

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y FACULTAD DE CIENCIAS DE LA

TIERRA Y EL ESPACIO

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN



INTERACCIÓN NATURAL CON REALIDAD AUMENTADA PARA LA
REALIZACIÓN DE TAREAS DE MANIPULACIÓN Y ENSAMBLAJE
VIRTUAL

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

PRESENTA:

PAUL TAMAYO SERRANO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. ULISES ZALDÍVAR COLADO

Culiacán, Sinaloa. Febrero de 2016

Resumen

En la industria, los costos por ensamblaje de piezas son bastante altos, llegando a representar el 40% del costo de producción, por lo tanto, se han buscado estrategias para reducir dichos costos. Una de estas estrategias es el ensamblaje utilizando realidad virtual, también conocido como ensamblaje virtual. Una desventaja importante del uso de la realidad virtual en estas tareas, es la baja percepción de realismo por parte del usuario. Esta percepción se debe a que el entorno de realidad virtual difiere del entorno de la vida real. Esto provoca que el usuario tenga que adaptarse al ambiente virtual para poder hacer uso de él, y posteriormente deberá adaptar su aprendizaje del mundo virtual al real. Lo cual no solo provoca un trabajo extra al usuario, sino que en algunos casos, también provoca un rechazo del uso de estas tecnologías por parte del usuario.

Con el fin de reducir el trabajo extra o rechazo de estas tecnologías por parte del usuario, se han desarrollado técnicas y herramientas que proveen una mejor percepción de realismo en las tareas de ensamblaje virtual. Dichas técnicas y herramientas incluyen aspectos visuales, acústicos, hápticos, etc. Uno de los aspectos más importantes para lograr una buena percepción de realismo es la interacción natural. La interacción natural se logra cuando el usuario puede trabajar con elementos virtuales de la misma manera en que lo haría con elementos reales. El principal problema detectado es que, aun con los esfuerzos que se han llevado a cabo para mejorar la percepción de realismo, ésta se encuentra lejos de ser igual a la del mundo real, y por lo tanto se necesita el desarrollo de mejoras a las técnicas y herramientas existentes o la creación de nuevas.

En este trabajo se desarrolló un ambiente de ensamblaje virtual que hace uso de la realidad aumentada como técnica para ayudar a los usuarios a tener una percepción más natural, en comparación con los sistemas de realidad virtual pura. El ambiente hace uso de realidad aumentada, dispositivos electromagnéticos de captura de movimiento, guante de datos y está provisto de comportamiento dinámico de objetos mediante la integración de un motor de modelado basado en física. Como contribuciones, se creó un sistema que permite una interacción bimanual por parte del usuario, proveyéndolo de una manipulación natural con los elementos de la simulación. Como contribución principal, se creó una técnica híbrida opto-electromagnética, que permite localizar en todo momento, las manos reales del usuario y sincronizarlas con las manos virtuales de la simulación.

Palabras Clave:

Ensamblaje, Realidad Virtual, Realidad Aumentada, Ensamblaje Virtual, Técnicas de Interacción Natural, Percepción de Realismo, Comportamiento Dinámico de Objetos.

Abstract

In the industry, the costs of pieces assembly are fairly high, reaching a 40% of the production's total cost, hereby, strategies to reduce such costs have been seek. One of these strategies is the assembly process making use of virtual reality, also known as virtual assembly. One important disadvantage of the use of virtual reality in such tasks is the low perception of realism from the user. This perception is because the virtual reality's environment differs from the one of real life. This forces the user to adapt to the virtual environment to be able to use it, and afterwards, he must adapt that learning of the virtual world to the real one. This not only provokes an extra work load to the user, but in some cases, it generates a rejection from the user to these technologies.

Aiming to reduce the user's extra work load or the rejection to these technologies, techniques and tools have been developed that provide a better realism perception in virtual assembly tasks. These techniques and tools include aspects of several types: visual, acoustic, haptic, etc. One of the most important aspects to achieve a good realism perception is the natural interaction. Natural interaction is achieved when the user can work with virtual elements in the same way as he would with real ones. The main problem detected is that, even with all the efforts for improving the reality perception of the user, it is far from being equal to the real world; therefore, it is needed to develop improvements to the existing techniques and tools, or the creation of new ones.

In this work, a virtual assembly environment has been created; it makes use of augmented reality as a technique to help users to have a better natural perception, comparing it with pure virtual reality systems. The environment makes use of augmented reality, electromagnetic trackers for movement capture, data gloves, and also dynamic behavior of objects, thanks to the integration of a physics based engine. As contributions, a system was created that allows the user to do a bimanual interaction, providing him with a natural manipulation of the simulation's elements. As main contribution, a hybrid opto-electromagnetic technique was developed, which allows localizing at all moment, the user's real hands and synchronizing them with the simulation's virtual hands.

Keywords:

Assembly, Virtual Reality, Augmented Reality, Virtual Assembly, Natural Interaction Techniques, Perception of Realism, Dynamic Behavior of Objects.

Agradecimientos

A mi asesor, Dr. Ulises Zaldívar Colado, por su ayuda, apoyo y paciencia como asesor durante todo este tiempo. Pero sobretodo, por brindarme su amistad y la de su familia.

Al CONACyT, por el apoyo económico brindado.

Al posgrado de Ciencias de la Información, por la oportunidad de estudiar en él.

A la coordinadora del posgrado, Dra. Xiomara Penélope Zaldívar Colado, por todo el apoyo brindado.

A mis profesores, por todo lo que me enseñaron.

A mis revisores, por su tiempo, y valiosa retroalimentación.

A mis familiares y amigos, por todo su apoyo y afecto incondicional.

Índice General

Resumen.....	III
Abstract.....	V
Agradecimientos.....	VII
Índice de Figuras.....	XIII
Índice de Tablas.....	XV
Índice de Ecuaciones.....	XV
Lista de Abreviaturas.....	XV
1. Introducción.....	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Motivación	1
1.3. Solución Propuesta.....	2
1.4. Justificación	2
1.5. Objetivos General y Particulares	3
1.6. Hipótesis de Investigación.....	4
1.7. Preguntas de Investigación	4
1.8. Organización de la Tesis	5
2. Marco Teórico.....	7
2.1. Ensamblaje	7
2.2. Realidad Virtual	9
2.3. Ensamblaje Virtual	10
2.4. Realidad Aumentada	11
2.5. Hardware para VR y AR	12
2.5.1. Head-Mounted Display	12
2.5.2. Guantes de Datos	14
2.5.3. Trackers	16
2.5.4. Dispositivos Hápticos	18
3. Estado del Arte.....	21

3.1.	Características Deseables en un Sistema de Ensamblaje Virtual	21
3.1.1.	Visualización del Entorno de Trabajo y Objetos Virtuales	21
3.1.2.	Ayuda Visual para la Secuencia de Ensamblaje.....	22
3.1.3.	Algoritmo de Agarrado de Piezas.....	24
3.1.4.	Implementación del Algoritmo de Ensamblaje	25
3.1.5.	Comportamiento Físico	27
3.1.6.	Captura de Movimientos de las Manos y Cabeza del Usuario	28
3.1.7.	Retroalimentación Háptica.....	28
3.1.8.	Retroalimentación Acústica	29
3.1.9.	Sincronización de Manos Reales con Manos Virtuales en Sistemas de AR.....	29
3.2.	Ejemplos de Sistemas de Ensamblaje Virtual.....	31
3.3.	Ejemplos de Sistemas de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada	38
3.4.	Análisis de Resultados	46
4.	Desarrollo del Ambiente de Realidad Aumentada para Ensamblaje	
	Virtual	49
4.1.	Diseño.....	49
4.2.	Etapa 1: Creación del Entorno de AR con ARToolKit.....	53
4.2.1.	Desarrollo	53
4.3.	Etapa 2: Validación del Entorno de AR para la Interacción con Objetos Virtuales y Comportamiento Dinámico.....	58
4.3.1.	Desarrollo	58
4.3.2.	Pruebas y Experimentos.....	65
4.3.3.	Conclusiones de la Etapa y Propuestas para la Etapa Siguiete	69
4.4.	Etapa 3: Desarrollo de la Técnica Híbrida de Manipulación de Objetos en Sistemas de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada	71
4.4.1.	Desarrollo	71
4.4.2.	Pruebas y Experimentos.....	78
4.4.3.	Conclusiones de la Etapa y Propuestas Finales para el Sistema de AR	81
4.5.	Etapa 4: Sistema de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada	83
4.5.1.	Desarrollo	83
4.5.2.	Pruebas y Experimentos.....	91
4.5.3.	Conclusiones de la Etapa.....	95

5. Conclusiones y Perspectivas Futuras de Investigación	97
Referencias	101
Anexos	107
A. Cuestionario	107
B. Datos de la Etapa 3.....	109
C. Publicaciones y Conferencias	113

Índice de Figuras

Figura 2.1. A) Diagrama Conceptual de un HMD Transparente Óptico. B) Diagrama Conceptual de un HMD Transparente de Video. Figura tomada de [15].	13
Figura 2.2. Guante de Datos, y su uso dentro de una simulación.	15
Figura 2.3. Tracker Electromagnético.	18
Figura 2.4. Interfaces Hápticas A) de Escritorio, B) Portátil.	20
Figura 3.1. A) Visualización Directa. B) Visualización por HMD. Tomados de [29] y [11]	22
Figura 3.2. Ayudas Visuales A) Colores para Colisiones. B) Colores para Orden de Ensamblaje. C) Grafo de Enlaces. Tomados de [30], [11] y [31].	23
Figura 3.3. A) Visualización de Piezas Cóncavas. B) Piezas Convexas para Agarrado. C) Ejemplo de Agarrado de Pieza. Tomado de [8].	25
Figura 3.4 A) Partes con sus Vectores. B) Partes Ensambladas. Tomado de [31].	26
Figura 3.5. Técnica de Ensamblaje de VADE. Tomado de [25].	27
Figura 3.6. Manos con Marcas para la Detección del Índice y Pulgar. Tomado de [37].	30
Figura 3.7. Detección de las Manos del Usuario Enfatizando de los Dedos Índice y Pulgar para Manipular Objetos. Tomado de [40].	31
Figura 3.8. Dedos Índice y Pulgar Usando la Interfaz Háptica. Tomado de [36].	32
Figura 3.9. Esquema de Funcionamiento de VADE. Tomado de [25].	34
Figura 3.10. Ejemplo de Uso del Sistema SHARP. Tomado de [44].	36
Figura 3.11. A) Sistema con Ayuda Visual Interactiva. B) Grafo de Enlaces. Tomados de [8].	37
Figura 3.12. Ejemplos De Sistemas de Realidad Aumentada para Ensamblaje Virtual de Tipo Instruccional. A) Tomado de [20]. B) Tomado de [56]. C) Tomado de [57].	39
Figura 3.13. Arquitectura de Hardware. Ejemplo del Sistema para Ensamblar. Tomado de [38].	40
Figura 3.14. A) Entorno de Trabajo con su Hardware. B) Ejemplo del Sistema. Tomados de [39].	41
Figura 3.15. A) Área de Trabajo con su Hardware. B) Ejemplo de Ensamblaje. Tomados de [18].	42
Figura 3.16. A) Entorno de Trabajo. B) Ejemplo de Ensamblaje. Tomados de [21].	44
Figura 3.17. Ejemplo de ARDnA para Crear el Modelo Virtual, Basado en un Carrito Real. Tomado de [65].	45
Figura 3.18. Vehículo a Armar. Tomado de [66].	46
Figura 4.1. Metodología de Trabajo.	50
Figura 4.2. Arquitectura de Hardware Etapa 1.	53
Figura 4.3. Arquitectura de Software Etapa 1.	54
Figura 4.4. Unificación de las Arquitecturas de Hardware y Software Etapa 1.	55
Figura 4.5. Ejemplo de marca fiducial, de la cual se obtiene su matriz de transformación con respecto a la cámara.	55
Figura 4.6. Marca fiducial como centro de la simulación.	57
Figura 4.7. Arquitectura de Hardware Etapa 2.	59
Figura 4.8. Arquitectura de Software Etapa 2.	59
Figura 4.9. Unificación de las Arquitecturas de Hardware y Software Etapa 2.	60

Figura 4.10. A) Multimarca constituida por una matriz de 4x3 marcas fiduciales tomado de[68]. B) Multimarca con 6 marcas activas, en verde se presentan las marcas detectadas y en rojo la no detectada, pero calculada con base en las otras	62
Figura 4.11. Objetos virtuales (objetos de colores) con sus respectivas cajas contenedoras (wireframes blancos).....	63
Figura 4.12. A) Origen de la simulación igual a la posición y orientación de la multimarca. B) Una vez utilizada para generar el origen de la simulación, la multimarca puede ser reposicionada. C) Otro uso de la multimarca. D) Reajuste del origen de la escena.....	64
Figura 4.13. A) Suelo definido en el origen de la simulación. B) Objetos 3D hechos en OpenGL®. C) Objetos 3D con sus respectivas cajas envolventes de comportamiento dinámico.....	65
Figura 4.14. A) Se muestran las dos manos virtuales. B) Manos virtuales con su caja envolvente. C) Mano derecha interactuando con los objetos azul y rojo.	65
Figura 4.15. A) Escena con las manos virtuales, objetos originales y cubos. B) Objetos con sus respectivas cajas envolventes. C) Se generó una mayor cantidad de cubos. D) Interacción de la mano virtual con los objetos generados.....	66
Figura 4.16. Graficas comparativas del desempeño de las 3 computadoras. El eje Y son los fps, el eje X la cantidad de oleadas, y las líneas de colores representan la cantidad de marcas.....	68
Figura 4.17. Esquema cinemático de la mano virtual tomado de [69].	70
Figura 4.18. Arquitectura de Hardware Etapa 3.	72
Figura 4.19. Arquitectura de Software Etapa 3.....	73
Figura 4.20. Unificación de las Arquitecturas de Hardware y Software Etapa 3.	74
Figura 4.21. Entorno experimental con el objeto a manipular y el punto destino con sus respectivas regiones de proximidad.	79
Figura 4.22. Arquitectura de Hardware Etapa 4.	84
Figura 4.23. Arquitectura de Software de la Etapa 4.	85
Figura 4.24. Unificación de las Arquitecturas de Hardware y Software Etapa 4.	86
Figura 4.25. A) Esquema Cinemático Anterior de la Mano. B) Nuevo Esquema Cinemático de la Mano.	87
Figura 4.26. A) Caja Envolvente Convexa. B) Malla Triangular Envolvente para Piezas Cóncavas. ...	88
Figura 4.27. Dos Piezas Ensambladas con la Técnica Descrita.....	88
Figura 4.28. Escena con Diagrama de Ensamblaje.....	89
Figura 4.29. Líneas Indicando la Orientación Correcta de ensamblaje.....	90
Figura 4.30. A) Condición Experimental en el Mundo Real. B) Usuario Realizando el Ensamblaje Real.....	92
Figura 4.31. A) Condición Experimental con Realidad Virtual. B) Condición Experimental con Realidad Aumentada.....	92
Figura 4.32. Resultados Promedio de TCT, para cada Condición Experimental.	94

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Características de las 3 computadoras utilizadas para el experimento de rendimiento.	67
Tabla 4.2. Resultados del experimento Etapa 3.....	80
Tabla 4.3. Resultados de la encuesta Etapa 3.	81
Tabla 4.4. Resultados de los Procesos Experimentales.....	93
Tabla 4.5. Resultados ANOVA de las Condiciones Experimentales.....	94

Índice de Ecuaciones

Ecuación 4.1. Matriz de transformación para marcas fiduciales.	56
Ecuación 4.2. Obtención de la matriz de transformación de la marca (mano) con respecto al centro de la simulación.....	76
Ecuación 4.3. Obtención de la matriz de transformación del tiempo actual con respecto al tiempo cero.....	77
Ecuación 4.4. Obtención de la matriz de transformación de la marca (mano) actual, con respecto al centro de la simulación.	77

Lista de Abreviaturas

AR: Augmented Reality: Realidad Aumentada

VA: Virtual Assembly: Ensamblaje Virtual: Ensamble Virtual

VR: Virtual Reality: Realidad Virtual

1. Introducción

1.1. Planteamiento del Problema

El ensamblaje es la manipulación y la unión de piezas para formar un todo [1], este todo puede ser a su vez, una pieza más, o el producto final a crear. El ensamblaje, como una actividad industrial, por definición, infiere el uso de piezas físicas para llevarlo a cabo. Dicho proceso es costoso, llegando a representar un 40% del costo total de producción [2]. Además, en la práctica, muchas de las piezas usadas en el ensamblaje, pueden ser frágiles, costosas, difíciles de manipular, o su uso y/o manipulación pueden representar problemas para la salud, de forma directa o indirecta [3].

Con el fin de reducir los problemas y costos asociados con el manejo de piezas físicas, se ha empleado el uso de la Realidad Virtual (VR por sus siglas en inglés de Virtual Reality) en tareas de ensamblaje [4-11]. Existen varias ventajas al usar la VR, las más tangibles son: el no necesitar tener las piezas físicas para poder aprender a ensamblarlas; no existe la desventaja de dañar piezas sensibles por inexperiencia en su manejo; no existe el problema de disponibilidad de piezas, ya que se pueden generar tantas y cualquiera como sea necesario; se reducen los problemas, antes mencionados, de salud por malas posturas, accidentes por ignorancia o falta de entrenamiento en la manipulación de las piezas. La principal desventaja del uso de la VR en las tareas de ensamblaje, es la limitada percepción de “realismo” del usuario, la cual puede afectar el desempeño de la tarea, una vez que se lleva a la práctica. Esta desventaja se ha combatido con el uso de sistemas más inmersivos, como es el uso de visualizadores montados en la cabeza (HMD por sus siglas en inglés de Head-Mounted Display) o las tecnologías hápticas de retroalimentación [12-14].

1.2. Motivación

La Realidad Aumentada (AR por sus siglas en inglés de Augmented Reality), es la combinación del entorno real, con la superposición de elementos virtuales [15, 16]. Esto le

permite tener algunas de las ventajas de la RV, y combinarlas con la percepción del mundo real de las personas. Aprovechando esta tecnología y aplicándola al ensamblaje, se han obtenido buenos resultados [17-21].

Sin embargo, dichos sistemas con realidad aumentada para ensamblaje, tienen desventajas que afectan de forma negativa el nivel de realismo de las simulaciones. Estos sistemas se pueden enriquecer con el uso de las técnicas y tecnologías presentes en los ambientes virtuales. Añadiendo dichos elementos, es posible crear nuevas estrategias para contrarrestar sus desventajas y lograr así, simulaciones que el usuario sienta son, iguales a las interacciones naturales en el mundo real.

1.3. Solución Propuesta

Con el fin de incrementar la percepción de realismo en las tareas de ensamblaje virtual, se desarrolló un ambiente de ensamblaje virtual que hace uso de la realidad aumentada como técnica para ayudar a los usuarios a tener una percepción más natural, en comparación con los sistemas de realidad virtual pura. El ambiente hace uso de realidad aumentada, dispositivos electromagnéticos de captura de movimiento, guante de datos y está provisto de comportamiento dinámico de objetos mediante la integración de un motor de modelado basado en física. Se desarrolló e implementó una técnica híbrida que permite la localización de las manos reales del usuario en todo momento, y de esta forma, sincronizarlas con las manos virtuales de la simulación.

1.4. Justificación

El trabajo de ensamblado es básico en la industria actual, ya que muchas de las máquinas o herramientas que se fabrican hoy en día son o muy grandes, para ser hechas en una sola pieza; o requieren de materiales u otras piezas que pueden no estar disponibles en la zona y deban ser transportados hasta el área de fabricación. Además, el ensamblaje en piezas, nos permite intercambiarlas según sea necesario (ya sea por desgaste de uso, daños por accidentes, calidad necesaria de una pieza, o cualquier otra razón que conlleve a la necesidad de reemplazar), en lugar de tener que cambiar al todo.

Sin embargo, esta tarea puede no ser trivial, ya que desde el mismo entrenamiento en el uso, manipulación y ensamblaje de las piezas; hasta el armado del producto final, pueden suceder varios accidentes o contratiempos. Con el fin de evitar estos contratiempos, se ha recurrido a la VR para sustituir ciertas fases del ensamblaje que no requieren de la existencia de las piezas físicas, y que, gracias al uso de las tecnologías de VR, puede incluso ser más económico para la industria. Sin embargo, un problema implícito del uso de tecnologías de VR es la percepción de realismo que le proveen al usuario. Dicho realismo influye directamente en el desempeño del usuario, tanto para empezar a usar los sistemas VR, hasta en la transición del trabajo con el ambiente virtual al real. En algunos casos, esta dificultad por la que debe pasar el usuario es percibida por él como insoportable y le provoca un rechazo al uso de dichas tecnologías.

Recientemente, con el auge de la AR, se decidió implementarla en las tareas de ensamblaje. Esta implementación, si bien ya está dando buenos resultados, es aún un área de investigación tanto de análisis como de mejora de métodos. Uno de los puntos principales a mejorar es la percepción de realismo por parte del usuario. De forma innata, la AR provee un nivel de realismo mayor que la VR pura, esto gracias a que se presentan elementos del mundo real, y se le superponen elementos virtuales. Sin embargo, aspectos como la interacción natural son un problema tanto de los ambientes del VR como de los de AR. En la presente tesis, se trabaja para mejorar la percepción de realismo del usuario, haciendo énfasis en la interacción natural como un medio de lograrla. Logrando así que el usuario tenga una aceptación mayor de dichos sistemas, y le sea más sencillo el realizar su tarea en el entorno real.

1.5. Objetivos General y Particulares

Objetivo General:

- Validar el uso de la AR con elementos de ambientes virtuales para mejorar el desempeño del usuario en tareas de manipulación y ensamblaje virtual.

Objetivos Particulares:

- Diseñar, modelar y exportar piezas mecánicas.
- Implementar la AR para la definición del sistema de coordenadas de la simulación, y la creación de una mesa de trabajo virtual sincronizada con la del entorno real.
- Implementar la AR para la superposición de piezas virtuales sobre el área de trabajo real.
- Desarrollar e implementar una técnica para la sincronización de las manos reales del usuario, con las manos virtuales de la simulación.
- Desarrollar e implementar una técnica de agarre para la manipulación de las piezas modeladas.
- Implementar un motor de modelado basado en física para la simulación del comportamiento natural de las piezas virtuales.
- Implementar una técnica de ensamblaje de piezas.
- Desarrollar un procedimiento experimental para validar la propuesta del uso de AR en el ensamblaje virtual.

1.6. Hipótesis de Investigación

La integración de las tecnologías de Realidad Aumentada con elementos de ambientes virtuales mejorará el desempeño de los usuarios en tareas de manipulación y ensamblaje virtual.

1.7. Preguntas de Investigación

¿El tiempo de finalización de la tarea de ensamblaje, será menor en sistemas de realidad aumentada o en los de realidad virtual?

¿Cualitativamente, cuál tecnología tendrá una mayor aceptación por parte de los usuarios en tareas de ensamblaje virtual, la realidad virtual o la realidad aumentada?

¿El costo computacional inherente a las aplicaciones de realidad aumentada, provocará una velocidad de simulación menor a los 30 cuadros por segundo, en aplicaciones de ensamblaje en tiempo real?

1.8. Organización de la Tesis

A continuación se presenta la organización de este documento de tesis.

En el capítulo II se detalla el marco teórico. Este capítulo es el sustento de la investigación, se presentan las definiciones básicas que permiten contextualizar el desarrollo del presente trabajo de tesis.

En el capítulo III se presenta el estado del arte. Los trabajos más novedosos de ensamblaje con realidad virtual y realidad aumentada son examinados. Se describen las fortalezas y debilidades de los trabajos, y con base en ellas, se logra obtener la información necesaria para crear el sistema propuesto en este trabajo de tesis.

El capítulo IV se centra en la metodología, donde se explican los pasos a seguir para poder probar la hipótesis y validar así la investigación. La metodología se presenta en etapas de desarrollo del sistema. En cada etapa se explica el sistema creado hasta ese punto, su estructura y las tecnologías utilizadas. Se explican las arquitecturas de hardware y software empleadas, y posteriormente la unificación de ambas para implementar el sistema. En algunos casos, si es pertinente, se presentan pruebas y experimentos de la etapa. En los casos que aplica también se presentan las conclusiones y los trabajos a desarrollar en la etapa siguiente.

Las conclusiones finales del trabajo de tesis se presentan en el capítulo V. También se proponen trabajos a futuro para extender la actual investigación.

Finalmente, se presentan las referencias bibliográficas utilizadas en el trabajo. Posteriormente, se muestran los anexos, como son: publicaciones realizadas, exposiciones, participaciones en congresos, así como el cuestionario aplicado a los sujetos que participaron en la experimentación.

2. Marco Teórico

2.1. Ensamblaje

En su manera más simple, el ensamblaje surgió desde que el ser humano empezó a crear sus herramientas. Las primeras lanzas que el cazador primitivo usó, fueron probablemente solo palos de madera con una punta afilada. Las siguientes versiones debieron ser las que utilizaron una punta de algún material, como puede ser piedra o hueso; estas puntas estaban fijadas en un extremo de un palo. Lo anterior es ejemplo del ensamblaje de por lo menos dos piezas, la punta y mástil. Ésta nueva versión de la lanza, tenía una gran ventaja contra su predecesor (la cual es un punto importante del ensamblaje), en caso de dañarse alguna de las partes que lo componían, se podía retirar solo esa parte, y reemplazarla por otra nueva, esto en contraste con la versión anterior, la cual, en caso de dañarse, requería de su reemplazo. Otro ejemplo primitivo de ensamblaje fue el del martillo, en un principio, la herramienta pudo ser un hueso como el fémur, y su versión mejorada sería muy parecida al ejemplo de la lanza, una parte de material duro para la cabeza, y otro para el mango, nuevamente, una de las principales ventajas es la posibilidad de cambiar una pieza por alguna otra parecida en caso de dañarse.

Para resaltar la importancia del ensamblaje, tomaremos como ejemplo uno de los inventos más importantes realizados por el hombre, la rueda. Es difícil encontrar hoy en día, a alguien que opine que la rueda no es, y no fue, uno de los logros más importantes de la humanidad; sin embargo, la rueda por sí sola, no es capaz de hacer casi nada que nos sea útil, su utilidad se encuentra cuando se le ensambla con otras piezas, para formar herramientas más complejas. Las ruedas de una carreta sirven de poco, sin el eje que las une y les permite rotar, y que a su vez las ayuda a formar parte de ella. El molino de agua tiene muchas ruedas interconectadas a modo de engranes, y es solo gracias a todas esas piezas, que es posible utilizar su fuente de energía para el fin con el que fue hecho el molino. Así mismo, los engranes de un reloj sirven de poco si se les aísla, pero juntos y en un orden adecuado, permiten llevar el conteo de algo tan valioso como es el tiempo.

El ensamblaje tiene varias ventajas, algunas de las principales son:

- Permite la creación de objetos, los cuales no pueden ser creados en una sola pieza. Para ilustrar este punto podemos pensar en herramientas u objetos pequeños que puedan ser fabricados en una sola pieza, por ejemplo: platos, vasos, copas de metal, cuchillos de metal, etc. Todos ellos pueden hacerse al vaciar el material del que están hechos en un molde. Sin embargo, es impráctico y en ocasiones imposible hacer eso a gran escala. Es más fácil hacer un avión compuesto por un conjunto de piezas ensambladas, que intentar crear uno de una sola pieza.
- Permite el reemplazo de las piezas que lo componen. En caso de que una pieza se dañe, por accidente o porque se termine su vida útil, el ensamblaje nos permite cambiarla por otra, ya sea porque es más nueva, o porque es mejor según algunos criterios de selección.
- Los objetos ensamblados, pueden realizar funciones más complejas que los objetos simples o de una sola pieza.

El ensamblaje, como una actividad industrial, por definición, infiere el uso de piezas físicas para llevarlo a cabo. Dicho proceso es costoso, llegando a representar un 40% del costo total de producción [2]. Además, como toda actividad humana, conlleva ciertos riesgos de diferente índole. En la práctica, muchas de las piezas usadas en el ensamblaje, pueden ser:

- Frágiles, siendo un riesgo su manipulación por personal inexperto, ya que podría resultar en la pieza siendo dañada o destruida.
- Muy costosas, ya sea en su fabricación por los materiales que necesita, o porque en la zona donde se realizará el ensamblaje no se dispone de la maquinaria o tecnología necesaria para crear esa pieza, y es necesario trasladarla de otra región.
- Difíciles de manipular, ya sea porque su tamaño y/o peso dificulten su manejo, y que se requiera del uso de herramientas especiales.

