin del diseño de éste sistema es la estimación espacial en 3D de los marcadores, dentro del espacio de trabajo de una persona [52], es por esto que nos interesa determinar una ubicación espacial adecuada para un rango de profundidad entre los 40 y 115 [cm] con respecto a la cámara.

Para realizar la validación de la estimación, se realizaron una serie de mediciones de la estimación obtenida por el sistema propuesto, dichas mediciones se compararon con los datos obtenidos por medio un sistema de fotogrametría bidimensional, mediante triangulación estéreo.

### 4.3.1 Herramientas

Para la captura de las imágenes a comparar se usaron dos cámaras de referencia Kodak Easy Share M530. Dispuestas sobre trípodes de fotografía tal como se observa en la figura 43. Así mismo, se usaron dos marcadores (rojo y azul) de diámetro 2 cm. Para realizar el cálculo de la triangulación se desarrolló una herramienta en Matlab® que realiza los cálculos de correspondencia en tres dimensiones de los objetos en cuestión, partiendo de las dos imágenes capturadas.



Figura 43. Cámara Kodak Easy Share M530. Fuente: Kodak.

### 4.3.2 Escenario

Se dispuso el escenario de prueba como se observa en las figura 44, donde inicialmente se ubica la cámara Web, a una distancia de 125 cm con respecto a la pared y a una altura de 142 cm. De la misma forma también se ubican el par de cámaras fotográficas. Los datos fueron tomados con una iluminación controlada, en un rango promedio entre 320 y 400 lux de iluminación artificial.

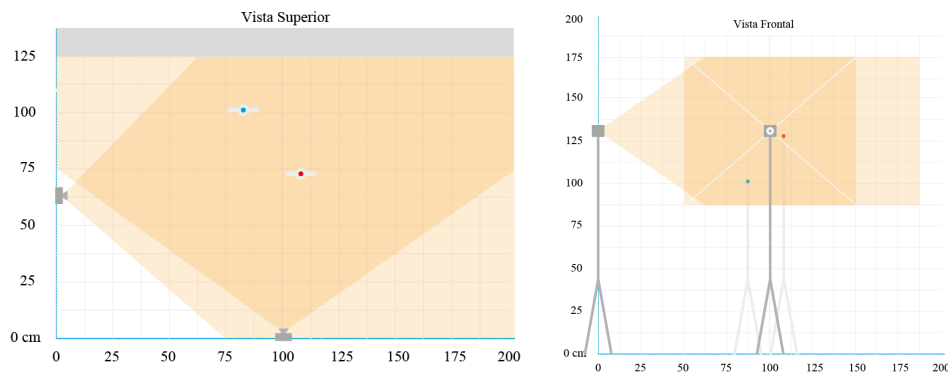


Figura 44. Configuración del espacio para la toma de datos. Vista Superior y vista Frontal.

### 4.3.3 Procedimiento

**Calibración:** Se inició por realizar la calibración del sistema estereoscópico, teniendo en cuenta las recomendaciones de Bouguetti [47]. El proceso de calibración se realiza individualmente para cada cámara, sin importar que sean de la misma referencia.

**Captura de Imágenes:** Después de dispuesto el escenario para la captura, se procede a la captura de imágenes y datos realizando una captura del par estéreo y el almacenamiento de las coordenadas estimadas mediante la herramienta, este proceso se realizó simultáneamente realizando variaciones de profundidad cada 2 cm desde los 40 cm hasta 115 cm de profundidad con respecto a la webcam.

**Análisis:** La ubicación espacial de los marcadores en las imágenes fue determinada con una aplicación diseñada en Matlab® para obtener las coordenadas por triangulación estereoscópica usando la metodología de Torrontegi [70]. En la figura 45 se observa la interfaz grafica de la aplicación diseñada. Dichas coordenadas fueron comparadas con las coordenadas estimadas por el sistema monocular planteado.

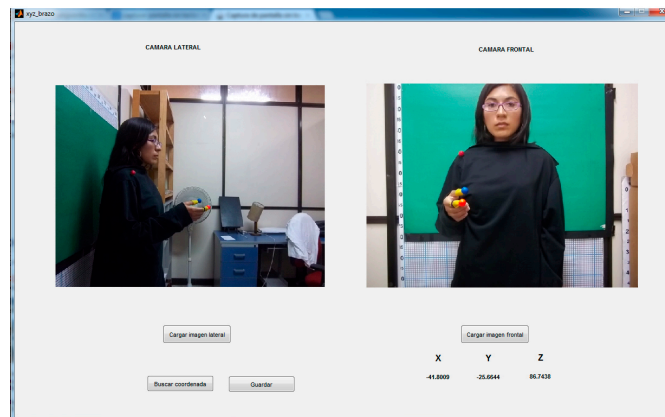


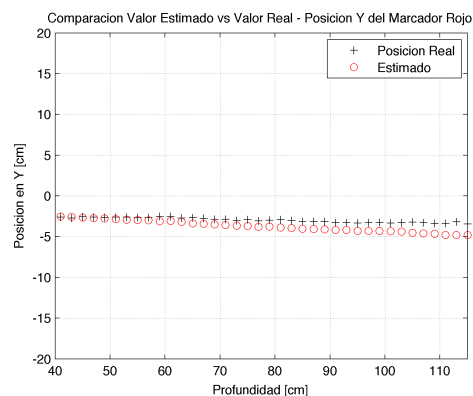
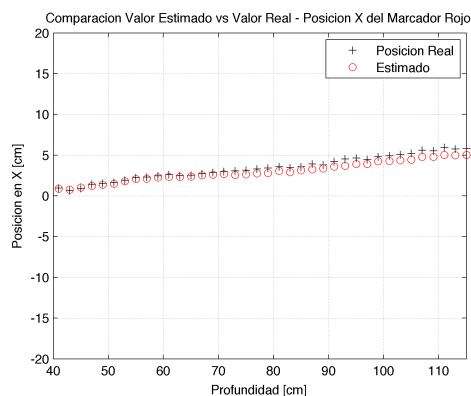
Figura 45. Interfaz gráfica de la aplicación de triangulación.

### 4.3.4 Resultados

En la validación de la aplicación se realizaron dos pruebas, una para un marcador de color rojo y otra para un marcador de color azul, cada prueba consistió en estimar la profundidad del respectivo marcador y compararla con la profundidad calculada por dicha aplicación propuesta en MATLAB, ver figura 45.

#### 4.3.4.1 Marcador Rojo

Para el marcador rojo en el plano frontal se estimó la posición en  $X$  con respecto a la cámara. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 46, donde se puede observar que la variación en la estimación se incrementa cuando aumenta la profundidad con respecto a la cámara, disminuyendo de esta manera la precisión presentada por el sistema planteado. Sin embargo la variación mínima es de 0,011 [cm] encontrada a 40 [cm] y la variación máxima es de 0,90 [cm] presentándose a 111 [cm] se profundidad con respecto a la cámara.



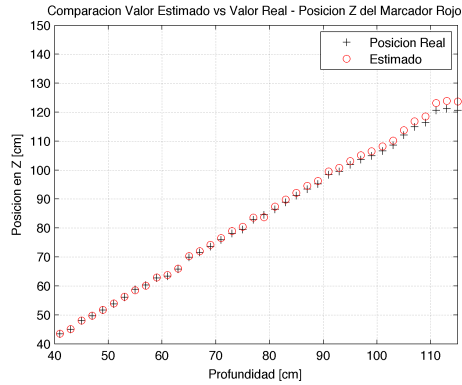


Figura 46. Estimación de la Posición en X, Y e Z del marcador rojo VS Posición Real del Marcador.

Se estimaron las posiciones en Y para el marcador rojo. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 46. En la grafica se puede observar una variación que aumenta con la profundidad, la menor variación es de 0,039 [cm] presentada a 40 [cm] y la mayor variación se presenta con 1,63 [cm] a una profundidad de 113 [cm]. La posición en Z con respecto a la cámara, presenta variaciones que van aumentando junto a la profundidad, la mayor variación se presenta a los 115 [cm] con un valor de 2,97 [cm].

Para la estimación de las posiciones se realizaron tomas de 20 datos por cada posición de profundidad. Por consiguiente se analizó la desviación estándar para cada toma. Las desviaciones son mostradas en la figura 47. En la gráfica se puede observar, para la posición X del marcador rojo, que comienzan a incrementarse después de los 65 [cm] de profundidad, sin embargo la mayor desviación de los datos se presentó a los 111 [cm], y es considerada una variación pequeña con valor de 0,112.

Para la posición Y del marcador se observa incremento considerable después de los 65 [cm] de profundidad, aumentando progresivamente hasta los 110 [cm]. El valor más alto presentado es de 0,14. Sin embargo las variaciones estándar de los datos presentadas en la figura 47 no son considerablemente altas, lo que sugiere la estabilidad de los datos capturados en las tomas realizadas.

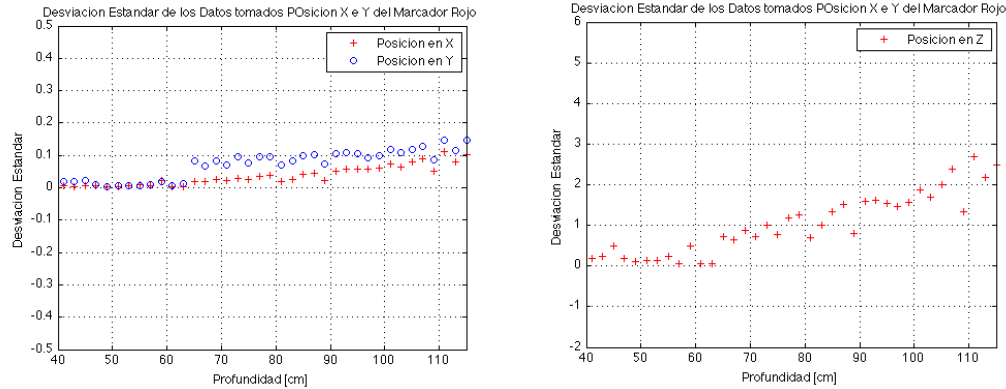


Figura 47. Desviación Estándar presentada en la toma de datos para la posición en X,Y e Z del marcador rojo.

La desviación estándar presentada en la toma de datos de la posición en Z del marcador rojo se puede observar en la figura 47, donde se presenta un claro incremento que se hace considerable después de los 65 [cm] de profundidad, y tiene como punto máximo 2,68, presentado a los 111[cm].

De los resultados observados anteriormente se puede concluir que existe una variación presente en los datos capturados para las posiciones en X,Y,Z apreciable mediante la desviación estándar observada en las figura 47, donde se observa claramente la estabilidad de los datos en el rango de profundidad entre 40 y 65 [cm]. En el rango de 65 a 115 [cm], se presenta una variación de los datos pequeña en las posiciones X e Y, sin embargo en la posición Z se observa una variación considerable que puede afectar la profundidad del marcador. La variación presentada en Z no es lo suficientemente grande para afectar negativamente las posiciones X e Y del marcador.

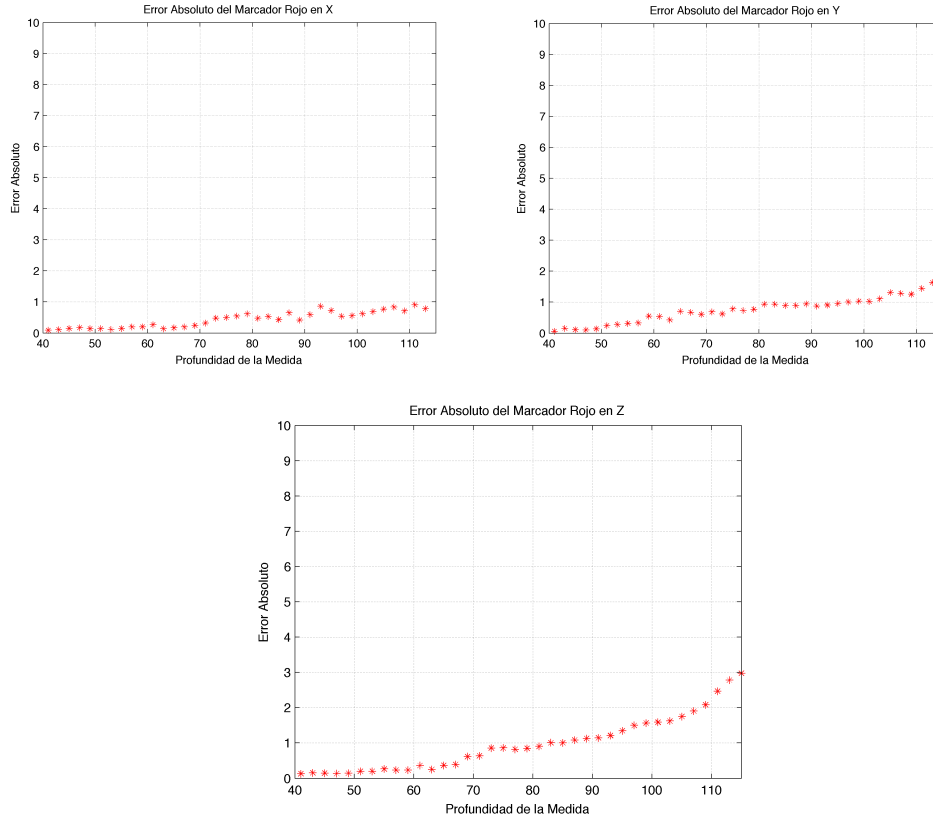


Figura 48. Error Absoluto presentado en la estimación de posición del marcador rojo.

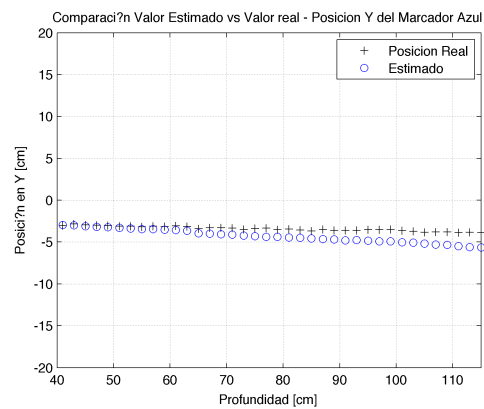
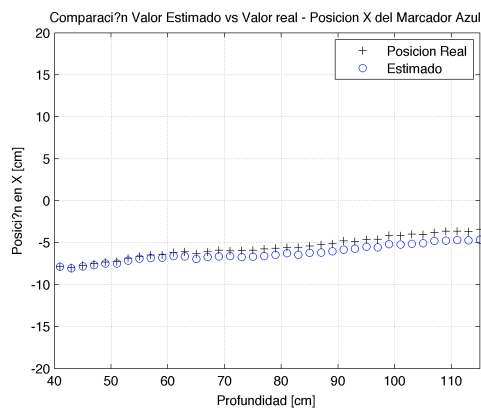
Arriba Izquierda, posición X. Arriba Derecha Posición Y. Abajo Posición Z.

En las figura 48 se observa los errores absolutos presentados en las posiciones X, Y y Z del marcador rojo. Como se puede observar, en la posición X el mayor error presentado se observa con 0,9 [cm] a 111 [cm] de profundidad. También se observa un error menor a 1 [cm] durante todos los datos medidos. Con respecto a la posición Y, el mayor error presentado es de 1.63 [cm] a una profundidad de 113 [cm], así mismo se observa un error menor a 1 [cm] en el rango de 0 a 100 [cm], después de esta profundidad el error presentado comienza a incrementarse paulatinamente. En la posición Z del marcador se encuentra un error considerablemente menor a 1 [cm] en el rango de 0 a 85 [cm] , en el rango de 85 a 115 se presenta un error considerable y en aumento, logrando un valor de 2,97 [cm] con respecto al valor real, observado a una profundidad de 115 [cm].

De los errores relacionados anteriormente se puede inferir que los valores presentados para las coordenadas X e Y son considerablemente pequeños y aceptables para la profundidad de trabajo requerida. De la misma manera, se consideran no despreciables el error presentado para la posición en Z del marcador, que muestra un evidente aumento a medida que se aleja de la cámara. Se considera que tiene un rango de error aceptable hasta una profundidad de 109 [cm], lo que permite un error aceptable para la profundidad de trabajo planteada.

#### 4.3.4.2 Marcador Azul

A continuación se relacionan los resultados de la toma de datos. Se estimó inicialmente la posición X para el marcador azul, y obtuvieron los resultados observados en la figura 49, donde se puede detallar la variación presentada a partir de los 60 [cm] de profundidad, incrementando la variación de manera constante. La variación máxima presentada es de 1,2 [cm] a una profundidad de 115 [cm] con respecto a la cámara. De igual manera se observa una variación bastante menor en el rango de 40 a 62 [cm].



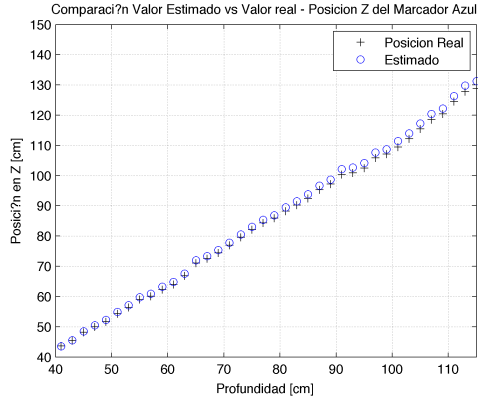


Figura 49. Estimación de la Posición en X,Y e Z del marcador Azul VS Posición Real del Marcador.

En la Figura 49 se muestra la comparación para la posición en Y del marcador Azul. Se puede observar que se presenta una variación pequeña en el rango de 40 a 64 [cm], pero que se incrementa constantemente a medida que aumenta la profundidad, por esto la mayor variación se presenta a los 115 [cm] con un valor de 1,78 [cm]. Para la posición en Z del marcador se observan en la figura 49, variaciones pequeñas y constantes a lo largo de la profundidad. Se presenta la mayor variación a una profundidad de 115[cm] con un valor de 2,47 [cm], valor que tiende a incrementarse con la profundidad.

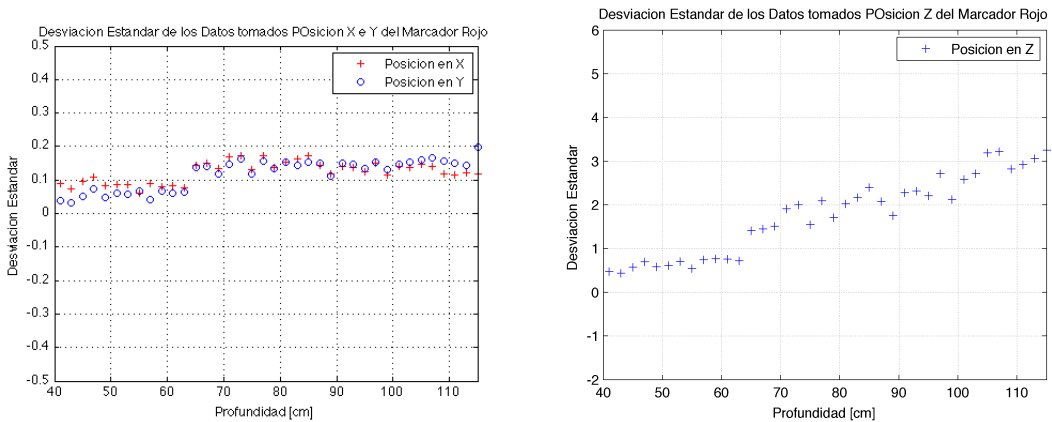


Figura 50. Desviación Estándar presentada en la toma de datos para la posición en X, Y e Z del marcador Azul.

En la figura 50 se observa que las desviaciones presentadas en los datos de la posición Y son menores en el rango de 40 a 65 [cm], y van aumentando

escasamente hasta los 115 [cm]. La mayor desviación en X se presentó a los 73 [cm] de profundidad con un valor de 0,17 y en Y a los 115 [cm] con un valor de 0,19.2. De la misma manera, las desviaciones en los datos de la posición en Z del marcador Azul. Se puede notar que la desviación aumenta progresivamente, pero con mayor rapidez después de los 65 [cm] de profundidad. Con un valor de 3,25, se presenta la mayor variación a los 115 [cm] de profundidad.

De los resultados mostrados se puede concluir que existen variaciones en la posición del marcador azul, evidenciadas por la desviación mostrada anteriormente, en las posiciones X e Y se nota la estabilidad en los datos capturados en el rango de 40 a 65 [cm], variando levemente en el rango restante. Sin embargo en la posición Z se observa una desviación que supera ampliamente a las mostradas anteriormente, sin embargo no afecta ampliamente a las posiciones X e Y.

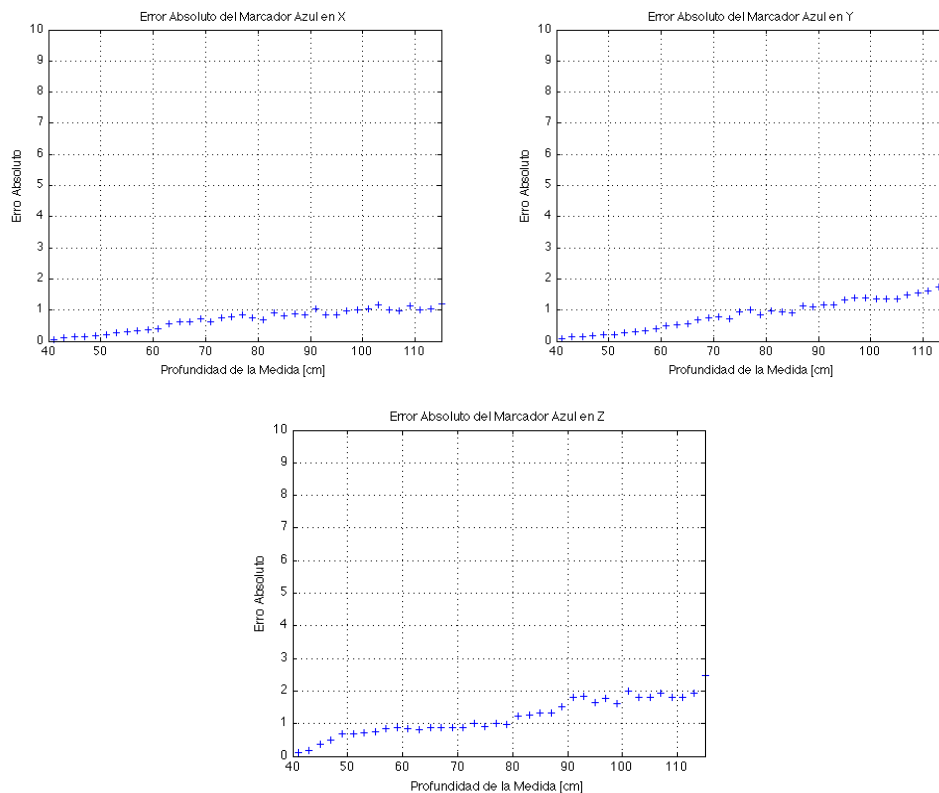


Figura 51. Error Absoluto presentado en la estimación de posición del marcador azul.

Arriba Izquierda, posición X. Arriba Derecha Posición Y. Abajo Posición Z.

Los errores observados en la figura 51 se evidencia que para la posición X del marcador azul, se mantiene un error en promedio por debajo de 1 [cm], este valor solo es superado a una profundidad mayor a 100 [cm]. El mayor error observado se encuentra a 115 [cm] con valor de 1,2. Para la posición Y, en el rango de 40 a 85 [cm] se observa un error inferior a 1, valor que se incrementa con la profundidad, llegando a presentar el mayor error de 1,7 a 115 [cm] de profundidad. Para la posición Z, se nota que en el rango de 0 a 80 [cm] el error es menor a 1, valor que va aumentando con la profundidad hasta un valor máximo de 2,4 a 115 [cm]. Se observa un aumento progresivo del error a lo largo de toda la profundidad estudiada, sin embargo aumenta con más rapidez después de los 80 [cm].

De las graficas estudiadas anteriormente se puede comentar que los errores presentados para todas las posiciones del marcador en el rango de 40 a 80 [cm] son inferiores a 1. Sin embargo en las posiciones de Y e Z estos valores aumentan relativamente rápido con la profundidad. A pesar de esto los errores mostrados son aceptables para la zona de trabajo planteada.

El sistema de visión nos arrojará los datos suficientes para ingresar al sistema de reconstrucción del brazo y estimar la posición del mismo y sus respectivos movimientos.

Es de mencionar que los resultados obtenidos en este capítulo del trabajo fueron presentados en Ponencia Oral titulada “*Real-time Monocular Vision-Based 3D Object Tracking System using Kalman filter*” en el “XV simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial” – STSIVA 2012, realizado el 14, 13 y 14 de septiembre, en la Ciudad de Medellín – Colombia.

## 5. MODELO DEL MIEMBRO SUPERIOR

A continuación se describirá el trabajo realizado para plantear el modelo que describe los movimientos de la extremidad superior. Basados en el modelo propuesto por Rocon y Pons [1] se inicia un trabajo de análisis para complementar el modelo de la extremidad incluyendo la mano como mecanismo de agarre de los objetos virtuales.

### 5.1 Modelo de Rocon y Pons

Rocon y Pons describen el miembro superior usando la simplificación de segmentos y grados de libertad en las articulaciones, con el fin de obtener una síntesis que con el menor número de segmentos pueda representar los movimientos naturales de la extremidad superior.

Es necesario tener en cuenta las consideraciones hechas por Pons para el estudio del brazo en donde toda la mano es considerada como un solo segmento, de esta forma la estructura que se usa para el análisis tendrá los cuatro segmentos descritos anteriormente unidos entre sí por las articulaciones de la muñeca, el codo y el hombro, quienes sujetan el miembro superior al cuerpo [3] . Teniendo en cuenta las características propias del miembro superior y las condiciones de análisis es necesario tener en consideración el trabajo de Rocon, [1], [3]:

- El comportamiento mecánico del brazo es independiente del resto de cuerpo.
- Todos los componentes de cada segmento, incluidos los huesos y las partes suaves forman parte del mismo cuerpo rígido.
- Las deformaciones de las partes suaves (músculos, piel, etc.) no afectan significativamente las propiedades mecánicas de todo el segmento.

### 5.1.1 Segmentos del MS

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas, los segmentos a tener en cuenta son (ver Figura 52) :

Segmento 1: Brazo (Húmero)

Segmento 2: Antebrazo (Cúbito y Radio)

Segmento 3: Mano (Carpó, metacarpo, Falanges)

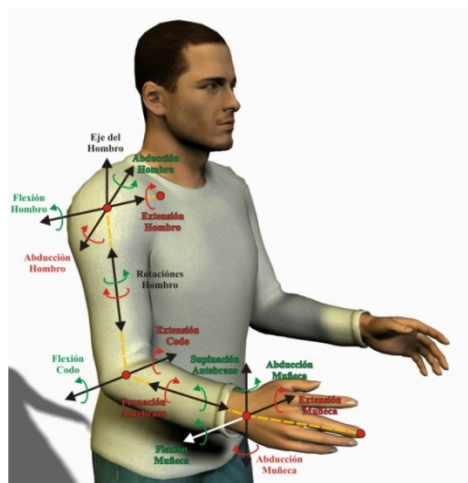


Figura 52. Movimientos del Miembro superior basado en el modelo de Rocon y Pons. [1].

Como consideró Pons en su trabajo, las alturas se consideran constantes mediante una relación numérica con la talla (altura, según percentil adecuado) y presentados en la tabla 4.

Tabla 4. Longitud de los Segmentos. [1]

LONGITUD DE LOS SEGMENTOS	
SEGMENTO	DISTANCIA
Hombro (L1)	0.094 H
Brazo (L2)	0.186 H
Antebrazo (L3)	0.146 H
Mano (L4)	0.108 H

H= Altura del cuerpo en Centímetros.

### 5.1.2 Movimientos del Miembro Superior

La descripción anatómica del movimiento humano, usada comúnmente en medicina explica el movimiento entre los huesos y el rango de movimiento de cada articulación en tres planos del cuerpo, llamados planos anatómicos. Los planos anatómicos que definen ejes perpendiculares en torno al cual se produce la rotación son (ver figura 53):

- **Plano frontal o coronal**, que se divide el cuerpo en anterior y posterior.
- **Plano transversal**, que divide el cuerpo en la parte superior e inferior.
- **Plano sagital o lateral**, que divide el cuerpo en partes derecha e izquierda.

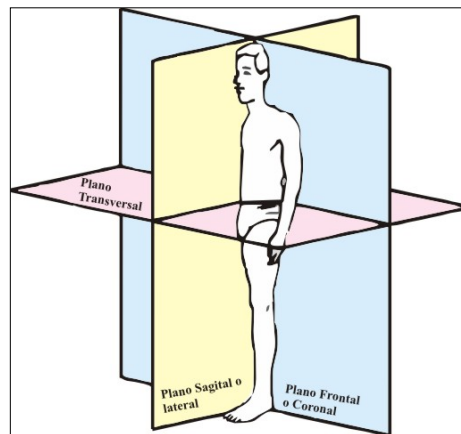


Figura 53. Planos anatómicos del cuerpo. [39]

Los movimientos presentados en el Plano Sagital son llamados Flexión y extensión:

- **Flexión:** Es un movimiento que reduce el ángulo entre los huesos o partes del cuerpo. Los movimientos de flexión se presentan en el plano sagital
- **Extensión:** Es un movimiento que aumenta el ángulo entre los huesos de la extremidad en una articulación

Los Movimientos en el plano coronal o frontal son llamados Abducción y Aducción:

- **Abducción:** Es un movimiento hacia afuera de la extremidad, fuera del plano medio del cuerpo.
- **Aducción:** Es un movimiento que lleva un miembro – brazo cerca del cuerpo en el plano sagital y se opone al movimiento de Abducción.

Otros movimientos que se presentan en el miembro superior:

- **Supinación:** Es la rotación del antebrazo para que la posición de la palma sea hacia arriba.
- **Pronación:** Es una rotación del antebrazo que la posición de la palma sea hacia abajo.

Otras descripciones de movimientos incluyen la **rotación**, ya sea interna o externa, definido como el movimiento de una articulación en torno al eje de la extremidad en un movimiento circular, y **circunducción**, que es un movimiento circular en el que se combinan la flexión, abducción, extensión y aducción en secuencia. El ejemplo más común es la articulación del hombro (articulación de rótula).

Teniendo en cuenta los segmentos y los movimientos naturales propios, ahora se describen las uniones o articulaciones de dichos elementos que nos permitirán comprender y definir los grados de libertad. Es también necesario aclarar que se han tomado todas las uniones o articulaciones como ideales [4].

### 5.1.3 Articulaciones del MS

#### Articulación del Hombro:

Es la encargada de unir la escapula y clavícula con el humero. Según Gowitzke [6] el comportamiento de esta articulación es muy similar al de una articulación esférica o enartrósica, en la que se pueden describir 3 grados de libertad y un

comportamiento multiaxial. Para esta articulación se consideran los siguientes tipos de movimientos (ver figura 54):

- **Flexión-Extensión:** es el movimiento que lleva al brazo hacia el frente o hacia atrás del plano frontal del cuerpo, el rango de movimientos va de 130° a 180° para la flexión, mientras que para la extensión va de 30° a 60°.
- **Abducción- Aducción:** es el movimiento que lleva el brazo hacia o fuera de la línea media del cuerpo, el hombro puede alcanzar 180° de abducción, pero sólo 75° de aducción.
- **Circunducción o Rotación:** es el movimiento realizado alrededor del húmero. La rotación puede ser interna con movimientos que van desde los 60° hasta los 90°, o externa donde alcanza los 75°.

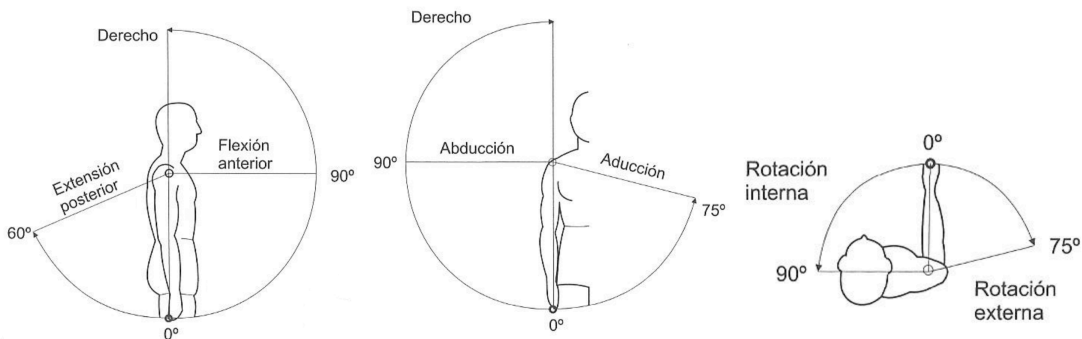


Figura 54. Movimientos del Hombro. A. Extensión-Flexión. B. Abducción-Aducción. C. Rotación. [6]

### Articulación del Codo:

Realiza la unión del Húmero con el Cúbito y Radio. Esta articulación presenta movimientos en un solo plano comportándose como una articulación Artrodia y permite movimientos de manera uniaxial.

Es necesario aclarar que el segmento de antebrazo-muñeca puede girar sobre su propio eje, generando una rotación propia del segmento y no de la articulación de codo. Dicha rotación no afecta directamente la posición de la mano pero si su

orientación, debido a esto, algunos autores como Wang prefieren trasladar dicha rotación directamente a la muñeca para simplificar los estudios cinemáticos del sistema [7]. Para esta articulación se observaron los siguientes movimientos(ver figura 55):

- **Flexión-Extensión:** es el movimiento alrededor del eje transversal que permite a la palma de la mano acercarse o alejarse del brazo, la palma puede alcanzar una inclinación de  $140^\circ$ .
- **Pronación- Supinación:** es la rotación al redor del eje del antebrazo. La pronación es el movimiento que lleva la palma de la mano para bajo de los pulgares, con una rotación de hasta  $90^\circ$ , mientras que la supinación lleva la mano para afuera, con un ángulo máximo de  $70^\circ$ .

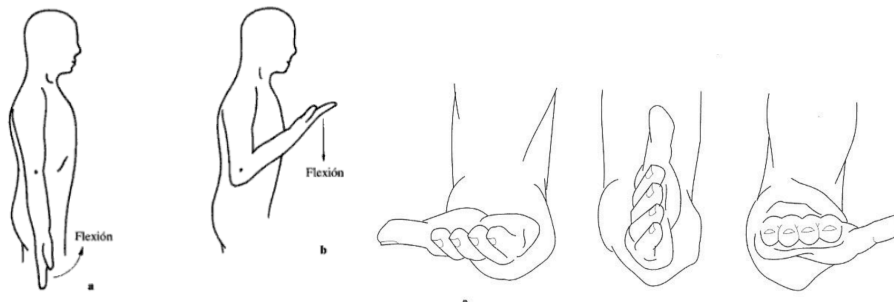


Figura 55. Movimientos del Codo.

A la Izquierda: Flexión-Extensión. Derecha: Pronación-Supinación. [6]

### Articulación de la Muñeca:

Encargada de unir el Brazo (Cúbito y Radio) con la Mano. En esta articulación se presentan 2 grados de libertad. El comportamiento de esta articulación puede ser tanto biaxial como multiaxial, los movimientos descritos por esta articulación son (ver figura 56):

- **Flexión-Extensión:** es el movimiento alrededor del eje transversal que permite a la palma de la mano acercarse o alejarse del antebrazo, la palma

puede alcanzar una inclinación de  $80^\circ$  para la flexión y  $70^\circ$  para la extensión.

- **Abducción- Aducción:** es el movimiento alrededor del eje antero-posterior que mueve la mano hasta el cúbito (abducción), o hasta el radio (aducción), los ángulos van desde los  $20^\circ$  o  $30^\circ$  para abducción y  $20^\circ$  para aducción.

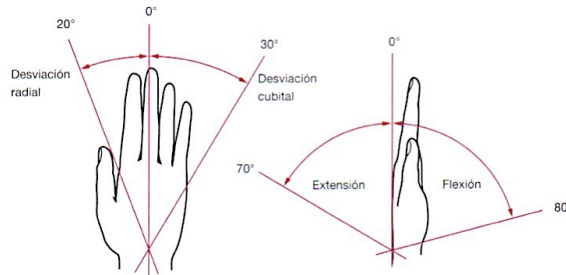


Figura 56. Movimientos de la mano.,

A la Izquierda: Abducción-aducción. A la Derecha, Flexión-Extensión. [6]

Finalmente Rocon y Pons, plantean un modelo basado en el esqueleto humano, que simplifica en tres segmentos (brazo, Antebrazo y Mano) con 7 grados de libertad (GDL) presentes en las articulaciones mencionadas, 3 GDL para el hombro, 2 GDL para el codo y 2 GDL para la mano, tal como se observa en la figura 57.

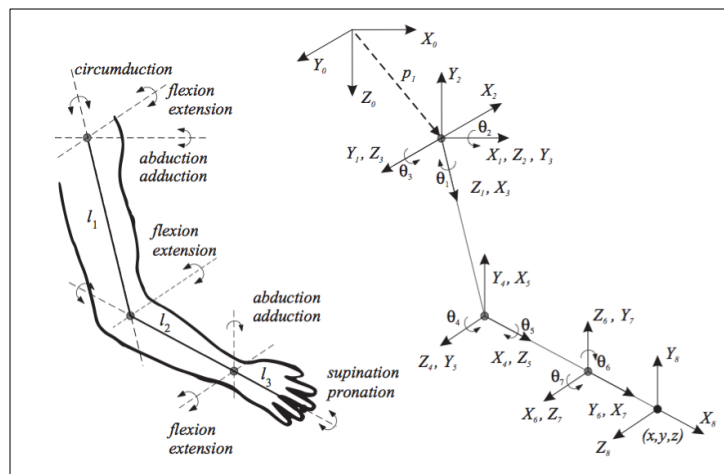


Figura 57. Modelo de Rocon y Pons. [1]

A continuación en la tabla 5, se relacionan los parámetros de Denavit y Hartenberg (DH) [2] que definen la cinemática directa para la extremidad superior.

Tabla 5. Parámetros de DH para el Modelo de Rocon y Pons. [1]

<i>Articulación</i>	<i>Bi</i>	$\theta_i$	<i>ai</i>	<i>di</i>	<i>ai</i>
Base		0	<i>ao</i>	<i>d</i>	0
				0	
Hombro	Rotación	0	0	0	$\alpha_1+90$
Hombro	abducción/aducción	-90	0	0	$\alpha_2+90$
Hombro	Flexión/extensión	+90	0	0	$\alpha_3+90$
Codo	Flexión/extensión	0	<i>L1</i>	0	$\alpha_4+90$
Codo	pronación/supinación	+90	0	<i>l2</i>	$\alpha_5+90$
Muñeca	Flexión/extensión	+90	0	<i>l3</i>	$\alpha_6+90$
Muñeca	abducción/aducción	0	<i>L4</i>	0	$\alpha_7$

## 5.2 Ampliación del Modelo

A fin de complementar el modelo estudiado anteriormente, se adaptará un modelo simplificado de la mano, que basado en el estudio de interacción, nos permita realizar los movimientos de manipulación necesarios. Basados en el modelo de Rocon y Pons podemos determinar los movimientos de la cadena cinemática del MS, desde el hombro hasta la Muñeca, sin embargo es necesario determinar también los movimientos de la mano, como instrumento de aprensión de objetos y terminal de la cadena cinemática.

Antes de iniciar, se debe considerar la recomendación de Cobos [8]. Cobos hace especial énfasis en que la incertidumbre de la posturas no es relevante para algún tipo de aplicaciones, es por esto que se usan modelos simplificados para hacer los cálculos más rápidos. Un modelo cinemático adecuado es necesario para conservar toda la información cinemática para la manipulación de objetos, este debe tener en cuenta las relaciones mas relevantes entre los dedos y restricciones necesarias dependiendo del tipo de manipulación requerido.

### 5.2.1 Trabajo relacionado

Determinar con gran precisión los movimientos de la mano es un gran problema que enfrenta la tecnología, sin embargo se han realizado amplios y satisfactorios intentos por definir dichos movimientos. A continuación mencionaremos los más sobresalientes, teniendo en cuenta que análisis realizado y en búsqueda de un modelo simplificado, que con el mínimo de articulaciones permita realizar movimientos de aprehensión.

El modelo simplificado de la mano propuesto por Walairacht et al [9], en el año 2002, para interpolar la posición con 3 marcadores ubicados en el (Metacarpofalángico) MCP, índice y pulgar respectivamente. Se asume que los movimientos del dedo índice y pulgar están sujetos a algunas constantes fijas.

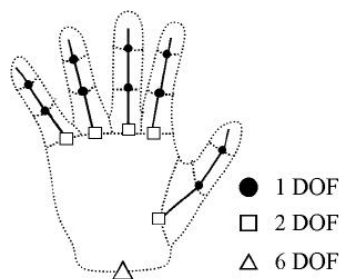


Figura 58. Modelo Simplificado de Walairacht. [9].

El autor realiza una simplificación del modelo basado en 3 criterios; Primero, los movimientos de cada articulación del dedo meñique serán los mismos del dedo anular, Segundo, existe una dependencia entre las dos articulaciones finales del dedo, provocada por usar el mismo tendón para mover el interior del dedo. Finalmente, El movimiento de la articulación que conecta el dedo y la palma de la mano del dedo medio se puede reducir a 1 GDL. Es de resaltar que para el cálculo de movimientos del pulgar, se estima una función polinomial de segundo grado que relaciona los ángulos en las articulaciones MCD y MCP. Finalmente el autor realiza una simplificación usando los criterios anteriormente señalados, presentando 17 GDL para la mano completa.