- Su uso y/o manipulación pueden representar problemas para la salud, de forma directa (que se compongan o contengan materiales de riesgo para la salud) o indirecta (como se muestra en [3]).

2.2. Realidad Virtual

La Realidad Virtual (VR por sus siglas en ingles de Virtual Reality) es definida por la RAE como: “Representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informático, que da la sensación de su existencia real” [22]. Dicha definición no es lo suficiente para los nuevos desarrollos que se han llevado a cabo en el área. Esta definición bien podría aplicarse incluso a las películas actuales, las cuales ya pueden ser producidas por sistemas informáticos y dar una gran sensación de existencia real. Sin embargo, carecen de puntos importantes que debería tener una buena simulación de realidad virtual.

Para enriquecer esta definición de VR, haremos uso de la que nos proponen en [23]: “La Realidad Virtual es una interface usuario-computadora de gama alta que implica una simulación de tiempo real e interacciones a través de múltiples canales sensoriales. Estas modalidades sensoriales son visual, auditorio, táctil, olor y sabor.” Dicha definición se encuentra más acorde a lo que es la VR actualmente, ya que constantemente se busca el crear hardware que permita al usuario utilizar sus sentidos naturales dentro de las simulaciones. Además, una buena simulación de VR, siempre permite que el usuario interactúe con el entorno virtual, y que dichas acciones repercutan de alguna manera en la simulación en tiempo real.

Las tecnologías de VR hacen uso de una o más interfaces humano-computadora para proveer varias sensaciones (visual, háptica, auditiva, etc.), las cuales le dan al usuario la sensación de que se encuentra presente en el mundo virtual. Esto permite que se adentre en la escena generada por computadora e interactúe usando movimientos humanos naturales. El objetivo final es permitir que el usuario interactúe en el entorno virtual a como él interactuaría en el mundo real [9].

Con el fin de reducir los problemas y costos asociados con el manejo de piezas físicas, se ha empleado el uso de la VR en tareas de ensamblaje [4-11].

2.3. Ensamblaje Virtual

De forma sencilla, se puede decir que a la aplicación de las tecnologías de VR en tareas de ensamblaje se les conoce como Ensamblaje Virtual (VA por sus siglas en inglés de Virtual Assembly), sin embargo, con el fin de dar una explicación más precisa, algunos autores se han dado a la tarea de contribuir con sus definiciones, según el contexto de sus trabajos. Algunas de estas definiciones son:

- Según [4], el VA se define como: “El uso de herramientas computacionales para hacer o ‘asistir con’ decisiones de ingeniería relacionadas con el ensamblaje a través de análisis, modelos predictivos, visualización, y representación de datos sin la realización física del producto o procesos de apoyo”.
- En [24] proponen su definición de VA como: “la habilidad para ensamblar modelos CAD de partes usando una interfaz inmersiva tridimensional con movimientos humanos naturales”.
- En su trabajo, [9] proponen su definición de VA como: “la capacidad de ensamblar representaciones virtuales de modelos físicos a través de la simulación del comportamiento realista del entorno, e interacción de partes para reducir la necesidad de prototipos físicos de ensamblaje, resultando en la habilidad de hacer más diseños y decisiones generales del ensamblaje en un ambiente inmersivo generado por computadora”.

Existen varias ventajas al usar la VR en tareas de ensamblaje, las más tangibles son:

- El no necesitar tener las piezas físicas para poder aprender a ensamblarlas.
- No existe la desventaja de dañar piezas sensibles por inexperiencia en su manejo.
- No existe el problema de disponibilidad de piezas, ya que se pueden generar tantas y cualquiera como sea necesario.

- Los problemas (antes mencionados) de salud por malas posturas o accidentes por ignorancia o falta de entrenamiento en la manipulación de las piezas.

La principal desventaja del uso de la VR en las tareas de ensamblaje es:

- La percepción de “realismo” del usuario, la cual puede afectar el desempeño de la tarea, una vez que se lleva a la práctica. Esta desventaja se ha combatido con el uso de sistemas más inmersivos, como es el uso de visualizadores montados en la cabeza (HMD por sus siglas en ingles de Head-Mounted Display) o las tecnologías hápticas de retroalimentación [8, 11-14, 25].

2.4. Realidad Aumentada

La Realidad Aumentada (AR por sus siglas en ingles de Augmented Reality), es una variación de la VR, la cual se considera menos obstructiva [26]. La VR adentra completamente a un usuario en el entorno virtual, y mientras el usuario se encuentra completamente inmerso, es incapaz de ver el mundo real a su alrededor. Por su lado, la AR le permite al usuario ver el mundo real, con objetos virtuales superpuestos o combinados con el entorno real. Por lo tanto, la AR reemplaza partes de la realidad en lugar de reemplazarla completamente [15, 16].

La AR tiene como ventajas:

- El poder tomar todas o algunas de las ventajas de la VR.
- El permitirle al usuario conservar parte de su percepción del mundo real, lo que le permite sentirse más familiar y cómodo con sus actividades.

La principal desventaja de la AR es:

- El tiempo de procesamiento necesario se vuelve más demandante en la AR que en la VR, ya que en el mundo real estamos acostumbrados a un tiempo de procesamiento al que se le suele conocer como “tiempo real”, y si la aplicación de

AR no es capaz de trabajar en tiempo real, entonces notaríamos un retraso entre lo que visualizamos y el cómo se debería ver.

Aun con las desventajas de la AR, se han llevado a cabo trabajos aplicándola al ensamblaje, algunos de ellos son: [17-21].

2.5. Hardware para VR y AR

Para mejorar la facilidad de uso de las tecnologías de VR se han creado herramientas físicas, las cuales mejoran el nivel de inmersión en comparación con los instrumentos clásicos como mouse, teclado y monitor. Dichas herramientas no solo facilitan el uso de las aplicaciones de VR, sino que también existen las que tienen por objetivo el mejorar la percepción de realismo del usuario. Estas herramientas pueden ser usadas en sistemas de AR (algunas requieren pequeñas modificaciones), e incluso algunas son creadas teniendo como objetivo su uso en aplicaciones de AR. A continuación se describen algunas de esas herramientas.

2.5.1. Head-Mounted Display

HMD (del inglés Head-Mounted Display), literalmente, un visualizador montado en la cabeza, es el nombre que se usa para definir a un conjunto de aparatos (que se colocan en la cabeza del usuario), cuya función principal es mostrar imágenes generadas o procesadas por computadora (por medio de visualizadores desplegados cerca del ojo del usuario). En español, se les conoce popularmente como cascos de realidad virtual, sin embargo; actualmente también se presentan en la forma de gafas. Dependiendo de la cantidad de visualizadores, se les clasifica en dos tipos, monoculares, si solo hay un visualizador para un solo ojo; y binoculares si existen dos visualizadores, uno para cada ojo.

Los HMD para VR se denominan HMDs de visión cerrada (en inglés closed-view HMDs). Debido a que deben de ser completamente inmersivos, como su nombre lo indica, son

cerrados frente a los ojos del usuario, de forma que se le impide ver el mundo real, y solo puede percibir el mundo de la simulación.

Para la AR, ya que es necesario percibir el mundo real y luego sobreponer elementos virtuales, se les denomina HMDs transparentes (en inglés see-through HMDs). Según la forma en que visualiza la escena real, existen dos posibles tipos de HMD para AR, tal como los define [15]:

- HMDs transparentes ópticos (en inglés Optical see-through HMDs). Estos HMDs poseen visualizadores transparentes y parcialmente reflejantes, los cuales le permiten ver el mundo real al usuario con sus propios ojos. Las imágenes generadas por computadora son proyectadas sobre los visualizadores, esto permite que el usuario vea el mundo real y la superposición de lo virtual sobre éste. La **Figura 2.1A** muestra el diagrama conceptual de dichos HMDs.
- HMDs transparentes de video (en inglés Video see-through HMDs). Estos son HMDs de visión cerrada a los cuales se les monta una o dos cámaras de video. Gracias a dichas cámaras es que se captura la escena del mundo real, dicha escena se pasa al ordenador y se le superponen los objetos virtuales. Posteriormente, la escena real con los objetos virtuales superpuestos se le muestran al usuario por medio de los visualizadores. La **Figura 2.1B** muestra el diagrama conceptual de dichos HMDs.

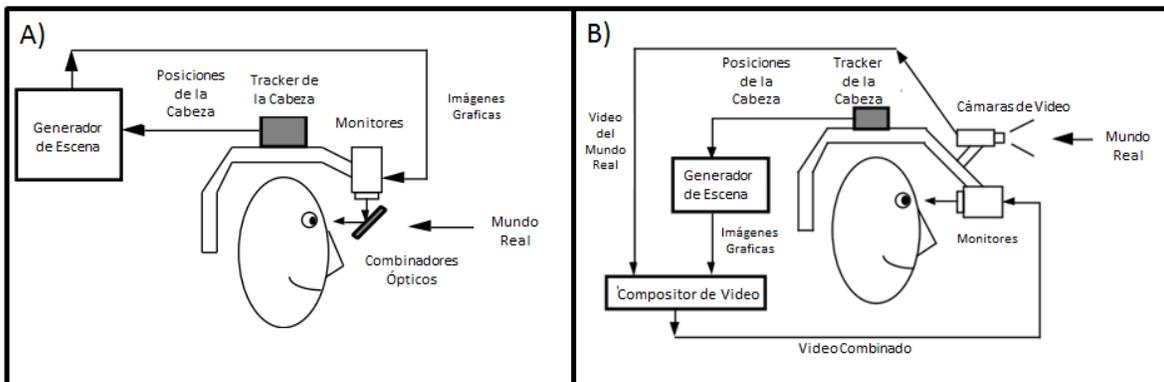


Figura 2.1. A) Diagrama Conceptual de un HMD Transparente Óptico. B) Diagrama Conceptual de un HMD Transparente de Video. Figura tomada de [15].

Es posible adaptar los HMDs de visión cerrada que son exclusivos de la VR para su uso en aplicación de AR, el proceso consiste simplemente en montar cámaras de video en el HMD. Al hacer esto, convertiríamos efectivamente un HMD de visión cerrada en un HMD transparente de video.

2.5.2. Guantes de Datos

Un guante de datos (en inglés Data Glove) es un conjunto de sensores y un soporte para los sensores, el cual es usado en la mano del usuario. Dichos dispositivos tienen como objetivo la adquisición y procesamiento de datos de la configuración y/o movimientos de los elementos de la mano. Los guantes de datos, como su nombre lo indica, típicamente son un guante de tela como la lycra, al cual se le cosen los sensores [27].

Los tipos de sensores utilizados en los guantes de datos son:

- **Fibra óptica.** Consiste en fijar dos o tres fibras ópticas a cada dedo de la mano. Las fibras ópticas están conectadas a un dispositivo opto electrónico. Una de las extremidades de cada bucle de fibra se conecta a un LED, y el otro extremo a un fototransistor. Cuando la fibra está derecha (sin doblarse), no hay disminución de la luz transmitida. Por el contrario, si la fibra está doblada, la intensidad luminosa recibida se atenúa. La variación de la intensidad de la luz reflejada por la fibra es una función del ángulo de la articulación del dedo, con ella es posible saber el valor de flexión. La relación entre la intensidad y el ángulo, no es lineal. Tampoco es constante en el tiempo, sobre todo si el guante es empleado por personas que tengan morfología diferente de la mano. Por lo tanto, la calibración del guante es indispensable en este tipo de tecnologías, y se debe efectuar para cada nueva utilización.
- **Sensores eléctricos de contacto.** Hacen uso de electrodos en la forma de parches de fibra conductiva en las puntas de los dedos, en el reverso de los dedos, o en la palma. Los gestos se detectan con base en la continuidad o ruptura de corriente en los contactos eléctricos entre los dedos de una mano, dedos de una mano y otra

mano, dedos y palma, etc. Las ventajas de este tipo de sensores es la no necesidad de calibración, confirmación de los gestos por medio de la sensación háptica de la mano, y la posibilidad de usar las dos manos para la interacción de gestos. Sin embargo, solo se puede detectar si se ha hecho un contacto o no de los sensores, y no la configuración intermedia de los dedos.

- Variación de resistencias. Este tipo de sensores utilizan resistencias variables. Dicha variación es en función de la elongación del soporte sobre el cual se encuentra situado el sensor. Por lo tanto, al mover alguna sección de algún dedo, se produce una variación en ese sensor, esto permite cuantificar dicha flexión.

El guante de datos es una herramienta muy útil en las aplicaciones de AR que hagan uso de las manos. Estos dispositivos le permiten al usuario hacer un uso real de los dedos de sus manos, lo que incrementa grandemente el realismo, comparándolo con solo poder hacer uso de señas predeterminadas. Sin embargo, antes de emplear un guante de datos es muy importante el considerar si, debido a la implementación del tipo de sensor, es factible su uso en la aplicación que se le quiere asignar, ya que de otra forma, podría volverse una carga para el usuario en lugar de una ayuda.

En la **Figura 2.2**, se muestra un guante de datos de variación de resistencias, los movimientos de los dedos del usuario son mapeados y utilizados para animar un par de manos virtuales en una simulación.

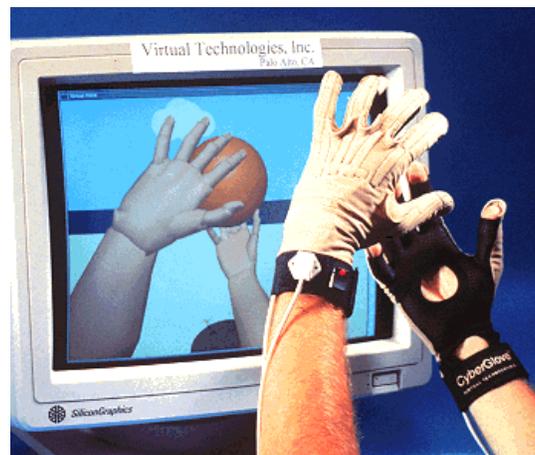


Figura 2.2. Guante de Datos, y su uso dentro de una simulación.

2.5.3. Trackers

Según [28], son herramientas que permiten capturar la localización continua en el espacio, de un objeto del mundo real. Este tipo de interfaces motrices son indispensables para las técnicas de VR. Dentro de ese dominio, el objeto a localizar es normalmente una parte del cuerpo, todo el cuerpo o un objeto a manipular por el usuario. Dichos dispositivos, interfaces motrices para la VR, pueden ser también útiles en otros sectores de actividad (metrología, robótica, etc.). Cuando se les utiliza para la VR, los llamamos por el neologismo “tracker”. Estos sensores están diseñados para medir solo la posición y orientación espacial de un marco de referencia móvil, ligado al objeto observado con relación a una referencia fija. El lugar que ocupa un objeto en el espacio con respecto a un punto de referencia, puede ser perfectamente determinado si el tracker permite medir 6 parámetros (3 ángulos y 3 distancias), estos se conocen como 6 grados de libertad.

Según su naturaleza, los trackers se pueden clasificar en mecánicos y de sin contacto. Los trackers mecánicos son estructuras cinemáticas compuestas de enlaces interconectados a sensores. Los trackers sin contacto han reemplazado a los mecánicos, ya que son menos incómodos y permiten más libertad de movimiento al usuario [27]. Algunas de las tecnologías de implementación de trackers sin contacto son [23]:

- Magnético. Un tracker magnético usa un campo magnético producido por un transmisor estacionario, para determinar la posición de un receptor en movimiento. Las ventajas incluyen el bajo costo, buena precisión, y no requerir de línea de visión directa entre el transmisor y el receptor. Las desventajas son la sensibilidad a campos magnéticos y los materiales ferromagnéticos que haya en el área de trabajo. Los objetos metálicos debe de ser removidos de las áreas próximas al transmisor y receptor.
- Ultrasónico. Un tracker ultrasónico usa señales ultrasónicas producidas por un transmisor estacionario para determinar la posición de un receptor en movimiento. A diferencia de los trackers magnéticos, los ultrasónicos no sufren de interferencia por metales. Sin embargo, sufren de ecos de superficies duras y

requieren de línea de visión directa entre el transmisor y el receptor. Si un objeto obstruye la línea de visión, la señal del tracker se pierde. Además, la velocidad de refresco de los datos es menos de la mitad de la de un tracker magnético.

- Óptico. Un tracker óptico usa detección óptica para determinar la orientación/posición en tiempo real de un objeto. Similar a los trackers ultrasónicos, los tracker ópticos requieren línea de visión directa y son no sensitivos a interferencia metálica. Sin embargo, cuando se les compara con los trackers ultrasónicos, los ópticos tienen una velocidad de refresco de datos superior y son capaces de tener entornos de trabajo más grandes.
- Inercial. Un tracker inercial es un sensor auto contenido que mide el ratio de cambio de la orientación de un objeto o el cambio de la velocidad de traslación de un objeto. Las ventajas incluyen una operación sin origen con un rango teóricamente ilimitado, no hay restricciones de línea de visión, y muy bajo ruido del sensor. Una de las mayores desventajas es que para derivar a posición y orientación, la salida del tracker inercial debe estar integrado y el resultado es sensitivo a la deriva y sesgo de los sensores.

Cualquiera de los tipos de trackers mencionados pueden ser utilizados en aplicaciones de AR, sin embargo, es necesario un trabajo extra para sincronizar adecuadamente el objeto a localizar con se equivalente virtual. Dicha sincronización es resuelta fácilmente por los trackers de tipo óptico, ya que ellos nos proveen la localización del objeto con respecto a la cámara, y fácilmente se puede ubicar al objeto en la escena simulada.

En la **Figura 2.3**, se muestra un tracker de tipo electromagnético, el cubo grande es el emisor de la señal, y el cubo pequeño es el receptor.



Figura 2.3. Tracker Electromagnético.

2.5.4. Dispositivos Hápticos

La háptica es la disciplina que se encarga del sentido del tacto. Una interfaz háptica, es un dispositivo que por medio del retorno de fuerzas, nos permite estimular el sentido del tacto del usuario, a dichos dispositivos también se les llama dispositivos de retorno háptico. Las interfaces hápticas permiten que el usuario sienta una escena virtual, esto gracias a que estos dispositivos se encuentra en contacto con la piel del usuario y la estimulan directamente. Las sensaciones que se le pueden proveer al usuario van desde sentir impulsos en las yemas de los dedos, hasta la imposibilidad de mover alguna parte de su cuerpo.

Según [28], aun cuando se habla de forma general como dispositivos de retorno háptico, en realidad las interfaces hápticas se pueden reagrupar en dos grandes familias:

- Interfaces de retorno de fuerza, también llamadas interfaces kinestésicas. Estas interfaces permiten sentir la posición y el movimiento de los cuerpos, así como las fuerzas ejercidas sobre ellos, mediante sensores propioceptivos en los músculos y los tendones. Dichas interfaces tienen por objetivo el aplicar fuerza sobre el cuerpo, pero también permiten medir la posición de las partes del cuerpo sobre las que actúan. Por lo general, estas interfaces requieren ser fijadas a algún otro

objeto que sirva de superficie de soporte. Las interfaces que se fijan a objetos como escritorios, poseen poca o nula portabilidad, pero suelen tener un retorno de fuerza mayor, en comparación con los que se fijan a objetos que confieren más portabilidad, como puede ser el antebrazo del usuario.

- Interfaces táctiles. Estas interfaces permiten sentir la forma, textura o temperatura de los objetos, con la ayuda de diferentes tipos de sensores situados a nivel de la piel. Dichas interfaces son puramente sensoriales: ellas no transmiten estímulos provenientes del usuario.

De acuerdo con [12], también es posible clasificar las interfaces hápticas de acuerdo al cómo se aplican sus fuerzas. Un concepto importante para poder utilizar esta clasificación es el de fuerza opuesta de reacción. Físicamente, para contrarrestar una fuerza, cada acción debe tener una fuerza igual y opuesta, la salida de fuerza deseada de una interfaz háptica debe ser balanceada por una igual fuerza opuesta de reacción. Las dos posibles clasificaciones de interfaces hápticas basadas en la fuerza opuesta de reacción son:

- Interfaz háptica de escritorio (en inglés *earth grounded*), las cuales son herramientas que descansan sobre un escritorio, u objeto que no sea el usuario mismo. Este tipo de interfaces, al recibir la fuerza aplicada por el usuario, aplican su fuerza de reacción sobre un objeto masivo, como el escritorio, pared o techo sobre el que se encuentran montadas. La ventaja de estas interfaces es que son capaces de proyectar fuerza sin problemas. Su desventaja es la reducida área de trabajo que poseen.
- Interfaz háptica portátil, o montada en el usuario (en inglés *earth ungrounded*), son las interfaces hápticas que aplican su fuerza de reacción sobre una parte del cuerpo del usuario, alejada del área de retroalimentación de fuerza deseada. La principal ventaja es su portabilidad, lo cual también les permite un área de trabajo más grande que las interfaces hápticas de escritorio. Sin embargo, su capacidad de generar fuerzas es inferior a las interfaces de escritorio.

En la **Figura 2.4**, se muestran dos interfaces hápticas, **A)** es un interfaz háptica de escritorio, y **B)** es una interfaz háptica portátil.

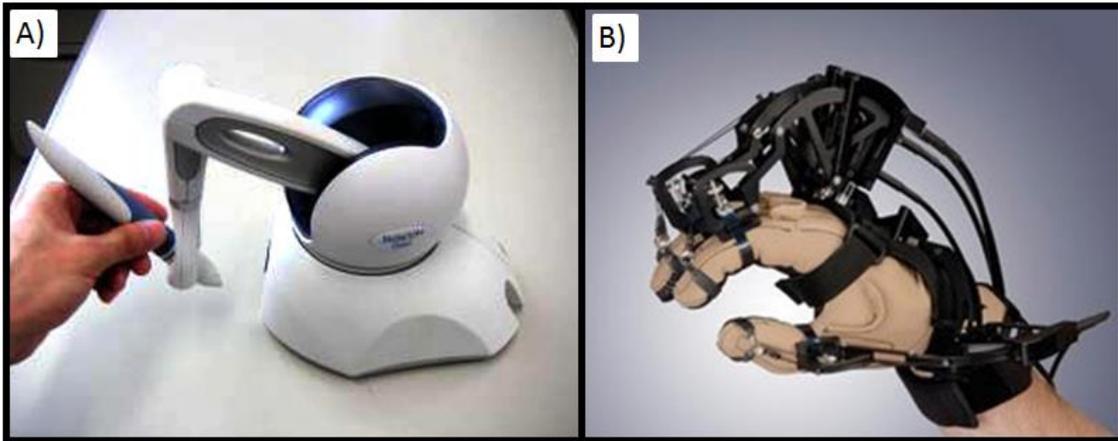


Figura 2.4. Interfaces Hápticas A) de Escritorio, B) Portátil.

3. Estado del Arte

3.1. Características Deseables en un Sistema de Ensamblaje Virtual

A continuación se presentan una serie de características cuya inclusión en un sistema de ensamblaje virtual, ayudan al desempeño de la tarea del usuario. Algunas de estas características son indispensables para dichos sistemas; algunas otras son opcionales, pero deseables.

3.1.1. Visualización del Entorno de Trabajo y Objetos Virtuales

Siendo la vista, uno de los sentidos más utilizados por el ser humano, es de esperarse que la visualización de la simulación sea una característica básica de cualquier sistema de VR y VA. A diferencia de un entorno de VR, donde la simulación puede ser de un área muy extensa (pudiendo en algunos casos ser del tamaño de ciudades o más), en una aplicación de VA, generalmente la simulación se hace de un área relativamente pequeña, dicha área se debe corresponder con las dimensiones normales del área de trabajo que se pretende simular. De igual forma, es de suma importancia el mostrar los objetos virtuales, o piezas que se desea ensamblar. El nivel visual de realismo de dichas piezas puede ir desde formas poco complejas y de colores sólidos, hasta piezas muy complejas, idénticas a las del mundo real, con colores y texturas que simulan también a las reales. En dichas simulaciones, es necesario el uso de estrategias para proveer al usuario con una correcta percepción de tamaño y distancia entre las piezas en el área de trabajo. Una de las estrategias más sencillas es el aplicar sombras a la escena y las piezas, así, al manipular una pieza, el usuario puede saber la altura aproximada a la que se encuentra la pieza, y el lugar donde impactaría de dejarla caer. Estrategias más avanzadas consisten en el uso de hardware como los HMDs con trackers, los cuales le permiten al usuario el cambiar su punto de visión de la escena.

En la **Figura 3.1** se presentan las dos formas más comunes de visualización de simulaciones en el VA. **A)** muestra una visualización directa, ya que nada obstruye la línea de visión entre el usuario y el monitor. Y **B)** muestra una visualización de la escena a través

de los HMD que porta el usuario, la escena es también transmitida a un monitor para poder ser observada por otros usuarios.

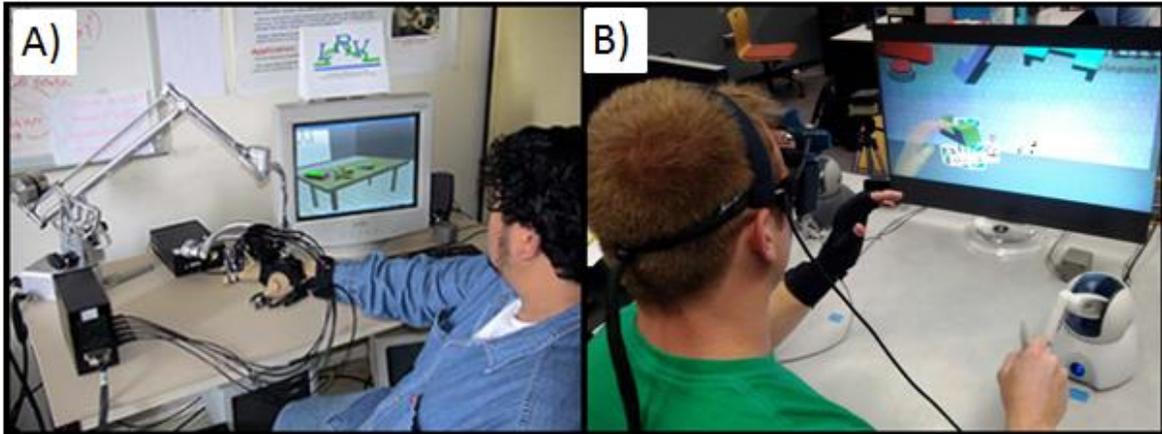


Figura 3.1. A) Visualización Directa. B) Visualización por HMD. Tomados de [29] y [11]

3.1.2. Ayuda Visual para la Secuencia de Ensamblaje

Una ayuda visual, es cualquier información gráfica extra que se le presenta al usuario, la cual, no influye directamente en la tarea de ensamblaje. Las ayudas visuales son especialmente útiles en las primeras etapas del entrenamiento del usuario, y posteriormente deben eliminarse, en pro de que la simulación sea más cercana a lo que el usuario tendrá en su tarea de ensamblaje del mundo real. Las ayudas visuales varían desde colores en las piezas, líneas o señales interactivas en las piezas, croquis o grafos que indican el orden o posibilidad de ensamblaje de las piezas, etc.

Algunos ejemplos de ayudas visuales utilizadas en trabajos de ensamblaje son:

- Colores para advertir de restricciones de distancias o interpenetración. En [30], las piezas cambian de color como medio de advertencia para el usuario. Se vuelven de color amarillo para indicar una violación de seguridad por distancia (una violación que en el mundo real, podría ocasionar daños humanos o materiales), y de color rojo para indicar una colisión entre piezas (**figura 3.2A**).
- Otro tipo de ayuda visual ligado al color de las piezas es, el utilizarlos para mejorar la memoria del usuario. En el procedimiento experimental presentado en [11], en

el cual se le pedía a los participantes ensamblar un rompecabezas 3D, cada pieza tenía un color diferente. Se descubrió que los participantes que hacían uso del entorno virtual de ensamblaje para entrenar, utilizaban los colores de las piezas para ayudarse a recordar el orden de ensamblaje (**figura 3.2B**).

- Uso de hojas de instrucciones. Esta ayuda visual es una virtualización de la hoja de instrucciones física, que se suele incluir con cualquier objeto que deba ser ensamblado por el usuario. En [11], durante la fase de entrenamiento, se le permitía al usuario hacer uso de la hoja de instrucciones del armado del producto.
- Croquis o grafos de enlaces. Estos son una ayuda visual que muestra la posibilidad de ensamblado entre piezas determinadas, o el orden en que deben ensamblarse las mismas. Salvo que el mismo grafo sea el fin de la simulación, esta ayuda debe desactivarse una vez que el usuario ya domina el orden de ensamblaje de las piezas. Un ejemplo de esta ayuda visual se presenta en [8] (**figura 3.2C**).