Veber y Bajd [11], realizan un modelo basado en los parámetros de Denavit-Hartenberg. Con cuatro grados de libertad para cada dedo. Dos GDL para la articulación MCP metacarpofalangeal y dos para la articulación PIP interfalangeal distal y proximal. El pulgar fue modelado con 5 GDL (2 flexión y extensión) (2 aducción y abducción del carpometacarpal) 2 de rotación y flexión y extensión de MCP y uno para la F y e del interfalangeal. La cinemática de la muñeca fue descrita con 2 GDL. En el modelo solo se tiene en cuenta el ingreso de datos en el dedo índice y medio. También se considera 5 GDL para el pulgar, hecho que eleva la complejidad del modelo conjunto de la mano. No se muestra implementación en tiempos, hecho que bajo la complejidad mencionada puede ser relevante en la solución del sistema [11].

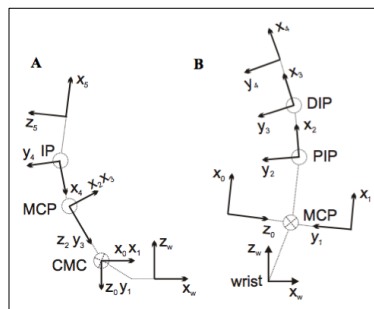


Figura 59. Modelo Simplificado de Veber y Bajd. [11]

Tabla 6. Parámetros de DH para el dedo pulgar y demás dedos, respectivamente. [11]

$\Theta$	d	a	$\alpha$	$\Theta$	d	a	$\alpha$
$\Theta_{i1}$	0	0	$\pi/2$	$\Theta_{i1}$	0	0	$-\pi/2$
$\Theta_{i2} + \tan^{-1}(PJ_{i1x}/PJ_{i1y})$	0	0	$-\pi/2$	$\Theta_{i2}$	0	$PJ_{i2}$	0
$\Theta_{i3}$	$-PJ_2$	0	$\pi/2$	$\Theta_{i3}$	0	$PJ_{i3}$	0
$\Theta_{i4} + \pi/2$	0	$PJ_3$	0	$\Theta_{i4}$	0	$PL_{i4}$	0
$\Theta_{i5} + \pi$	0	$PL_{i4}$	$\pi/2$				

Chen [12] muestra un modelo con estructura cinemática y características completas de la mano, se propone un método basado en las características de la imagen y cinemática inversa, que trae un bajo coste computacional. Para solucionar el problema de oclusión se usa un sistema de visión estero. Se complementa la forma interpretada por el sistema de visión con las restricciones de la Cinemática Inversa. Se observan varios problemas en el sistema propuesto,

uno de ellos es el problema de precisión, el sistema no puede adaptarse a diferentes usuarios. Presenta modelos similares a los anteriores, sin embargo simplifica la muñeca a solo 2 GDL y las articulaciones metacarpofalángicas a 2 GDL y le interfalángicas a 1 GDL, reduciendo a 4 GDL cada dedo.

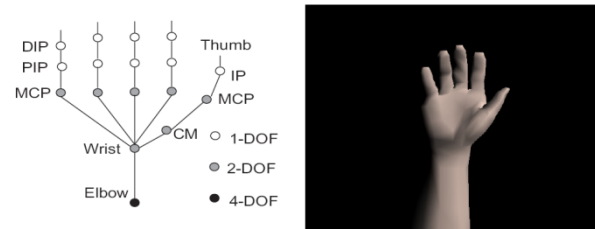


Figura 60. Modelo Simplificado de Chen, [12]

Cobos [13] presenta varios modelos. Modelos adecuados a las diferentes formas de agarre posiblemente presentadas en tareas de manipulación. Inicialmente presenta un modelo con 24 GDL con las restricciones necesarias para definir movimientos realistas. También presenta dos modelos más resultado del proceso de simplificación. Un modelo de 9 GDL para tareas de agarre circular y agarre prismático. Donde se determina el mínimo de grados de libertad necesarios para dichas tareas. Para el agarre circular se determina que el pulgar, el índice y el meñique los mas importantes en esta tarea. Para el agarre prismático se definen al menos dos GDL descritos en 2 DGL para el pulgar, 2 GDL de libertad para el índice, 1 GDL para el dedo medio y anular, 3 GDL para el meñique. Se realizaron experimentos con el fin de determinar la precisión del modelo simplificado para obtener posiciones de precisión. Dichos experimentos comparaban el error presentado comparando el modelo inicial de 24 GDL con los modelos simplificados para agarre circular prismático, presentándose un error de 5,9 % para agarre circular y 9,18 % en agarre prismático. También se concluye que el mínimo numero de GDL se determina en función de la tarea a realizar. De acuerdo con los resultados, las aplicaciones que admiten errores cercanos o superiores al 10% pueden usar modelos simplificados de 6 GDL, para aplicaciones más precisas, es decir entre 5% y 10%, deben usar modelos de 9 GDL, finalmente para

aplicaciones que acepten errores no mayores a 5%, se debe usar un modelo con al menos 20 GDL. Este trabajo se exponen las restricciones básicas entre los dedos y los ángulos de movimiento que generan las restricciones, ya que, según al autor, dichas restricciones permiten la simplificación del modelo.

Cobos sugiere que en general los modelos de 1 a 6 GDL son apropiados para agarres de fuerza con seguridad y estabilidad en el agarre sin alcanzar una gran precisión y habilidad en el manejo de agarre, sin embargo muestra resultados positivos para agarres circulares y primaticos de fuerza. Cobos también considera modelos de la mano iniciando con 1 GDL hasta 14 GDL. Particularmente se analizó el modelo de 4 GDL, que presenta 2 GDL en el metacarpo del pulgar, 1 GDL en el metacarpo y 1 GDL en el interfalángico proximal del índice, esencialmente por que es el modelo mas simplificado que permite agarres de objetos usando los dos dedos a manera de “pinza”. Dicho modelo está basado en las tareas de agarra prismático de precisión.

### **5.2.2 Modelo de la Mano**

Teniendo en cuenta los modelos presentado anteriormente y la taxonomía del agarre planteada en la sección 5.2.1, a continuación describimos el modelo de la mano planteado.

Después de analizar los modelos simplificados de la mano y observar las principales formas de agarre de precisión, se plantea el uso de el mínimo de dedos para los movimientos de agarre, debido a la complejidad que se presentaría en el modelo con un numero elevado de grados de libertad.

Dentro de los movimientos de agarre expuestos por Cutkosky [14] y revisados posteriormente por Feix [15], se observa que:

- Todos los movimientos de agarre utilizan el dedo pulgar

- Se usa un dedo de posición opuesta a la mano para realizar el agarre.
- Para los agarres de precisión se usan los dedos mas cercanos al pulgar.

Tenemos como premisa el uso de la mínima cantidad de dedos, se propone el uso de dos dedos, el Pulgar e Índice para los agarres de precisión.

De otro lado, Analizando los modelos de la mano, se observa el rango mínimo de movimientos de la siguiente manera, es decir, las articulaciones que tienen menor rango de movimiento se simplifican para dar paso a las articulaciones que permiten mayor espacio de trabajo. De esta forma tenemos que para el dedo Pulgar e índice el rango de movimiento presentado se relaciona en la tabla 7:

Tabla 7. Ángulos de Movimiento de las articulaciones. [13]

Dedo	Flexión	Extensión	abducción/ aducción
<b>Pulgar</b>			
Escafoide-Trapezio (STM)	0°	0°	0°
Trapeziometacarpal (TMC)	50° - 90°	15°	45°-60°
Metacarpofalángica (MCP)	75° - 80°	0°	0°
Interfalángica Distal (IP)	75° - 80°	5° - 10°	0°
<b>Índice</b>			
Carpometacarpal (CMC)	5°	0°	0°
Metacarpofalángica (MCP)	90°	30° - 40°	60°
Interfalángica Proximal (PIP)	110°	0°	0°
Interfalángica Distal (DIP)	80° - 90°	5°	0°

Basado en el Análisis de Componentes principales realizado por Cobos [16] dónde se analiza la prioridad de cada una de las articulaciones, tendiente a determinar modelos simplificados de la mano en movimientos de agarre prismático de precisión. En este trabajo se muestra que con una precisión del 88.4% la disminución a 4 componentes principales es completamente viable para movimientos de precisión prismática únicamente. Resultados relacionados en la tabla 5, donde se muestran los componentes principales para dos dedos.

Tabla 8. Análisis de Componentes Principales para modelos Simplificados de la Mano. [16]

<i>Dedo</i>	<i>Articulación</i>	<i>Símbolo</i>
Pulgar	Trapeziometacarpal abducción/aducción	T, TMC
Pulgar	Trapeziometacarpal Flexión/extensión	T, TMC
Índice	Metacarpofalángica Flexión/extensión	I, MCP
Índice	Proximal interfalángica Flexión/extensión	I, PIP

Se observan los movimientos según cada articulación, de las cuales la que tiene mayor movimiento en el dedo pulgar es la articulación Trapezio-Metacarpal (TMC) con movimientos de Flexión-extensión y aducción-abducción. De la misma manera en el dedo índice se presentan los mayores rangos de movimiento En las articulaciones Metacarpo falángica (MCP) e inter falángica proximal (PIP). Observando los movimientos de agarre prismático se considera que se puede simplificar el anterior juego de 4 componentes a un juego de 3, ya que se considera que la articulación I-PIP tiene un rango mínimo de movimiento durante la manipulación prismática, ver tabla 9.

Tabla 9. Simplificación de los componentes de la Mano.

<i>Dedo</i>	<i>Articulación</i>	<i>Símbolo</i>
Pulgar	Trapeziometacarpal abducción/aducción	T, TMC
Pulgar	Trapeziometacarpal Flexión/extensión	T, TMC
Índice	Metacarpofalángica Flexión/extensión	I, MCP

De esta manera se considera, que son las articulaciones predominantes en los movimientos de agarre de precisión. Cobos no tiene en cuenta para la simplificación del modelo las distancia de las dos filas de huesos escafoides, semilunar, piramidal, pisiforme, ganchoso, grande, trapecio y trapezoide; Sin embargo para unir los dos modelos se considera que dicha distancia se debe

mantener a manera de base para los dedos, ya que permite los movimientos de la mano planteados en el modelo de Rocon y Pons.

- **Segmentos**

Tomando como partida el análisis anterior, se describen 6 segmentos (ver figura 61) a usar en la mano, tal como se observan a continuación:

- Segmento 1 Pulgar: Muñeca – T-TMC
- Segmento 2 Pulgar: T-TMC – T-MCP
- Segmento 3 Pulgar: T-MCP -Yema Pulgar
- Segmento 4 Índice: Muñeca – I-CMC
- Segmento 5 Índice: I-CMC – I-MCP
- Segmento 6 Índice: I-MCP – Yema Índice.

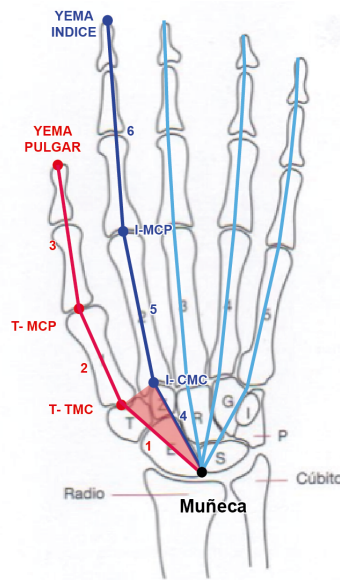


Figura 61. Segmentos y Articulaciones del Modelo Simplificado.

- **Articulaciones**

Las articulaciones de la mano se han tomado siguiendo algunas de las sugerencias de Cobos [16], sin embargo no se simplifican las distancias presentes entre la muñeca y las articulaciones T-TCM e I-CMC. También se determinan para dichas articulaciones los siguientes grados de libertad:

Dedo Pulgar T-TMC con 2 GDL: Aducción/abducción y Flexión/ Extensión

Dedo Pulgar T-MCP: Fija

Dedo Índice I-CMC fija

Dedo Índice I-MCP con 1 GDL: Flexión/Extensión

A continuación se observan los parámetros de DH para el modelo simplificado de la cinemática directa con 3 GDL de la mano.

Tabla 10. Parámetros de DH para el modelo simplificado de la mano.

Articulación	$B_i$	$\theta_i$	$a_i$	$d_i$	$\alpha_i$
Base		0	$a_0$	$d_0$	0
Muñeca-Pulgar	abducción/aducción	$\theta/2$	0	0	$\alpha/2+\alpha_1$
	flexión/extensión	$\theta/2$	$d_3$	0	$\alpha/2+\alpha_1+\alpha_2$
Muñeca-Índice	abducción/aducción	$\theta/2$	0	0	$\alpha/2+\alpha_1$
	flexión/extensión	$\theta/2$	$d_3$	0	$\alpha/2+\alpha_2+\alpha_2$
Pulgar TCM	flexión/extensión	$\theta+\theta_3$	0	0	$\alpha/2$
	abducción/aducción	$\theta$	$d_4$	0	$-\alpha/2+\alpha_4$
Pulgar MCP	Fija	0	$d_5$	0	$\alpha_5$
Índice CMC	Fija	0	$D_5$	0	$-\alpha/18$
Índice MCP	abducción/aducción	$-\theta/2$	$D_8$	0	$\alpha_6$

Las ecuaciones 33 a 39, son correspondientes a cada uno de los segmentos con las rotaciones necesarios para el movimiento.

$$Link\ 1 = Rz_0^1 * Rx_0^1 * Rz_0^1 * Rz_1^2 * Rx_1^2 * Rz_1^2 * Dx_1^2 \quad (33)$$

$$Link\ 2 = Rz_2^3 * Rx_2^3 * Rx_2^3 * Rx_3^4 * Rz_3^4 * Rz_3^4 * Dx_3^4 \quad (34)$$

$$Link\ 3 = Rz_4^5 * Dx_4^5 \quad (35)$$

$$Link\ 4 = Rz_5^6 * Rx_5^6 * Rz_5^6 * Rz_6^7 * Rx_6^7 * Rz_6^7 * Dx_6^7 \quad (36)$$

$$Link\ 5 = Rz_7^8 * Dx_7^8 \quad (37)$$

$$Link\ 6 = Rx_8^9 * Rz_8^9 * Dx_8^9 \quad (38)$$

$$T = Link1 * Link2 * Link3 * Link4 * Link5 * Link6 \quad (39)$$

### 5.3 Modelo Complementado

Basados en el modelo del miembro superior de Rocon y Pons y las simplificaciones de los modelos de la mano analizadas, se presenta un modelo complementado para toda la extremidad superior, que permite el agarre de precisión prismático tipo pinza, usando dos dedos, Índice y pulgar. Dicho modelo presenta 10 GDL creando cadenas cinemáticas desde el hombro hasta las yemas de los dedos mencionados anteriormente.

El modelo complementado esta compuesto por 8 Segmentos, iniciando en el hombro y terminando en las yemas de los dedos pulgar e índice, a continuación se describen los segmentos:

- Segmento 1: Brazo (Húmero)
- Segmento 2: Antebrazo (Cúbito y Radio)
- Segmento 3 Pulgar: Muñeca – T-TMC
- Segmento 4 Pulgar: T-TMC – T- MCP
- Segmento 5 Pulgar: T-MCP – Yema dedo Pulgar.
- Segmento 6 Índice: Muñeca – CMC
- Segmento 7 Índice: CMC – MCP
- Segmento 8 Índice: MCP – Yema dedo Índice.

En el modelo también se observan las siguientes articulaciones que definen el movimiento para cada segmento:

Tabla 11. Articulaciones y movimientos por articulación del Modelo ampliado.

Articulación	Movimientos	GDL
Hombro	Flexión-Extensión Abducción-Adducción Circundicción	3
Codo	Flexión-Extensión Pronación-Supinación	2
Muñeca	Flexión-Extensión Abducción-Adducción	2
Dedo Pulgar T-TMC	Flexión-Extensión Abducción-Adducción	2
Dedo Pulgar T-MCP	Abducción-Adducción	FIJA
Dedo Índice I-CMC		FIJA
Dedo Índice I-MCP	Abducción-Adducción	1

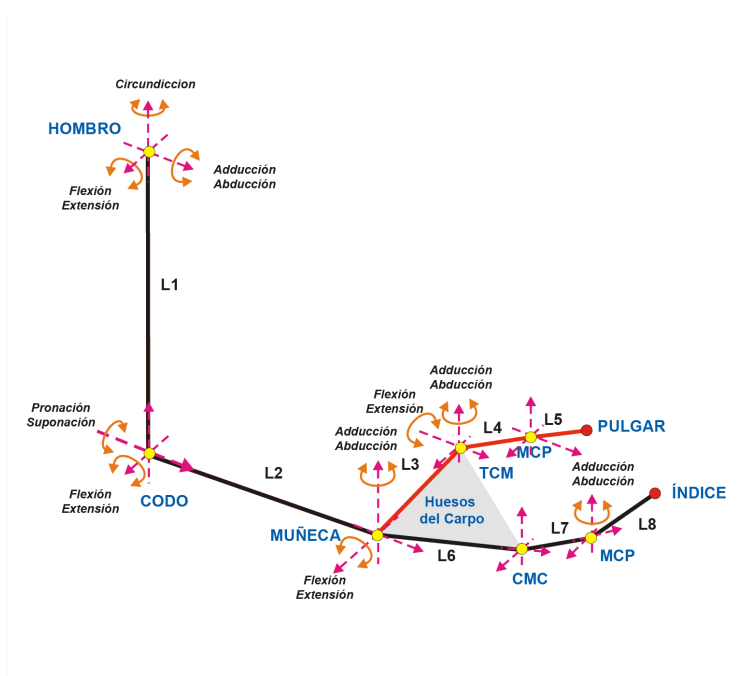


Figura 62. Modelo Complementado de 10 GDL.

### 5.3.1 Cinemática Directa

Tabla 12. Parámetros de DH para el modelo complementado del MS.

Articulación	$B_i$	$\theta_i$	$a_i$	$d_i$	$\alpha_i$
Base		0	$a_0$	$d$	0
Hombro	Rotación	$\pi$	0	0	$\pi/2 + \alpha_1$
Hombro	abducción/aducción	$-\pi$	0	0	$\pi/2 + \alpha_2$
Hombro	Flexión/extensión	$\pi$	$d_1$	0	$-\pi/2 + \alpha_3$
Codo	Flexión/extensión	0	0	0	$\pi/2 + \alpha_4$
Codo	Pronación/supinación	$\theta/2$	0	$d_2$	$\pi/2 + \alpha_5$
Muñeca	Flexión/extensión	$\theta/2$	0	0	$\pi/2 + \alpha_6$
Muñeca	abducción/aducción	$\theta/2$	$d_3$	0	$\pi/2 + \alpha_7$
Pulgar TCM	Flexión/extensión	$\theta + \theta_8$	0	0	$\alpha/2$
Pulgar TCM	abducción/aducción	$\theta$	$d_4$	0	$-\pi/2 + \alpha_9$
Pulgar MCP	Fija	0	$d_5$	0	$\alpha_{10}$
Índice CMC	Fija	0	$d_7$	0	$-\alpha/18$
Índice MCP	Flexión/extensión	$-\theta/2$	$d_8$	0	$\alpha_{11}$

La cinemática directa del modelo ampliado se encuentra descrita por las ecuaciones (40 a 48):

$$Link\ 1 = Rz_0^1 * Rx_0^1 * Rz_0^1 * Rz_1^2 * Rx_1^2 * Rz_1^2 * Rz_2^3 * Rx_2^3 * Rz_2^3 * Dx_2^3 \quad (40)$$

$$Link\ 2 = Rz_3^4 * Rz_3^4 * Rz_4^5 * Rx_4^5 * Rz_4^5 * Dz_4^5 \quad (41)$$

$$Link\ 3 = Rz_5^6 * Rx_5^6 * Rz_5^6 * Rz_6^7 * Rx_6^7 * Rz_6^7 * Dx_6^7 \quad (42)$$

$$Link\ 4 = Rz_7^8 * Rx_7^8 * Rx_7^8 * Rx_8^9 * Rz_8^9 * Rz_8^9 * Dx_8^9 \quad (43)$$

$$Link\ 5 = Rz_9^{10} * Dx_9^{10} \quad (44)$$

$$Link\ 6 = Rz_{10}^{11} * Rx_{10}^{11} * Rz_{10}^{11} * Rz_{11}^{12} * Rx_{11}^{12} * Rz_{11}^{12} * Dx_{11}^{12} \quad (45)$$

$$Link\ 7 = Rz_{11}^{12} * Dx_{11}^{12} \quad (46)$$

$$Link\ 8 = Rx_{12}^{13} * Rz_{12}^{13} * Dx_{12}^{13} \quad (47)$$

$$T = Link1 * Link2 * Link3 * Link4 * Link5 * Link6 * Link7 * Link8 \quad (48)$$

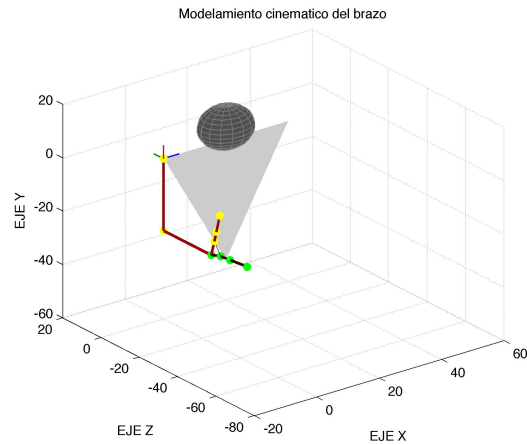


Figura 63. Grafica del Modelo Complementado de 10 GDL. Posición Inicial.