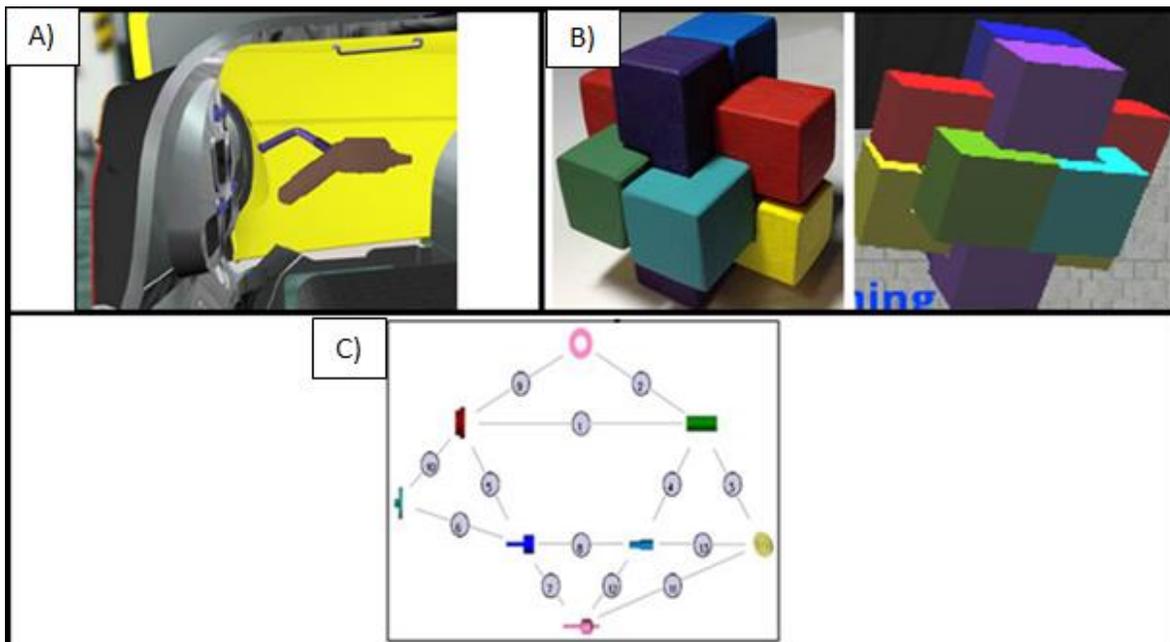


Figura 3.2. Ayudas Visuales A) Colores para Colisiones. B) Colores para Orden de Ensamblaje. C) Grafo de Enlaces. Tomados de [30], [11] y [31].

3.1.3. Algoritmo de Agarrado de Piezas

Otra característica indispensable de todo sistema de ensamblaje virtual, es el agarrado o selección de las piezas para su posterior manipulación. Un buen algoritmo (o uno malo) puede ser la diferencia entre una simulación bien ejecutada (o mal ejecutada). El algoritmo ideal puede depender de muchos factores, pero en última instancia, será la habilidad del usuario para trabajar con el algoritmo, el que decida si es útil o no. Idealmente, el algoritmo de agarrado debería ser como en la vida real, en la cual, si no se toca alguna parte de la pieza, esta no puede ser agarrada, y dependiendo de la parte tomada, es el comportamiento de la pieza físicamente. Sin embargo, para un agarrado igual al de la realidad, es necesario llevar a cabo procesos que consumirán más recursos de la computadora. Esto ya que los objetos reales pueden tener formas complejas de simular para la detección de colisiones, en estos casos, se recurre a una aproximación de la forma de las piezas, para lograr su agarrado. Por supuesto, hacer uso de dichas aproximaciones reduce el realismo del agarrado. La relación entre realismo y tiempo computacional dependerá de la simulación que se desee llevar a cabo.

El algoritmo de agarrado más simple es una aproximación de distancias entre la pieza a agarrar y la mano virtual o cursor virtual del usuario. En este algoritmo, se toma la distancia entre uno o más elementos de la mano, y el centro de la pieza, si se encuentran a una distancia determinada por el usuario, y la mano está en posición de agarrado, la pieza es agarrada y manipulada por la mano. En [32], se lleva a cabo un agarrado de piezas por medio de detección de colisiones entre la mano y las piezas, y una abstracción de las formas de las piezas. Las formas de las piezas se cambian por alguna de 3 formas primitivas: prisma rectangular, cilindro o esfera. El agarrado depende del uso del pulgar y alguno otro de los dedos de la mano. En [8], la forma de las piezas manipulables es aproximada a la forma de las piezas visibles, ya que estas, son una malla poligonal no convexa, y las manipulables son su equivalente a la envoltura poligonal convexa (**figura 3.3A y B**). El agarrado se ejecuta al tocar estas formas convexas con el pulgar y algún otro de los dedos de la mano (**figura 3.3C**). Este algoritmo es más realista que el mencionada anteriormente, pero su tiempo de procesamiento es también mayor.

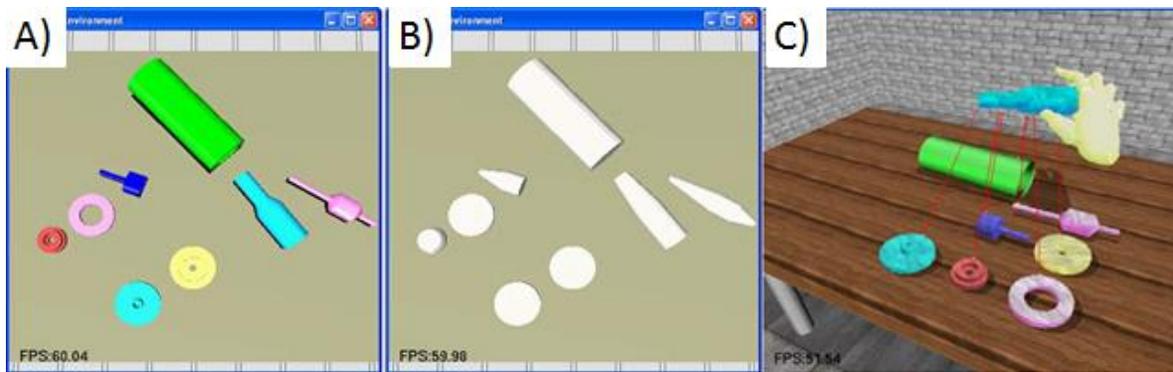


Figura 3.3. A) Visualización de Piezas Cóncavas. B) Piezas Convexas para Agarrado. C) Ejemplo de Agarrado de Pieza. Tomado de [8].

3.1.4. Implementación del Algoritmo de Ensamblaje

Vital a todo sistema de VA, es el propio algoritmo o técnica de ensamblaje. Los algoritmos de ensamblaje son del tipo basados en proximidad, esto ya que, el ensamblaje se logra al estar una pieza a cierta distancia mínima de otra. De forma básica, todos los algoritmos actúan de la misma forma. Se define una distancia mínima entre dos piezas a ensamblar, si esta distancia se cumple, se dice que el usuario desea ensamblar dichas piezas y se ejecuta alguna forma de mantener a las dos piezas unidas. En la implementación de la parte del algoritmo de aproximación y unión de las piezas, se encuentra la variedad y diferencia de los algoritmos de ensamblaje. A continuación se mencionan algunos algoritmos usados en sistemas de VA.

En [33] se propone la técnica Snap-Fitting, la cual es posteriormente mejorada por [31]. La técnica consiste en que, al momento de manipular dos piezas para ensamblar, una es designada como la parte primaria, y otra como la receptora, si se cumple la distancia para ensamblar, se le aplica una transformación geométrica a la parte primaria para llevarla a su posición y orientación final con respecto a la parte receptora. Adicionalmente, se le agrega un vector a las piezas, y es este vector el que mide la distancia entre su correspondiente vector de la otra pieza, de esta forma se asegura que la parte primaria entre de la forma adecuada en la parte receptora. Este algoritmo se aplica mayormente para piezas cuya forma predominante sea cilíndrica. En la **Figura 3.4A**, se puede ver dos

piezas, donde una es la parte receptora y la otra la parte primaria, ambas piezas tienen su vector, el cual se debe alinear correctamente para lograr el ensamblaje **Figura 3.4B**.

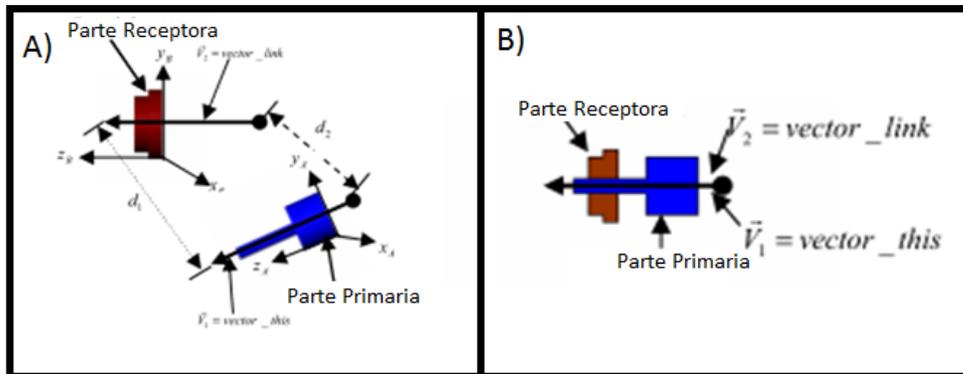


Figura 3.4 A) Partes con sus Vectores. B) Partes Ensambladas. Tomado de [31].

En [30], se hace uso de dos algoritmos de ensamblaje basados en proximidad. El primero lleva a cabo el ensamblaje cuando los objetos manipulados, son soltados por el usuario, y se encuentran suficientemente cerca uno del otro. El segundo algoritmo hace que las herramientas virtuales que el usuario maneja, encajen con tornillos virtuales, cuando se encuentran suficientemente cerca y mientras están siendo utilizados, se ejecuta el ensamblaje.

En [25], hace uso de un algoritmo de ensamblaje basado en proximidad. Una vez que se detecta la distancia mínima para realizar el ensamblaje, se proyectan los puntos a ensamblar como un eje. Dicho eje representa una restricción de movimiento, por lo tanto, la pieza solo puede ser movida en dicho eje. En la **Figura 3.5** se muestra un ejemplo de la técnica de ensamblaje.

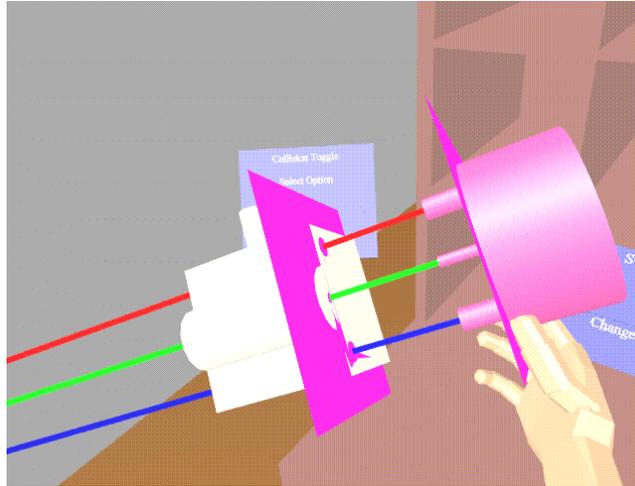


Figura 3.5. Técnica de Ensamblaje de VADE. Tomado de [25].

3.1.5. Comportamiento Físico

En el mundo real, estamos sujetos a fuerzas, las cuales se rigen por leyes de la física. Una simulación, puede omitir ciertos aspectos presentes en la vida real, sin embargo, esto reduce la percepción de realismo de la simulación. Si se desea que una simulación se aproxime a su contraparte del mundo real, es necesario el considerar las fuerzas naturales que nos rigen. Modelar comportamientos físicos puede incrementar significativamente el sentido de inmersión e interactividad del usuario, especialmente en aplicaciones que requieren un nivel intenso de manipulación [34]. Uno de los comportamientos físicos más importantes es la detección de colisiones, esto es, que los cuerpos puedan tocarse, y ejercer fuerza entre ellos. Gracias a la detección de colisiones, es posible el impedir la interpenetración de los cuerpos. Otro tipo de comportamiento físico asociado con la detección de colisiones, es la simulación de la fuerza de la gravedad. La gravedad ejerce una fuerza constante sobre los cuerpos, la cual hace que los mismos caigan hacia la tierra, o hacia alguna superficie que se interponga entre ellos. Un ejemplo es la mesa de trabajo, la gravedad hace que las piezas que se encuentren en el aire, caigan y colisionen con la mesa, haciendo que las mismas se queden en la mesa, y sea posible el trabajar con ellas.

En [4], se recalca la importancia de la simulación de comportamiento de física en las tareas de ensamblaje. Se menciona que es necesario el no solo simular la textura y colores

de los materiales de las piezas como puede ser madera, arcilla o acero, sino que también es necesario simular las propiedades inerciales de las piezas dependiendo del tipo de material del que se conforman. Otros aspectos importantes que se deben simular lo más cercanos posibles a la realidad son: velocidades, aceleraciones, colisiones, etc.

3.1.6. Captura de Movimientos de las Manos y Cabeza del Usuario

La interacción con elementos virtuales, se puede lograr con hardware convencional, como es el teclado, mouse, joystick, joypad, etc. Sin embargo, dichas herramientas no proveen de una interacción natural para el usuario. Ya que los sistemas de VA, suelen estar enfocados a trasladar al usuario del entorno virtual al mundo real, es importante que la interacción con el entorno virtual, sea lo más cercano posible a la condiciones reales. Para lograr esto, es necesaria la captura de los movimientos del usuario (por medio de trackers o guantes de datos), los cuales son mapeados a los elementos virtuales como pueden ser las manos, cabeza (para el ángulo de visión), dedos de la mano, etc. Uno de los primeros sistemas donde se hace la captura de movimientos es [4]. En él, se logra la captura de los movimientos de las manos por medio de trackers electromagnéticos, y el movimiento de los dedos y muñeca de las manos del usuario por medio de guantes de datos. Estos dispositivos, dispuestos de esta manera, mejoran la interacción natural del usuario con la escena creada. Adicionalmente, se hace uso de un tracker en la cabeza del usuario, la cual también está equipada con un HMD, de esta forma, el movimiento de la cabeza se usa para actualizar la línea de visión del usuario dentro de la simulación. Esta implementación, es la base en que se trabaja la captura de movimientos del usuario en los sistemas de ensamblaje virtual.

3.1.7. Retroalimentación Háptica

La retroalimentación háptica, es una de esas características que no son indispensables en un sistema de VA, sin embargo, su implementación ayuda grandemente a lograr la tarea de ensamblaje. Por ejemplo, en [13], se hace uso de una unidad háptica portátil para la tele operación de un brazo robot, para poder sentir el agarre de los objetos. Aun cuando este trabajo no es enfocado al ensamblaje, se muestran los beneficios de emplear

interfaces hápticas para la etapa de agarrado de piezas. En [8, 35, 36], se llevan a cabo experimentos para ver la influencia de la retroalimentación háptica en las tareas de ensamblaje. En dichos estudios, se comprobó que la implementación de estas herramientas mejora el tiempo de realización de la tarea de ensamblaje de los usuarios.

3.1.8. Retroalimentación Acústica

Los sonidos de las colisiones son eventos auditorios simples en un ambiente virtual, los cuales se pueden usar como señales que confirman el contacto entre las piezas. Incluso pueden llegar a indicar la intensidad del impacto entre piezas [36]. Los sonidos están presentes en todo momento en nuestro mundo, y ellos nos dan información que nuestra vista no puede captar. El añadir sonidos a las simulaciones ayuda a incrementar la percepción de realismo, ya que en la vida real, estamos acostumbrados grandemente a la retroalimentación acústica siempre que se lleva a cabo una tarea que tenga que ver con colisiones. Los sonidos también se pueden usar para enriquecer una simulación, se pueden agregar sonidos que no están presentes en la vida real, como una forma de incrementar la percepción del usuario a los eventos de la simulación.

3.1.9. Sincronización de Manos Reales con Manos Virtuales en Sistemas de AR

Solo objetos virtuales pueden interactuar con otros objetos virtuales. Para que los objetos reales interactúen con virtuales, es necesario crear objetos virtuales que se sincronicen con los reales. Por lo tanto, para poder lograr una interacción de las manos reales en una simulación, es necesario crear manos virtuales y sincronizarlas con las reales. Esta sincronización es indispensable en sistemas de AR, si se desea tener una manipulación natural, ya que en la vida real, el usuario utiliza sus manos para interactuar y manipular los objetos.

A continuación se muestran algunos trabajos de AR, donde se logra la sincronización de las manos, o algún objeto real, que posteriormente se puede extender a las manos del usuario.

En [37], se logra una sincronización de manos reales y virtuales, por medio del uso de marcas en zonas importantes de la mano, en concreto, una en el índice, otra en el pulgar, y una tercera entre el ángulo formado por estos dos dedos. De esta forma, pueden localizar la mano en el área de trabajo, e incluso pueden detectar gestos como el de agarrado. En la **Figura 3.6**, se puede ver la mano, con las 3 marcas detectadas, y algunas figuras geométricas que delinear al pulgar e índice, estas figuras se actualizan según la flexión de los dedos.

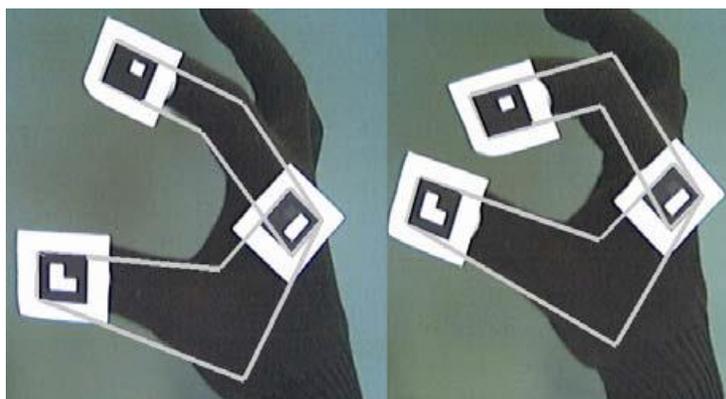


Figura 3.6. Manos con Marcas para la Detección del Índice y Pulgar. Tomado de [37].

En [38] se provee una sincronización de manos virtuales y reales, por medio del uso de marcas colocadas en la mano del usuario. Esta técnica es muy precisa, siempre y cuando el usuario no mueva muy rápido las manos, y que la línea de visión entre la marca y la cámara no se vea obstruida.

En [39], no se hace una sincronización de manos reales con virtuales, pero se usa una pluma de luz infrarroja, y un sistema de cámaras para poder detectar en todo momento la posición 3D de la pluma. Esta implementación puede extenderse para sincronizar las manos virtuales con la pluma, o usar el mismo principio para el desarrollo de un guante de datos.

En [18, 40], se hace uso de un algoritmo, que detecta las palmas de las manos del usuario, y los dedos del mismo. En los dedos, se le da importancia al pulgar e índice, y permite la

manipulación utilizando estos dos. La interacción no es totalmente natural, pero es cercana. De resaltar es el hecho de que su técnica no requiere de hardware extra, solo una cámara web y las manos del usuario. Un ejemplo de este sistema se muestra en la **Figura 3.7**.

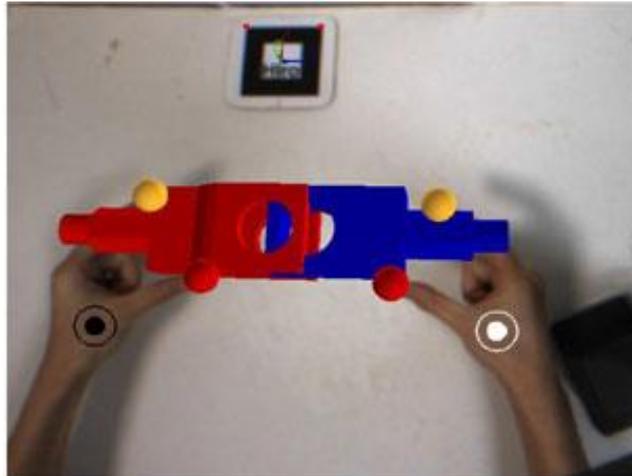


Figura 3.7. Detección de las Manos del Usuario Enfatisando de los Dedos Índice y Pulgar para Manipular Objetos. Tomado de [40].

En [21], la sincronización se lleva a cabo con el uso de una cámara Kinect dispuesta frente al usuario. El sistema no tiene una interacción totalmente natural, ya que la mano es solo un cursor, y hace uso de gestos y botones virtuales para asignar ordenes al sistema.

3.2. Ejemplos de Sistemas de Ensamblaje Virtual

En esta sección se presentan algunos de los sistemas de ensamblaje virtual que existen. Se exponen las principales ventajas, características y/o contribuciones de los sistemas.

En [35, 36] crearon un ambiente virtual para el diseño de ensamblaje (VEDA por sus siglas en ingles de Virtual Environment for Design for Assembly), el cual tenía comportamiento basado en física de sus piezas, siendo así, uno de los primeros sistemas de ensamblaje virtual en implementarlo. El sistema hace uso de dos dispositivos haticos para el retorno de fuerza, una para el dedo índice, y una para el pulgar (**figura 3.8**). También posee

retroalimentación acústica para ayudar al usuario a la realización de la tarea de ensamblaje. Se lleva a cabo una comparación de desempeño de tareas entre el mundo real y el virtual del sistema creado. Se demuestra que el mundo real tiene un tiempo de realización de la tarea menor que el virtual. Adicionalmente, se compara al sistema con y sin háptica, demostrando que el uso de tecnologías hápticas, mejora el desempeño del usuario.

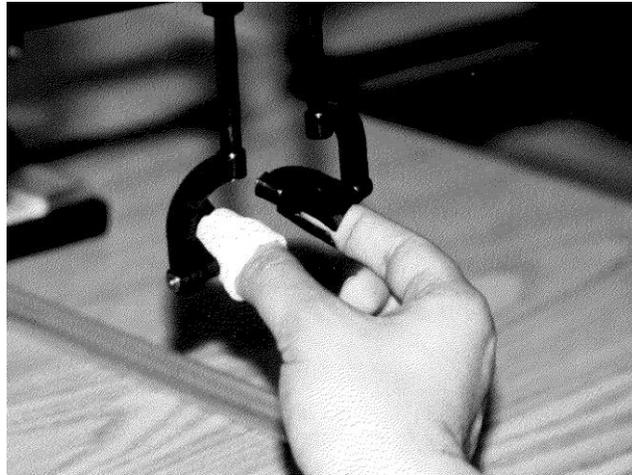


Figura 3.8. Dedos Índice y Pulgar Usando la Interfaz Háptica. Tomado de [36].

En [4, 25, 41] se creó un entorno de diseño para ensamblaje virtual (VADE por sus siglas en ingles de Virtual Assembly Design Enviroment), el cual tuvo como uno de sus objetivos primarios el probar la factibilidad de crear información valiosa de diseño usando herramientas de VR e intercambiar esta información con otras aplicaciones de ingeniería como las aplicaciones CAD. VADE consiste de un entorno virtual que le permite a un ingeniero el considerar aspectos del ensamblaje de sistemas mecánicos en los primeros ciclos de diseño del desarrollo del producto. El ambiente virtual hace uso de hardware y software utilizados en aplicaciones de VR, los cuales le permiten al diseñador el estar inmerso en la simulación. A nivel de hardware, VADE hace uso de un HMD de alta calidad y visión estereoscópica, para que el usuario pueda ver la escena. Trackers electromagnéticos montados en la cabeza del usuario permiten saber la posición de ella, y así, reajustar el punto de visión del usuario en relación a los movimientos reales de su

cabeza, este cambio se refleja en tiempo real al HMD portado por el usuario. Otros trackers se utilizan para rastrear los movimientos de las manos del usuario, y así crear y manipular el modelo virtual de sus manos. También se hace uso de un guante de datos para capturar los movimientos de los dedos y la muñeca del usuario. VADE permite al ingeniero el hacer uso del entorno de ensamblaje virtual para evaluar los problemas de tolerancia, seleccionar la secuencia óptima de armado de componentes, generar planes de procesos para el ensamblaje y desensamblaje, y visualizar los resultados. A nivel de software, VADE permite la comunicación con sistemas CAD. El sistema CAD provee los modelos poligonales que automáticamente transferidos a VADE para su posterior uso. VADE también contaba con un algoritmo de detección de colisiones. VADE grababa las trayectorias de las piezas durante el proceso de ensamblaje, para que posteriormente sean analizadas y determinar si es necesario cambiar el diseño del producto. El concepto del funcionamiento del sistema se muestra en la **Figura 3.9**. Una vez que el ingeniero diseña el sistema mecánico en un sistema CAD, VADE exporta automáticamente los datos necesarios al ambiente virtual por medio de unas opciones seleccionadas por el usuario en el sistema CAD. En el ambiente virtual se le presenta al usuario la escena de ensamblaje. Las piezas se encuentran localizadas inicialmente en el lugar que el usuario elija. Después de esta inicialización, se le permite al usuario realizar el ensamblado. Esto le permite al usuario hacer decisiones, hacer cambios de diseño, y llevar a cabo otras tareas de ingeniería dentro del ambiente virtual. Durante este proceso, el ambiente mantiene un enlace con el sistema CAD, y usa las capacidades de dicho sistema cuando sean requeridas. Al final de la sesión VADE, el usuario habrá generado mucha información valiosa de diseño, la cual se hace automáticamente disponible al diseñador en el sistema CAD.

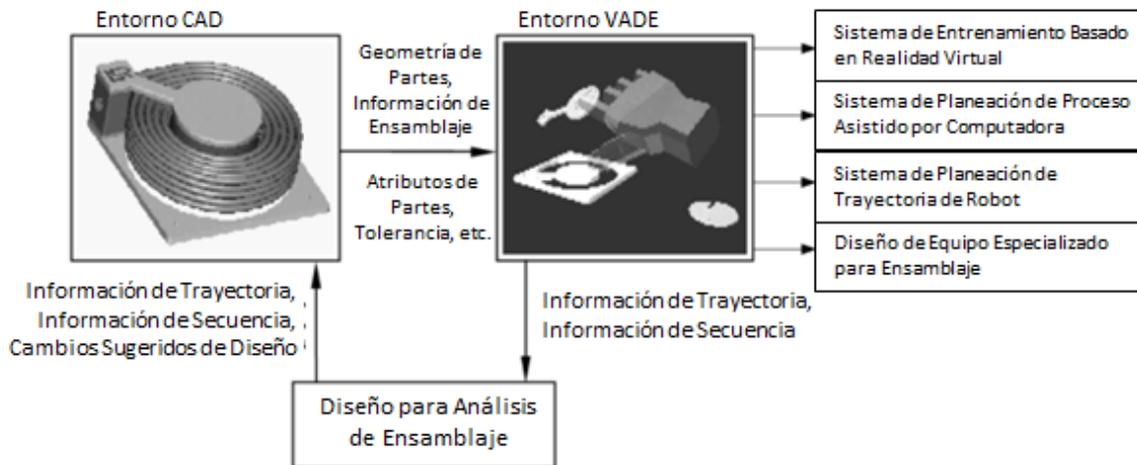


Figura 3.9. Esquema de Funcionamiento de VADE. Tomado de [25].

En [30], se carece de retroalimentación háptica, sin embargo, los autores recalcan la importancia de dicha tecnología en las tareas de ensamblaje. Al carecer de ella, proveen de varias ayudas interactivas para compensar su falta. Implementan dos algoritmos de ensamblaje: el primero hace que los objetos encajen entre ellos cuando son soltados por el usuario, y se encuentran suficientemente cerca uno del otro; el segundo algoritmo hace que las herramientas virtuales interactúen con tornillos virtuales, cuando ambos se encuentran suficientemente cerca y mientras están siendo utilizados, se lleva a cabo el ensamblaje entre las piezas que deben unir. Cuando el usuario tiene ocupada las dos manos, es posible asignar órdenes por medio del uso de la voz, con comandos previamente creados y guardados. El sistema también cuenta con un sistema de advertencias basado en el cambio de color de las piezas. En caso de que haya una violación de la distancia segura entre piezas o el usuario, la cual podría ocasionar daños a cualquiera de los dos, las piezas se colorean de amarillo. En el caso de una colisión, las piezas se colorean de rojo.

En [42], desarrollaron un sistema de ensamblaje, el cual hace uso de un HMD para visualizar la escena, y un guante de datos para la manipulación. Tanto la mano como la cabeza del usuario tienen un tracker de tipo electromagnético. Adicionalmente, el sistema crea un modelo virtual de un ser humano. El sistema calculaba el tiempo que le tomaba al

usuario realizar la tarea, además de guardar la secuencia de acciones que el usuario ejecutaba, para llevar a cabo el ensamblaje del producto.

En [43], desarrollaron un sistema capaz de importar modelos CAD complejos para su uso en la simulación del ensamblaje virtual. El sistema tiene comportamiento físico para la detección de colisiones y comportamiento realista de las piezas. Para la manipulación de las piezas, hacen uso de una unidad háptica de retorno de fuerza de escritorio, posteriormente hacen uso de dos unidades, una para cada mano del usuario. El usuario porta un HMD para la visualización estéreo de la simulación, lo cual le da pistas de profundidad, permitiendo así un mejor desempeño del usuario, que con sistemas que muestran la simulación en 2D. Utilizando trackers electromagnéticos obtienen la posición y orientación de la cabeza, manos y brazos del usuario. Una de las principales ventajas del sistema es que permite trabajar con modelos muy complejos, o con una gran cantidad de triángulos, siendo los más simples de 1,900 triángulos, y los más complejos llegando a los 369,000 triángulos. Otra de las ventajas del sistema es su arquitectura flexible, la cual le permite trabajar como una aplicación independiente, o ser usando en sistemas de alto costo para aplicaciones de realidad virtual, en computadoras de escritorio de bajo costo, en ambientes conectados donde múltiples sistemas de VR se comunican por internet, etc. Esto permite que el sistema tenga posibilidad de ser usado tanto en pequeñas o grandes industrias, así como en la academia. En [44], se extiende el trabajo anterior, y se desarrolla un sistema para ensamblaje háptico y prototipado realista (SHARP por sus siglas en inglés de System for Haptic Assembly & Realistic Prototyping). Este sistema hace uso de dos unidades hápticas de retorno de fuerza para escritorio, una para cada mano del usuario, permitiendo así, un ensamblaje bimanual. Otra adición es la posibilidad de desensamblar las piezas. También incluye un comportamiento más realista de las piezas, por medio de la adición de comportamiento físico. En la **Figura 3.10** se muestra el sistema siendo operado por un usuario, el usuario tiene una visión estereoscópica gracias al HMD, y puede manipular las 2 manos virtuales de la simulación, con el uso de las unidades hápticas.

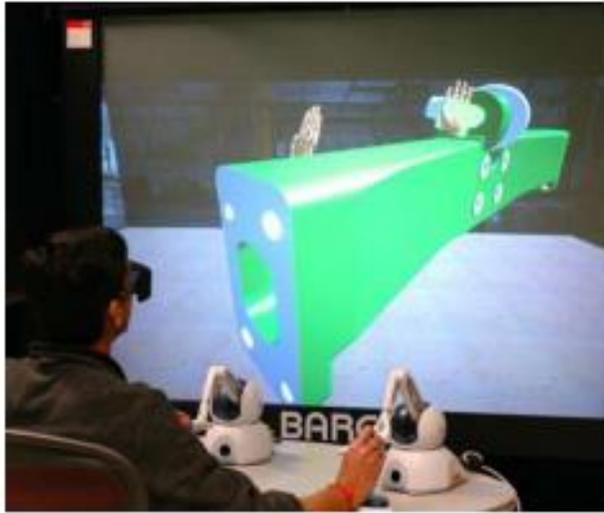


Figura 3.10. Ejemplo de Uso del Sistema SHARP. Tomado de [44].

En [8, 29], crearon un sistema de ensamblaje virtual basado en comportamiento de física, el cual provee a las piezas de detección de colisiones, gravedad y cálculo de fuerzas inerciales. El sistema hace uso de un guante de datos para capturar los movimientos de los dedos y mano del usuario, además posee unidades hápticas táctiles y de retorno de fuerza. El sistema le presenta las piezas a ensamblar al usuario, y también se visualiza la mano virtual controlada por el usuario, la cual es posicionada y orientada por un tracker colocado en la mano real del usuario. Las piezas pueden colisionar entre ellas y contra la mesa de la simulación, de igual forma la mano. Cuando alguna colisiona, se hace uso de un modelo de resorte-amortiguador para calcular las fuerzas generadas, esto no solo ayuda a sentir las fuerzas a través de las herramientas hápticas, sino que también ayuda a evitar la interpenetración de los objetos de la escena. El agarrado de las piezas se hace con una aproximación de la forma de las mismas, en este caso se genera una nueva forma convexa. La técnica de ensamblaje utilizada es el snap-fitting mejorado. El sistema tiene ayudas visuales y sonoras para el usuario. Las ayudas sonoras son un sonido distintivo cuando las piezas encajan entre sí. Las ayudas visuales son: de forma interactiva, líneas que indican las piezas con las que se puede ensamblar la pieza actualmente agarrado; y un grafo que le indica al usuario cuales piezas pueden ensamblar con cuales otras, además,

también muestra cuando dos piezas ya han sido ensambladas. Como parte del trabajo, se desarrolló un proceso experimental, el cual mide el tiempo en que le toma al usuario realizar el ensamblaje. Los resultados demuestran que el uso de herramientas hápticas, y de la no visualización de interpenetración de las piezas, ayuda al usuario a mejorar su desempeño en las tareas de ensamblaje virtual. En la **Figura 3.11A**, se muestra un ejemplo del sistema, en dicha figura, se pueden ver las líneas de ayuda visual interactiva, que indican con que piezas se puede ensamblar la pieza actualmente agarrada. En la **Figura 3.11B**, se muestra el grafo de enlaces, que le sirve al usuario de guía para elegir el orden en que desea ejecutar la tarea de ensamblaje.

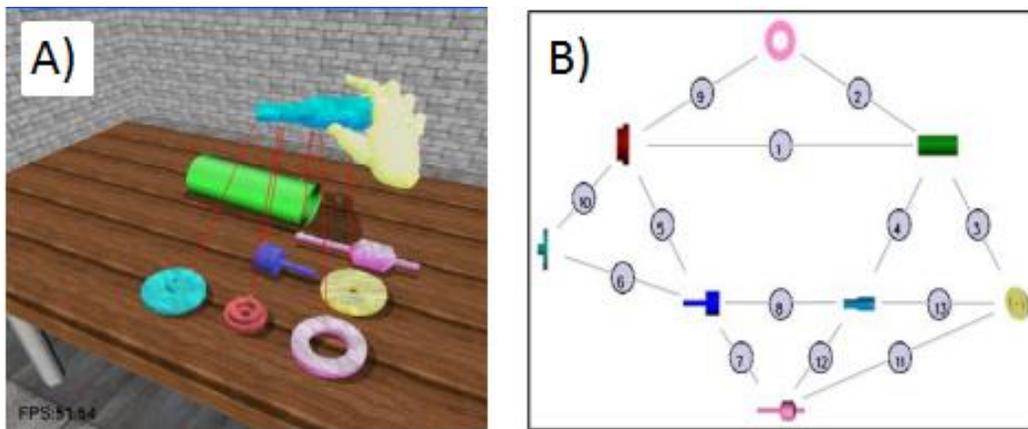


Figura 3.11. A) Sistema con Ayuda Visual Interactiva. B) Grafo de Enlaces. Tomados de [8].

En [45], se desarrolló una técnica que mejora la percepción de profundidad del usuario. Dicha técnica fue utilizada para el ensamblaje virtual de aeronaves. La técnica hace uso de la paralaje de movimiento como forma de percibir la profundidad de una escena, adicionalmente, esta reduce la fatiga de los ojos del usuario. La técnica hace uso de una cámara web para conocer la posición de la cabeza del usuario, y con base en ella, cambiar la línea de visión de la escena proyectada.

En [11], se compara un entrenamiento bimanual háptico contra un entrenamiento físico tradicional. Uno de los objetivos del trabajo era el examinar el rol del color de las piezas en el entrenamiento para ensamblaje. El experimento fue el armado de un rompecabezas

3D conformado por 6 piezas. Durante el entrenamiento, se le permitía al usuario el uso del manual de instrucciones de armado del rompecabezas. Los resultados demostraron que los participantes que usaban el entorno virtual, tardaban 3 veces más tiempo en entrenarse que los del entorno real. Pero, en el posterior proceso de prueba, los usuarios del entorno virtual fueron 2 veces más rápidos en realizar el ensamblaje que los del entorno real. Se descubrió que los usuarios del entorno virtual, hacían uso de los colores de las piezas para recordar el orden de ensamblaje, mientras que los del mundo real hacían uso de la forma de las piezas. Este trabajo demuestra que asignar colores a las piezas en un entorno virtual de ensamblaje, beneficia positivamente al usuario.

3.3. Ejemplos de Sistemas de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada

A continuación se presentan algunos sistemas que emplean la realidad aumentada para las tareas de ensamblaje virtual.

Tradicionalmente, el uso más común de sistemas de realidad aumentada en tareas de ensamblaje virtual, es el de servir como ayudas visuales de instrucciones para el usuario [17, 19, 20, 46-64]. Estos sistemas de realidad aumentada, llamados instruccionales, se limitan a mostrar datos al usuario, que le ayudan a llevar a cabo los pasos del ensamblaje. En la **Figura 3.12** se muestran ejemplos de este tipo de sistemas. En **A)**, se muestran las instrucciones con transparencias, lo cual permite poder seguir trabajando, ya que no se obstruye la visión completamente. Además, sistemas como este, también muestran la dirección en que se deben poner o girar las piezas. En **B)**, no se presentan instrucciones con palabras, pero se le muestra al usuario donde debe ensamblar que pieza, este tipo de implementación es un poco más complicada, ya que requiere de poder identificar las piezas para identificar el donde se pueden ensamblar. **C)** Este sistema es parecido al mostrado en la primera figura, solo que en este caso, la ayuda visual, impide ver a través de ella, dependiendo del fin del sistema, esta implementación puede ser menos útil que las anteriores.

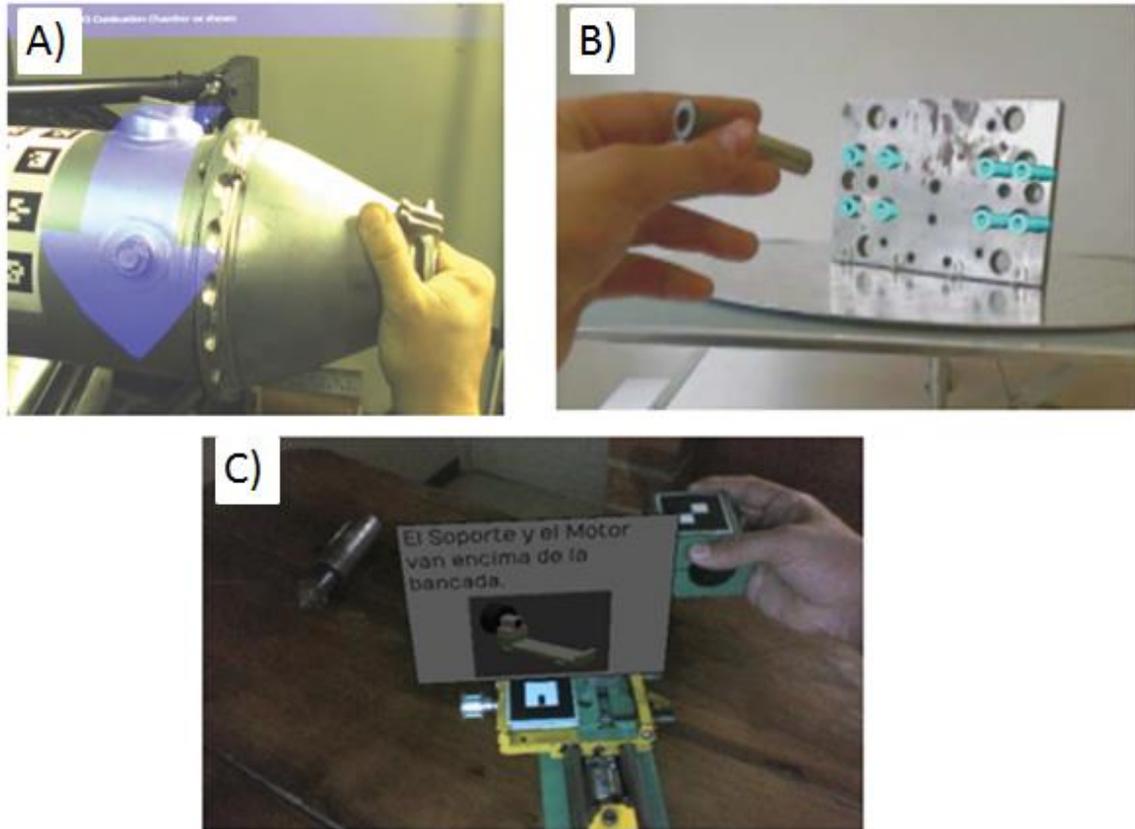


Figura 3.12. Ejemplos De Sistemas de Realidad Aumentada para Ensamblaje Virtual de Tipo Instruccional. A) Tomado de [20]. B) Tomado de [56]. C) Tomado de [57].

Si bien, estos sistemas son de gran ayuda en las tareas de ensamblaje, carecen de una interacción entre elementos generados por computadora y de los elementos del mundo real. Al carecer de esta interacción, no pueden cumplir con las características deseables de un sistema de ensamblaje virtual completo. Y más aún, no nos proveen las ventajas de las aplicaciones de VA, mencionadas al inicio de este documento de tesis. Por lo tanto, no se les puede considerar sistemas de ensamblaje virtual.

Algunos sistemas que si cumplen con las características necesarias para ser considerados sistemas de ensamblaje virtual con realidad aumentada son los siguientes:

En [38], se presenta uno de los primeros trabajos de realidad aumentada para ensamblaje virtual, que no es un sistema de tipo instruccional. A nivel de hardware, hacen uso de un HMD, el cual tiene montado una cámara web. En la mano, el usuario tiene un guante de

datos, al cual se le coloca una marca. En el centro de la mesa de trabajo, se localiza una marca, para generar el centro de la simulación. La disposición del hardware se muestra en la **Figura 3.13A**. El sistema posee 3 posiciones de agarrado, que se corresponden con piezas de tipo cilíndrica, esférica y pellizco (para piezas delgadas). La técnica de agarrado es de proximidad, si la mano se encuentra en posición de agarrado, a una mínima distancia definida por el usuario, se considera que desea agarrar la pieza, y se le permite la manipulación de la misma. El algoritmo de ensamblaje es de proximidad y velocidad, si una pieza se encuentra suficientemente cerca de otra con la que se pueda ensamblar, y la velocidad de desplazamiento es menor que un valor fijado por el usuario, se realizará el ensamblaje. El sistema tiene un desempeño de hasta 25 fps. Un ejemplo del sistema se muestra en la **Figura 3.13B**.

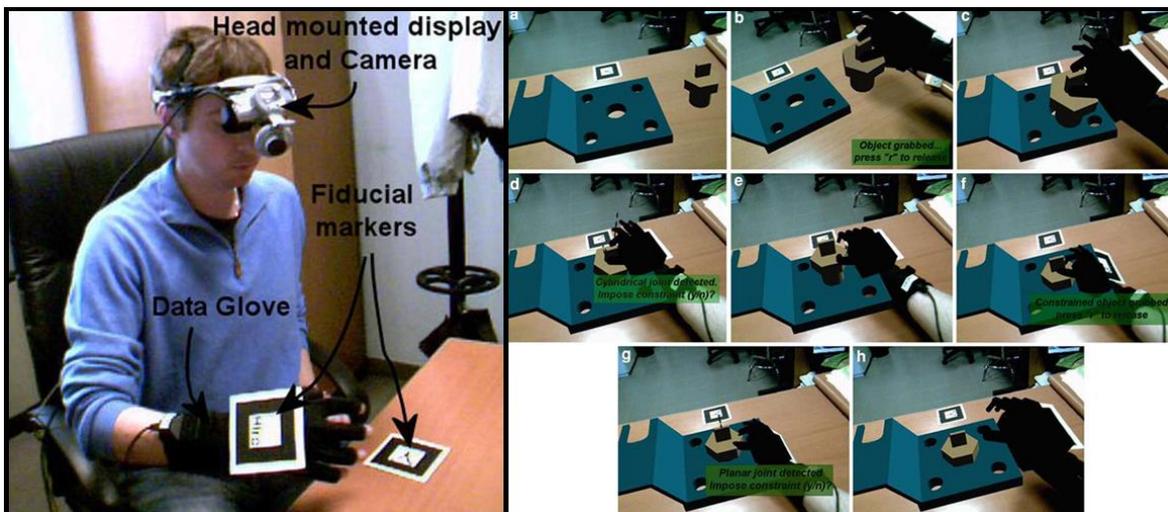


Figura 3.13. Arquitectura de Hardware. Ejemplo del Sistema para Ensamblar. Tomado de [38].

El sistema es bastante completo, y muchas de sus limitaciones son en relación con el hardware, como son el guante de datos, la cámara web y la capacidad de procesamiento de la computadora. Aun así, el sistema no posee un agarrado natural de los objetos, ya que se logra con 3 posiciones predefinidas para los dedos de la mano. También se encuentra presente el problema de obstrucción visual entre la cámara y las marcas, el cual inhabilitaría temporalmente el uso del sistema. Finalmente, el sistema carece de

comportamiento dinámico para las piezas, lo que reduce aún más la percepción de naturalidad de la simulación. Sin embargo, siendo uno de los primeros sistemas no instruccionales, tiene muchas características que otros sistemas anteriores y posteriores, no han implementado.

En [39], se hace uso de una pluma de luz infrarroja como herramienta de interacción. Dos cámaras con filtros infrarrojos siguen fácilmente la trayectoria de la pluma. Estas dos cámaras permiten obtener la posición 3D de la pluma. Gracias a esto, se puede usar la pluma para seleccionar, trasladar y rotar modelos virtuales para ensamblaje. Para ciclar entre las posibles acciones que permite la pluma, se disponen botones dentro de la simulación, el color de los botones indica el comando a ejecutar en ese momento por la pluma. El sistema, al ser multimodal, permite entradas adicionales por parte del usuario, como son: reconocimiento del hablar y reconocimiento de gestos. En la **Figura 3.14** se muestran el entorno de trabajo con su hardware y un ejemplo del sistema funcionando, donde se muestra el modelo virtual a ensamblar, los botones de acciones para la pluma, y la pluma misma.

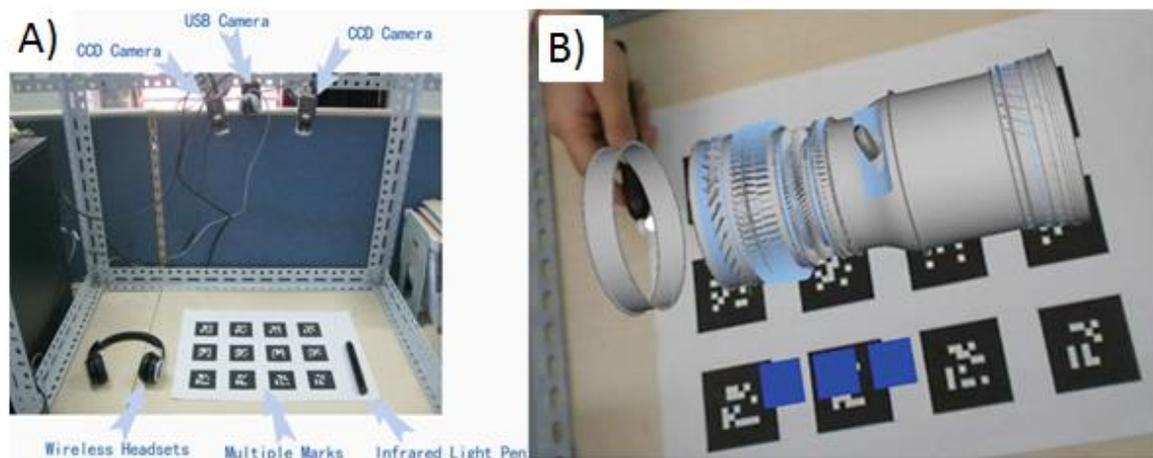


Figura 3.14. A) Entorno de Trabajo con su Hardware. B) Ejemplo del Sistema. Tomados de [39].

El sistema tiene características muy buenas para el ensamblaje virtual, el único problema es que, el uso de la pluma no es natural, cuando se le compara con el uso de las manos del

usuario. Una interacción natural precisa, requiere del uso de las manos del usuario en las tareas de ensamblaje virtual.

En [18, 40] se creó un sistema para ensamblaje virtual con realidad aumentada haciendo uso de las manos desnudas del usuario. El sistema le permite al usuario usar sus dos manos para manipular y orientar las piezas a ensamblar, herramientas y desensamblar. El algoritmo identifica la palma y dedos de las manos del usuario, dando énfasis al pulgar e índice, los cuales son utilizados para la interacción con los objetos virtuales. El sistema permite cargar los modelos CAD a utilizar desde el inicio del programa. Se guardan constantemente los datos de ensamblaje realizados por el usuario, dichos datos pueden usarse posteriormente para análisis del desempeño del usuario y factibilidad de la secuencia de ensamblaje. Se Implementa un algoritmo de ensamblaje que diferencia entre piezas de tipo planares, cilíndricas y cónicas. Adicionalmente, el sistema le permite al usuario hacer uso de herramientas virtuales, para llevar a cabo la tarea de ensamblar a las piezas virtuales. El sistema fue probado y se considera que trabaja bien con una velocidad de 15fps a una resolución de pantalla de 512 x 384 pixeles. El área de trabajo, y un ejemplo del ensamblaje posible se muestra en la **Figura 3.15**.

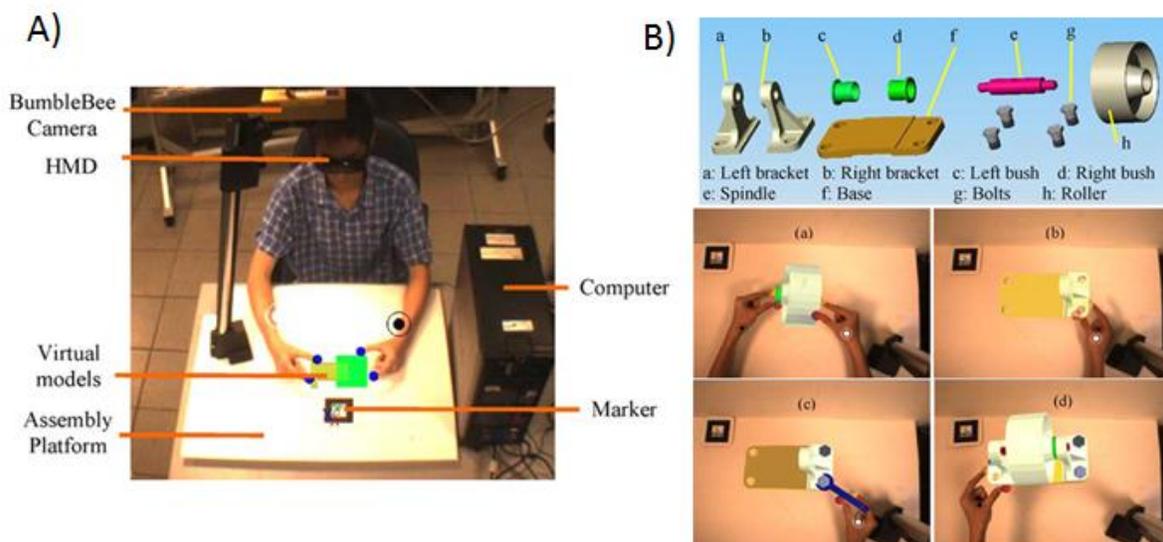


Figura 3.15. A) Área de Trabajo con su Hardware. B) Ejemplo de Ensamblaje. Tomados de[18].

Este sistema es un buen ejemplo de ensamblaje virtual con realidad aumentada, no solo un sistema instruccional como los antes mencionados. Las principales ventajas son el poder usar las manos de forma natural, y sin herramientas extras. Sin embargo, dado que la detección de las manos y de los dedos, depende de ser captados directamente por la cámara, esto limita los movimientos y gestos posibles para la mano. Trabajando con las limitaciones de las posibles configuraciones de la mano, el sistema es robusto, pero limita la naturalidad de la simulación. Otra buena aportación del sistema es la posibilidad de usar herramientas virtuales para el ensamblaje. El desempeño de 15fps, es una limitante, la simulación debería tener por lo menos 30fps. Este problema puede ser solucionado con el uso de hardware con mejores prestaciones.

Otro sistema para ensamblaje virtual con realidad aumentada se presenta en [21]. El sistema hace uso de una cámara Kinect para identificar y localizar la mano del usuario, y posteriormente usarla como un cursor. Adicionalmente, también se detecta el gesto que el usuario hace con su mano, los gestos posibles son: puño cerrado, mano abierta, mano cerrada, dedo índice y ondear la mano. En la **Figura 3.16A** se muestra un ejemplo del sistema. La mano se muestra como un cursor, representado por una esfera amarilla en la simulación. El sistema se le muestra al usuario, con una serie de botones en la parte inferior para que seleccione una acción (trasladar, rotar, escalar, etc.), dichas acciones pueden ser ejecutados en los modelos virtuales. Para el ensamblaje (**figura 3.16B**), las piezas poseen una guía visual (un octaedro) el cual indica, el punto donde encajan las piezas. Una vez que los vectores formados por estos octaedros, se encuentran a cierta distancia, el movimiento de las piezas solo puede realizarse en ese eje.

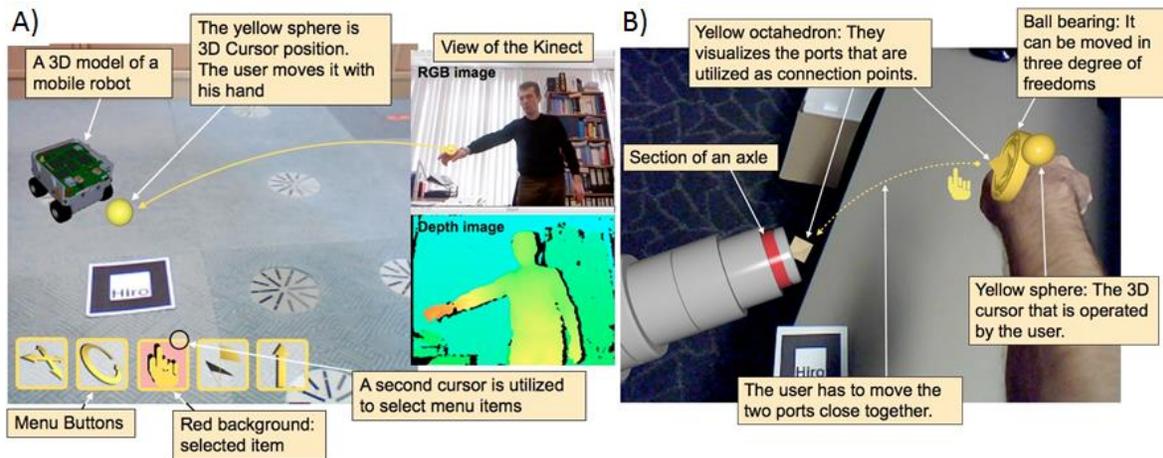


Figura 3.16. A) Entorno de Trabajo. B) Ejemplo de Ensamblaje. Tomados de [21].

En [65], se extienden los trabajos presentados anteriormente en [18, 40], proponiendo un sistema para diseño y ensamblaje con AR (ARDnA por sus siglas en ingles de Augmented Reality Design and Assembly). Una de las características nuevas, es que permite el importar y usar piezas básicas, para armar un producto. Esto evita el uso de sistemas CAD para crear piezas complejas, sin embargo; una vez generada la estructura con dichas piezas básicas, se puede exportar el diseño y ser modificado en un sistema CAD, para agregarle el detalle requerido según la tarea. El sistema también permite trabajar con piezas reales y utilizarlas dentro de la simulación, esto gracias a que dichas piezas tienen pegadas a ellas marcas para identificarlas y proyectar su modelo CAD sobre ellas, pero semi-transparentes, para poder visualizar tanto el objeto real, como el modelo virtual. Además de la interacción con las manos sin hardware en ellas, de los trabajos anteriores, se agregó reconocimiento de gestos para poder realizar modificaciones a los modelos de piezas básicas y aceptar comandos, los gestos son con base en la distancia entre los dedos y el centro de la mano. En la **Figura 3.17**, se presenta un ejemplo del sistema. En él, un usuario replica un carrito de juguete real, con las piezas básicas que provee el sistema. El carrito creado, hace uso de un motor del mundo real como otra pieza virtual.