### 5.3.2 Modelo inverso

El problema cinemático inverso se define como la determinación de la posición y orientación de cada articulación de la cadena cinemática necesarias para alcanzar un objetivo en el espacio. Existen diversos métodos para la solución del problema cinemático inverso, dichas soluciones se presentan de manera analítica, cuando el sistema a solucionar presenta como máximo 6 GDL. Cuando el sistema a solucionar supera esta restricción el numero soluciones posibles tienden a infinito ( $\infty$ ) [17] lo que lleva a buscar soluciones de tipo numérico.

Varios modelos se han implementado para resolver el problema Cinemático inverso. Zhao y Blander [53] plantea la solución como la búsqueda de un mínimo local en un conjunto de ecuaciones no lineales, que definen las restricciones espaciales en coordenadas cartesianas.

Los métodos numéricos más populares usan se enfocan en el uso de la matriz Jacobiana para encontrar una aproximación lineal de la solución del problema. Varias metodologías se han presentado para abordar este problema, como el uso

de la Jacobiana transpuesta, El mínimo Cuadrado Atenuado (DLS), el mínimo cuadrado atenuado con descomposición de valor singular (SVD-DLS), mínimo Cuadrado Atenuado Selectivo (SDLS)[54,55,56,57,58].

Otro tipo de soluciones se presenta con el uso del método de Newton, algunos de los más conocidos es el método de Broyden's, el método de Powell's, y el método de Broyden, Fletcher, Goldfarb y Shanno [59]. Sin embargo estos métodos son complejos, difíciles de implementar y tienen un alto costo computacional en cada iteración. Otro método bastante popular es el conocido como CCD (Coordenadas Cíclicas de Descenso). CCD es un método heurístico e iterativo con bajo costo computacional por cada iteración, puede solucionar el problema cinemático inverso sin el uso de manipulación de matrices, en tiempo bastante bajo. Sin embargo tiene algunas desventajas como los movimientos poco realistas, incluso con restricciones aplicadas, está diseñado para manejar cadenas de serie, lo que impide el uso de más de una cadena.

Anteriormente se han descrito algunos de los métodos más populares para abordar este problema, Aristidou y Lasenby [71] evalúan ampliamente dichos métodos para solucionar el problema en cadenas cinemáticas de 10 GDL, teniendo en cuenta el costo computaciones, fiabilidad, tiempo de solución y la naturalidad de la misma, es decir, si la posición estimada corresponde a una posición natural del miembro superior. El resultado del trabajo de Aristidou y Lasenby, es la presentación de un algoritmo heurístico denominado FABRIK que presenta la solución de la IK en pocas iteraciones, a bajo costo computacional y en tiempos cercanos a tiempo real. FABRIK permite el uso de múltiples efectadores o puntos finales de la cadena cinemática, requerimiento necesario para la solución de nuestro sistema.

La implementación se realizó utilizando la herramienta computacional Matlab®. El flujo de datos que alimenta el algoritmo de FABRIK se obtiene del rastreo monocular realizado anteriormente, dedo índice, dedo pulgar y hombro, de los

cuales se obtuvo la posición en x, y e z. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la reconstrucción del miembro superior con 10 GDL.

FABRIK presenta dos escenarios para la solución del problema (ver Algoritmo 1). Un escenario Forward o Directo y un escenario Backward o Inverso. El método propuesto inicia desde la última articulación de la cadena o posición inicial y trabaja de manera forward o directa, ajustando cada articulación a lo largo del camino. Posteriormente, se trabaja hacia atrás (Backward) de la misma manera, con el fin de completar una iteración.

#### Algoritmo 1: Una iteración Completa de FABRIK.

**Input:** La posición de la articulación  $p_i$  para  $i = 1, \dots, n$ , la posición objetivo  $t$  y las distancias entre cada articulación  $d_i = |p_{i+1} - p_i|$  para  $i = 1, \dots, n - 1$ .  
**Output:** La nueva posición de la articulación  $p_i$  para  $i = 1, \dots, n$ .

```

1.1 % La Distancia entre la Raiz y el objetivo
1.2  $dist = |p_1 - t|$ 
1.3 % Compruebe si el objetivo está al alcance
1.4 if  $dist > d_1 + d_2 + \dots + d_{n-1}$  then
1.5     % El objetivo es inalcanzable
1.6     for  $i = 1, \dots, n - 1$  do
1.7         % Encuentre la distancia  $r_i$  entre el objetivo  $t$  y la posición de la articulación  $p_i$ 
1.8          $r_i = |t - p_i|$ 
1.9          $\lambda_i = d_i/r_i$ 
1.10        % Encuentre la nueva posición de la articulación  $p_i$ .
1.11         $p_{i+1} = (1 - \lambda_i) p_i + \lambda_i t$ 
1.12    end
1.13 else
1.14     % El objetivo es inalcanzable; entonces, fije  $b$  como la posición inicial de la articulación  $p_1$ 
1.15      $b = p_1$ 
1.16     % Compruebe si la distancia entre el efector  $p_n$  y el objetivo  $t$  es mayor que una tolerancia.
1.17      $dif_A = |p_n - t|$ 
1.18     while  $dif_A > tol$  do
1.19         % ESTADO 1: ALCANCE DIRECTO
1.20         % Fije el efector final  $p_n$  como objetivo  $t$ 
1.21          $p_n = t$ 
1.22         for  $i = n - 1, \dots, 1$  do
1.23             % Encuentre la distancia  $r_i$  entre la nueva posición de la articulación  $p_{i+1}$  y la articulación  $p_i$ 
1.24              $r_i = |p_{i+1} - p_i|$ 
1.25              $\lambda_i = d_i/r_i$ 
1.26             % Encuentre la nueva posición de la articulación  $p_i$ .
1.27              $p_i = (1 - \lambda_i) p_{i+1} + \lambda_i p_i$ 
1.28         end
1.29         % ESTADO 2: ALCANCE INVERSO
1.30         % Fije la raíz  $p_1$  es la posición inicial
1.31          $p_1 = b$ 

```

```

1.32      for i = 1, ..., n - 1 do
1.33          % Encuentre la distancia ri entre la nueva posición de la articulación pi y la articulación pi+1
1.34          ri = |pi+1 - pi|
1.35          λi = di/ri
1.36          % Encuentre la nueva posición de la articulación pi.
1.37          pi+1 = (1 - λi) pi + λipi+1
1.38      end
1.39      difA = |pn - t|
1.40  end
1.41  end

```

### 5.3.2.1 Escenario Backward

Consiste en la reubicación de las uniones del brazo, de manera ordenada, empezando desde sus extremos (índice y pulgar), hasta llegar a su raíz (hombro), conservando las longitudes de cada segmento. La Figura 64a. muestra la posición inicial del brazo y la nueva ubicación de sus objetivos.

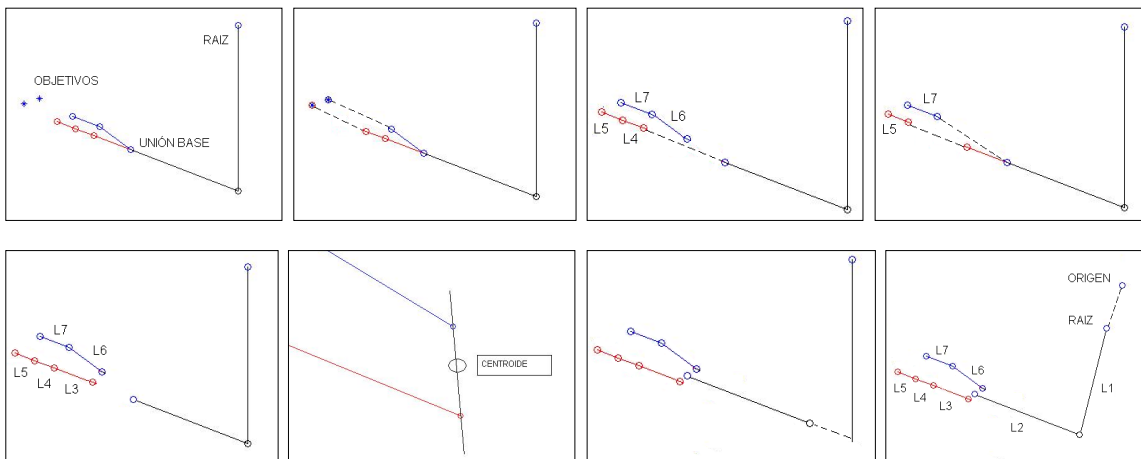


Figura 64. Una iteración de FABRIK en el escenario Backward para la solución del modelo de 10 GDL.

El proceso de reubicación de las articulaciones, empieza llevando los puntos finales a sus respectivos objetivos, como puede apreciarse en la Figura 64b. Una vez llevados los puntos finales del brazo, a los objetivos, se procede a mover las siguientes uniones, a través de la línea a trazos, conservando las distancias L5 y

L7, el resultado es el mostrado en la Figura 64c. Las figuras 64d y 64e ilustran, la forma en como se repite este proceso, hasta llegar a la unión base, punto en el cual se derivan las cadenas finales. Hasta este punto del procedimiento, las dos cadenas derivadas han quedado separadas de la unión, como puede verse en la Figura 64e; por lo tanto, el punto de unión debe ubicarse en el centroide formado por las raíces de estas dos cadenas. El punto señalado como centroide en la Figura 64f, es el punto en donde quedará ubicada la unión correspondiente a L2, L3 y L6. Para finalizar el escenario backward, se sigue el proceso de reacomodación de las uniones de correspondientes a L1 y L2, ver Figura 64g, quedando la raíz de la cadena desprendida de su punto de inicial, como puede verse en la Figura 64h.

#### 5.3.2.2 Escenario Forward

En este escenario se reacomodan las uniones, partiendo de la raíz hasta los puntos finales, de esta manera se reubica la raíz de la cadena (hombro), en su punto inicial, dando como resultado la configuración mostrada en la Figura 65. Seguidamente se repite el proceso de reacomodación de uniones, hasta llegar a la unión base, esto puede apreciarse en la Figura 65a. En las figuras 65b y 65c, se muestra la forma en la cual, los puntos iniciales o raíces de las cadenas derivadas, son llevadas a la unión base, es decir; se unen los segmentos L2, L3 y L6. De aquí se repite el proceso a través de las dos cadenas, hasta reacomodar los puntos finales del brazo, y de esta manera, nuevamente habrá una separación entre los puntos finales y los objetivos, como puede verse en la Figura 65d. Hasta esta instancia, se ha completado una iteración, este proceso debe repetirse hasta que exista una distancia aceptable entre los puntos finales de la cadena y los objetivos.

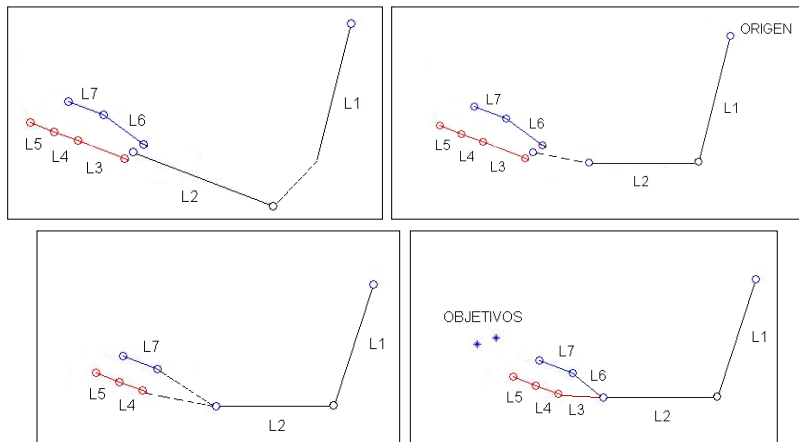


Figura 65. Una iteración de FABRIK en el escenario Forward para la solución del modelo de 10 GDL.

### 5.3.2.3 Múltiples Efectuadores finales

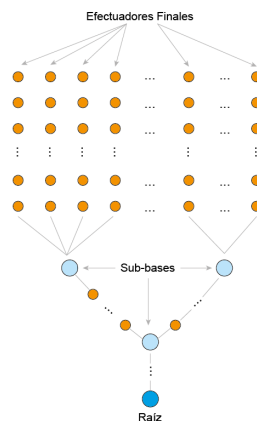


Figura 66. Modelo se múltiples efectadores finales y múltiples sub-bases.

El algoritmo de FABRIK [72] puede ser fácilmente extendido para resolver modelos con múltiples efectadores en el extremo. Sin embargo es necesario el conocimiento previo del modelo, las articulaciones sub base y en general a estructura de las cadenas a resolver.

Cuando se presenta un único efectuator final se presentan las dos etapas (backward, y forward). En la primera etapa, el algoritmo se aplica normalmente, en este caso, iniciando en el efectuator final inversamente hasta el padre sub-base. Esto producirá muchas posiciones diferentes de la sub-base, tantas posiciones como efectadores finales este conectados a dicha sub base. La nueva posición de la sub-base será el centroide de todas esas posiciones. A continuación, se aplica el algoritmo normalmente iniciando en la sub-base hasta la raíz. Si hay más sub-bases entre la anterior sub-base y la raíz, se debe aplicar la misma técnica. En la segunda etapa, el algoritmo se aplica normalmente iniciando ahora en la raíz y moviendo las articulaciones hacia la sub-base. Posteriormente el algoritmo debe ser aplicado de manera individual a cada cadena hasta el efectuator final de la misma. El método se repite hasta que todos los efectadores alcancen sus objetivos o no existe un cambio significativo entre su posición anterior y la nueva posición.

#### 5.3.2.4 Aplicación de Restricciones angulares

El modelo presentado en la sección anterior, debe cumplir con un conjunto de restricciones angulares en las articulaciones, dado que es necesario reproducir sus movimientos forma natural. Dichas restricciones se basan en la amplitud de los movimientos permitidos para cada articulación mostrados en la sección 5.1.3.

Según FABRIK, las restricciones planteadas se clasifican en restricciones rotacionales y traslacionales. La rotación de un segmento es descrito por una descomposición de dos operaciones: Una rotación simple, denominada *Rotacional*, que mueve el segmento al vector de dirección final, y ora llamada *Orientacional*, que representa el giro alrededor de este vector final. El objetivo es el re-posicionamiento y re-orientación del objetivo dentro de los limites del intervalo permitido, asegurando que estas restricciones sean siempre cumplidas con la posición mas factible.

FABRIK plantea la aplicación de las restricciones usando la descomposición en espacio de cuadrantes espaciales, basado en GA (Geometric Algebra), mediante la definición de un cono geométrico con las posibles soluciones que cumplen con las restricciones (ver figura 67). Sin embargo se considero mas práctico y sencillo la aplicación de las restricciones por cuadrantes y descomposición cartesiana, debido a la reducción de la cantidad de soluciones posibles.

Dichas restricciones, deben ser aplicadas durante los escenarios forward y backward, para lograr que el algoritmo sea lo más efectivo posible, y el resultado sea una posición natural del miembro superior, por lo tanto deben aplicarse en cada iteración. Para la aplicación de dichas restricciones, FABRIK implementa dos algoritmos (ver algoritmo 2 y 3).

#### Algoritmo 2. Restricciones Orientacionales

**Input:** El rotor **R** representa la rotación entre las articulaciones  $p_i$  y  $p_{i-1}$ .  
**Output:** La Articulación reorientada  $p'_{i-1}$

- 2.1 Compruebe si el rotor **R** está dentro de los límites de movimiento
- 2.2 **if** dentro de los límites **then**
- 2.3 **do** nada y **exit**
- 2.4 **else**
- 2.5 reoriente la articulación  $p_{i-1}$  de tal manera que el rotor **R** esté dentro de los límites
- 2.6 **end**

#### Algoritmo 3. Restricciones Rotacionales

**Input** La posición del objetivo **t** y los ángulos definidos por las restricciones de rotación.  $\theta_j$  for  $j = 1, \dots, 4$ .  
**Output:** la nueva posición del objetivo **t'**.

- 3.1 Encuentre la ecuación de la recta **L1**
- 3.2 Encuentre la proyección **O** de el objetivo **t** sobre la línea **L1**
- 3.3 Encuentre la distancia entre el punto **O** y la posición de la articulación
- 3.4 ubique el objetivo (rote y traslade) de tal forma que **O** se encuentre ubicado en el origen de coordenadas y se oriente de acuerdo los ejes x e y » Ahora se ha simplificado a un problema de dos dimensiones
- 3.5 Encuentre a cuál cuadrante pertenece el objetivo
- 3.6 Encuentre cuál sección cónica describe el rango permitido de movimiento.
- 3.7 Encuentre la sección cónica asociada con dicho cuadrante usando las distancias  $q_j = \text{Stan}\theta_j$ , donde  $j = 1, \dots, 4$
- 3.8 % Compruebe si el objetivo está dentro de la sección cónica o no.
- 3.9 **if** dentro de la sección cónica **then**
- 3.10 use la posición real del objetivo **t**

- 3.11 **else**
- 3.12 Encuentre el punto mas cercano al objetivo en dicha sección cónica
- 3.13 Ubique (rote y traslade) el punto de la sección cónica inversa a través de 3.4 y use ese punto como nueva posición del objetivo.
- 3.14 **end**

El proceso se aplica de manera independiente para cada articulación como se ilustra en la Figura 67a. Para explicar este proceso, suponga una cadena con uniones A y B, raíz O y punto final C, el cual debe alcanzar el punto T.

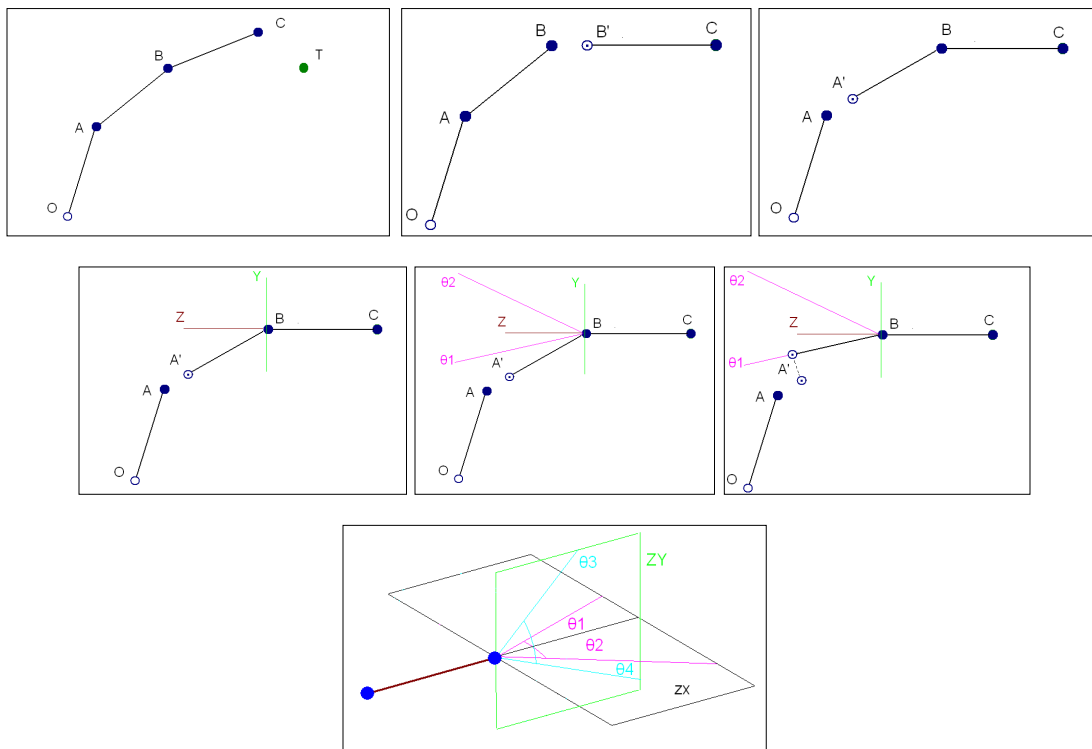


Figura 67. Aplicación de las restricciones angulares.

En la Figura 67b, el punto C ha llegado a la posición T, y como se explicó en la sección anterior el segmento  $CB'$  debe conservar la longitud inicial, que tenía la cadena, por lo tanto el punto B deberá desplazarse hacia el punto  $B'$ , como se muestra en la Figura 67c. Para aplicar las restricciones del segmento BA, es necesario trasladar y rotar el sistema de coordenadas, de modo que su origen coincida con el punto B, y su eje z positivo sea este en la dirección del segmento

BC, el resultado se vera como el de la Figura 67d. Es menester aclarar que la cadena de la Figura 67d se encuentra dentro del plano  $X=0$ , por lo tanto al realizar la traslación y rotación del sistema de coordenadas, no es posible apreciar, cambio alguno con respecto al eje X, no obstante, el lector, deberá tener presente que el eje x positivo apunta hacia afuera de esta hoja.