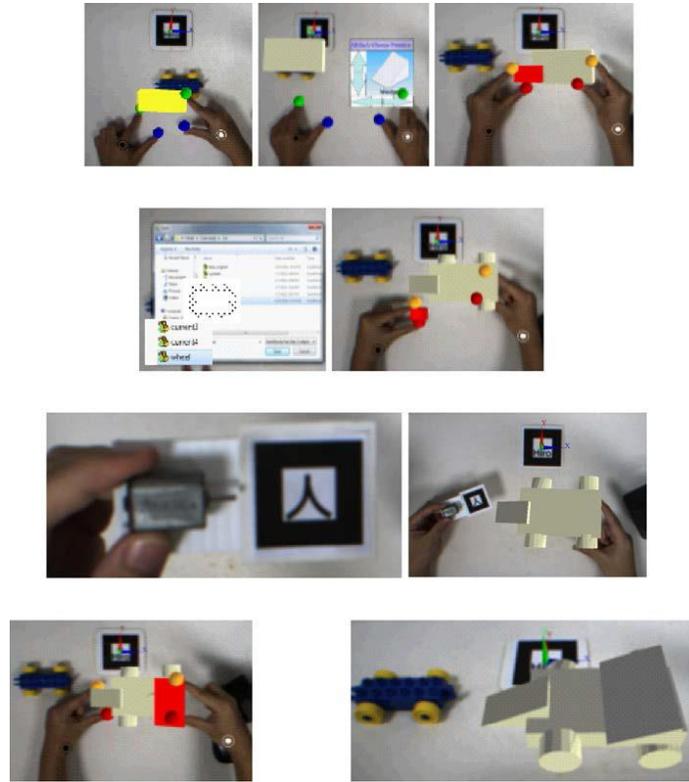


Figura 3.17. Ejemplo de ARDnA para Crear el Modelo Virtual, Basado en un Carrito Real. Tomado de [65].

En [66] presentan un sistema de realidad aumentada, el cual hace uso de dispositivos hápticos portables. La visualización se lleva a cabo con un HMD, y el centro de la simulación con una marca, dispuesta en la mesa de trabajo. El sistema tiene un motor de modelado basado en física para detectar colisiones de las piezas. También realizan un experimento, en el cual les piden a 10 participantes, que armen un carretón de rieles, 10 veces con háptica y 10 veces sin ella de forma alternativa. Comprobaron que el uso de háptica decrece la cantidad de errores cometidos en el ensamblaje. Un ejemplo del sistema se muestra en la **Figura 3.18**.



Figura 3.18. Vehículo a Armar. Tomado de [66].

3.4. Análisis de Resultados

Después de analizar los trabajos más recientes y significativos en sistemas de ensamblaje virtual con realidad aumentada. Se corrobora que dichos sistemas (salvo pocas excepciones), no hacen uso de las ventajas o características que brinda la realidad virtual. Esta falta de aprovechamiento de las ventajas no solo se limita a las técnicas de interacción a nivel de software, sino también a nivel de hardware, ya que no se hace uso de herramientas altamente empleadas en la realidad virtual como son los guantes de datos, dispositivos hápticos, trackers, etc. Esto debido a que normalmente, las tecnologías de realidad aumentada, suelen trabajarse mediante sistemas ópticos (o captura de imágenes), y las soluciones que se llevan a cabo, solo hacen uso de dicha tecnología. Esto es una pena, ya que estas tecnologías enriquecen grandemente la experiencia de la simulación, y es de gran importancia el utilizarlas, ya que con ellas se pueden lograr buenos resultados, como el mostrado en el trabajo actual de tesis.

Un problema que presentan todos los trabajos mencionados que permiten la manipulación de objetos, y que es inherente al uso de tecnologías de tracking basado en visión, es la obstrucción de la línea de visión entre la cámara y las manos del usuario. Dicha obstrucción se lleva a cabo de varias maneras, como puede ser el bloqueo por interponer la cabeza del usuario en la línea de visión, el rápido movimiento de las manos evitando que la cámara capte la imagen o característica que debe rastrear, e incluso, en la manipulación misma de las piezas, ya que es común girar la mano y obtener posturas que

impedirían una línea de visión directa. Algunas de estas condiciones de obstrucción pueden reducirse al colocar en una posición determinada la cámara, en la cual sea poco probable que suceda una obstrucción. Sin embargo, la obstrucción por giros de las manos al manipular objetos, no ha sido resuelta. Este problema reduce la naturalidad de la interacción de las manos reales con el sistema. Comprometiendo también, la gama de acciones y usos que el usuario puede efectuar con sus manos

Este problema latente durante la interacción, no ha reportado solución alguna de acuerdo a la amplia literatura revisada. En el actual trabajo de tesis, se presenta una solución a dicho problema, el cual es un sistema híbrido entre las tecnologías visuales de AR, y las de captura de movimientos (tracking) electromagnéticas utilizadas en la VR. Dicha solución permite el movimiento libre de las manos del usuario, sin tener que preocuparse por la obstrucción visual de la línea de visión entre la cámara y las manos. Lo anterior da lugar a la implementación de la realidad aumentada para sistemas de ensamblaje virtual mediante una interacción natural por parte del usuario.

4. Desarrollo del Ambiente de Realidad Aumentada para Ensamblaje Virtual

En este capítulo se presenta la metodología llevada a cabo con el fin de probar la hipótesis de la investigación: La integración de las tecnologías de realidad aumentada con elementos de ambientes virtuales, mejorará el desempeño de los usuarios en tareas de manipulación y ensamblaje de objetos. La metodología se divide en un diseño general y etapas de desarrollo del ambiente de realidad aumentada para ensamblaje virtual. En cada etapa se presenta el desarrollo de la misma, sus pruebas y experimentos, conclusiones y los trabajos futuros.

4.1. Diseño

Para probar la hipótesis, se creó un sistema de manipulación y ensamblaje virtual con realidad aumentada. El sistema se desarrolló de forma modular aditiva, proceso en el cual se fueron agregando módulos de funcionalidad y, en los casos en que fue necesario, modificando los ya implementados. Este proceso dio lugar a la generación de etapas de desarrollo del sistema, donde cada etapa proveía un conjunto de nuevas características. En algunas de dichas etapas se llevaron a cabo pruebas y experimentos. En los casos en que hubo pruebas y experimentos, también se presentan las conclusiones y los trabajos a futuro.

A continuación, en la **Figura 4.1**, se presentan la arquitectura general del sistema creado.

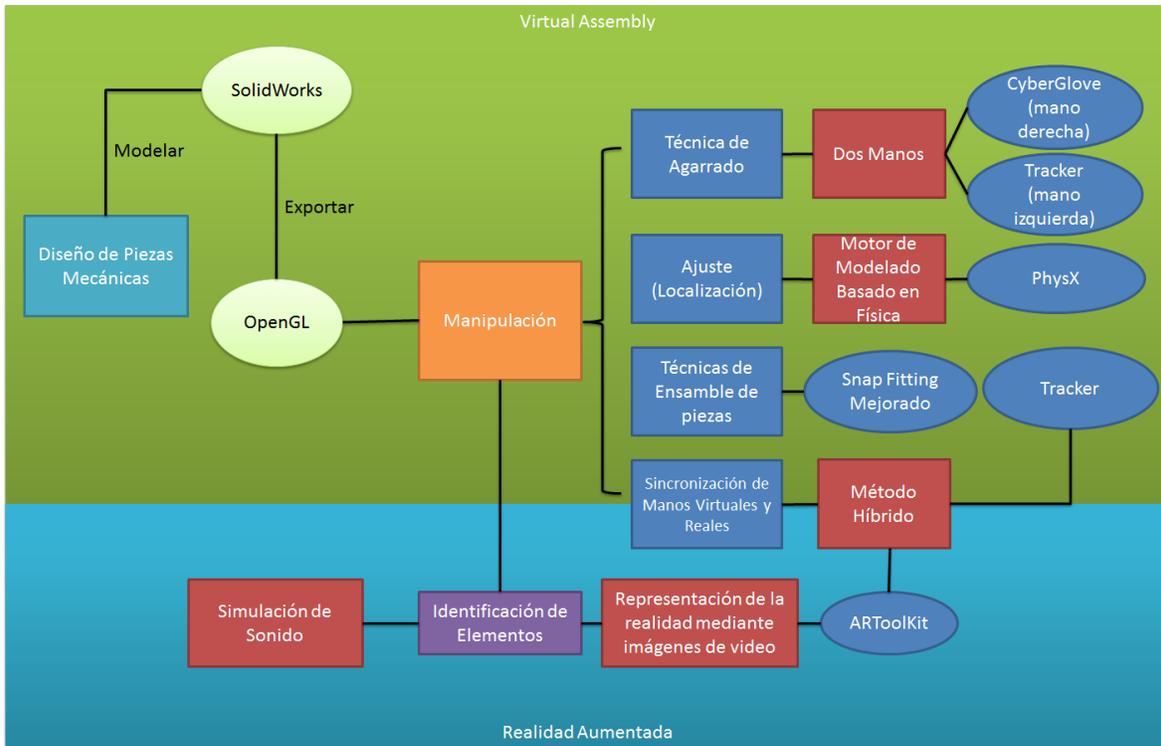


Figura 4.1. Metodología de Trabajo.

Primero, se modelaron las piezas mecánicas con las cuales se trabaja en la simulación. Dicho modelado se realizó con la herramienta SolidWorks™. Los modelos fueron convertidos a mallas triangulares, y posteriormente se exportaron a OpenGL®.

La manipulación de las piezas se divide en 4 secciones:

- La técnica de agarrado que se utilizó, es una técnica que hace uso de las dos manos del usuario. El agarrado se llevó a cabo en la mano derecha con el uso del guante de datos CyberGlove™. En la mano izquierda, se hizo uso del tracker electromagnético Fastrak™, donde se emplearon dos sensores y la distancia entre ellos para simular el cerrado y abertura de la mano.
- El ajuste o localización es el encargado de darle una posición a las piezas en el plano tridimensional, además de definir el comportamiento que simula al mundo real. Para lograr esta simulación cercana a la del mundo real, se hizo uso de un motor de modelado basado en física, el cual simula leyes físicas como la gravedad,

colisiones entre objetos, velocidad, etc. El motor de modelado basado en física seleccionado fue PhysX®.

- Las técnicas de ensamblaje de piezas son las encargadas de lograr la fijación entre ellas, lo cual nos permite unir una o más entre sí, y habilita el manipularlas como si se tratará de una sola. La técnica utilizada fue Snap Fitting Mejorado [31].
- Para la sincronización de las manos reales del usuario, y las virtuales de la simulación, se propuso un método híbrido. El método hace uso de un tracker electromagnético y de las marcas de ARToolKit, para localizar las manos del usuario y posicionar en su lugar las manos virtuales de la simulación.

La identificación de los elementos fue expandida con el uso de la realidad aumentada. La AR se usó principalmente para la visualización por video del entorno real, y la superposición de elementos virtuales. Los elementos a identificar fueron: la mesa de trabajo y las manos del usuario. Se usó las librerías ARToolKit para este fin. Con el fin de incrementar el realismo, se hizo la inclusión de sonidos en la simulación.

El programa se desarrolló en la plataforma Microsoft® Visual Studio® 2010, y el lenguaje de programación utilizado fue C++.

Una vez desarrollado el programa de software final, se llevó a cabo el procedimiento experimental y análisis de los resultados. El procedimiento consistió en usar voluntarios, para que efectuaran el ensamblado de las piezas virtuales usando el sistema, haciendo uso de AR por visión y audio.

Se midieron las siguientes variables:

- La cantidad de tiempo que le toma al usuario el iniciar y terminar la tarea de ensamblado.
- La cantidad de tiempo que le toma al usuario el lograr posicionar una pieza.
- La cantidad de tiempo que el usuario sujeta una pieza.

Para el análisis de los resultados se aplicó un análisis de varianza contra otros sistemas similares antes creados, para ver si hay ventajas en el uso de un método con respecto al

otro; y poder probar si el uso de AR mejora el desempeño del usuario sobre el uso de solo la VR.

Adicionalmente, se efectuó un cuestionario cualitativo a los participantes, para saber cuál fue su impresión del uso de la AR contra la VR, y conocer si los usuarios prefieren y se sienten más cómodos trabajando con una tecnología o la otra.

4.2. Etapa 1: Creación del Entorno de AR con ARToolKit

4.2.1. Desarrollo

La primera etapa del sistema consistió básicamente en la creación de un entorno de AR, en el cual se definió el sistema de coordenadas del mundo virtual, un plano para la mesa de trabajo, y se mostraba un objeto interactivo sobre ella. Dicha etapa tuvo como fin, el explorar las tecnologías de AR, y ser el punto de partida de las demás etapas del sistema.

A continuación se muestran las arquitecturas de hardware y de software del sistema, así como la combinación de ambas y el funcionamiento del mismo.

4.2.1.1. Arquitectura de Hardware

La arquitectura de hardware se muestra en la **Figura 4.2:**

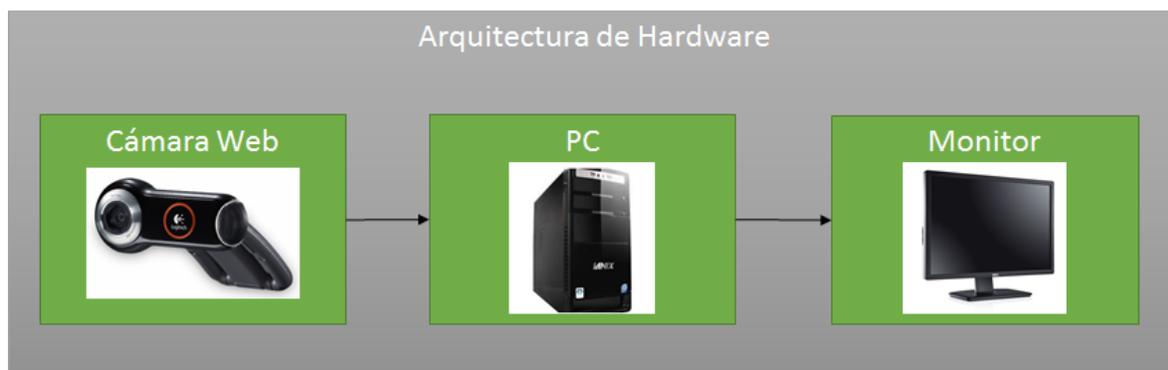


Figura 4.2. Arquitectura de Hardware Etapa 1.

Para esta etapa, los dispositivos de hardware necesarios fueron solamente una cámara web, y una computadora. La cámara en cuestión es una Logitech™ QuickCam® Pro 9000, la cual provee una resolución de 640x480 pixeles a una velocidad de 30 cuadros por segundo (fps), la resolución puede incrementarse, pero a costo de sufrir una pérdida en los fps. La computadora que se utilizó para desarrollar el sistema es una Lanix® Titan con un procesador Intel® Core™ 2 Quad Q9400 @ 2.66GHz, 4GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica Nvidia® GeForce® 8400 GS de 256MB. Para la visualización de la simulación, se hace uso de un monitor convencional con un refresco de imagen de 60Hz.

4.2.1.2.Arquitectura de Software

La arquitectura de software utilizada para el desarrollo del sistema se muestra en la **Figura 4.3:**

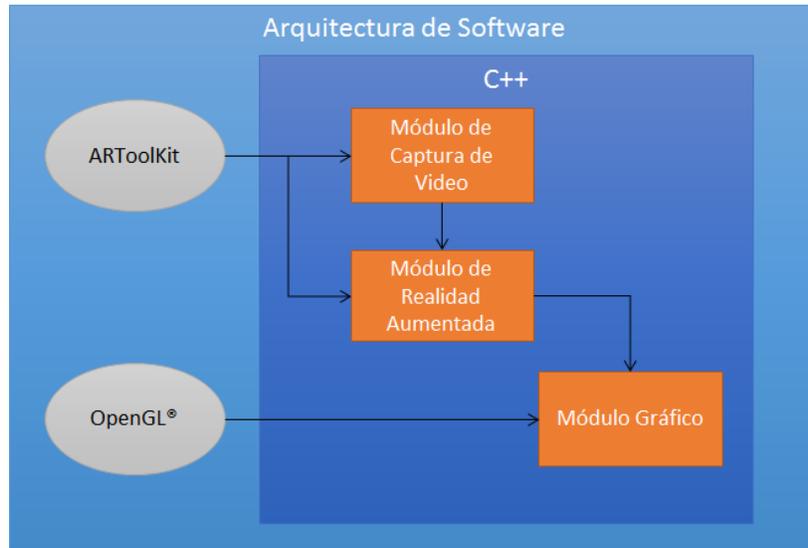


Figura 4.3. Arquitectura de Software Etapa 1.

El sistema fue escrito en el lenguaje de programación C++, haciendo uso de la plataforma Microsoft® Visual Studio® 2010.

Se utilizó la biblioteca ARToolKit versión 2.72.1 para los módulos de captura de video y de realidad aumentada, ambos incluidos en la misma biblioteca. El módulo de captura de video se encarga de detectar alguna cámara conectada a la computadora, abre el puerto y nos entrega la escena captada como un flujo de imágenes, en condiciones ideales, este flujo es de 30 imágenes por segundo a una resolución de 640x480 pixeles cada una. El módulo de realidad aumentada se encarga de detectar marcas dentro de la escena (imagen entregada por la cámara). Dichas marcas son llamadas marcas fiduciales, estas son conocidas por el sistema, después de un previo entrenamiento, y una vez identificadas es posible saber su posición y orientación relativas a un punto de vista dado, dicho punto de vista es el de la cámara.

El Módulo Gráfico, el cual es el encargado de desplegar los gráficos computacionales al usuario, fue creado utilizando OpenGL® (Open Graphics Library) la cual nos permite crear gráficos y escenas en 3D.

4.2.1.3. Desarrollo del Sistema

A continuación se presenta el funcionamiento del sistema. Los puntos a explicar son: la determinación del sistema de coordenadas del mundo virtual y la visualización de la simulación. La unificación de las arquitecturas se presenta en la **Figura 4.4:**

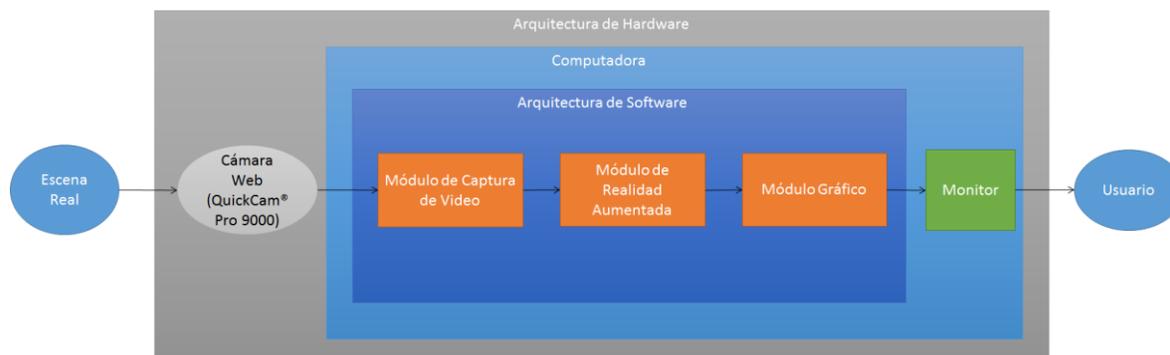


Figura 4.4. Unificación de las Arquitecturas de Hardware y Software Etapa 1.

4.2.1.4. Determinación del sistema de coordenadas del mundo virtual

Para determinar el sistema de coordenadas del mundo virtual, se obtienen las entradas del mundo real, la escena es capturada constantemente por la cámara web gracias al módulo de captura de video. La escena se envía al módulo de realidad aumentada como un flujo continuo de imágenes para su posterior proceso en el módulo gráfico; ambos módulos se incluyen en las bibliotecas de ARToolKit. El módulo de realidad aumentada recibe cada imagen captada por la cámara, y la analiza en busca de posibles marcas fiduciales (**figura 4.5**).



Figura 4.5. Ejemplo de marca fiducial, de la cual se obtiene su matriz de transformación con respecto a la cámara.

El proceso de búsqueda de marcas se lleva a cabo haciendo una binarización de la imagen, después escanea la escena capturada en busca de formas cuadradas, cuando las encuentra, calcula su posición y orientación con respecto a la cámara. Posteriormente intenta identificar las marcas fiduciales con base en las que tiene dadas de alta, una vez localizadas e identificadas, obtenemos el identificador de la marca detectada y su matriz de transformación, la cual se define en la **Ecuación 4.1**.

$${}^{cam}M_{marca} = \begin{bmatrix} R_{marca} & \vec{T}_{marca} \\ \vec{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 4.1. Matriz de transformación para marcas fiduciales.

Donde, ${}^{cam}M_{marca}$ es la matriz de transformación de la marca con respecto a la cámara web, R_{marca} es su matriz de rotación y \vec{T}_{marca} es su vector de traslación.

Una vez obtenidas e identificadas las marcas en la escena, sus identificadores y sus respectivas matrices de transformación le son enviados al módulo gráfico para su uso posterior dentro de la simulación.

4.2.1.4.1. Visualización de la simulación

El módulo gráfico sigue un ciclo normal de OpenGL®, en el cual se encuentra el método correspondiente a la visualización de todos los modelos 3D de la escena. Las coordenadas geométricas de todos los objetos son asignadas mediante las matrices de transformación antes obtenidas. El marco de referencia de la escena (o del mundo virtual) es obtenido a partir de la matriz de transformación de una marca. La simulación se muestra en la **Figura 4.6**. En la figura se puede apreciar la marca fiducial que define el centro de la simulación, y los objetos virtuales que se generan tomándola como punto de referencia.

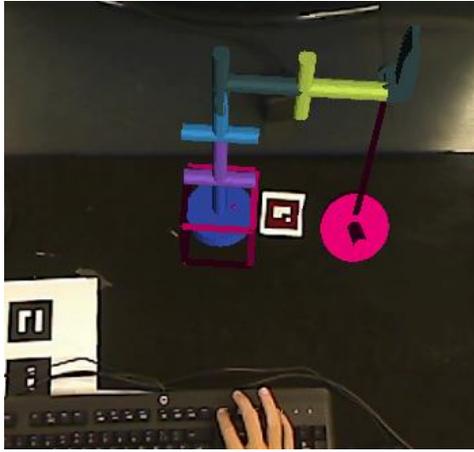


Figura 4.6. Marca fiducial como centro de la simulación.

4.3. Etapa 2: Validación del Entorno de AR para la Interacción con Objetos Virtuales y Comportamiento Dinámico

4.3.1. Desarrollo

La segunda etapa del sistema consistió en la agregación de módulos para poder manipular los objetos virtuales, y dotarlos de comportamiento dinámico. Los módulos son: módulo de captura de movimientos y módulo de motor de física. Esta etapa definió algunas de las características principales que tendría el sistema final, sin embargo, al ser la primera implementación de dichas características, ellas tuvieron que ser refinadas posteriormente. La etapa tuvo una fase de experimentos, y análisis de resultados, los cuales se presentan en la siguiente sección. De esta etapa se generó artículo, el cual fue publicado en el XVII Congreso Mexicano de Robótica [67].

A continuación se explican las adiciones a la Etapa 2 del sistema con respecto a la Etapa 1.

4.3.1.1.Arquitectura de Hardware

La arquitectura de hardware fue enriquecida con la adición de un tracker, el cual fue empleado para la captura de los movimientos de las manos del usuario. El tracker en cuestión fue el Fastrak® de la compañía Polhemus™, el dispositivo es un sistema electromagnético con 6 grados de libertad, el cual nos permite conocer la posición y orientación de hasta 4 sensores con respecto un emisor.

La nueva arquitectura se muestra en la **Figura 4.7:**

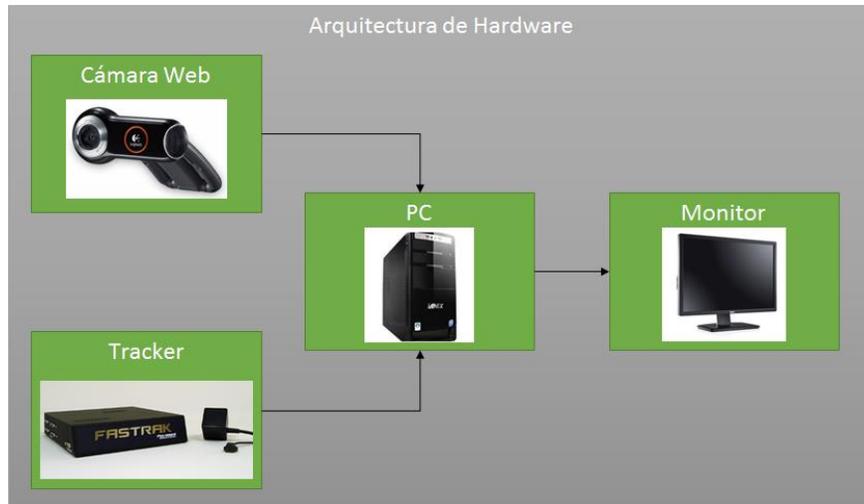


Figura 4.7. Arquitectura de Hardware Etapa 2.

4.3.1.2. Arquitectura de software

Como se mencionó anteriormente, la adición a la arquitectura de software fue el módulo de captura de movimientos y el módulo de motor de física. La arquitectura de software se muestra en la **Figura 4.8**:

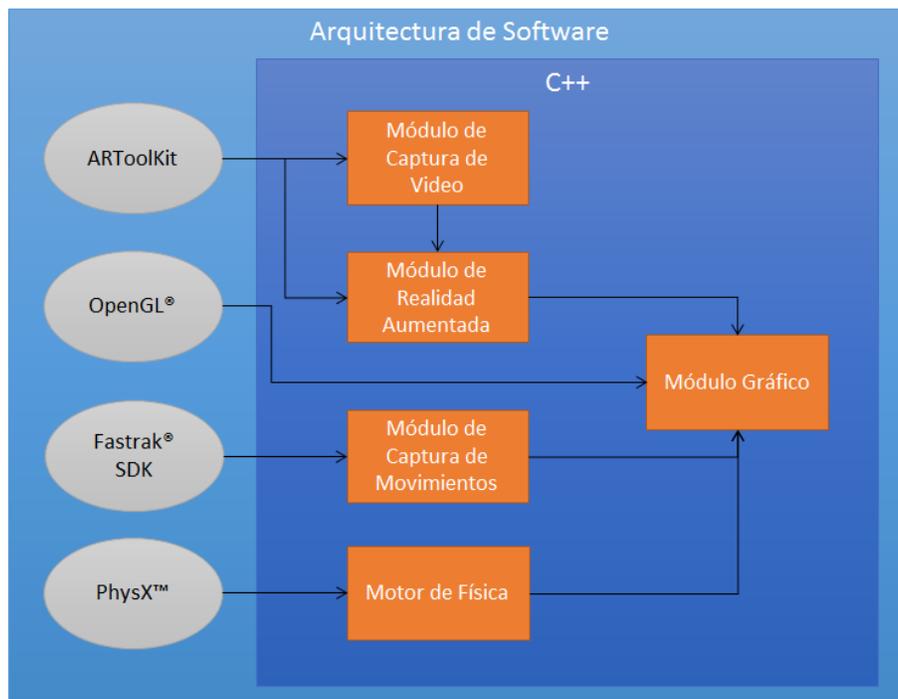


Figura 4.8. Arquitectura de Software Etapa 2.

El Módulo de Captura de Movimientos fue hecho utilizando el Fastrak® SDK de Polhemus™. Dicho módulo nos permite obtener los datos de posición y orientación de cada uno de los sensores; para la traslación se pueden elegir centímetros o pulgadas y para la rotación ángulos de Euler o Cuaterniones.

Para dotar de comportamiento dinámico a los objetos de la escena, se utilizó el motor de física PhysX™ versión 2.8.1 de Nvidia® Corporation. Dicho motor fue utilizado para incluir la fuerza de gravedad en la escena, y colisión de las piezas entre si y contra el área definida como suelo de la escena.

4.3.1.3. Desarrollo del Sistema

A continuación se presenta el funcionamiento del sistema. La implementación anterior de la determinación del sistema de coordenadas del mundo virtual, fue enriquecida con el uso de multimarcas. De igual forma, también se explican las características provistas por los nuevos módulos. La actualización de la unificación de las arquitecturas se muestra en la **Figura 4.9:**

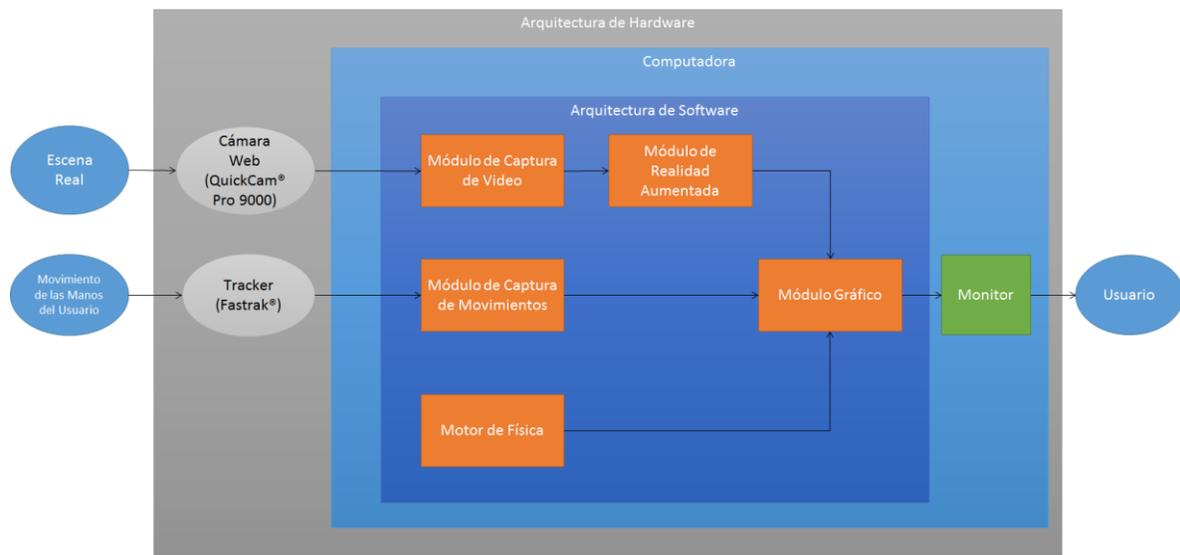


Figura 4.9. Unificación de las Arquitecturas de Hardware y Software Etapa 2.

4.3.1.3.1. Determinación del sistema de coordenadas del mundo virtual

Trabajando con una sola marca, se presentan un par de problemas: la fluctuación de la posición y orientación; y la posibilidad de obstrucción.

La fluctuación de la posición y de la orientación, consiste en el hecho de que, una vez identificada la marca y extraída la matriz de transformación, en el siguiente cuadro de video, dichas posición y orientación, varíen ligeramente (por cambios de luz, enfoque de la cámara, ruido en la captura de la imagen, etc.). Esto da lugar a una matriz de transformación ligeramente diferente a la obtenida con anterioridad, lo que provoca que, al crear la escena, todos los objetos dentro de ella, fluctúen constantemente su posición y orientación. Este problema permite seguir trabajando, pero crea una imprecisión impredecible al momento de interactuar con el sistema.

La posibilidad de obstrucción, es cuando intencional o no intencionalmente, el usuario interrumpe la línea de visión directa entre la cámara y alguna marca fiducial. Aun una obstrucción parcial de dicha línea de visión, interrumpe totalmente el algoritmo de identificación de las marcas, imposibilitando así la obtención de su matriz de transformación. Este problema hace poco factible el trabajar con esta tecnología, ya que, en pro de poder utilizar el sistema, el usuario debe sacrificar una porción de su área de trabajo para no interrumpir la línea de visión.

Con el fin de subsanar estas dos desventajas, es posible hacer uso de multimarcas (**figura 4.10A**), las cuales son también marcas fiduciales, pero dispuestas en un orden definido por el usuario, generalmente como una matriz. Una vez que el módulo de realidad aumentada detecta alguna de las marcas de la matriz, puede calcular la posición de las demás marcas en caso de no haberlas detectado; y en caso de detectar una o más, podemos obtener la matriz de transformación con base en todas. Esto permite un mejor cálculo de la posición de la marca, reduciendo así la fluctuación, además de permitir trabajar aun cuando accidentalmente obstruyamos una o más de las marcas (**figura 4.10B**).

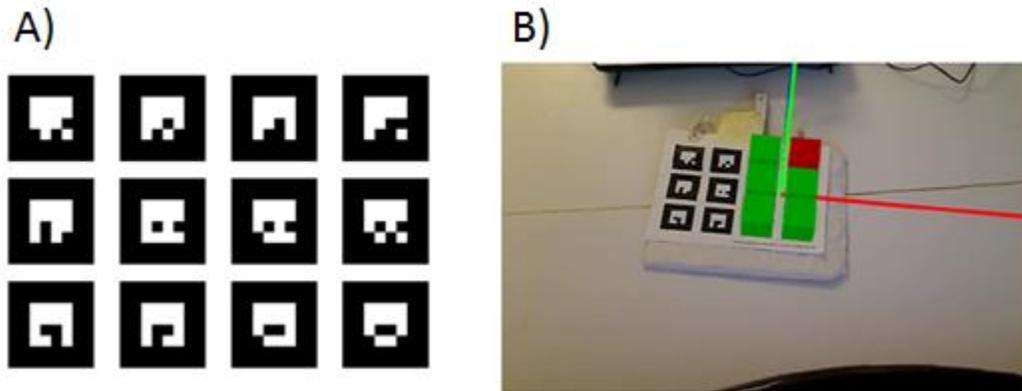


Figura 4.10. A) Multimarca constituida por una matriz de 4x3 marcas fiduciales tomado de[68]. B) Multimarca con 6 marcas activas, en verde se presentan las marcas detectadas y en rojo la no detectada, pero calculada con base en las otras

4.3.1.3.2. Captura de movimientos de las manos

En esta etapa, el usuario puede interactuar con los objetos, para ello debe proveer una entrada al sistema. La entrada en cuestión es la posición y orientación de sus manos, dichos datos se capturan con el tracker y son enviados al módulo de captura de movimientos. El módulo de captura de movimientos nos permite elegir la métrica en la cual se enviarán los datos. Se eligió que el dato de posición sea enviado en centímetros, y el de orientación en ángulos de Euler. Dichos datos son posteriormente ordenados en forma de una matriz de transformación como la mostrada en la **Ecuación 4.1**. La matriz está definida con respecto al sistema de coordenadas del emisor, y no con respecto al sistema de coordenadas de la cámara. Finalmente, las matrices de transformación de ambas manos son enviadas al módulo gráfico.

4.3.1.3.3. Comportamiento dinámico de los objetos

El motor de física nos permite crear formas o modelos geométricos de los objetos modelados en el ambiente y a dichos modelos asignarles un comportamiento dinámico. Dichas formas o modelos son posteriormente asignados a los objetos de la simulación, esto gracias a que las formas del motor de física tienen también una matriz de transformación. Entre los comportamientos asignados a las formas, se encuentran el de

colisión y el de la fuerza de gravedad con respecto a un plano. Dicho plano también es creado gracias al motor de física y es asignado a la simulación. El comportamiento que le asigna el motor de física a los objetos se conoce como comportamiento dinámico. En la **Figura 4.11** se muestran los objetos de la simulación y sus cajas contenedoras definidas en el motor de física.

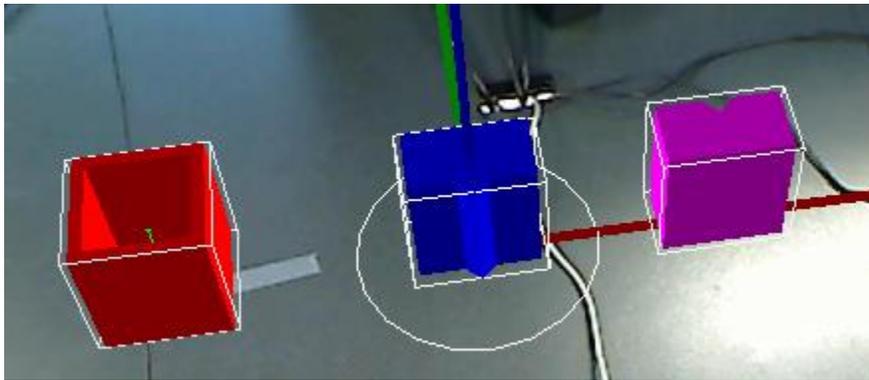


Figura 4.11. Objetos virtuales (objetos de colores) con sus respectivas cajas contenedoras (wireframes blancos).

4.3.1.3.4. Visualización de la simulación

El módulo gráfico se mantiene igual a la etapa anterior, solo se modificó ligeramente la presentación visual de la simulación. El marco de referencia fue generado con el uso de una multimarca (**figura 4.12A**) por las ventajas antes mencionadas. Una vez asignado el origen, el sistema puede funcionar sin la multimarca (**figura 4.12B**), esto gracias a que la matriz de transformación se guarda para ser usada de manera estática. El hacer esto, permite que la matriz de transformación de la multimarca pueda ser usada con otro fin. En la **Figura 4.12C** se muestra un ejemplo de otro uso para la multimarca, en ella la matriz de transformación se usa para generar un objeto (rectángulo café) con el cual se puede interactuar con los demás objetos de la escena. En caso de ser necesario, se puede usar la multimarca para reajustar el origen de la escena (**figura 4.12D**).

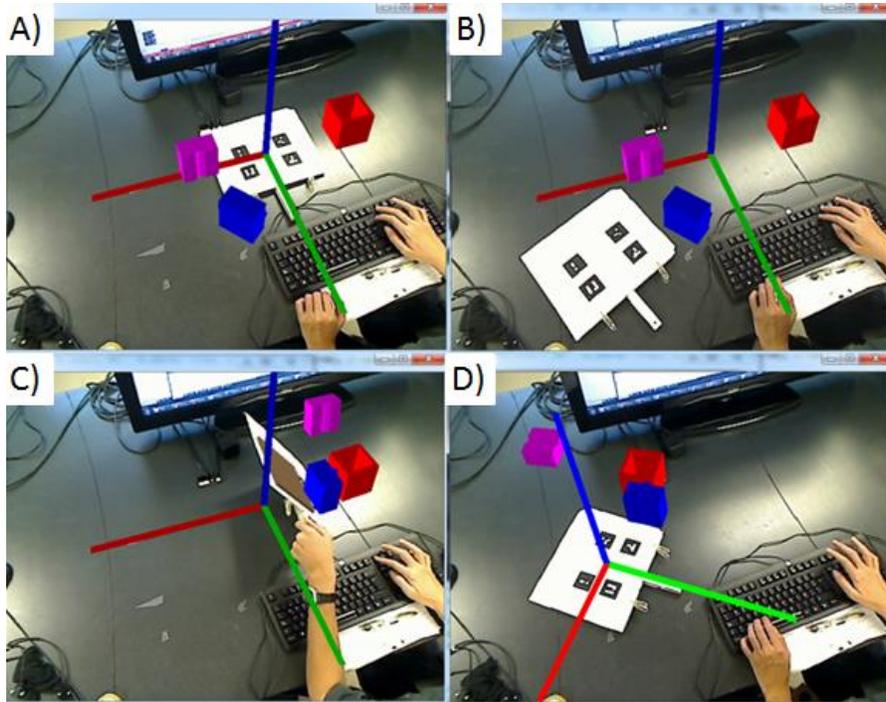


Figura 4.12. A) Origen de la simulación igual a la posición y orientación de la multimarca. B) Una vez utilizada para generar el origen de la simulación, la multimarca puede ser reposicionada. C) Otro uso de la multimarca. D) Reajuste del origen de la escena.

En la escena tenemos un suelo, el cual es el punto barrera de colisión que los objetos no pueden traspasar por obra de la fuerza de gravedad definida en el motor de física (mostrado en el origen como dos círculos concéntricos en la **Figura 4.13A**). Ya que cada objeto creado con el motor PhysX™ tiene un objeto correspondiente en la escena simulada, es necesario sincronizar las coordenadas geométricas de ambos. Para esto, cada objeto visualizado mediante OpenGL® copia las coordenadas geométricas de su caja contenedora correspondiente en PhysX™. De esta forma, los objetos visuales 3D simulan tener las mismas propiedades que los creados en el motor de física, colisión y fuerza de gravedad (mostrados los puros objetos 3D en la **Figura 4.13B** y con sus cajas envolventes en la **Figura 4.13C**).

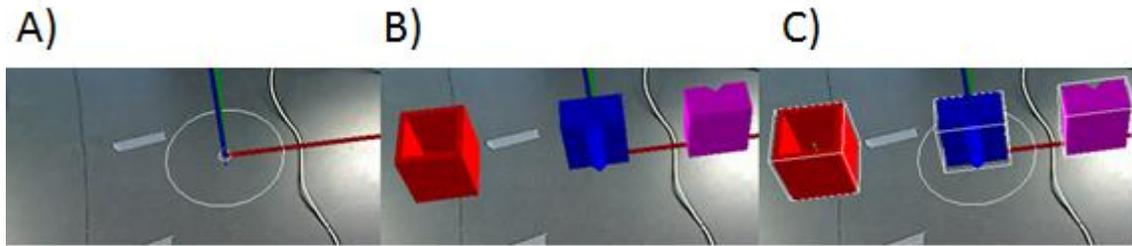


Figura 4.13. A) Suelo definido en el origen de la simulación. B) Objetos 3D hechos en OpenGL®. C) Objetos 3D con sus respectivas cajas envolventes de comportamiento dinámico.

Otros objetos que existen en la escena son las manos del usuario, las cuales, como ya se mencionó, reciben su posición y orientación del tracker. Las manos tienen una caja envolvente simple (no articulada), creada en el motor de física, hecha solo con el fin de poder tocar y mover a los objetos de la escena (**figura 4.14**). Es importante hacer mención de que las manos virtuales no están sincronizadas con las manos reales del usuario, por lo tanto, la naturalidad de la interacción es menor a la que se proveyera en caso de estar sincronizadas.

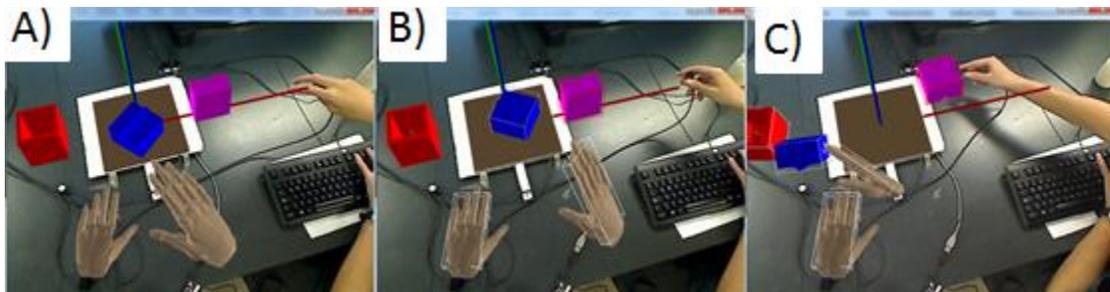


Figura 4.14. A) Se muestran las dos manos virtuales. B) Manos virtuales con su caja envolvente. C) Mano derecha interactuando con los objetos azul y rojo.

4.3.2. Pruebas y Experimentos

El objetivo de las pruebas de esta etapa fue, estudiar la factibilidad de realizar un sistema como el propuesto, tomando en cuenta el rendimiento de la computadora, tratando de definir un punto mínimo para lograr una adecuada ejecución de la simulación.

Para ello se creó el sistema con 3 objetos con comportamiento dinámico, dos manos controladas por el usuario y que permiten la interacción con los objetos, y una tabla manipulable con la matriz de transformación de una multimarca. Además, también se agregó un conjunto de pequeños cubos a la escena para poder apreciar de mejor manera la interacción. Dichos cubos siguen el principio de los objetos de la escena al ser asignados una caja de física que les dota de un comportamiento dinámico y cuya matriz de transformación permite que sean dibujados por el módulo gráfico. En la **Figura 4.15** se muestran capturas de pantalla del sistema mencionado.

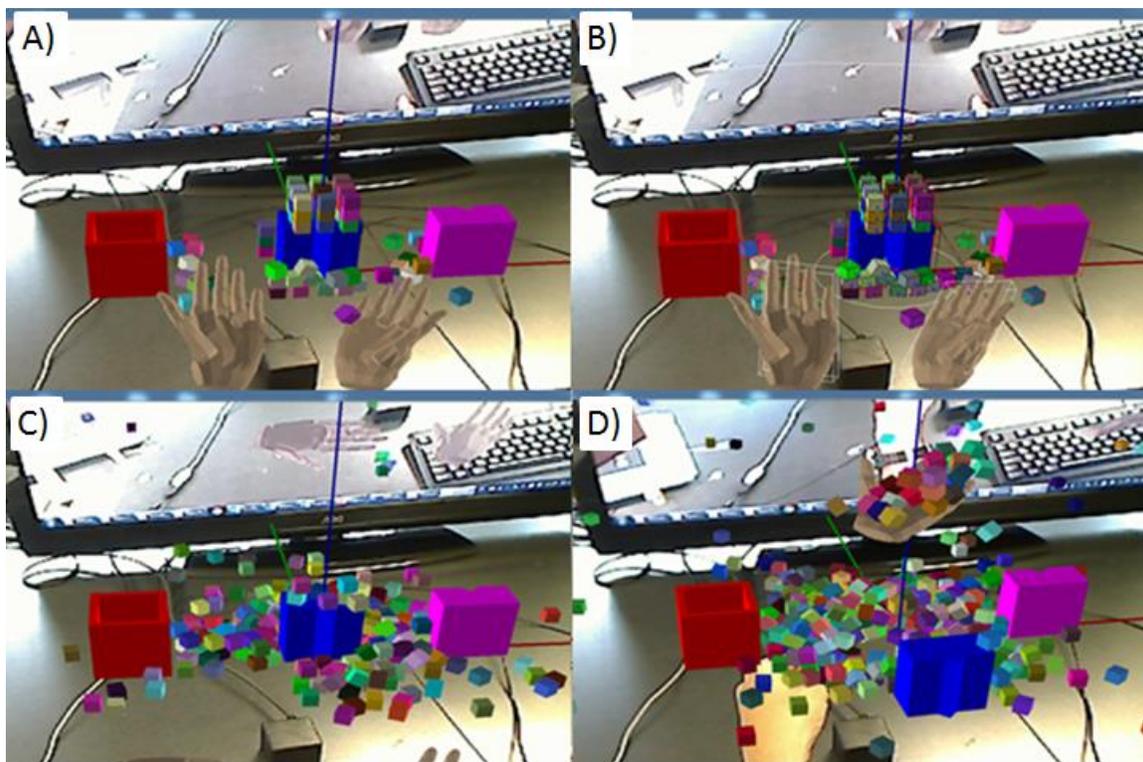


Figura 4.15. A) Escena con las manos virtuales, objetos originales y cubos. B) Objetos con sus respectivas cajas envolventes. C) Se generó una mayor cantidad de cubos. D) Interacción de la mano virtual con los objetos generados.

Una de las desventajas de los sistemas de realidad aumentada es el costo de computación, ya que es necesario recibir información del mundo real, procesarla y con base en ella transmitir una salida al usuario. Dicho proceso tiene un costo de cómputo mayor que el de una simulación de realidad virtual pura. Así mismo, cuando el módulo de realidad aumentada tiene asignadas muchas marcas, el sistema debe ejecutar más ciclos de

comparación para identificarlas, de igual forma, el uso de comportamiento dinámico, como el que el sistema le asigna a los objetos por medio del motor de física, implica un costo extra de computación. Dichos costos aunados son una preocupación, ya que podrían implicar la imposibilidad de aplicar la realidad aumentada en los ambientes en los que se intenta introducir. Para probar si son un problema o no, se realizó un experimento.

El experimento de desempeño, fue ejecutado en 3 computadoras diferentes para poder discernir si las características del hardware generaban una diferencia significativa en el rendimiento. Las características de las 3 computadoras se muestran en la **Tabla 4.1**. El experimento consistió en la creación de varios conjuntos de los cubos antes mencionados. A cada uno de estos conjuntos se les conoce como “oleadas”, y tienen por objetivo el incrementar el costo computacional del programa, intentado así, reducir el desempeño de la aplicación. Cada oleada contuvo 10 cubos, hasta llegar a un máximo de 250 cubos o 25 oleadas. El experimento se realizó para una multimarca la cual iba desde 8 marcas activas hasta 1 marca activa. En cada oleada se captaba los fps promedio y la cantidad de marcas activas de la simulación. Las gráficas de resultados se presentan en la **Figura 4.16**.

Tabla 4.1. Características de las 3 computadoras utilizadas para el experimento de rendimiento.

ID	PC1	PC2	PC3
Sistema Operativo Windows®	7 Ultimate x64	7 Ultimate x32	7 Professional x64
Procesador	Intel® i7 740QM @ 1.73GHz	Intel® Core™ 2 Quad Q9400 @2.66GHz	Intel® Xeon™ E5 @ 2,80GHz
RAM	12.0GB DDR3 @ 664MHz	4.0GB DDR2 @ 398MHz	16.0GB DDR3 @ 531MHz
Tarjeta Gráfica NVIDIA® GeForce®	1023MB GT 425M	256MB 8400 GS	2047MB GTX 660

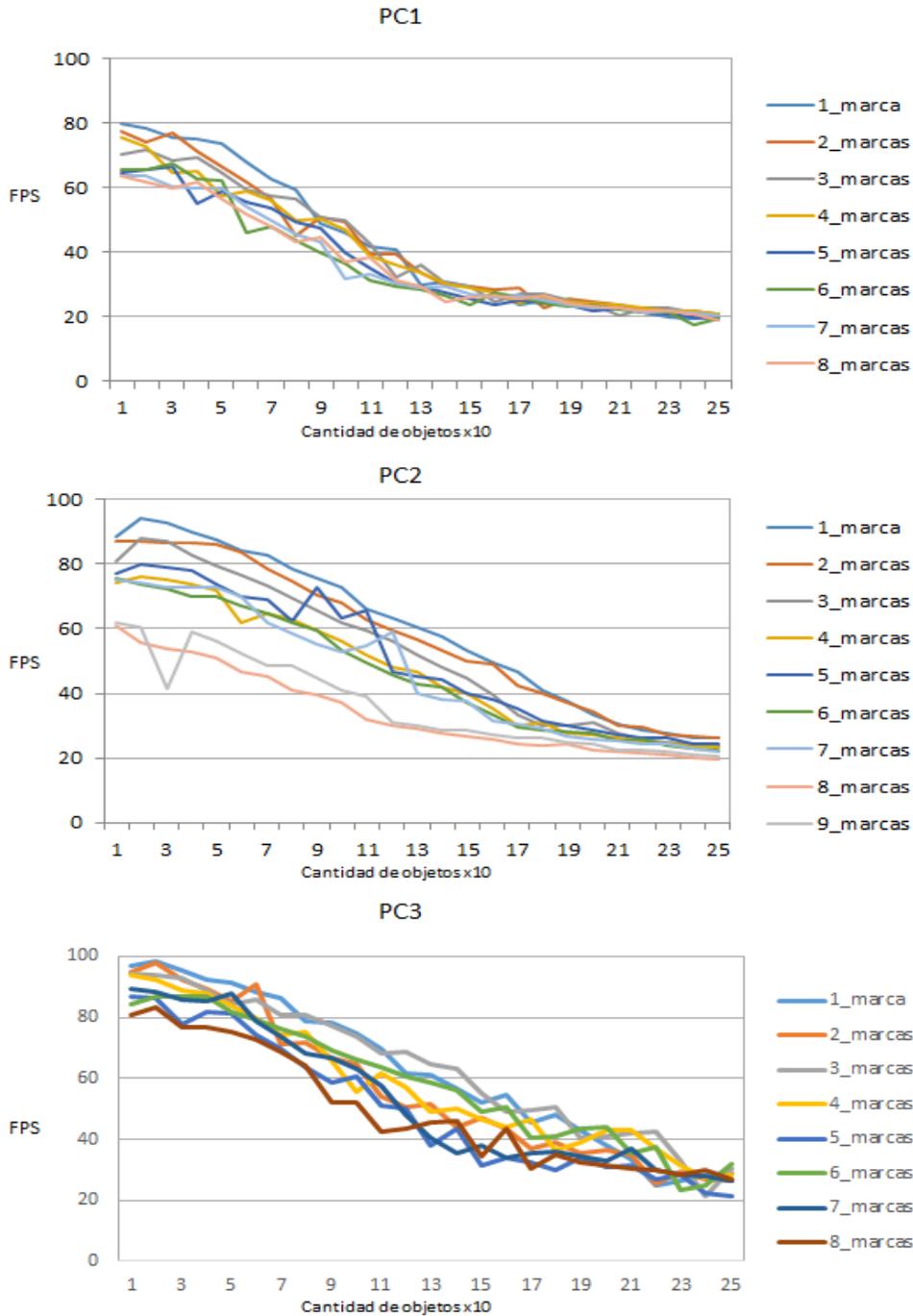


Figura 4.16. Graficas comparativas del desempeño de las 3 computadoras. El eje Y son los fps, el eje X la cantidad de oleadas, y las líneas de colores representan la cantidad de marcas.

En las gráficas se puede corroborar que las 3 computadoras tienen una cantidad de fps inversamente proporcional a la cantidad de marcas a detectar. Dicha diferencia se acentúa

al inicio de la simulación, cuando la cantidad de objetos PhysX™ es pequeña. Cuando la cantidad de objetos es grande (superior a los 170 objetos), hay una convergencia, en la cual, la cantidad de marcas deja de ser un factor decisivo en el rendimiento de la simulación. La computadora que presentó menor rendimiento (tanto inicial como final) fue la PC1, cuyos fps nunca fueron mayores de 80, las otras dos presentan un mejor rendimiento, aunque en la PC2 es más errático, siendo la PC3 la que presenta un rendimiento más constante. Basado en ello, y las características de las computadoras, podemos corroborar que la velocidad del procesador es la principal característica para el rendimiento. Esto se corrobora ya que la computadora con inferior desempeño tiene un procesador de 1.73GHz, mientras que las otras dos son bastante parecidas entre ellas, con velocidades de 2.66GHz y 2.80GHz. En contra de las expectativas, una tarjeta gráfica con mayor memoria, no fue un factor decisivo, ya que la computadora PC1 tiene una tarjeta cuyo modelo es más reciente y de mayor memoria que la que posee la computadora PC2; aun así, el desempeño de la PC2 fue superior a la PC1. Estos datos nos indican que el procesamiento de la simulación se llevó a cabo solo con el procesador y no con la tarjeta gráfica.

4.3.3. Conclusiones de la Etapa y Propuestas para la Etapa Siguiende

Se creó un sistema con realidad aumentada que permite la manipulación de objetos virtuales. El sistema permite visualizar una escena del mundo real y superponerle objetos virtuales, dichos objetos tienen comportamiento dinámico gracias a un motor de modelado basado en física. El usuario puede interactuar con los objetos gracias a un sistema de captura de movimientos, el cual le permite posicionar sus manos dentro del sistema. De igual forma, se hicieron experimentos para probar el rendimiento del sistema con base en la cantidad de marcas fiduciales activas y la cantidad de objetos dinámicos en la escena. Los resultados mostraron que, para mantener un desempeño superior a 30 fps, es importante mantener baja la cantidad de marcas que se deben buscar en la escena, un máximo de 6 marcas es aconsejable, así como también no exceder de 150 objetos dinámicos convexos por simulación. La cantidad de marcas puede ser un problema, según

las necesidades del usuario, sin embargo, la cantidad de objetos dinámicos no debería ser un problema, ya que 150 objetos es un buen número para cualquier simulación.

Con base en el sistema creado, y los resultados obtenidos del experimento, se llega a la conclusión de que es factible la creación de sistemas para la manipulación de objetos con realidad aumentada.

Se propone extender el trabajo actual para que incluya más elementos que mejoren la experiencia del usuario, dichos elementos son:

- Implementación de objetos dinámicos cóncavos.
- La inclusión de los movimientos reales de las partes de la mano con el uso de un guante de datos.
- Crear cajas envolventes de física para cada una de las partes que conforman la mano, mejorando así la detección de colisiones de la mano con los objetos y el realismo de la interacción, como el que se muestra en la **Figura 4.17**, tomado de [69].
- Sincronizar las manos del usuario real con las generadas para la escena virtual.
- Implementar un algoritmo para ensamblar los objetos de la escena y poder, de esta forma, usar el sistema en tareas de ensamblaje virtual.

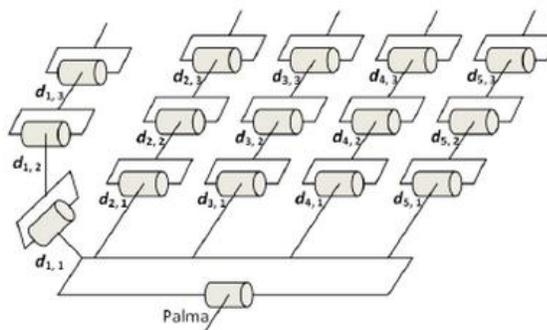


Figura 4.17. Esquema cinemático de la mano virtual tomado de [69].