Luego de cambiar de coordenadas, se trazan los límites de movimiento del punto  $A'$ , los cuales dependen de los ángulos máximos, hasta donde podría girar el segmento BC, con respecto al eje Z. Estos límites se describen en la Figura 67e. También puede apreciarse con claridad que el punto  $A'$ , está por fuera de los límites, permisibles de movimiento, por lo tanto, debe corregirse, llevándolo al punto más cercano que esté en dicha región, como puede verse en la Figura 67f. Este proceso debe repetirse, para cada unión en cada iteración. Las regiones de movimiento permisibles, están definidas por 4 ángulos, que corresponden a los planos YZ y XZ, esta región se ilustra en la Figura 67g.

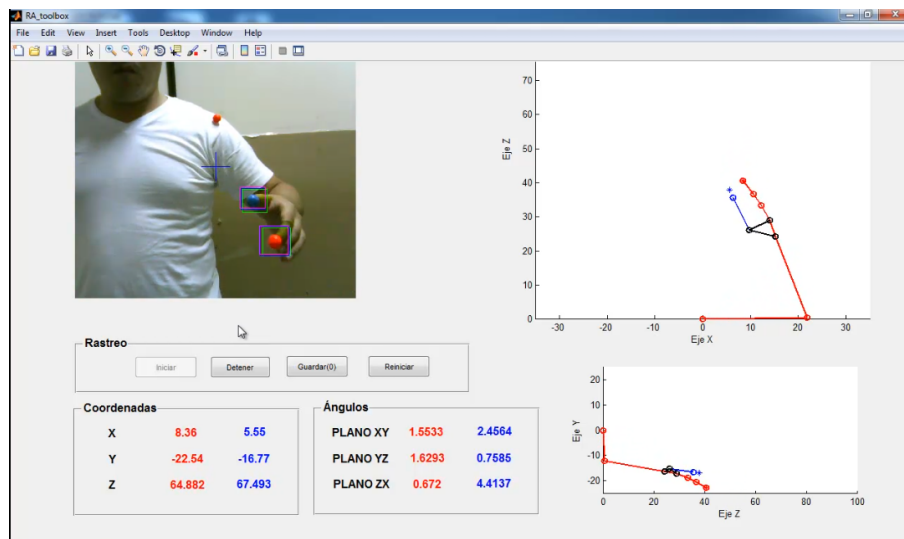


Figura 68. Captura de la Aplicación desarrollada en Matlab para solucionar el modelo Inverso.

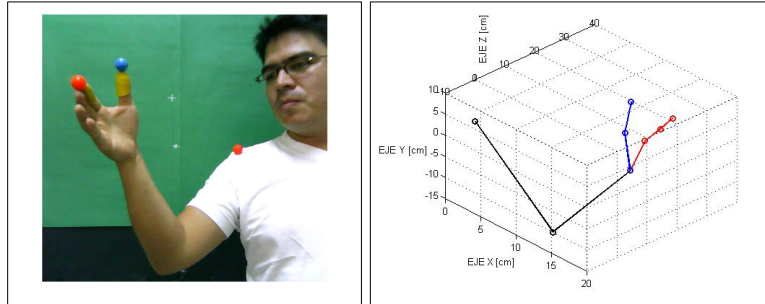


Figura 69. Resolución de modelo Inverso. Imagen capturada de por la webcam del sistema (izquierda). Modelo en 3D brazo (derecha).

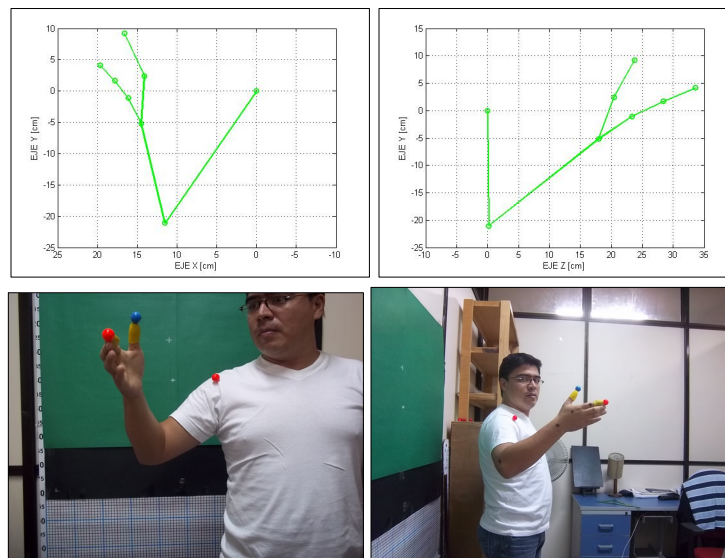


Figura 70. Resolución de modelo Inverso. Modelo en el plano XY e XZ (izq), Imágenes de la posición del brazo (der).

### 5.3.2.5 Singularidades de la cadenas

Una de las ventajas de FABRIK, a diferencia de los métodos anteriormente descritos, es la baja presencia de singularidades, también, retorna movimientos suaves en tiempos de resolución bastante bajos, debido al enfoque centrado en Algebra Geométrica. Salvo el caso en el que la cadena asume una posición en la cuál los segmentos se encuentran completamente alineados y el objetivos está justo al frente. En este caso, la cadena se desplaza hasta la raíz, pero permanecería recta después de la etapa de calculo cinemático directo (forward).

Posteriormente en la otra etapa (backward), la cadena es devuelta a su lugar original, entrando de esta manera en un bucle infinito. Sin embargo este problema se presenta en raras ocasiones y puede ser fácilmente manejado permitiéndole a la cadena rotar un ángulo muy pequeño dentro de las restricciones de movimiento (reposicionando el objetivo durante el primer estado inverso y luego retornando a su ubicación inicial).

#### 5.3.2.6 Tiempo de resolución del algoritmo

Para la aplicación visualizada es importante mantener el tiempo de resolución al mínimo. Los tiempos de resolución del modelo inverso presentados son bastante bajos y en poco número de iteraciones, teniendo en cuenta el uso de una cadena cinemática ramificada, 10 GDL para el modelo propuesto y la obtención de posiciones naturales del miembro superior. El algoritmo presentado por Aristidou arroja resultados favorables en tiempo de resolución y costo computacional, convirtiéndose en una alternativa atractiva para la resolución numérica de problemas de este tipo, esto se observa en la tabla 13.

Tabla 13. Tiempos promedio en la resolución del algoritmo.

<b><i>Resolución</i></b>	<b><i>Tiempo</i></b>	<b><i>No. Iteraciones Solución</i></b>
Objetivo Alcanzado	0,015625 s.	16
Objetivo no Alcanzado	0,082344 s.	95

#### 5.4 Evaluación del Modelo

A fin de determinar el comportamiento del modelo planteado y de la solución obtenida de la cinemática inversa. el modelo complementado fue evaluado comparativamente por medio de fotogrametría bidimensional, mediante triangulación estéreo. Se realizó una toma de pares fotográficos y paralelamente se tomaron los datos arrojados por la estimación presentada por el algoritmo de FABRIK. A continuación se describe el proceso que se llevo a cabo.

## **5.4.1 Fotogrametría Bidimensional – Triangulación Estéreo**

### **5.4.1.1 Descripción de la Técnica**

La triangulación estéreo nos permite realizar mediciones de la posición en tres dimensiones de objetos, mediante el uso de un par estéreo de imágenes de la escena, buscando la correspondencia entre los puntos comunes en las imágenes. Este proceso se puede llevar a cabo únicamente si se conoce la posición relativa entre cámaras y la orientación de las mismas. Para realizar esta evaluación se desarrolló una aplicación en Matlab, para solucionar la correspondencia de los puntos presentes en el par estéreo, obteniendo así mismo las coordenadas de cada punto en 3D.

### **5.4.1.2 Descripción de los equipos**

Para llevar a cabo esta evaluación, se utilizaron dos cámaras Kodak Kodak Easy Share M530 dispuestas sobre trípodes de fotografía. También se usaron marcadores esféricos de diámetro 2 cm ubicados en las articulaciones del miembro superior.

### **5.4.1.3 Descripción del Método**

Para poder aplicar la triangulación se tomó un par de fotografías para cada posición del miembro superior, proceso que se repitió con 20 tomas. Paralelamente se realizó la estimación de la posición del brazo obtenida mediante la solución del algoritmo de FABRIK del modelo planteado. Mediante una aplicación diseñada para Matlab, se tomó el par estéreo y se obtuvo la posición de cada articulación representada en la imagen con un marcador esférico, dichos datos fueron comparados con la estimación obtenida de FABRIK.

## **5.4.2 Protocolo de toma de datos**

Los datos se tomaron siguiendo el protocolo diseñado por Villalba [61], usando en el análisis de movimientos del miembro superior.

### 5.4.2.1 Set de Marcadores

Para el tipo de prueba a realizar se usó un set de siete (7) marcadores esféricos, con un diámetro de 2 [cm], ubicados en zonas anatómicamente cercadas al centro de rotación de la articulación. En la tabla 11, se describe el nombre completo de cada marcador, así como su correcta posición. Este conjunto de marcadores ha sido usados en los centros de rotación articular del miembro superior ubicados en las referencias anatómicas identificables según Norton [38]. Las referencias anatómicas son puntos esqueléticos identificables que actúan como marcadores en la ubicación exacta del sitio de medición, ver figura 71. Todas las marcas se localizan a través del tacto.

Tabla 14. Set de marcadores usados en el MS.

<i>Nombre marcador</i>	<i>Punto Antropométrico Miembro Superior</i>
1. Base	Punto Acromial (Hombro)
2. Codo	Punto Radial
3. Muñeca	Stylian
4. Pulgar	Falángico
5. Yema Pulgar	Dactileo Pulgar
6. Índice	Metarcapiano Radial
7. Yema Índice	Dactileo Índice

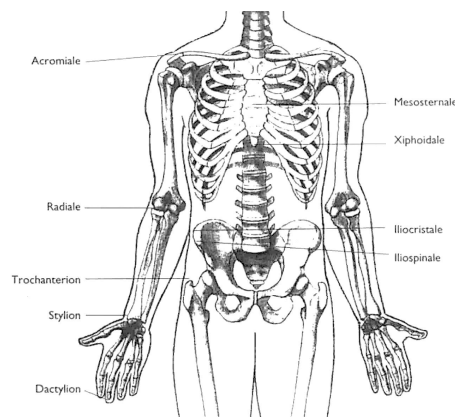


Figura 71. Puntos o marcas anatómicas de referencia. [38]

#### 5.4.2.2 Posición de usuario y cámaras. (fotogrametría y web)

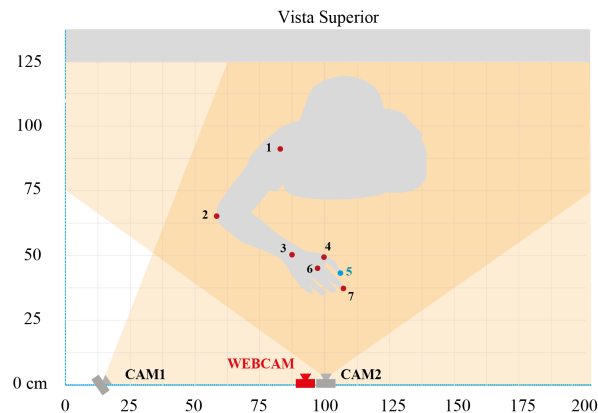


Figura 72. Vista Superior del Área de trabajo, posición de las cámaras y del usuario.

Para realizar la toma de datos el usuario debe estar de pie frente a la cámara web. Ubicado a una distancia máxima de 100 cm. Las cámaras fotografías se ubican tal como se observa en la figura 72. Así mismo es necesario tomar las dimensiones existentes entre los puntos antropométricos del miembro superior del usuario. Todas las pruebas se realizaron con el mismo usuario.

#### 5.4.2.3 Calibración de las cámaras

Debido a la necesidad de tomar imágenes sin distorsión, se realiza el proceso de calibración para el par estéreo, basado en el algoritmo de Bougueti [48], de esta manera se obtuvieron los parámetros de calibración para cada cámara y para el par correspondiente.

#### 5.4.2.4 Toma de Datos

Para la realización de la toma de datos se siguió el siguiente procedimiento:

- Prueba de Alcance y Posición
- Prueba de movimiento del brazo

El usuario debe colocar su brazo en una posición determinada, es decir, desde una posición inicial indicada se debe alcanzar la posición de los marcadores indicada en la pantalla. A continuación se describe el procedimiento:

- i. Preparación del sistema
- ii. Posición del usuario
- iii. Localizar el brazo en la posición inicial
- iv. Realizar el Movimiento a la posición indicada
- v. Captura de los datos estimados (webcam)
- vi. Toma de las fotografías para la triangulación.

#### 5.4.2.5 Corrección de los datos

Antes de poder realizar la comparación de los resultados se debe tener en consideración la posición superficial de los marcadores usados en la fotogrametría, debido a que existe una diferencia dimensional presente en comparación con el modelo estimado, dicha diferencia radica en el volumen muscular inexistente para el modelo planteado debido a su origen esquelético. Dicha corrección afecta la posición de las articulaciones y de igual manera a la posición del miembro superior en general. Teniendo en cuenta el trabajo de Schmidt [60], donde se relacionan las distancias entre marcadores superficiales y un modelo esquelético, se planteó la corrección de la posición de cada marcador, tal como se muestra en la figura 73.

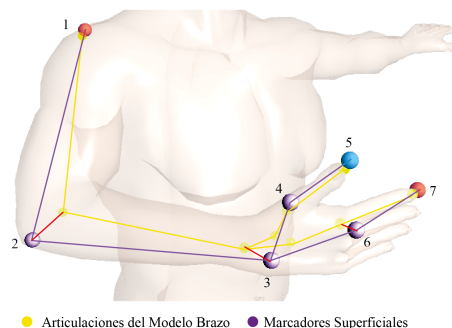


Figura 73. Visualización del Modelo Esquelético y Marcadores superficiales usados en fotogrametría.

### 5.4.3 Resultados

A continuación se muestra un ejemplo de comparación realizado con una de las posiciones estimadas. En la figura 74 se muestra el par de fotografías usadas para realizar la triangulación. En la figura 75 se puede observar el modelo del brazo planteado en comparación con el brazo real (descrito mediante triangulación).



Figura 74. Par estéreo de fotografías usadas en la triangulación.

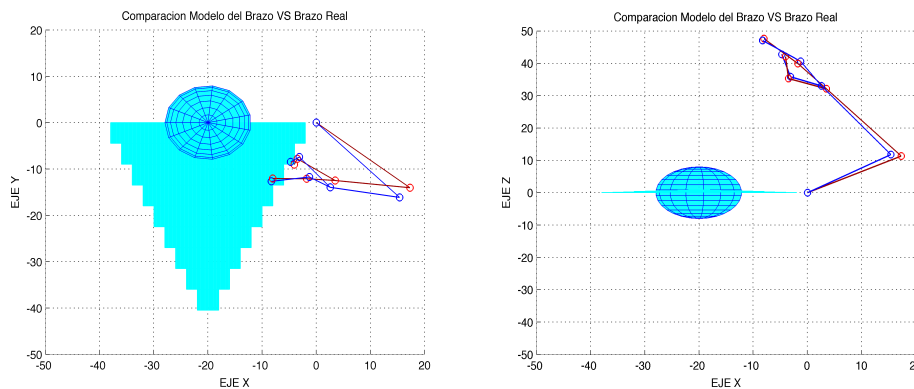


Figura 75. Comparación del Modelo del Brazo Vs Brazo Real. Vista Frontal y Superior.

A continuación se realizará una comparación teniendo en cuenta la posición de cada una de las articulaciones analizando los errores absolutos presentados.

#### 5.4.3.1 Articulación del Codo

En las pruebas realizadas se obtuvieron los resultados que se observan en la figura 76. Se Muestran las graficas de Errores absolutos obtenidos para en cada

eje de coordenadas, así mismo se muestra el error presentado como norma para cada articulación.

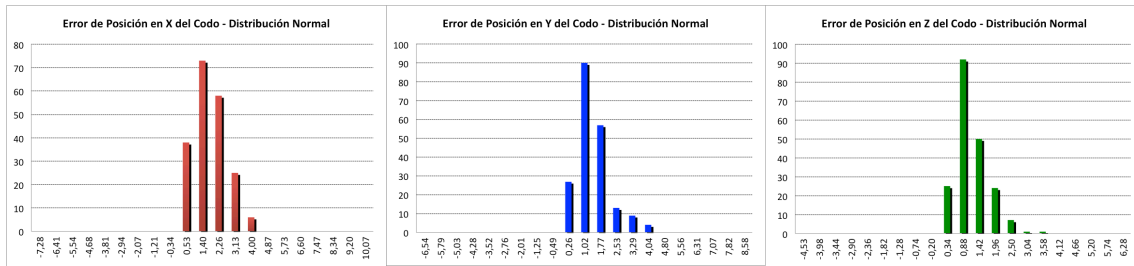


Figura 76. Distribución de Errores Absolutos del Codo en cada eje de coordenadas. Eje X, Y e Z, respectivamente.

Tabla 15. Distribución de Errores Absolutos del Codo en cada eje de coordenadas.

Eje X, Y, Z y Norma, respectivamente.

Eje	Error Absoluto	Desviación Estándar - $\sigma$	Porcentaje Datos en la Media	Porcentaje de datos entre $-\sigma$ y $+\sigma$	Porcentaje de datos entre $-2\sigma$ y $+2\sigma$
x	1,34 cm	0,86 cm	36,5%	84%	97%
Y	1,01 cm	0,70 cm	45%	87%	94%
z	0,87 cm	0,54 cm	47%	84%	97%
NORMA	2.00 cm	0,98 cm	39%	84%	97%

El error absoluto más grande y la desviación estándar mayor se presentó en el eje X. En la figura 77 se observa la distribución de los datos para cada eje, notándose una agrupación mas cercana a la media en el ejes Z. Esto nos permite concluir que la mayor precisión se presenta en el eje Z, así mismo la menor precisión en el eje X. Con referencia a la exactitud, se puede concluir que es mayor en el eje Z y menor en el eje X.

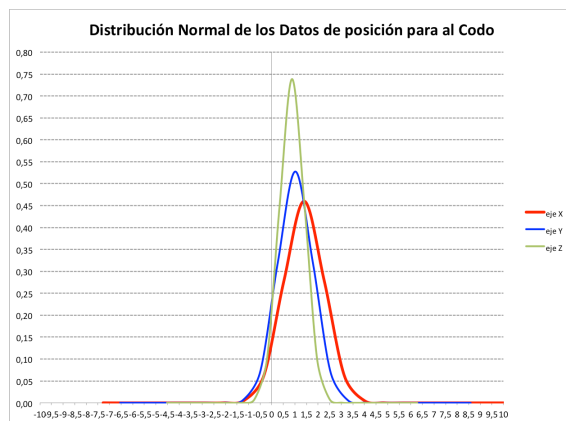


Figura 77. Distribución de Errores Absolutos del Codo en cada eje de coordenadas.

A modo de entender espacialmente los errores presentados, se analizó la norma para esta articulación, los resultados obtenidos se muestran en la figura 78, donde se observa una norma promedio de 0,94 cm con una desviación estándar de 0,51.

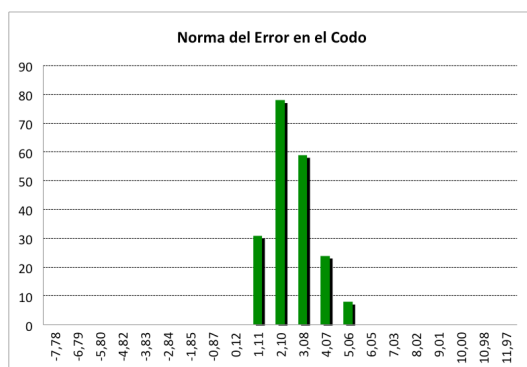


Figura 78. Distribución de la norma de los Errores Absolutos del codo.

También se encuentra en 39% de los datos en el grupo promedio, así mismo entre  $-\sigma$  y  $+\sigma$  se encuentran el 84,% de los datos, entre  $-2\sigma$  y  $+2\sigma$  se encuentran el 96% de los datos.

#### 5.4.3.2 Articulación del Muñeca

A continuación se muestran los resultados para la articulación de la Muñeca, inicialmente el análisis de los errores absolutos para cada uno de los ejes y

posteriormente el análisis de la norma. En la figura 79 se muestran los datos para cada uno de los ejes.

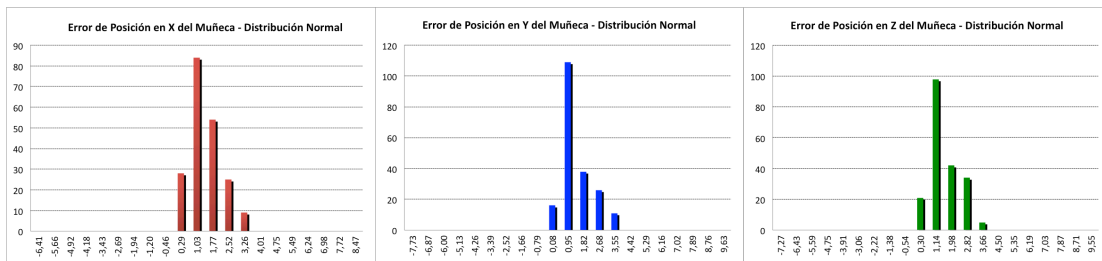


Figura 79. Distribución de Errores Absolutos de la muñeca en cada eje de coordenadas.