4.4. Etapa 3: Desarrollo de la Técnica Híbrida de Manipulación de Objetos en Sistemas de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada

4.4.1. Desarrollo

La etapa 3 enriquece al módulo de captura de movimientos, al proveer un medio para monitorear las posiciones de los elementos de la mano del usuario. Esto permite que los movimientos de la mano real del usuario, sean transmitidos a una mano virtual de la simulación. Dicha mano virtual articulada y controlada por el usuario, permite la manipulación de los objetos virtuales de la escena.

La mayor contribución de la etapa 3 fue el desarrollo de una técnica híbrida para la manipulación de objetos virtuales en sistemas de ensamblaje virtual con realidad aumentada. Dicha técnica hace uso de marcas fiduciales y de sensores electromagnéticos, para conocer la posición y orientación de las manos del usuario en todo momento. Solucionando así el problema de la sincronización de las manos reales con las virtuales, y permitir una manipulación natural de los objetos virtuales.

En pro de validar la nueva técnica propuesta, se realizó un procedimiento experimental, el cual se explica y analiza en la siguiente sección. De esta etapa se publicó un artículo en el XVII Congreso Mexicano de Robótica [70].

A continuación se explican las contribuciones de la Etapa 3 del sistema con respecto a la Etapa 2.

4.4.1.1. Arquitectura de Hardware

Con el fin de poder capturar los movimientos de los elementos de la mano del usuario, se hizo uso de un guante de datos. El guante en cuestión es el CyberGlove II® de la compañía CyberGlove Systems®, el cual es un guante de datos con 22 sensores que permiten obtener la posición exacta de cada uno de los elementos de la mano. Por motivos de disponibilidad, solo se hizo uso de uno de estos guantes, el de la mano derecha. La computadora utilizada en etapas anteriores fue reemplazada por una WorkStation de HP®

Z420 con un procesador Intel® Xeon™ E5 @ 2.80GHz, 16GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica Nvidia® GeForce® GTX 660 de 2047MB.

La arquitectura de hardware de esta etapa se muestra en la **Figura 4.18:**

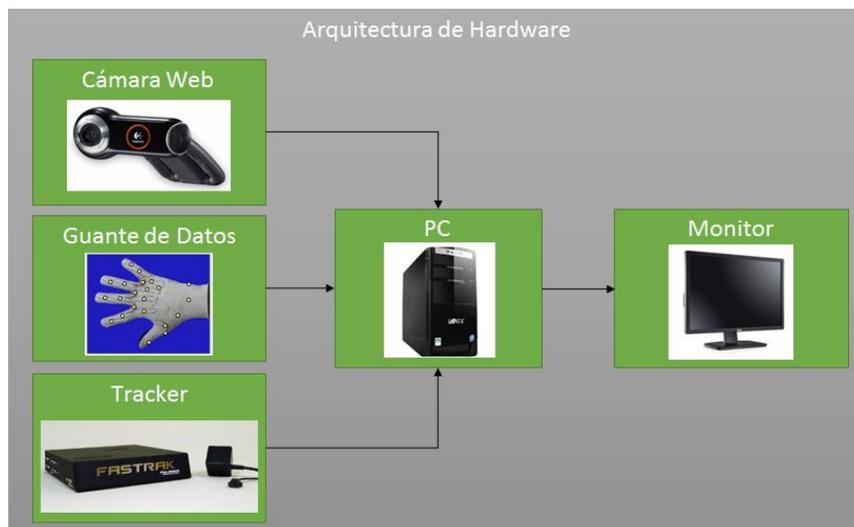


Figura 4.18. Arquitectura de Hardware Etapa 3.

4.4.1.2. Arquitectura de Software

El módulo de captura de movimientos fue actualizado, entregando así no solo la posición y orientación de las manos, si no también, el ángulo de flexión de cada una de las falanges de los dedos de la mano. Dicho módulo fue creado haciendo uso del VHTToolkit® de CyberGlove Systems® y de ARToolkit. ARToolkit fue utilizado para la detección de marcas fiduciales. VHTToolkit® es una biblioteca que permite extraer los datos del Fastrak®, así como del CyberGlove II®.

La arquitectura de software de la etapa 3 se muestra en la **Figura 4.19:**

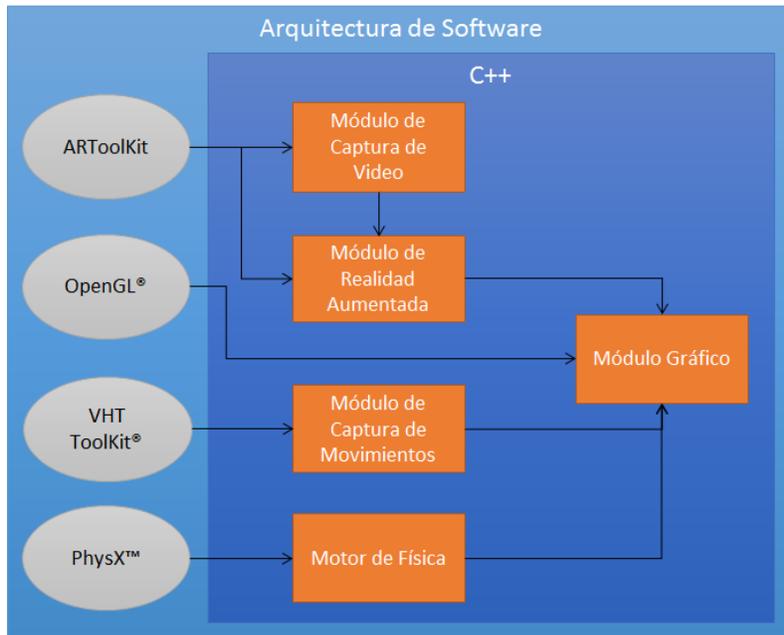


Figura 4.19. Arquitectura de Software Etapa 3.

4.4.1.3. Desarrollo del Sistema

A continuación se presenta el funcionamiento del sistema. Con respecto a la etapa anterior, la determinación del sistema de coordenadas del mundo virtual, el comportamiento dinámico de los objetos y la visualización de la simulación, no sufrieron cambios significativos, por lo que no se mencionarán.

Esta sección se enfocará en la captura de los movimientos de las manos con la técnica híbrida propuesta y la captura de la flexión de los dedos del usuario. La actualización de las arquitecturas unificadas se muestra en la **Figura 4.20**:

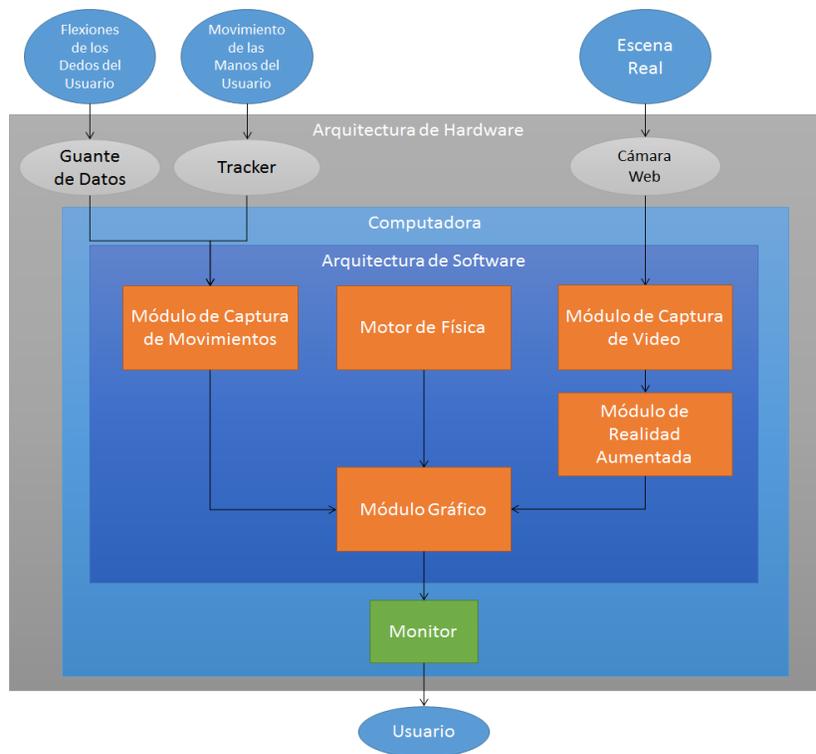


Figura 4.20. Unificación de las Arquitecturas de Hardware y Software Etapa 3.

4.4.1.3.1. Captura de movimientos de las manos con técnica híbrida propuesta

En realidad, el usuario no puede manipular los objetos virtuales con elementos reales, solo objetos virtuales pueden interactuar entre sí. Por esto es necesario hacer una sincronización entre unas manos virtuales, con las manos reales del usuario, y así crear la ilusión de que es el usuario quien manipula de forma natural los objetos con sus manos reales.

El método híbrido es la combinación de dos métodos que, por si mismos, tienen buenas ventajas, pero también tienen desventajas, estos métodos son el uso de marcas fiduciales y el uso de sensores electromagnéticos para la obtención de la orientación y traslación de las manos reales.

El método de las marcas fiduciales requiere que dichas marcas sean puestas en las manos del usuario, una por cada mano. La ventaja de usar este método es que, habiendo las condiciones idóneas, es posible obtener la matriz de transformación de la marca,

posicionar y orientar las manos virtuales en el lugar donde se encuentran las manos reales. Sin embargo, el uso de este método tiene desventajas, en particular hay dos puntos débiles. Uno de los puntos débiles es el bloqueo visual de las marcas por algún otro objeto, como puede ser la cabeza del usuario, o el simple hecho de girar las manos a una posición, donde se vea obstruida la línea de visión de la cámara a esa marca. El otro punto débil es el mover la mano a una velocidad mayor a la cual es posible capturar una imagen clara de la marca. Estos dos puntos limitan nuestro rango de operaciones a ciertos movimientos de las manos, y a cierta velocidad de desplazamiento de las manos. A continuación nos referiremos a estos dos problemas como problema de obstrucción y problema de velocidad.

El método de sensores electromagnéticos es el uso del tracker para establecer la posición y orientación de las manos. Dicho método tiene la ventaja de ser inmune a la obstrucción óptica, y tampoco presenta el problema de velocidad que tiene el método de las marcas fiduciales. Sin embargo, este método, por su naturaleza, tiene el problema de que la exactitud de la señal se puede interferir ante otras señales electromagnéticas que se encuentren presentes en el área de trabajo, así como también, por la presencia de objetos metálicos o cuya naturaleza pueda causar interferencia electromagnética a la señal de los sensores. Estos problemas pueden solucionarse por medio de una adecuación idónea del área de trabajo. Sin embargo, otro problema presente e inevitable en el método del tracker, es que los datos que nos entregan los sensores (su matriz de transformación) son respecto al emisor electromagnético, y no al centro de la simulación. Esto obliga a ubicar siempre de forma precisa al emisor en un área predeterminada, en la práctica, esto no siempre es posible, ya sea porque el área de trabajo no lo permita, o por la imposibilidad del usuario de ubicar (tanto en traslación como orientación) a la perfección al emisor en su lugar predeterminado. Llamaremos a esto problema de posicionamiento del emisor.

Con el fin de solucionar dichos problemas, proponemos un método que es un híbrido de los dos antes mencionados. Este método híbrido tiene las ventajas de los dos métodos y cubre sus desventajas.

El método híbrido consiste en portar en la mano, al mismo tiempo, una marca y un sensor del tracker. Se comienza haciendo uso del método de marcas, ya que este método es bastante bueno mientras no ocurra el problema de obstrucción o el de velocidad. Además, este método nos permite, por medio de multiplicaciones de matrices, obtener las matrices de transformación de las marcas con respecto al centro de la simulación, como se muestra en la **Ecuación 4.2**.

$$({}^{cam}M_{mCentro})^{-1} \cdot {}^{cam}M_{mano} = {}^{mCentro}M_{mano}$$

Ecuación 4.2. Obtención de la matriz de transformación de la marca (mano) con respecto al centro de la simulación.

Donde ${}^{cam}M_{mCentro}$ es la matriz de la marca del centro de la simulación con respecto a la cámara, ${}^{cam}M_{mano}$ es la matriz de la marca de alguna de las manos con respecto a la cámara, y ${}^{mCentro}M_{mano}$ es la matriz resultante, la cual es la matriz de transformación de la marca de la mano con respecto al centro de la simulación.

Si no se presenta el problema de obstrucción o el de velocidad, dicha matriz se utiliza para posicionar y orientar la mano virtual. En caso de presentarse el problema de obstrucción o el de velocidad, se levanta una bandera que indica que la marca no es visible, se guarda su matriz de transformación, y se recurre al uso de los datos que nos envía el sensor del tracker de la mano. En cuanto se levanta la bandera, guardamos la matriz de transformación del sensor, a esto le llamamos el tiempo cero, este dato no se refresca hasta que no se hace visible la marca y desaparece nuevamente. En cada paso o momento de la simulación, se captura la matriz de transformación actual del sensor, a esta la llamamos tiempo actual. En cada paso calculamos, por medio de multiplicaciones de matrices, la diferencia del tiempo actual contra el tiempo cero. Esta diferencia se la agrega posteriormente a la matriz de transformación de la marca que fue guardada al momento de perder su visibilidad. En las **Ecuaciones 4.3** y **4.4** se presentan las multiplicaciones de matrices que permite obtener dicho resultado.

$$\left({}^{emi}M_{tCero} \right)^{-1} \cdot {}^{emi}M_{tActual} = {}^{tCero}M_{tActual}$$

Ecuación 4.3. Obtención de la matriz de transformación del tiempo actual con respecto al tiempo cero.

$${}^{mCentro}M_{mano} \cdot {}^{tCero}M_{tActual} = {}^{mCentro}M_{manoActual}$$

Ecuación 4.4. Obtención de la matriz de transformación de la marca (mano) actual, con respecto al centro de la simulación.

Donde ${}^{emi}M_{tCero}$ es el tiempo cero del sensor con respecto a su emisor, ${}^{emi}M_{tActual}$ es el tiempo actual del sensor con respecto a su emisor, el cual se actualice en cada paso, ${}^{tCero}M_{tActual}$ es la diferencia entre el tiempo actual y el tiempo cero, el cual se le debe agregar a la matriz de la mano con respecto al centro de la simulación ${}^{mCentro}M_{mano}$, y con esto obtenemos ${}^{mCentro}M_{manoActual}$ la cual es el matriz de la mano con respecto al centro de la simulación, pero agregándole la diferencia de las matrices de transformación del sensor.

Con este método híbrido combatimos el problema de la obstrucción y de la velocidad, ya que cuando se presentan, se recurre a la robustez del método del tracker ante estos problemas. Y el problema de posicionamiento del emisor y la obtención del sistema de coordenadas con respecto al centro de la simulación queda solucionado al obtener la diferencia de tiempos de las matrices del sensor y agregársela a la matriz de la marca fiducial. Además, el método tiene la ventaja de que no es necesario alinear la marca con su correspondiente tracker de forma perfecta, el método, al hacer la diferencia de tiempos compensa cualquier imperfección de dicha alineación. Con esto las fortalezas de los dos métodos se unen para cubrir sus debilidades.

En este punto ya tenemos la matriz de transformación de la ubicación de las manos reales, y éstas le son enviadas al módulo gráfico para su posterior procesamiento, el cual consisten en situar las manos virtuales en dicha ubicación.

4.4.1.3.2. Captura de la flexión de los dedos del usuario

La nueva entrada que el usuario le provee al sistema es la flexión de los dedos de su mano, dichas flexiones son capturadas por el guante de datos, y procesadas por VHTToolKit®. Dicha herramienta nos entrega esos valores en forma de los ángulos de flexión de los dedos de las manos, y el valor actual de cada flexión. Dichos datos se utilizan posteriormente para animar los movimientos de la mano virtual del usuario, cuyo esquema cinemático se presenta en la **Figura 4.17**.

4.4.2. Pruebas y Experimentos

En la Etapa 3, las pruebas fueron realizadas con el fin de probar el nuevo método propuesto para la sincronización de las manos reales del usuario y las virtuales. Dicho método subsana algunas de las desventajas de dos tecnologías existentes al combinarlas.

Con el fin de corroborar la validez del método, se desarrolló una prueba experimental. El experimento consistió en mover un objeto de su punto de inicio a un punto de destino. Dicho objeto es un cubo de 10cm, con una cavidad en su parte superior. El punto de destino se localizó a 75cm del objeto en su eje X, y a -15cm en su eje Z. Además el punto destino fue rotado 45° con respecto al objeto. El punto destino se compone de tres regiones concéntricas ilustradas como cuadrados. La exterior mide 40cm de diámetro, la intermedia mide 20cm, y la interior mide 10cm. La parte interior del punto destino mide exactamente lo mismo que cualquiera de las caras del objeto a manipular. En la **Figura 4.21** se muestra el entorno experimental.

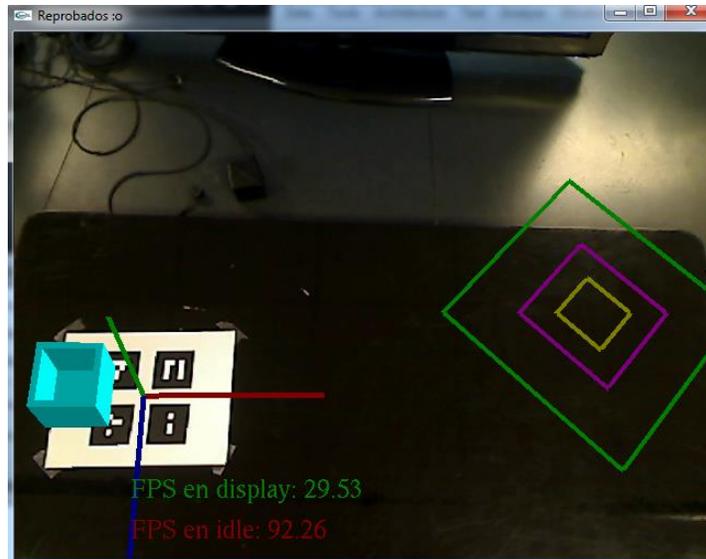


Figura 4.21. Entorno experimental con el objeto a manipular y el punto destino con sus respectivas regiones de proximidad.

El experimento consiste en que el usuario mueva el objeto a la zona destino lo más cerca posible del centro, y con una rotación lo más parecida posible a los 45° del punto destino. Este proceso se debe hacer con cada uno de los métodos, el de marcas fiduciales, el del tracker y el híbrido. El método a utilizar por el usuario se sortea y se asigna aleatoriamente. Antes de empezar cualquier prueba, se le da una breve explicación al usuario de las pruebas que realizará, y se le permite utilizar otro sistema parecido para que se familiarice con este tipo de entornos. La prueba se considera iniciada una vez que el usuario toma por primera vez el objeto, y se considera terminada ya que el objeto se encuentra a 8cm o menos del punto destino.

Los datos que se recopilan en cada prueba son:

- Task Completion Time (TCT), el cual es el tiempo en segundos que le toma al usuario iniciar y terminar la prueba.
- Locating Time (LT), el tiempo en segundos que le tomo al usuario desde que entró a la región más externa del punto destino hasta terminar la prueba.
- La imprecisión en traslación (IT) en centímetros del punto destino contra la posición final del objeto al terminar la prueba.

- La imprecisión en rotación (IR) en grados del punto destino contra la rotación final del objeto al terminar la prueba.

Para la prueba se recibió de la cooperación de 30 voluntarios que realizaron el experimento. El promedio de los datos obtenidos se muestra en la **Tabla 4.2:**

Tabla 4.2. Resultados del experimento Etapa 3.

	Marcas	Tracker	Híbrido
TCT	12.596 seg.	16.873 seg.	12.820 seg.
LT	8.845 seg.	12.294 seg.	9.044 seg.
IT	3.150 cm.	2.698 cm.	3.320 cm.
IR	10.074°	13.530°	9.630°

Basándose en los promedios, para TCT, se puede apreciar que tanto el método de marcas fiduciales y el híbrido presentaron el mejor desempeño, siendo ligeramente superior el de marcas al híbrido. Para LTL se repite el patrón anterior, donde el método de marcas y el híbrido superan al tracker, pero son parecidos entre sí, siendo nuevamente, superior el método de marcas. En IT, el método del tracker fue superior a los otros dos, nuevamente marcas e híbrido son muy parecidos entre sí. Finalmente, en IR, se repite el patrón donde el método de marcas y el híbrido superan al tracker, y ellos son parecidos entre sí, solo que esta vez, el híbrido es ligeramente superior al de marcas.

Estos datos parecen indicar que el método de marcas es superior a los otros dos métodos, sin embargo, tras aplicar un análisis de varianza, se descubrió que no hay una diferencia estadística significativa entre los métodos (la variable p del análisis de varianza nunca fue menor a 0.05).

Dado que uno de los puntos a seguir de este trabajo, es la manipulación natural de objetos e incrementar la percepción de realismo del usuario, junto al experimento, se realizó una encuesta para obtener datos cualitativos de los voluntarios. La encuesta

constaba de 4 preguntas, cada una acompañada de comentarios por parte de los voluntarios. Las primeras 3 preguntas eran para calificar el realismo, la precisión y la facilidad de cada uno de los 3 métodos. Las 3 primeras preguntas se calificaban con un número entre 1 y 10, donde 1 es la menor calificación posible, y 10 la mayor. La cuarta pregunta era si el usuario utilizaría o no un ambiente como este para realizar la simulación. Los promedios de calificaciones se presentan en la **Tabla 4.3**:

Tabla 4.3. Resultados de la encuesta Etapa 3.

Realismo			Precisión			Facilidad		
Marca	Tracker	Híbrido	Marca	Tracker	Híbrido	Marca	Tracker	Híbrido
7.6	7.76	8.23	7.76	7.7	8.2	8	8.03	8.3

La encuesta cualitativa muestra que los voluntarios, encuentran muy similares en las 3 áreas a la técnica de la marca y la del tracker, y consideran que la del método híbrido es mejor que las otras, pero con una diferencia no mayor a 0.47, 0.44 y 0.27 en cada área respectivamente. En la pregunta 4, 29 de 30 voluntarios contestaron que si les gustaría utilizar un sistema como este si tuvieran que realizar una simulación.

4.4.3. Conclusiones de la Etapa y Propuestas Finales para el Sistema de AR

Se desarrolló y evaluó una técnica híbrida opto-electromagnética para la manipulación de objetos virtuales en tareas de ensamblaje virtuales con realidad aumentada. La técnica se comparó contra las otras técnicas de la cual se compone. Después de realizar el proceso experimental con voluntarios, no fue posible encontrar una diferencia estadística significativa entre los métodos. Sin embargo, juzgando por los promedios de desempeño, se puede ver que hay un mejor desempeño utilizando el método de las marcas fiduciales y el método híbrido. Ambos métodos proveen una interacción natural superior al método del tracker, ya que permiten manipular los objetos con una mano virtual posicionada en el lugar donde se localiza la mano real del usuario.

De igual forma, como una manera de medir el punto de vista y aceptación de los voluntarios por los métodos propuestos, se llevó a cabo un cuestionario de carácter

cualitativo. El análisis cualitativo muestra, que a pesar del desempeño que revelan los datos recopilados por el sistema, los voluntarios sienten que el método propuesto fue mejor que los otros dos. Los voluntarios también expresaron su gusto por sistemas como éste, donde la interacción es más cercana a la que ellos esperan tener en la vida real, y se sintieron animados a probar y experimentar futuras extensiones del trabajo.

En el futuro se trabajará con mejoras al sistema y a la técnica híbrida para el mapeo de las manos. Si bien, los datos no muestran una diferencia estadística significativa, se implementará la técnica y se evaluará en una tarea más compleja, como es el ensamblaje virtual. Se espera, que al incluir tareas más complejas y donde las condiciones experimentales no sean idóneas, sino más cercanas a la realidad, se pueda apreciar una diferencia significativa entre los métodos.

4.5. Etapa 4: Sistema de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada

4.5.1. Desarrollo

La etapa 4 es la etapa final del sistema. Esta etapa no posee cambios significativos a nivel de hardware con respecto a la etapa anterior, solo la adición de bocinas para la retroalimentación acústica. A nivel de software se agregó el módulo de sonido, y se llevaron a cabo una serie de modificaciones y ajustes a los módulos ya existentes.

Los cambios más significativos a nivel de software son:

- La adición de los movimientos de abducción y aducción de los dedos del usuario y mapearlo a la mano virtual (anteriormente el modelo cinemático no poseía tal movimiento).
- Detección más realista de las colisiones entre objetos virtuales cóncavos, al cambiar sus cajas envolventes de física de cubos, a representaciones basadas en la malla triangular de dichos objetos.
- Implementación de una técnica de ensamblaje, permitiendo finalmente usar el sistema en una aplicación real de ensamblaje virtual.
- La adición de ayudas visuales para facilitar la tarea de ensamblaje.
- La implementación de sonidos para enriquecer la simulación.

Finalmente, para validar la hipótesis de este trabajo de tesis, se presenta un experimento, el cual se compara con trabajos anteriores, y saber de esta forma, si la aplicación de la realidad aumentada mejora o no, el desempeño del usuario en tareas de ensamblaje virtual.

A continuación se presentan las contribuciones de esta etapa con respecto a la etapa 3.

4.5.1.1.Arquitectura de Hardware

El único cambio a la arquitectura de hardware fue la adición de bocinas para escuchar los sonidos generados en la escena. Las bocinas utilizadas fueron bocinas estéreo convencionales de escritorio. Esto ya que solo se requería tener retroalimentación

acústica, pero la calidad de la misma no era un punto primordial, por ello no se recurrió a hardware especializado de alta calidad.

La arquitectura de hardware de esta etapa se presenta en la **Figura 4.22**:

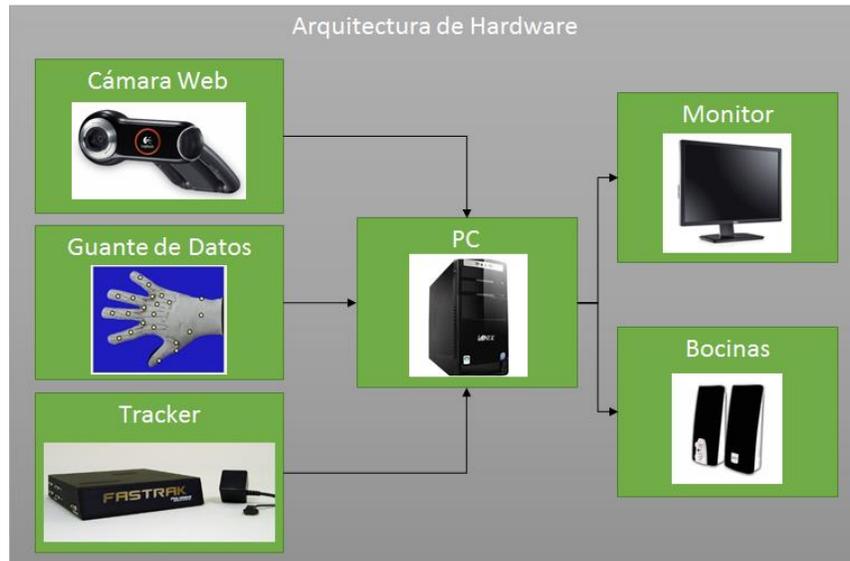


Figura 4.22. Arquitectura de Hardware Etapa 4.

4.5.1.2. Arquitectura de Software

La arquitectura de software fue actualizada con la inclusión del módulo de sonido. Dicho modulo hace uso de las bibliotecas multimedia provistas por el sistema operativo. Dichas bibliotecas permiten la reproducción de un archivo de audio en un dispositivo de salida indicado por el usuario, por defecto, dicho dispositivo es el conectado a la salida de audio de la computadora.

La arquitectura de software de la etapa 4 se presenta en la **Figura 4.23**:

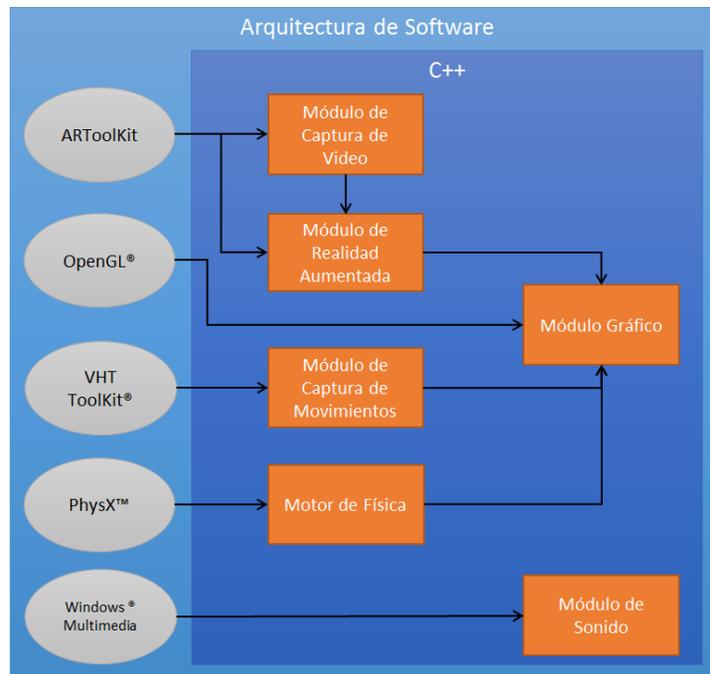


Figura 4.23. Arquitectura de Software de la Etapa 4.