Eje X, Y e Z, respectivamente.

Tabla 16. Distribución de Errores Absolutos de la Muñeca en cada eje de coordenadas.

Eje X, Y, Z y Norma, respectivamente.

Eje	Error Absoluto	Desviación Estándar - $\sigma$	Porcentaje Datos en la Media	Porcentaje de datos entre $-\sigma$ y $+\sigma$	Porcentaje de datos entre $-2\sigma$ y $+2\sigma$
x	1,03 cm	0,75 cm	42%	83%	96%
Y	0,94 cm	0,86 cm	55%	81%	98%
z	1,14 cm	0,84 cm	47%	84%	97%
NORMA	2.10 cm	0,81 cm	28%	82%	98%

El error absoluto más grande y la desviación estándar mayor se presentó en el eje Z y la mayor desviación se observa en el eje Y. En la figura 80 se observa la distribución de los datos para cada eje, notándose una agrupación mas cercana a la media en el eje X. Esto nos permite concluir que la mayor precisión se presenta en el eje Z, así mismo la menor precisión en el eje X. Con referencia a la exactitud, se puede concluir que es mayor en el eje Y y menor en el eje Z.

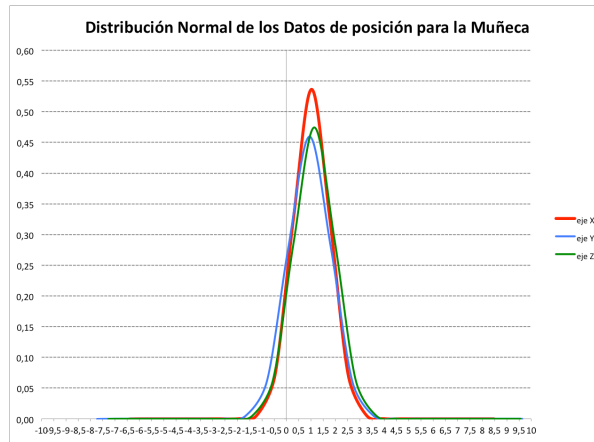


Figura 80. Distribución de Errores Absolutos del Codo en cada eje de coordenadas.

Para entender espacialmente los errores presentados, se analizó la norma para esta articulación, los resultados obtenidos se muestran en la figura 81, donde se observa una norma promedio de 2,10 cm con una desviación estándar de 0,81.

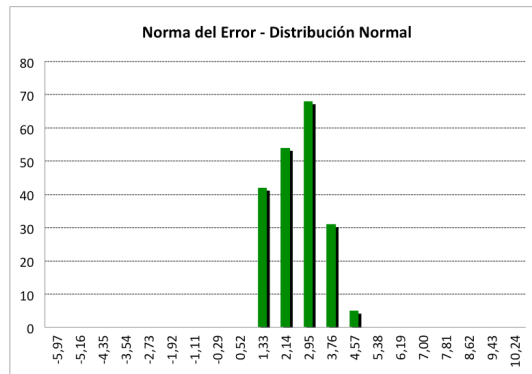


Figura 81. Distribución de la norma de los Errores Absolutos de la Muñeca.

También se encuentra en 28% de los datos en el grupo promedio, así mismo entre  $-\sigma$  y  $+\sigma$  se encuentran el 82% de los datos, entre  $-2\sigma$  y  $+2\sigma$  se encuentran el 97,5% de los datos.

#### 5.4.3.3 Articulación del Índice (Metacarpiano Radial)

Este punto está ubicado en el metacarpiano radial, en la articulación Metacarpofalángica del dedo índice. A continuación se muestra los resultados de

la comparación hecha, dicha comparación se realizó con los errores absolutos, se muestran los errores por cada eje y posteriormente la norma calculada con dichos componentes.

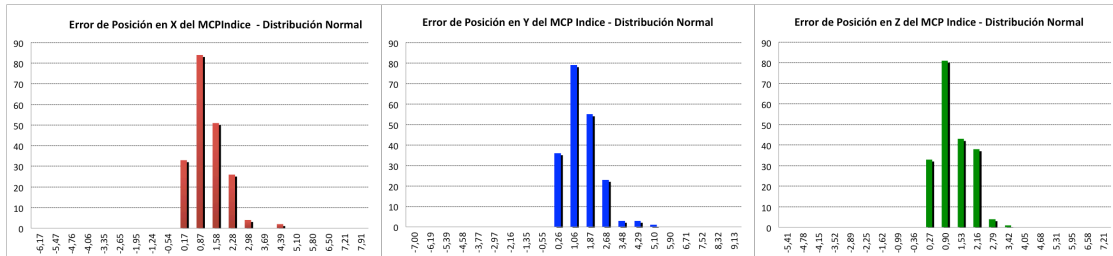


Figura 82. Distribución de Errores Absolutos de la articulación MCP del dedo Índice en cada eje de coordenadas. Eje X, Y y Z, respectivamente.

Tabla 17. Distribución de Errores Absolutos del MCP Índice en cada eje de coordenadas. Eje X, Y, Z y Norma, respectivamente.

Eje	Error Absoluto	Desviación Estándar - $\sigma$	Porcentaje Datos en la Media	Porcentaje de datos entre $-\sigma$ y $+\sigma$	Porcentaje de datos entre $-2\sigma$ y $+2\sigma$
x	0,87 cm	0,70 cm	42%	84%	97%
Y	1,06 cm	0,80 cm	40%	85%	97%
z	0,89 cm	0,63 cm	41%	78%	98%
NORMA	1.09 cm	0,79 cm	31%	83%	97%

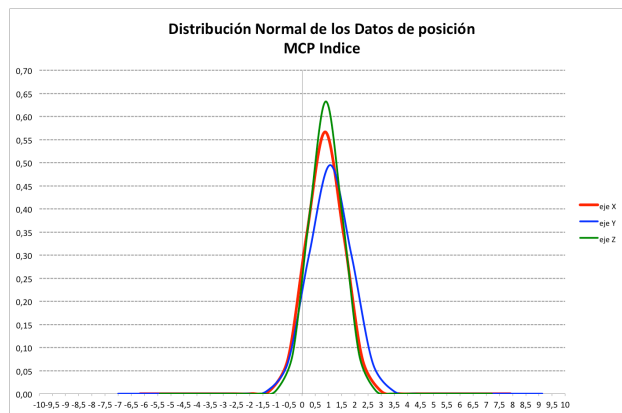


Figura 83. Distribución de Errores Absolutos del MCP del Índice en cada eje de coordenadas.

De lo anterior encontramos que el mayor promedio de error para la articulación MCP de dedo índice se encontró en el eje Y, y la mayor desviación de los datos se encuentran tanto en el eje X y Y. En la figura 83 se observa una agrupación mayor

para el eje Z, y una exactitud menor para el eje Y. La mayor precisión ubicada en el eje Z y exactitud en el eje X.

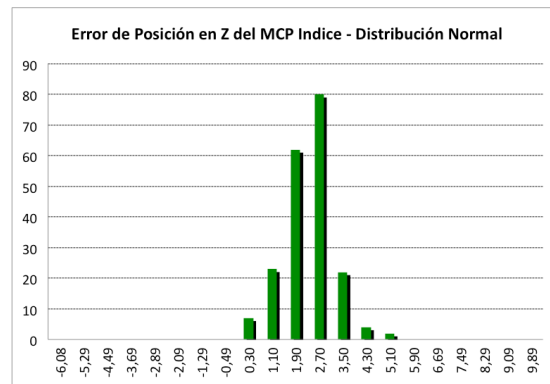


Figura 84. Distribución de la norma de los Errores Absolutos del CMP del índice.

#### 5.4.3.4 Articulación del Pulgar (Falángico)

Este punto esta ubicado en la articulación Trapeziometacarpal (TCM) del dedo pulgar. Los resultados mostrados en la figura 85, relacionan los errores absolutos en cada eje de la articulación.

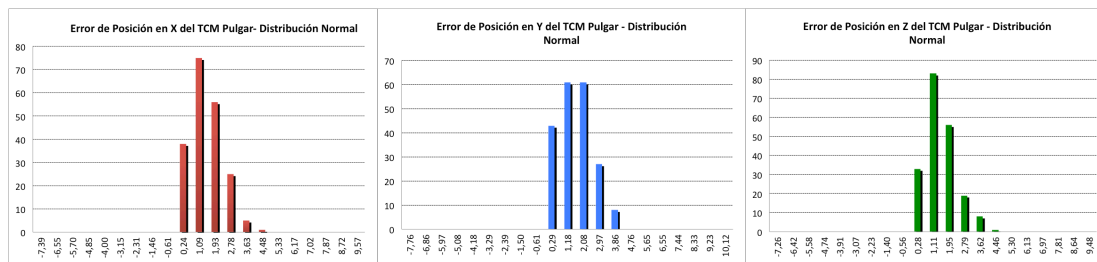


Figura 85. Distribución de Errores Absolutos de la articulación TMC del dedo Pulgar en cada eje de coordenadas. Eje X, Y y Z, respectivamente.

Tabla 18. Distribución de Errores Absolutos del TCM Pulgar en cada eje de coordenadas.

Eje X, Y, Z y Norma, respectivamente.

Eje	Error Absoluto	Desviación Estándar - $\sigma$	Porcentaje Datos en la Media	Porcentaje de datos entre $-\sigma$ y $+\sigma$	Porcentaje de datos entre $-2\sigma$ y $+2\sigma$
x	1,08 cm	0,84 cm	38%	84%	97%
Y	1,18 cm	0,89 cm	31%	82%	97%

z	1,11 cm	0,83 cm	41%	86%	96%
NORMA	2.17 cm	1,10 cm	35%	80%	99%

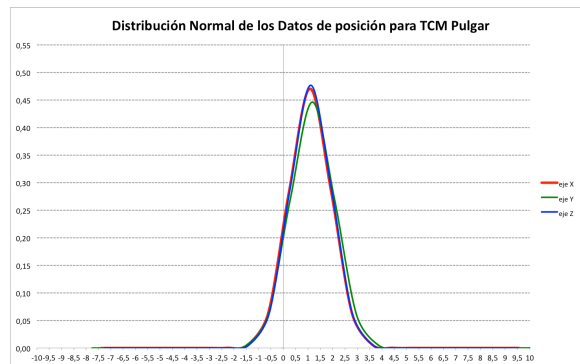


Figura 86. Distribución de Errores Absolutos del TMC del Pulgar en cada eje de coordenadas.

En la gráfica 86 podemos observar que el mayor promedio de error y la mayor desviación estándar para la articulación TCM de dedo pulgar se encontró en el eje Y. Así mismo, se observa una agrupación mayor para el eje Z, y una exactitud menor para el eje Y. La mayor precisión y exactitud ubicada en el eje X y Z.

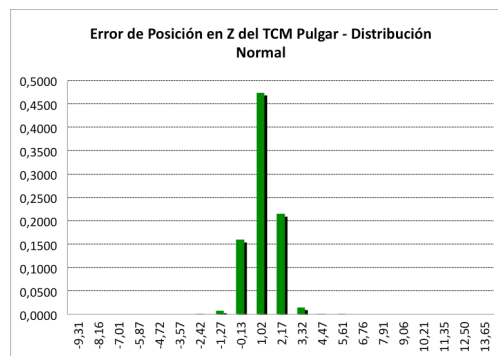


Figura 87. Distribución de la norma de los Errores Absolutos del TCM del Pulgar.

#### 5.4.3.5 Análisis Estadísticos

Se realizaron análisis estadísticos con los datos, realizando un análisis de diferencia entre medias, comparando las media real con la media de los datos calculados. Se realizó un análisis con un 95% de confianza, y los resultados obtenidos se relacionan en la tabla 19.

Tabla 19. Análisis de diferencia ente medias.

	Valor de prueba = 0					
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
					Inferior	Superior
CODOX	17,155	199	,000	,4445802	,393476	,495684
CODOY	16,131	199	,000	,4122431	,361848	,462638
CODOZ	21,187	199	,000	,4730422	,429015	,517069
MUNECAX	21,245	199	,000	,4709840	,427268	,514701
MUNECAY	19,140	199	,000	,4528955	,406234	,499557
MUNECAZ	21,541	199	,000	,5202497	,472624	,567875
MCPINDICEX	16,211	199	,000	,3612232	,317283	,405163
MCPINDICEY	16,712	199	,000	,4309528	,380101	,481804
CPMINDICEZ	19,232	199	,000	,4947746	,444044	,545506
YINDICEX	17,656	199	,000	,3397035	,301763	,377644
YINDICEY	21,158	199	,000	,3989668	,361782	,436151
YINDICEZ	19,381	199	,000	,3691691	,331608	,406730
TCMPULGARX	18,424	199	,000	,3849158	,343718	,426114
TCMPULGARY	19,535	199	,000	,4223473	,379714	,464980
TCMPULGARZ	16,599	199	,000	,4374037	,385440	,489368
YPULGARX	18,414	199	,000	,3847811	,343574	,425988
YPULGARY	19,382	199	,000	,4208563	,378038	,463675

El análisis de diferencia entre medias permite identificar que con el intervalo de confianza, la media de los datos observados se encuentran entre el limite superior e inferior mostrado por el análisis. Dichos análisis se realizó bajo la hipótesis de error = 0, para determinar si la diferencia presentada es aceptable o no. Para la hipótesis del análisis si la diferencia entre las medias se encuentra entre el limite superior e inferior, es una diferencia aceptable para los datos analizados.

También se realizó un análisis de error para las normas de cada articulación. Con un 95% de confianza, se analizaron las normas. En la tabla 20, se relacionan los datos del análisis.

Tabla 20. Análisis de error para las normas de cada articulación.

	MINIMO	Q1	MEDIA	Q3	MAXIMO
CODO	0,309832743	1,348664952	1,990642517	2,722178186	4,970487341
MUÑECA	0,534117983	1,576529976	2,220061459	2,733956411	3,9282335
MCP INDICE	0,198760882	1,440873227	1,935272991	2,357110723	4,741700204
TCM PULGAR	0,226263626	1,300890441	2,034021829	2,910401868	4,484946359
MODELO GRAL	0,198760882	1,420887801	2,038251947	2,67532945	4,970487341

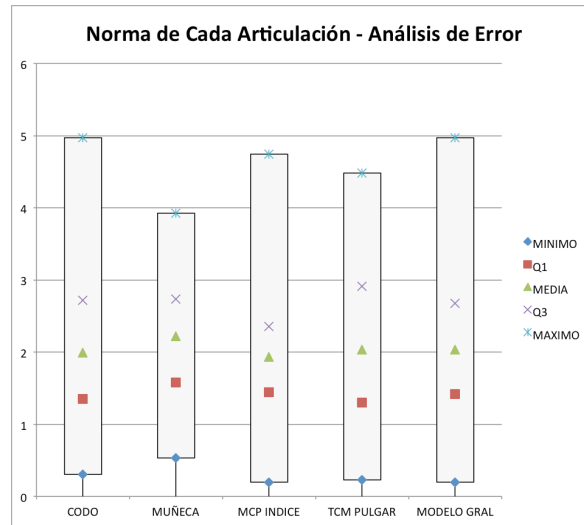


Figura 88. Distribución de la norma de los Errores Absolutos del TCM del Pulgar.

En la figura 88, se muestran los datos de análisis de error. Dicho análisis muestra que la media de error se encuentra en todas las articulaciones, dentro del rango percentil 50, es decir que el error se agrupa dentro de los rangos aceptables. Para el codo se observa, que aunque se encuentran datos de error que superan los 4 cm, dichos datos no son estadísticamente representativos ya que se encuentra ampliamente alejado de la media y del percentil 75. Se observan los mayores errores en la articulación del codo sin embargo no son estadísticamente representativos, la mayoría de datos se encuentra bajo el promedio de 3 cm. Así mismo la muñeca presenta la mayor media de error, sin embargo dichos errores se agrupan en errores promedio menores a 3 cm. Se observa un promedio para las articulaciones alrededor de 2cm de error. Sin embargo, el error de la articulación TCM del pulgar tiene un error promedio mayor a 2,2 cm, pero el percentil 75 apenas supera los 2,5 cm de error.

Observando el anterior análisis se considera que es aceptable un error promedio de 2 cm de norma para cada articulación, teniendo en cuenta el sistema de bajo costo planteado y las condiciones de captura de la imágenes.

Realizando una revisión de la literatura para modelos aplicados bajo condiciones similares, se encuentra a Moeslund [79], que presenta un modelo de brazo para manipulación en HCI, mostrando en alguna ocasiones errores en el rango de +- 20 cm, debido en mayor medida a la calidad de la imágenes usadas. También se observó el modelo evaluado por Schmidt [80] basado en un sistema monocular, que presenta un error general de 4,6 cm, dicho sistema presenta la particularidad de disminuir su error a medida que avanza el tiempo de captura. Agarwal y Triggs [81] presentan un modelo general que mantiene un error que oscila entre 6,5 y 10,5 cm para el brazo completo, no se analizan las articulaciones por separado. Jaeggli [82] propone un modelo general del cuerpo que presenta errores en el Codo de 4cm y en la muñeca de 6 cm.

Tabla 21. Comparación de error promedio con otros trabajos similares.

<i>Autor</i>	<i>Promedio de Error</i>
Modelo Planteado	2 cm
Moeslund [79],	20 cm
Schmidt [80]	4,6 cm
Agarwal y Triggs [81]	6,5 a 10,5 cm
Jaeggli [82]	4 y 6 cm

Teniendo en cuenta que no se pudo encontrar un estudio que determine el mínimo de error necesario para la manipulación, se considera basado en la literatura revisada y la observación del modelo, que el error presentado se encuentra dentro del rango aceptable para la aplicación del mismo.

#### 5.4.3.6 Medición De Ángulos

A fin de conocer el comportamiento angular del modelo se realizaron unas mediciones a movimientos de traslación y rotación del brazo. Se capturaron estos datos realizando movimientos rotación en cada eje, posteriormente se analizó el comportamiento en cada plano de coordenadas y se a continuación se muestran los comportamientos significativos.

#### **Rotaciones en el Eje X**

En las rotaciones sobre el eje X, se evidenciaron principalmente variaciones en el plano YZ, principalmente en el antebrazo y la muñeca. En la figura 89 se muestran los ángulos observados, que para el antebrazo varían entre 0 y 100 grados y para la muñeca entre 0 y -100 grados.

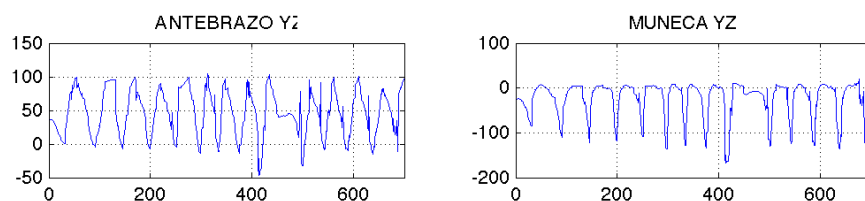


Figura 89. Ángulos del antebrazo y muñeca en rotación sobre X.

### Rotaciones en Eje Y

En la observación realizada para las rotaciones en el eje Y sobre el plano XZ, se encuentran las principales variaciones plasmadas en hombro, el antebrazo y la muñeca, tal como se observa en la figura 90.

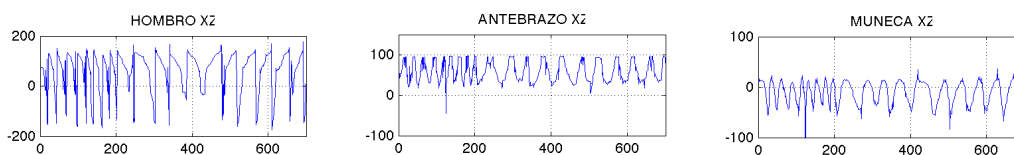


Figura 90. Ángulos del Hombro, antebrazo y muñeca en rotación sobre Y.

### Rotaciones en Eje Z

En las rotaciones sobre el eje Z observadas sobre el plano XY, se encontró variaciones notables en el antebrazo y la muñeca. Dichas variaciones entre 25 y 70 Grados para el antebrazo y -25 y 25 grados para la muñeca.

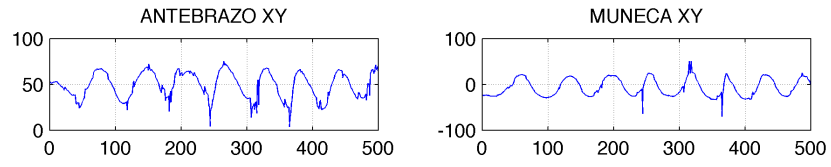


Figura 91. Ángulos del Hombro, antebrazo y muñeca en rotación sobre Z.

## 6. APLICACIÓN MODELO REALIZADA

### 6.1 Diagrama de Procesos

Basado en la técnica planteada se desarrollo una aplicación a manera de modelo funcional en Matlab. A continuación se hace una revisión de los principales componentes de la aplicación. Los principales componentes de la aplicación, se describen en la figura 92.

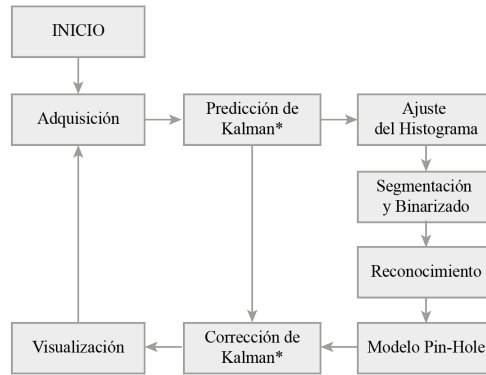


Figura 92. Diagrama de procesos de la aplicación en Matlab®.

La aplicación desarrollada permitió implementar la técnica planteada, como un primer modelo funcional de las interacciones sugeridas. Dicha aplicación esta compuesta a grades rasgos por tres procesos: *El sistema de visión*, encargado de la captura y procesamiento de la imagen de video el tiempo real resultado de este proceso se obtienen las coordenadas en tres dimensiones (x,y,z) de los dos marcadores (rojo y azul). *Sistema de posición del brazo*, encargado de la reconstrucción de la posición y ángulos de cada una de las articulaciones del brazo. Finalmente el proceso de *Funciones de Manipulación*, encargado de aplicar a las tareas de manipulación elegidas los datos recibidos.

#### 6.1.1 Proceso del Sistema de visión

Este modulo se encuentra descrito ampliamente en el capitulo 2.



\* No Aplica para el primer fotograma

Figura 93. Proceso de Visión.

### 6.1.2 Proceso de Posición de Brazo

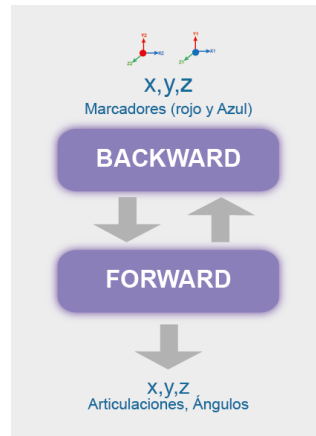


Figura 94. Proceso de Posición del Brazo.

Este proceso se encuentra ampliamente descrito en el capítulo 4 de este documento.

### 6.1.3 Proceso de Funciones de Manipulación

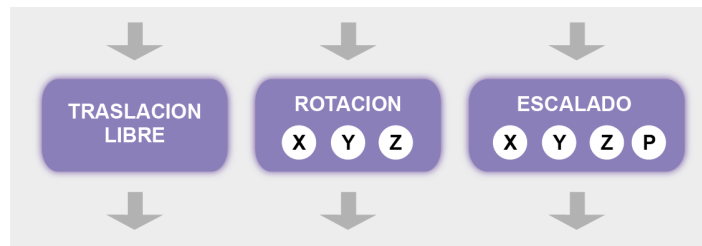


Figura 95. Proceso Funciones de Manipulación

Este proceso se describe en la sección 3.5.2 de este documento.

## 6.2 Interfaz Gráfica de Usuario

Se desarrolló una interfaz a pantalla completa en Matlab, en la figura 96 se observa. Teniendo en cuenta el reducido número de funciones y la necesidad de un amplio espacio de trabajo se plantearon 3 zonas de agrupación.

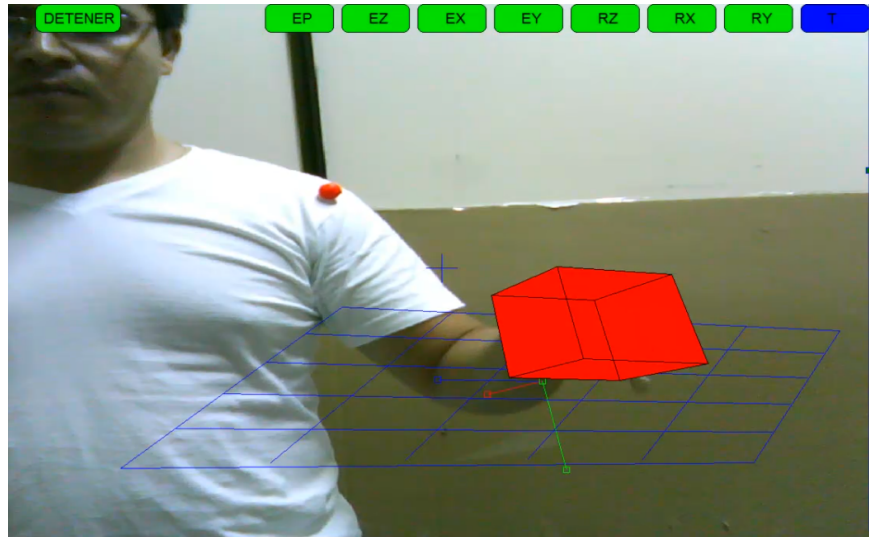


Figura 96. Interfaz Aplicación RA en Matlab ®.

*Controles:* Se agrupan los controles en orden horizontal, en la parte superior de la pantalla, ordenados de izquierda a derecha. Tal como se observa en la figura 97.



Figura 97. Grupo de Controles de la aplicación.

- DETENER: Reinicia la aplicación
- EP: Permite el escalado Proporcional del Objeto
- EZ: Permite el escalado en el eje Z del Objeto
- EZ: Permite el escalado en el eje X del Objeto
- EZ: Permite el escalado en el eje Y del Objeto
- RZ: Permite las rotaciones en el eje Z del Objeto
- RX: Permite las rotaciones en el eje X del Objeto
- RY: Permite las rotaciones en el eje Y del Objeto
- T: Permite las traslaciones libres.

*Profundidad del Objeto:* En la sección A observada en la figura 98, se ubica un indicador de profundidad del objeto y de los marcadores, a fin de ayudar en la ubicación de los mismos en la dimensión no observable en pantalla.

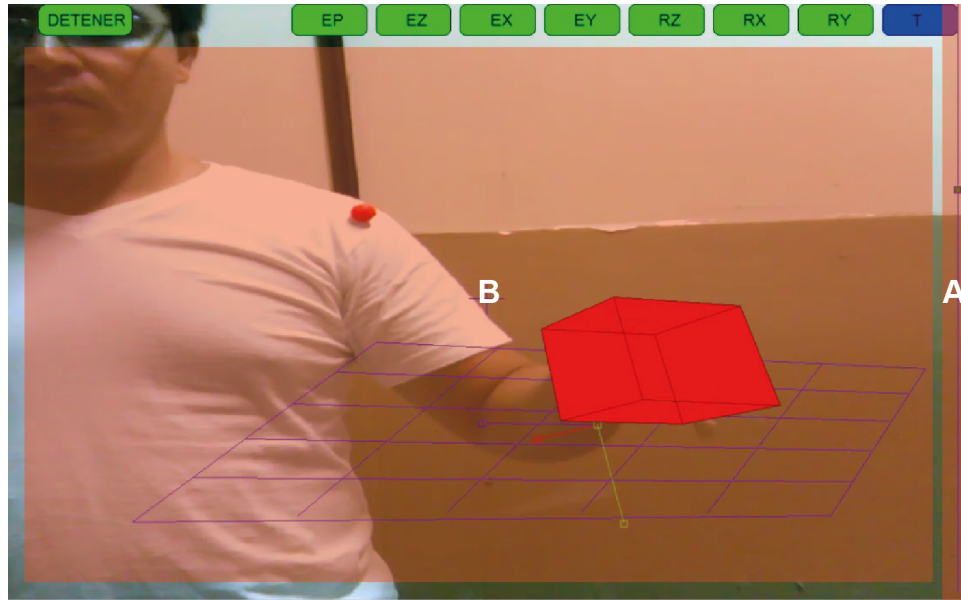


Figura 98. Control de Profundidad y Zona de Trabajo de la aplicación.

*Zona de Trabajo:* En el espacio demarcado (B) en la figura 91, se muestra la zona de trabajo para la manipulación de los objetos. En esta zona se muestra el plano de trabajo con los indicadores de los ejes de referencia, también se observa el objeto (paralelepípedo) manipulable dentro de dicha zona.

### **6.3 Pruebas de Manipulación**

La aplicación en mención se probó en la manipulación del objeto, los resultados observados se resumen a continuación.

#### **Sistema de Visión:**

Se observa un desempeño bastante bueno en la velocidad de detección de los marcadores, ocasionado por el uso del toolbox de procesamiento de imágenes de Matlab y su notable capacidad en este campo. Así mismo la profundidad obtenida mantiene la precisión mostrada anteriormente, sin embargo los cambios de luz, fuentes de sobre iluminación o baja iluminación, ocasionan alteraciones en la

posición de los marcadores. También se observa una segmentación estable en entornos con fondos de color regulares, sin embargo presenta detecciones erróneas en fondos que contengan alguno de los colores de los marcadores.

### **Posición del brazo**

Al aplicación presenta un desempeño bueno en la determinación de las posiciones y ángulos de las articulaciones, las alteraciones en la precisión de algunas articulaciones como el codo y muñeca no afectan ampliamente las funciones que basan su proceso en dichos datos, ya que se usa la descomposición de componentes para cada eje, mitigando esta variación. También se considera que el modelo podría simplificarse para evitar las variaciones y hacerlo más estable.

### **Funciones de manipulación**

Las funciones presentan un buen comportamiento, sin embargo algunas de ellas no se realizan de manera natural, debido a las variaciones del modelo del brazo. Las funciones son operadas bajo una selección previa en la sección de controles, lo que presenta más movimientos de los necesarios para la manipulación del objeto, estimulando la manipulación controlada y no de manera natural.

### **Desempeño General**

En el uso se presentan ambigüedades de representación gráfica, falta de coherencia en la percepción de la profundidad y orientación del objeto, esto ocasiona confusiones en el usuario. Se observa una aplicación con una interfaz sencilla y clara, sin embargo debido a la naturaleza Matlab, se observa la dificultad en la graficación de los objetos en 3D, debido a esto se observa una disminución de la velocidad en la renderización en tiempo real de los objetos. Además de esto se colocaron más objetos en el espacio de trabajo, lo que incrementó sustancialmente el tiempo de proceso para la renderización. También se consideran los requerimientos para la ejecución de la aplicación en términos de software, observando que Matlab no permite la creación de aplicaciones orientada

a la web, de la misma manera los requerimientos necesarios para las aplicaciones de escritorio son de alta complejidad.

También se observa que no se pueden importar modelos 3D realizados en ningún software CAD, así mismo no se pueden concebir volúmenes de apariencia realista.

Teniendo en cuenta las observaciones anteriores se procedió a realizar una aplicación simplificada solventando situaciones presentadas en la aplicación modelo desarrollada en Matlab. Dicha aplicación se desarrollo en Unity® y se describirá con más amplitud en el próximo capítulo.

## **7. Aplicación Prototipo – DAR**

Direct Augmented Reality (DAR) es una aplicación que toma como metáfora un puzzle 3D. Invita a los usuarios a manipular cada una de las fichas para crear una figura.

DAR fue implementado utilizando el motor de desarrollo orientado a objetos en 3D y video juegos Unity®, dicha elección se tomó basado en la capacidad de procesamiento gráfico y su orientación en entornos 3d multiplataforma, además de esto permite la creación de aplicaciones de escritorio, web, dispositivos móviles.

Se eligió una metáfora de puzzle 3D ya que se consideran todas las funciones de manipulación para el desarrollo del mismo.

### **7.1 Interfaz Gráfica de Usuario**

Esta aplicación tiene una interfaz a pantalla completa, sin embargo carece de controles, ya que los gestos de movimiento, rotación y escalado se realizan directamente por el usuario. En la figura 99, se observa la interfaz, que en esencia es similar a la primera versión realizada pero simplifica los controles y dado el carácter 3D del motor gráfico, la percepción del volumen de los objetos es mucho mayor.

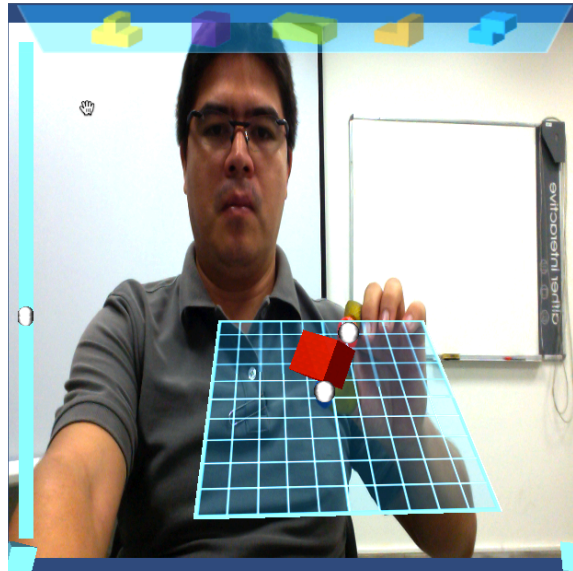


Figura 99. Interfaz de la aplicación desarrollada en Unity ®.

## 7.2 Controles

En comparación con la versión anterior, esta nueva versión elimina los controles para seleccionar la tarea de manipulación a cumplir, dichos controles se realizan directamente en el objeto mediante los movimientos del brazo. En la gráfica 100 se observan las zonas planteadas en la interfaz.

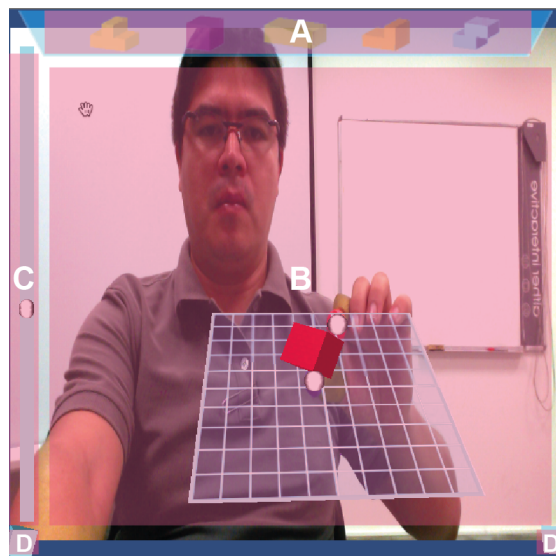


Figura 100. Disposición de las zonas en la interfaz de la aplicación.

### **7.3 Espacio de trabajo**

En la figura 91 se observa el espacio de trabajo ubicado en la zona B, con mas área en la pantalla. Así mismo también se observa el plano de trabajo, con mas claridad y sencillez.

### **7.4 Funciones extra ( deshacer y eliminar)**

Se han creados dos funciones extra, deshacer y eliminar. En la esquina inferior izquierda se encuentra “deshacer”, que permite regresar hasta 10 acciones antes, incluyendo las funciones de manipulación, creación y eliminación de objetos.

En la esquina inferior derecha “eliminar”, como complemento para la interacción con la figuras presentes en la zona de trabajo. Se realiza la aprehensión del objeto y se arrastra hasta la esquina para eliminarlo de la zona de trabajo.

## CONCLUSIONES

El diseño de las interacciones es fundamental en la comprensión de una herramienta computacional, y aunque la interfaz es una parte esencial en este proceso, la comprensión de cómo los usuarios realizan sus tareas es crucial para el diseño de dichas interacciones.

Después de revisar la literatura relacionada se considera que la interacción es una tarea fundamental dentro de los desarrollos de RA, dicho enfoque se presentó en ponencia oral en el VIII Congreso Internacional de Electrónica y Tecnologías de Avanzada – CIETA 2011, organizado por la Universidad de Pamplona. Así mismo dicho trabajo fue elegido para la publicación en la Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada en el Volumen 1 de 2011.

En la actualidad existen diversas técnicas que plantean interacciones usando dispositivos ajenos al cuerpo humano, la tendencia en las técnicas de interacción se orienta el uso gestos humanos de todo tipo, sin el uso de dispositivos invasivos o que interrumpan el flujo de movimientos del usuario.

La técnica propuesta muestra una forma de interacción que le permite al usuario manipular objetos de manera natural, al permitirle aprehender objetos virtuales usando su experiencia con objetos físicos, sin necesidad de aprender nuevos gestos ni formas de interacción.

Se propone una técnica basada en un sistema de visión monocular, que usa como dispositivo de entrada dos marcadores esféricos ubicados en los dedos índice y pulgar. En las pruebas realizadas estos marcadores no presentaron incomodidad el momento de manipular los objetos. Sin embargo se presentaron algunos problemas de rastreo ocasionados por las oclusiones temporales de los mismos.

Es conocido que la iluminación es una variable de alta complejidad en los sistemas de visión, con el fin de mitigar las variaciones ocasionadas por la iluminación se implementó el método de Otsu con resultados positivos en variaciones pequeñas y progresivas de iluminación.

El sistema de visión monocular desarrollado, presenta un notable registro en 3D, tiene un bajo costo computacional lo que demuestra el bajo tiempo de respuesta, así mismo los recursos necesarios para su funcionamiento son mínimos haciéndolo útil sin necesidad de equipos especiales.

Los resultados del análisis y el desarrollo del sistema de visión monocular se presentaron como ponencias orales, la primera titulada “*Visión artificial aplicada en sistemas de realidad aumentada*” en el 3er Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica – UNAB 2011. Así mismo se presentó la ponencia titulada “*Real-time Monocular Vision-Based 3D Object Tracking System using Kalman filter*” en el “XV simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial” – STSIVA 2012, realizado el 14, 13 y 14 de septiembre, en la Ciudad de Medellín – Colombia.

Se planteó un modelo del brazo humano con 10 GDL, que comprendió el miembro superior junto a una simplificación del modelo de la mano, convirtiéndolo en un modelo conjunto de la extremidad superior. Dicho modelo presentó una precisión media en la articulación del codo y la muñeca, sin embargo el error promedio de todas las articulaciones se encuentra alrededor de los 2 cm, en comparación con otros trabajos similares se encuentra que dicho error es inferior y se considera suficiente para ser usado en la manipulación de objetos.

Se consideran positivos los resultados obtenidos con el modelo planteado, dichos resultados fueron aceptados para su presentación en modalidad de Poster en el “VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2012” realizado del 31 de julio al 03 de Agosto 2012, en la ciudad de São Luis – Maranhão, Brasil. Sin embargo por problemas de salud del autor, el poster no pudo ser presentado.

Se desarrolló una aplicación modelo en Matlab® basada en la técnica propuesta, dicha aplicación presentó limitaciones en la visualización y registro de la perspectiva de los objetos, debido a esto se desarrollo una segunda aplicación multiplataforma en Unity 3D, con resultados positivos en la interacción natural con objetos virtuales en un entorno de RA.

La técnica propuesta demuestra gran potencial, debido al uso de dispositivos de bajo costo y la versatilidad lograda en el prototipo de la aplicación desarrollado. Se plantea su aplicación diversos campos, como el educativo, en simulaciones, software CAD, video juegos etc.

## TRABAJO FUTURO

A modo de fortalecimiento de la técnica propuesta se consideran algunos aspectos de trabajo futuro, a continuación se describen:

Con el fin de mejorar la interacción disminuyendo los dispositivos ajenos que el usuario deban mantener para interactuar con el sistema, se sugiere la eliminación de los marcadores en los dedos, para esto se plantea un sistema de visión que reconozca las manos junto a los dedos.

También se considera que un modelo del brazo con menos complejidad es suficiente para el desarrollo de interacciones, esto mejoraría el tiempo de respuesta y permitiría aumentar la precisión del mismo.

Se considera que con algunas mejoras el modelo de 10 GDL del brazo, se pueden realizar análisis de diversos tipos, usando un sistema de visión de bajo costo.

Se puede aumentar la precisión del sistema de visión usando un sistema estéreo de cámaras mediante triangulación, bajo el mismo planteamiento descrito en este trabajo.

Se visualiza el uso de esta técnica en aplicaciones de tipo CAD, para la construcción de modelos en tamaño real, aprovechando la sincronización en 3D de la técnica propuesta.

## BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- [1] Pons J. L., *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeleton*, Jhon Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [2] Denavit J. y Hartenberg R.. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Trans ASME J. Appl. Mech*, 23:215-221,1955
- [3] Rocon, E., Pons, J. L. "Case study: study of tremor characteristics based on a biomechanical model of the upper limb". En: J. L. Pons., *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeleton*, Jhons Willey & Sons, Ltd, 2005, pp: 80-85.
- [4] Barrientos A. "Fundamentos de Robótica" Ed. Mac Graw Hill. Barcelona. 1997. Pp. 15-38.
- [5] Carignan C., Liszka M., "Design of an Arm Exoskeleton whith Scapula Motion for Shoulder Rehabilitation", *Advanced Robotics*, 2005, ICAR'05. 12th International Conferencie, 2005, pp. 524-531.
- [6] Gowitzke, M., Milner, M.. *Scientific Bases of Human Movements*, Ed. Paidotribo, 2000.
- [7] Wang, X., Verriest, J. P.. "A geometric algorithm to predict the arm reach posture for computer-aided ergonomic evaluation", *The Journal of Visuailization and Posture Animation*, 1998, pp. 33-47.
- [8] Cobos S., Ferre M., Ortego J., Sanchez-Uran M. *Simplified Hand Configuration for Object Manipulation*. M. Ferre (Ed.): *EuroHaptics 2008*, LNCS 5024, pp. 730–735, 2008. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.
- [9] Walairacht, S., Yamada, K., Hasegawa, S. ,Koike, Y. , Sato, M. 2002. 4 + 4 fingers manipulating virtual objects in mixed reality environment. In *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 11, 2, 134-143. MIT Press.
- [10] Buchmann V., Violich S., Billinghamurst M., Cockburn A. *FingARtips – Gesture Based Direct Manipulation in Augmented Reality*. Association for Computing Machinery, Inc. 2000.

- [11] Veber M., Bajd T. Assessment of Human Hand Kinematics. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation Orlando, Florida - May 2006.
- [12] Chen W., Fujiki R., Arita D., Taniguchi D. Real-time 3D Hand Shape Estimation based on Image Feature Analysis and Inverse Kinematics. 14th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP 2007) IEEE. 2007.
- [13] Cobos S., Ferre M., Uran S., Ortego J., Peña C. Efficient Human Hand Kinematics for Manipulation Tasks. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Acropolis Convention Center Nice, Francia, Septiembre, 22-26, 2008.
- [14] Cutkosky M. On Grasp Choice, Grasp Models, and the Design of Hands for Manufacturing Tasks. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 5, no. 3. Junio 1989.
- [15] Feix T., Pawlik R., Schmiedmayer H., Romero J. Y Kragic´ D. A comprehensive grasp taxonomy. Proc Robotics, science and systems conference: Workshop on understanding the human hand for advancing robotic manipulation. 2011.
- [16] Cobos S., Ferre M., Aracil R. Simplified Human Hand Model based on Grasping Analysis. Madrid, España. 2010.
- [17] Tolani D., Goswami A., Badler N. Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs.
- [18] Bar-shalom Y., Rong-Li X., Kirubarajan T. Estimation with applications to tracking and navigation: Theory algorithms and software. John Wiley & Sons, Ind. 2001.
- [19] Linderöth M., Robertsson A., Åström K., and Johansson R. Object Tracking with Measurements from Single or Multiple Cameras. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Mayo 2010.
- [20] Ricolfe C. Caracterización y optimización del proceso de calibrado de cámaras basado en plantilla bidimensional. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2006.

- [21] Zhang Z. (2000) A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22, pp 1330-1334.
- [22] Pal, N.R, Pal, S., (2006). "A review on image segmentation techniques", Pattern Recognition, Vol 26, pp 1277-1294.
- [23] Comaniciu, D. Meer, P., (2007). "Robust analysis of feature spaces: Color image segmentation", Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, Puerto Rico, pp 750- 755
- [24] Deng Y., Manjunath, (2001). "Unsupervised Segmentation of Color Texture Regions in Images and Video". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 23, No 8, pp 800-810.
- [25] Fan J., David K., Yan Y., (2001). "Automatic Image Segmentation by Integrating Color-Edge Extraction and Seeded Region Growing". IEEE Transactions on Image Processing. Vol 10, No 10, pp 1454-1466.
- [26] Kovesi P. "Edges are not just steps". Proceedings of ACCV2002 The Fifth Asian Conference on Computer Vision, Melbourne Enero 2002, pp 822-827.
- [27] Gil P., Torres F., Ortiz F.G. Detección de Objetos por segmentación multinivel combinada de espacios de color. 2005
- [28] Gaspar T. and Oliveira P. Monocular Depth from Focus Estimation with Complementary Filters. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation Shanghai International Conference Center Mayo 9-13, 2011, Shanghai, China.
- [29] Hecht E., Optics. Cuarta Edición. Addison Wesley & Sons I image2013-01-10\_16.48.23.png nc. 2001.
- [30] Faugeras O., Luong T., Maybank S. Camera self-calibration: theory and experiments. European Conference on Computer Vision, p. 321-334. (1992).
- [31] Portalés C. Entornos multimedia de Realidad Aumentada en el campo del arte. 2008. Ph.D Thesis. Universiad Politecnica de Valencia, España.
- [32] Kaiser E., Olwal A., McGee D., Benko H., Corradini A., Xiaoguang L., Cohen P., and Feiner S. Mutual disambiguation of 3d multimodal interaction in augmented and virtual reality. In ICMI '03: 5th international conference on Multimodal interfaces, pages 12–19, New York, NY, USA, 2003.

- [33] Kang and K. Ikeuchi, "Toward automatic robot instruction from perception: Recognizing a grasp from observation," IEEE Int'l Journal of Robotics and Automation, vol. 9, no. 4, Aug. 1993.
- [34] Iberall T., "The nature of human prehension: three dextrous hands in one,". IEEE International Conference of Robotics and Automation, 1987, pp. 396-401
- [35] Kang S.B. e Ikeuchi K., A framework for recognizing grasps, Tech. Rep. CMU-RI-TR-91-24, Carnegie Mellon University, Noviembre. 1991.
- [36] Cutkosky M.R., y Wright P.K., "Modeling manufacturing grips and correlations with the design of robotic hands," IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1986, pp. 1533-1539.
- [37] Feix T., Pawlik R., Schmiedmayer H., Romero J. Y Kragic´ D. A comprehensive grasp taxonomy. Proc Robotics, science and systems conference: Workshop on understanding the human hand for advancing robotic manipulation. 2011.
- [38] Norton K., Olds T. Antropométrica. Rosario. Argentina. Ed. Biosystem (2000).
- [39] Caillet R. Anatomía Funcional Biomecánica. Editorial Marbán, 1 Ed. (2006)
- [40] Viladot A. Lecciones Básicas de Biomecánica del Aparato Locomotor. Ed. Springer. Barcelona 2001.
- [41] Baillot Y. A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments.2001
- [42] Azuma, R. 1. A Survey of Augmented Reality. In Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6, 4 (Agosto 1997), Pag.355-385.
- [43] Kang S.B. and Ikeuchi K., "A grasp abstraction hierarchy for recognition of grasping tasks from observation," Proc. IEEE/RSJ Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, Yokohama, Japan, July 1993.
- [44] Santillan E., Detección y clasificación de objetos dentro de un salón de clases empleando técnicas de procesamiento digital de imágenes”, Tesis de Maestria, Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico 2008, Pag 63
- [45] Otero J. J., “Modelo interpolativo punto-superficie para calibrado de cámaras en visión artificial,” Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid 2002.
- [46] Bautista L.E, Santamaria N., Paredes H. “Real-time Monocular Vision-Based 3D Object Tracking System using Kalman filter”. XV SIMPOSIO DE

TRATAMIENTO DE SEÑALES, IMÁGENES Y VISIÓN ARTIFICIAL – STSIVA  
2010. Medellín, Colombia.

- [47] Bouguet S. (2011). Computational Vision [Online] Disponible en: [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).
- [48] Fajardo L., “Desarrollo de un método de fusión de regiones para segmentación de imágenes”, Tesis de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid 2009.
- [49] García E., “Detección y clasificación de objetos dentro de un salón de clases empleando técnicas de procesamiento digital de imágenes”, Tesis Maestral, Universidad Autónoma Metropolitana, México 2006, pp 63- 66.
- [50] Solera A., El filtro de Kalman, Nota Técnica, Departamento de investigaciones económicas, Banco Central de Costa Rica, Costa Rica 2003.
- [51] Sturm P., Maybank S.. On plane-based camera calibration: a general algorithm, singularities and applications. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition pp 432-437, 1999.
- [52] Maradei M.. Espinel F.. Ergonomía para el Diseño.. Ediciones UIS. 2011
- [53] Zhao J., Norman Badler I., Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures, ACM Transactions on Graphics (TOG) (1994) 313–336.
- [54] Balestrino A., De Maria G., Sciavicco L., Robust control of robotic manipulators, 9th IFAC World Congress, vol. 5, 1984, pp. 2435–2440.
- [55] Wolovich W.A., Elliott H., A computational technique for inverse kinematics, 23rd IEEE Conf. on Decision and Control, vol. 23, 1984, pp. 1359–1363.
- [56] Wampler C.W., Manipulator inverse kinematics solutions based on vector formulations and damped least-squares methods, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 16 (1) (1986) 93–101.
- [57] Nakamura Y., Hanafusa H., Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control, Transactions ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 108 (3) (1986) 163–171.
- [58] Samuel R. Buss, Jin-Su Kim, Selectively damped least squares for inverse kinematics, Journal of Graphics Tools 10 (3) (2005) 37–49.

- [59] Fletcher R., Practical Methods of Optimization, Segunda Edición, Wiley Interscience, New York, NY, USA, 1987.
- [60] Schmidt R., Disselhorst-Klug C., Silny J. y Rau G. A marker-based measurement procedure for unconstrained wrist and elbow motions. Nota técnica en Journal Of Biomechanics, Edición 32, Pag 615-621. 1999.
- [61] Villalba M. Protocolo de Análisis de Movimiento en los Brazos para diagnóstico Clínico. Universidad de los Andes. Bogota, 2003
- [62] Kalman, R.E. (1960). "A new approach to linear filtering and prediction problems". Journal of Basic Engineering 82 (1): 35–45. 2008.
- [63] Alcantarilla P., Bergasa L., Barea R., Lopez E., Ocaña M., "Sistema de localización y mapeado mediante visión artificial para asistir a la navegación de personas invidentes", Departamento de Electrónica Universidad de Alcalá, Madrid, 2009.
- [64] Faugeras, O. D. & Toscani, G. (1987) Camera calibration for 3D computer vision. Proc. International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, Silken, Japan, p. 240-247
- [65] Weng, J., Cohen, P. & Herniou, M. (1992) Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-14(10): 965-980.
- [66] Espinola A., "Sistema de Visión de un Robot Humanoide en un ambiente semiestructurado". Universidad Autonoma de Mexico. Mexico 2012
- [67] De la Escalera Arturo, Visión por computador, fundamentos y métodos. Ed. Prentice Hall, 2001.
- [68] Gonzalez, R. C. y Woods, R. E. (2000). Procesamiento de Imágenes Digitales. Editora Edgard Blücher.
- [69] Otsu N., "A threshold selection method from gray-level histogram", IEEE Transactions on System Man Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1, 1979, pp. 62-66.
- [70] Torrontegi, U. "Reconstrucción densa de modelos tridimensionales utilizando visión artificial". Tesis de Máster. Universidad del Pais vasco. España 2010.
- [71] Aristidou A. "Tracking and Modelling Motion for Biomechanical Analysis. Phd Dissertation. Cambridge University 2010.

- [72] Aristidou A, Lasenby J. "FABRIK: A fast, iterative solver for the inverse kinematics problem. Journal of Graphical Models # 73, Pag 243-260. 2011.
- [73] Karam M. "A framework for research and design of gesture-based human computer interactions". PhD. Tesis. Universidad de Southampton. 2006.
- [74] Dey, A. K. & Abowd, G. D. Towards a better understanding of context and context-awareness. Tech. rep., Georgia Institute of Technology, College of Computing. 1999.
- [75] Maradei M., Espinel F. Ergonomía para el Diseño. 2011. Ediciones UIS.
- [76] Granollers Toni, MPlu+a. Una Metodología que Integra la Ingeniería del Software, la Interacción Persona-Ordenador y La Accesibilidad en el Contexto de Equipos De Desarrollo Multidisciplinares. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. 2004
- [77] Norman Donald. User Centered System Design: New Perspectives on Human-Computer Interaction. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, 1986
- [78] Annett, J., & Duncan, K. D. (1967). Task analysis and training design. Journal of Occupational Psychology, 41, 211-221.
- [79] Moeslund T., Granum E. Pose Estimation of a Human Arm using Kinematic Constraints. En, 12th Scandinavian conference on image analysis (SCIA 01), Noruega, 2001.
- [80] Schmidt J., Jannik F. Kernel Particle for Real-Time 3D body tracking in monocular color images. Rzeszov University of Technology. En FG2006 IEEE, Reino Unido. 2006.
- [81] Agarwal A., Triggs B. 3D Human Pose from Silhouettes by relevance vector Regression. IEEE Internacional Conference on Computer vision and Patter Recognition, 2004.
- [82] Jaeggli T., Koller-Meier E., Van Gool L. Monocular Tracking with a mixture of view-Dependent learned models. Katholieke Universiteit Leuven, ESAT/VISICS 2006.
- [83] Sharp H., Rogers Y., Preece J. Interaction Design: Beyond Humand Computer Interaction. USA. John Wiley & Sons Inc. Segunda Edición. 2007.

- [84] Zhou F., Been-Lirn H., Billinghurst M. 2008. Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. *7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '08)*. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA.
- [85] Lee B., Chun J. ,Manipulation of Virtual Objects in Marker-less AR System by Fingertip Tracking and Hand Gesture Recognition. ICIS 2009, Seoul, Korea. Noviembre 24-26, 2009.
- [86] Machón E., ¿Qué es la Interacción Persona-Ordenador? Consultado en [www.alzado.org](http://www.alzado.org) el 7 de Febrero de 2010.
- [87] Roussou, M. (2004). "Learning by Doing and Learning Through Play: An Exploration of Interactivity in Virtual Environments for Children." *ACM Computers in Entertainment* 2(4): 1 - 23.
- [88] Johnson, L., Smith, R., Willis, H., Levine, A., and Haywood, K., (2011). The 2011 Horizon Report. Austin, Texas: The New Media Consortium.
- [89] Dorfmüller K. , Schmalstieg D. Finger tracking for interaction in augmented environments. En ISAR '01, pp. 55-64, 2001.
- [90] Haller M, Billinghurst M., Thomas B. Emerging Technologies of Augmented Reality. IGI Publishing, Hershey, PA, USA, 2006.
- [91] Bly S., Harrison S., y Irwin S.. Media spaces: bringing people together in a video, audio and computing environment. *Communications of the ACM*, 36(1):28–47, 1993.
- [92] Francis K. H. Quek. Toward a vision-based hand gesture interface. In *VRST'94: Proceedings of the conference on Virtual reality software and technology*, pages 17–31, River Edge, NJ, USA, 1994. World Scientific Publishing Co., Inc.
- [93] Ingram H.A., Donkelaar P., Cole J., Vercher. The role of proprioception and attention in visuomotor adaptation task. *Exp. Brain Res*, 132:114–126, 2000.
- [94] 5DT Data Gloves. Fifth Dimension Technologies, <http://www.5dt.com/>.
- [95] Fels S., Hinton G.. Glove-talkii: An adaptive gesture-to-formant interface. En *ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1995.

- [96] Baudel T. and M. Beaudouin-Lafon. Charade: remote control of objects using free-hand gestures. In *Communications of the ACM*, volume 36, pages 28–35, Julio 1993.
- [97] Puppet Works, <http://www.puppetworks.com>, Consultado noviembre 2012.
- [98] Motion Analysis Corporation, <http://www.motionanalysis.com>.
- [99] Amento B., Hill W., y Terveen L.. The sound of one hand: A wrist-mounted bio-acoustic fingertip gesture interface. *ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2002.
- [100] Rekimoto J. Gestur wrist and gesturpad: Unobtrusive wearable interaction devices. In *ISWC '01: IEEE International Symposium on Wearable Computers*, pagina 21, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.
- [101] Nefian A., Luhong Liang, Xiaobo Pi, Xiaoxing Liu, and Kevin Murphy. Dynamic bayesian networks for audio-visual speech recognition. *EURASIP. Journal on Applied Signal Processing*, 2002(11):1274–1288, 2002.
- [102] Bae S., Kobayash T., Kijima R. Tangible nurbs-curve manipulation techniques using graspable handles on a large display. S. Feiner and J.A. Landay, editors, *UIST*, paginas 81–90. ACM, 2004.
- [103] Malik S. y Laszlo J.. Visual touchpad: a two-handed gestural input device. In R. Sharma, T. Darrell, M.P. Harper, G. Lazzari, and M. Turk, editors, *ICMI*, pages 289–296. ACM, 2004.
- [104] Starner T. y A. Pentland. Visual Recognition of American Sign Language Using Hidden Markov Models. M.I.T. Media Laboratory, Cambridge MA.
- [105] Starner T., Auxier J., Ashbrook D.. The gesture pendant: A self-illuminating, wearable, infrared computer vision system for home automation control and medical monitoring. En *ISWC 2000*.
- [106] Lee W. Campbell and David A. Becker. Invariant features for 3-d gesture recognition. *Second International Workshop on Face and Gesture Recognition*, 1996.
- [107] Aggarwal J., Park S.. Human motion: Modeling and recognition of actions and interactions. In *3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 2nd

- International Symposium on (3DPVT'04), paginas 640– 647, Thessaloniki, Grecia, Septiembre 2004.
- [108] Bautista L., Archila. Tareas Fundamentales en la Realidad Aumentada, un Nuevo Enfoque. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Universidad de Pamplona. Vol. 1 2011. Pag. 33-28. Colombia 2011.
- [109] Starner T., Auxier J. The gesture pendant: A self-illuminating, wearable, infrared computer vision system for home automation control and medical monitoring. En ISWC 2000.
- [110] Ishii, H., Kobayashi M. y Arita K. (1994). "Iterative design of seamless collaboration media." *Communications of the ACM* 37(8): 83 – 97
- [111] Dorfmueller K. , Schmalstieg D. Finger tracking for interaction in augmented environments. En ISAR '01, pp. 55-64, 2010.
- [112] Song P., Yu H., Winkler S. Vision-based 3D Finger Interactions for Mixed Reality Games with Physics Simulation. *The International Journal of Virtual Reality*, 2009, 8(2):1-6.
- [113] Lee B., Chun J. , Manipulation of Virtual Objects in Marker-less AR System by Fingertip Tracking and Hand Gesture Recognition. ICIS 2009, Seoul, Korea. Noviembre 24-26, 2009.
- [114] Balakrishnan R. y Patel P. The padmouse: facilitating selection and spatial positioning for the non-dominant hand. En CHI '98: Conference on Human factors in computing systems, paginas 9–16. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1998.
- [115] Kurtenbach G.. The Design and Evaluation of Marking Menus. PhD thesis, Department of Computer Science, University of Toronto, Toronto, Canada, 1993.
- [116] Turk M. *Frontiers of Human-Centred Computing, Online Communities and Virtual Environments*, chapter Gesture Recognition. Springer-Verlag, 2001.
- [117] Pavlovic V., Sharma R. Visual interpretation of hand gestures for human-computer interaction: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 19(7):677{695, 1997.
- [118] Quek F., McNeill D. y Bryll R. Multimodal human discourse: gesture and speech. *ACM Trans. Comput.-Human Interact.*, 9(3):171{193, 2002.

- [119] Kessler G., Hodges L. y Walker N.. Evaluation of the cyberglove as a whole-hand input device. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 2(4):263{283,1995.
- [120] Robles-De-La-Torre, G. "The Importance of the sense of touch in virtual and real environments", *IEEE Multimedia*, Special issue on Haptic User Interfaces for Multimedia Systems, pp 24-30 (2006).
- [121] Iwata H., "Haptic interfaces", *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Application*, Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah (2003).
- [122] Terrillon J., Shirazi M., Fukamachi H. Comparative performance of diferent skin chrominance models and chrominance spaces for the automatic detection of human faces in color images. En *International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FG)* , pages 54{61, 2000.
- [123] Martin J. y Crowley J.. An appearance-based approach to gesture-recognition. En *International Conference on Image Analysis and Processing* , pages 340{347, Florencia, Italia, 2004.
- [124] M. Krueger. *Artificial Reality II* . Addison Wesley, Reading, MA, 2008.
- [125] Rekimoto Jun. Smartskin: an infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. En *CHI '02: SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, paginas 113–120, New York, NY, USA, 2002. ACM Press.
- [126] Rabiner L. y Juang J. *Fundamentals of Speech Recognition*. Prentice Hall PTR, Abril 200 3.
- [127] Alon J., Athitsos V. Simultaneous localization and recognition of dynamic hand gestures. *IEEE Motion Workshop*, 2005.
- [128] Starner T. Visual recognition of american sign language using hidden markov models. *Reporte Técnico*. 2009.
- [129] Nam Y.y Wohn K.. Recognition of space-time handgestures using hidden markov model, 2006.
- [130] Xiang C. y Balakrishnan R. Visionwand: interaction techniques for large displays using a passive wand tracked in 3d. *XVI annual ACM symposium on User interface software and technology*, paginas 173–182. ACM Press, 2007.

- [131] Park H. y Lee S. Wearable Augmented Reality System using Gaze. Interaction. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008. Cambridge, UK. 2009.
- [132] Reitinger B., Werlberger P., Bornik A., Beichel R., Schmalstieg D. Spatial Measurements for Medical Augmented Reality. International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'08). 2008.
- [133] Fernández B y Fernández J. Bare Hand Interaction in Tabletop Augmented Reality. SIGGRAPH 2009, New Orleans, Louisiana, Agosto 3–7, 2009.