4.5.1.3. Desarrollo del Sistema

A continuación se presenta el funcionamiento del sistema en la etapa 4. Solo se hace mención de las características nuevas que esta etapa tiene con respecto de las etapas anteriores. Se explicarán las mejoras a la captura de movimientos de los dedos del usuario; la mejora a la detección de colisiones del motor de física; la técnica de ensamblaje aplicada; las ayudas visuales agregadas al sistema para facilitar la tarea de ensamblaje; y finalmente el módulo de sonido implementado. La arquitectura unificada final del sistema, se muestra en la **Figura 4.24**.

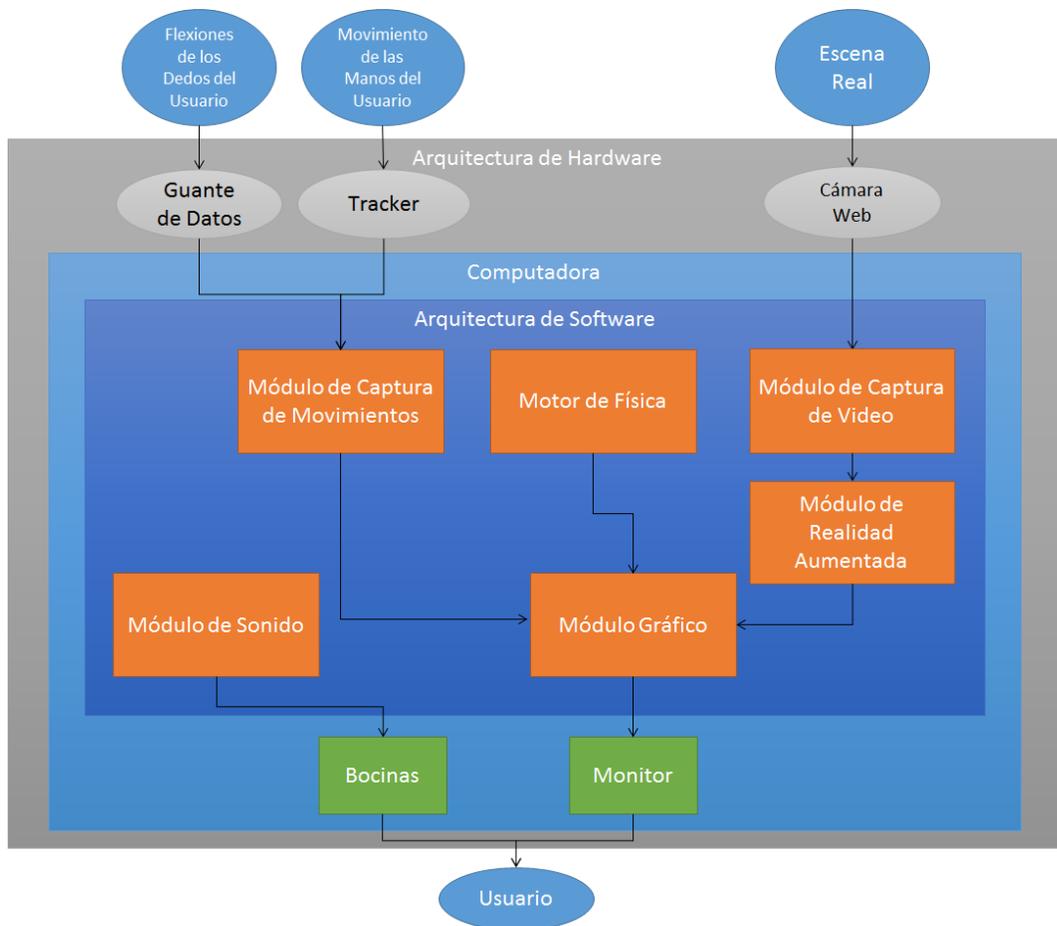


Figura 4.24. Unificación de las Arquitecturas de Hardware y Software Etapa 4.

4.5.1.3.1. Captura del movimiento de abducción y aducción de los dedos

En la implementación de la captura de movimiento de las manos de etapas anteriores, se dejó de lado el movimiento de abducción y aducción de los dedos. El ensamblaje puede realizarse sin estos movimientos, sin embargo, su implementación mejora el realismo de la simulación y por lo tanto, la naturalidad de interacción. Con esta modificación, el modelo cinemático de la mano antes mencionado, se cambia de la forma presentada en la **Figura 4.25**, donde se muestran los dos modelos.

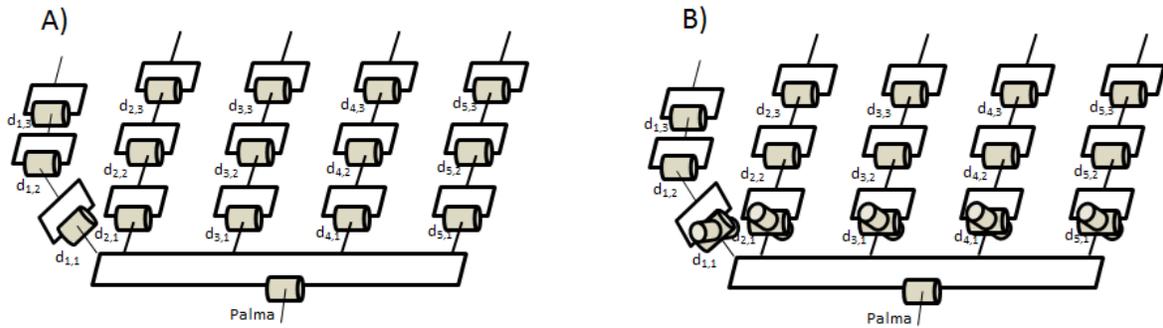


Figura 4.25. A) Esquema Cinemático Anterior de la Mano. B) Nuevo Esquema Cinemático de la Mano.

4.5.1.3.2. Detección de colisiones de objetos cóncavos

No es posible llevar a cabo el ensamblaje entre objetos convexos, se requiere de mínimo un objeto cóncavo para realizarlo. En las etapas anteriores, las figuras se visualizan con forma cóncava, pero la detección de colisiones se llevaba a cabo con cajas envolventes cóncavas, por lo tanto, no era posible realizar un ensamblaje entre ellas. En esta etapa se implementó la creación de una malla de triángulos para colisiones, la cual se corresponde con la malla triangular de la pieza visualizada, de esta forma, la colisión entre piezas virtuales es igual a la esperada en las piezas reales. La **Figura 4.26A** muestra un ejemplo de lo desarrollado en etapas anteriores. En dicha figura se visualizan dos figuras cóncavas, pero sus cajas envolventes de física son prismas rectangulares, por lo tanto son convexas. En la **Figura 4.26B**, se visualizan las mismas figuras, pero su caja envolvente de física ha sido reemplazada de un prisma rectangular a una malla triangular, la cual permite formas cóncavas. En las etapas anteriores, la parte delgada de la pieza de color verde, no podría entrar en la cavidad de la pieza de color violeta. Con la implementación de la etapa actual, si es posible hacer que la parte delgada de la figura de color verde, entre en la cavidad de la figura de color violeta.

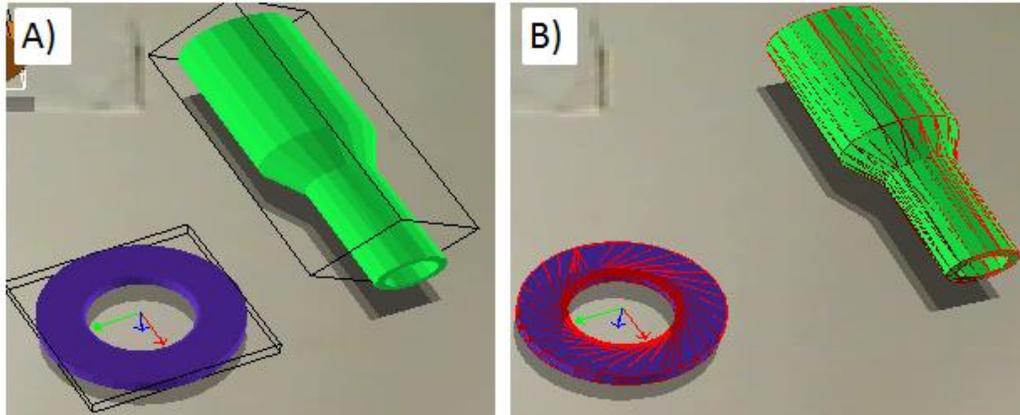


Figura 4.26. A) Caja Envolvente Convexa. B) Malla Triangular Envolvente para Piezas Cóncavas.

4.5.1.3.3. Técnica de ensamblaje

La técnica para ensamblar seleccionada fue el Snap-Fitting mejorado, ya que es una técnica confiable, y el costo computacional requerido para implementarla es bajo. La distancia para hacer el ensamblaje puede ser reajustada, pero por defecto se maneja una distancia de 5mm. Una vez que las dos piezas llegan a la distancia requerida, son unidas por medio de una restricción generada con el motor de física. Dicha restricción impide cualquier movimiento de una de las piezas si este no afecta a la otra, de esta forma, las dos piezas actúan físicamente como una misma. En la **Figura 4.27** se muestran dos figuras ensambladas con la técnica utilizada.

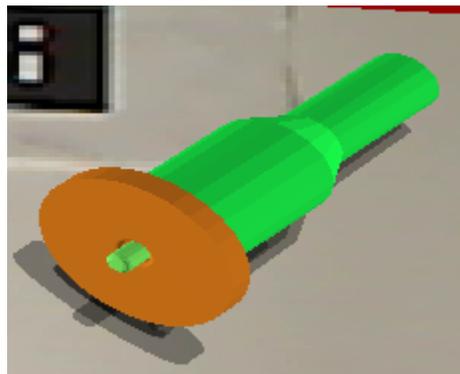


Figura 4.27. Dos Piezas Ensambladas con la Técnica Descrita.

4.5.1.3.4. Ayudas Visuales

Con el fin de reducir la carga mental del usuario, y facilitar así la realización de la tarea de ensamblaje, se le proveen de ayudas visuales. Las nuevas ayudas visuales implementadas son:

- Un diagrama de las piezas que pueden ensamblar entre sí.
- Líneas que indican la orientación en que se deben ensamblar las piezas.

En la **Figura 4.28** se muestra la simulación con todas las piezas disponibles, y en la parte superior derecha se muestra el diagrama con dichas piezas, y por medio de líneas se indica que piezas ensamblan entre sí, dicho diagrama indica la posibilidad de ensamblaje, no el orden del mismo.

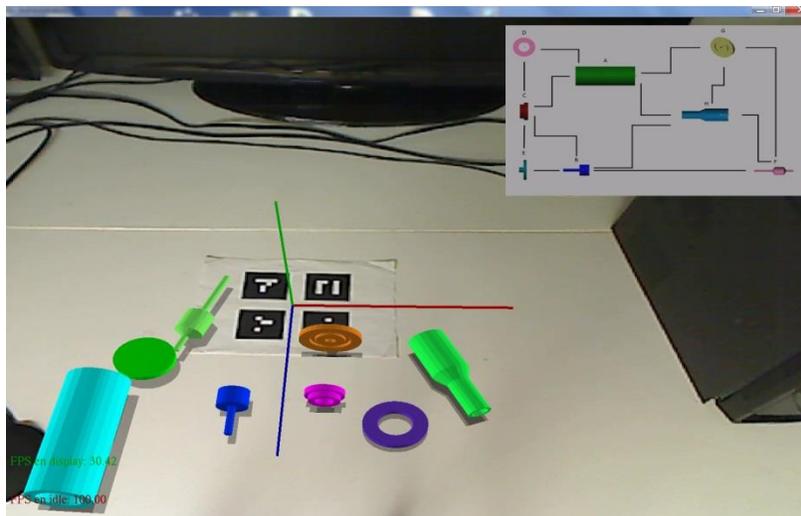


Figura 4.28. Escena con Diagrama de Ensamblaje.

Al tomar dos piezas, y que estas puedan ensamblarse entre sí, se muestran pequeñas líneas amarillas entre las piezas. Estas líneas ayudan a indicar la distancia entre los puntos que se deben tocar para ejecutar la técnica de ensamblaje. Esto ayuda al usuario a saber la orientación que debe darle a las piezas para que puedan ensamblar correctamente. En la **Figura 4.29** se muestra dicha ayuda visual.



Figura 4.29. Líneas Indicando la Orientación Correcta de ensamblaje.

4.5.1.3.5. Implementación de sonidos

Para enriquecer la simulación, y proveer de ayuda sonora al usuario, se implementaron sonidos dentro del sistema. La simulación cuenta con 3 sonidos diferentes, los cuales se activan en los siguientes casos:

- Cuando una pieza cae, e impacta contra la mesa de la simulación.
- Cuando una pieza colisiona con otra pieza.
- Cuando dos piezas se ensamblan entre sí.

De los 3 sonidos, los primeros dos son para agregar realismo a la simulación, y dar una pequeña ayuda al usuario, al saber si las piezas están colisionando entre ellas o con la mesa. El tercer sonido, más que proveer de realismo a la escena, su intención es ayudar al usuario a saber cuándo se ha logrado el ensamblaje. En la vida real, la háptica proveería al usuario con la sensación adecuada de cuando realice el ensamblaje. En el sistema, al no contar con dispositivos hápticos de retorno de fuerza, se hace uso del sonido para indicarle al usuario de cuando esta parte tan importante de su tarea se ha realizado.

4.5.2. Pruebas y Experimentos

Con el fin de probar la hipótesis de este trabajo de investigación, y poder corroborar si la AR, con técnicas de ambiente virtuales, mejora o no, el desempeño del usuario en tareas de ensamblaje, se llevó a cabo un proceso experimental.

Para llevar a cabo las pruebas, se hizo uso de un proceso experimental definido previamente en [8], el cual fue también utilizado en [71]. En dichos trabajos se mide el desempeño del usuario en tareas de ensamblaje, el cual se define como el tiempo que al usuario le toma desde iniciar, hasta terminar la tarea de ensamblaje, en ingles se le conoce como el Task Completion Time (TCT). En [8], se demostró que el uso de tecnologías hápticas, mejora el desempeño de los usuarios en tareas de ensamblaje virtual. Mientras que en [71], se demostró que es posible obtener resultados no estadísticamente diferentes a los anteriores, pero con el uso de unidades hápticas de menor costo monetario. Se eligió utilizar un proceso experimental previamente realizado por otros investigadores, ya que esto nos da la ventaja de poder comparar los resultados obtenidos en el trabajo actual, contra otros ya realizados y validados.

El trabajo a realizar en el experimento, consistió en el ensamblaje de una pieza real dentro de otra. Dichas piezas se encuentran dispuestas como se muestra en la **Figura 4.30A**. Las piezas se encuentran a 30cm de distancia una de la otra. Solo una de las piezas puede ser manipulada, la otra se encuentra fija a la mesa, imposibilitando su manipulación. La tarea que el usuario debía realizar, es la de tomar la pieza de la izquierda con su mano derecha, e insertarla dentro de la pieza fijada a la mesa, como se muestra en la **Figura 4.30B**.

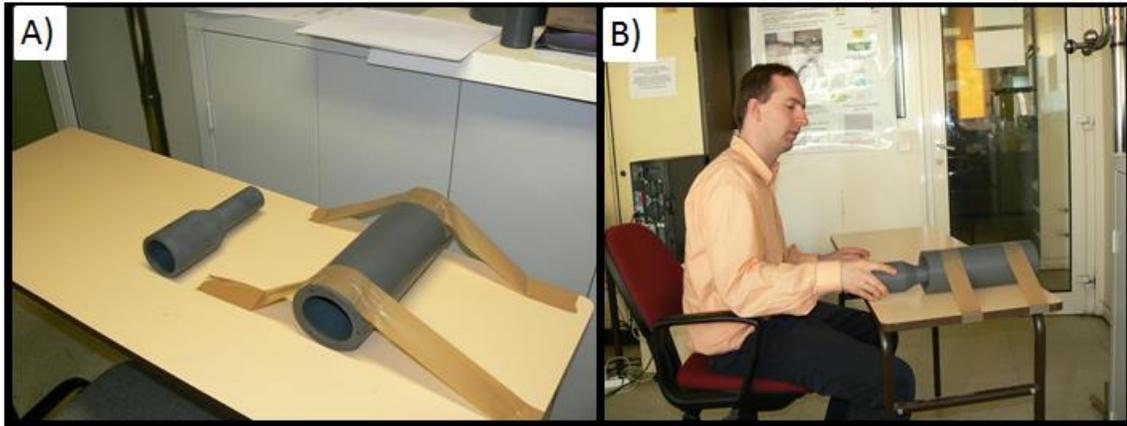


Figura 4.30. A) Condición Experimental en el Mundo Real. B) Usuario Realizando el Ensamblaje Real.

En el proceso experimental original [8], se definieron 3 condiciones experimentales. RW, que es la realización de la tarea en el mundo real. C1, que es la condición en la cual, el usuario interactúa con un entorno virtual, pero no recibe retroalimentación háptica al momento de ensamblar las piezas. C2, que es la condición experimental con retroalimentación háptica. Posteriormente, se agregó la condición C3 en [71], la cual hace uso de retroalimentación háptica, pero con herramientas de bajo costo económico. El entorno virtual de dichos trabajos se muestra en la Figura 4.31A. Finalmente, en el trabajo actual, se define la condición C4, la cual hace uso de realidad aumentada, esta condición se muestra en la Figura 4.31B.

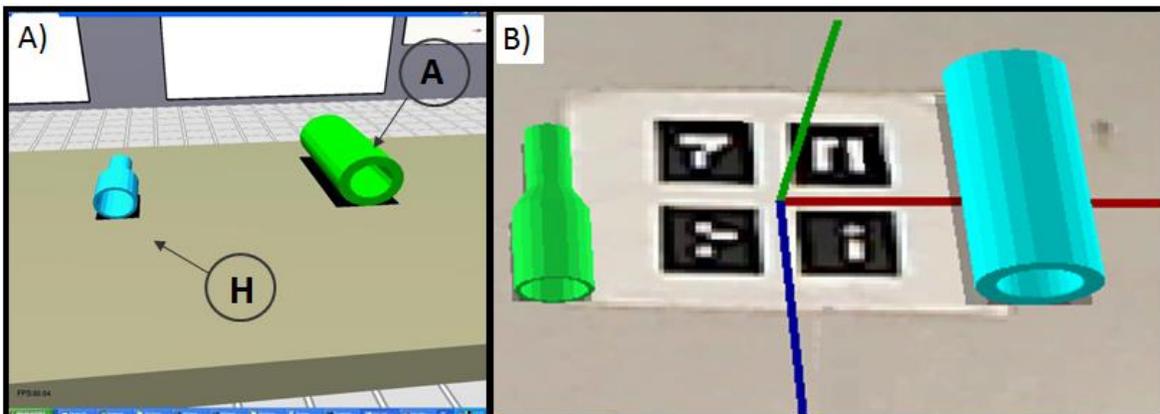


Figura 4.31. A) Condición Experimental con Realidad Virtual. B) Condición Experimental con Realidad Aumentada.

Para la experimentación, se hace uso de 11 voluntarios, varones, diestros, de edad entre 25 y 43 años. En las condiciones C1, C2 y RW, los 11 voluntarios hicieron el experimento en cada condición, se les asigna un tiempo de descanso entre las pruebas, para reducir el factor aprendizaje. Tanto en la condición C3 como en C4, se hace uso de individuos con las características antes mencionadas, pero no son las mismas personas, ya que los experimentos se llevaron a cabo en localizaciones geográficas y tiempos diferentes.

Los tiempos de terminación de la tarea de los voluntarios en cada condición experimental, son los presentados en la **Tabla 4.4**. También se muestran los tiempos promedios en cada condición experimental.

Tabla 4.4. Resultados de los Procesos Experimentales.

Sujetos	SIN HAPTICA (C1)	CON HAPTICA (C2)	Phamton Omni (C3)	AR (C4)	Mundo Real (RW)
	Tiempo(seg)	Tiempo(seg)	Tiempo(seg)	Tiempo(seg)	Tiempo(seg)
1	34.08	12.2	6.65	8.845	6.13
2	20.84	8.17	4.92	5.429	3.07
3	27.08	9.62	6.02	8.361	5.19
4	38.69	15.53	3.09	16.177	4.62
5	16.92	9.3	3.36	8.658	4.95
6	15.81	6.94	6.39	12.512	4.52
7	24.75	10.3	13.11	13.182	4
8	10.89	5.06	3.78	9.657	5.47
9	23.42	8.3	7.9	17.161	4.61
10	18.31	6.14	11.78	14.648	6.04
11	18.39	9.7	3.34	6.365	2.7
Suma:	249.18	101.26	70.34	120.995	51.3
Promedios:	22.65272727	9.205454545	6.394545455	10.99954545	4.663636364

En la **Figura 4.32**, se muestra una gráfica con los tiempos promedio de cada condición experimental.

Medias y 95.0 Porcentajes Intervalos LSD

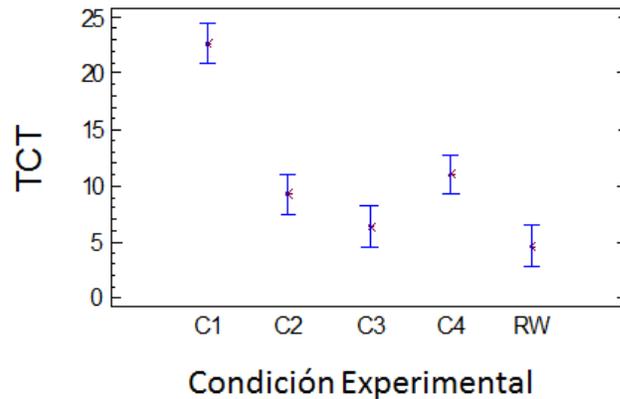


Figura 4.32. Resultados Promedio de TCT, para cada Condición Experimental.

Con base en los datos recopilados, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) en el TCT entre las condiciones experimentales. Esto con el fin de descubrir si existe o no, diferencias estadísticamente significativas entre ellas. En la **Tabla 4.5**, se presentan los resultados de los análisis entre condiciones. Resultados en color verde, se presentan los resultados de las comparaciones que implican a la condición experimental con realidad aumentada (C4), desarrollada en esta etapa de la tesis.

Tabla 4.5. Resultados ANOVA de las Condiciones Experimentales.

Condiciones Experimentales a Comparar	Variable p
[C1]vs[C2]	p< 0.0001
[C1]vs[C3]	p< 0.0001
[C1]vs[C4]	p< 0.0007
[C1]vs[RW]	p< 0.0001
[C2]vs[C3]	p< 0.0860
[C2]vs[C4]	p< 0.2215
[C2]vs[RW]	p< 0.0008
[C3]vs[C4]	p< 0.0029
[C3]vs[RW]	p< 0.1139
[C4]vs[RW]	p< 0.0002

De los resultados ANOVA, se encontró que:

- Usando un nivel de confianza del 95% [$F(1,21) = 23.0$, $P < 0.05$], entre las condiciones experimentales C1 y C4, tomando en cuenta el TCT. Se demuestra que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las condiciones experimentales. Esto demuestra que la condición experimental con realidad aumentada (C4), le permite un mejor desempeño en TCT al usuario, en comparación con la condición experimental sin háptica (C1), con un tiempo promedio de 11.6532 segundos a favor de C4. Esto demuestra la hipótesis de que la integración de las tecnologías de realidad aumentada con elementos de ambientes virtuales, mejorará el desempeño de los usuarios en tareas de manipulación y ensamblaje virtual.
- Usando un nivel de confianza del 95% [$F(1,21) = 1.70$, $P > 0.05$], entre las condiciones experimentales C2 y C4, tomando en cuenta el TCT. Se demuestra que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las condiciones experimentales. Esto demuestra que la condición experimental sin háptica (C2), y la condición experimental con realidad aumentada (C4), le permiten al usuario tener un desempeño similar en tareas de manipulación y ensamblaje virtual, siendo superior C4 por un promedio de 1.7941 segundos. Esto abre las puertas a la implementación y prueba de tecnologías con retroalimentación háptica y realidad aumentada trabajando en conjunto.

4.5.3. Conclusiones de la Etapa

Se creó un sistema para manipulación y ensamblaje virtual, el cual hace uso de realidad aumentada, y técnicas de ambientes virtuales. El sistema permite la visualización del entorno de trabajo real, con la superposición de piezas virtuales. Se hace uso de tecnologías de ambientes virtuales, un guante de datos, y un dispositivo de captura de movimientos, para proyectar dentro la simulación las acciones reales del usuario. Adicionalmente, el sistema posee una innovadora y robusta forma de sincronización las

manos virtuales con las reales del usuario, proveyendo así, de una interacción y manipulación natural. El sistema fue enriquecido con la implementación de un motor de modelado basado en física, el cual provee de comportamiento real a las piezas. El usuario puede tomar y manipular las piezas virtuales, para finalmente lograr el ensamblaje de las mismas. Como ayudas para el usuario, el sistema muestra un grafo de enlaces de piezas, e indica la orientación de ensamblaje de las piezas agarradas. Finalmente, el sistema posee ayudas sonoras para el usuario.

También, se llevó a cabo un proceso experimental, gracias al cual, se pudo comprobar como verdadera la hipótesis de este trabajo de tesis.

Adicionalmente, gracias al análisis de varianza, se pudo observar que, las tecnologías hápticas en trabajos de ensamblaje virtual, son superiores en tiempo de terminación de la tarea, en comparación con las tecnologías con realidad aumentada. Esto abre la puerta a la implementación de sistemas de realidad aumentada con tecnologías hápticas.

5. Conclusiones y Perspectivas Futuras de Investigación

El ensamblaje es una parte muy importante y costosa del proceso de producción, el cual afecta a varias etapas del mismo. Debido a esta importancia, se han buscado técnicas para reducir su costo. En años recientes, y con el auge que ha tenido la realidad virtual, se le ha empleado en las tareas de ensamblaje, creando así, lo que hoy se conoce como ensamblaje virtual. Sin embargo, el ensamblaje virtual sufre la desventaja de una pobre percepción de realismo por el usuario. Esto causa problemas de adaptación en algunos usuarios, y en otros, rechazo al uso de estas tecnologías.

Derivada de la realidad virtual, se creó la realidad aumentada. Esta permite el hacer uso de los elementos del entorno real, y superponer solo los objetos virtuales necesarios en una simulación. El uso de esta tecnología, de forma innata, provee al usuario con una sensación mayor de realismo que la realidad virtual. Sin embargo, tal como se vio en este trabajo, las técnicas, avances y herramientas utilizadas en la realidad aumentada, no van a la par con las de la realidad virtual.

En el trabajo actual, se creó un sistema para ensamblaje virtual que hace uso de realidad aumentada. Dicho trabajo fue desarrollado por etapas. Las aportaciones de dichas etapas son:

- La etapa 1, permitió el inicio del sistema, al sentar las bases necesarias para la creación de un ambiente que hace uso de realidad aumentada. En esta etapa se creó un plano de trabajo, y la visualización de un objeto virtual sobre un entorno real.
- La etapa 2, permite la manipulación de objetos virtuales. Los objetos virtuales poseen un comportamiento dinámico. Por medio de un sistema de captura de movimientos, la posición y orientación de las manos del usuario, son mapeadas a un par de manos virtuales dentro del sistema. Finalmente, en esta etapa, se llevó a cabo un proceso experimental, que permitió definir límites de usabilidad del

sistema. Estos límites son la cantidad de fps, con base en la cantidad de marcas fiduciales en escena y la cantidad de objetos dinámicos.

- La etapa 3, presenta una nueva técnica híbrida, la cual permite la localización de las manos del usuario. Dicha técnica permite la interacción natural del usuario, ya que se sincronizan sus manos reales, con las manos virtuales de la simulación. Esta etapa, también provee al usuario con la captura de los movimientos de los dedos de su mano. Mejorando la manipulación de los objetos de la escena.
- La etapa 4 es la etapa final del sistema. Esta etapa captura más movimientos de la mano del usuario, posee un comportamiento más exacto de los objetos virtuales creados e implementación de sonidos. Lo cual mejora la percepción de realismo y la naturalidad de la escena. También se agregaron ayudas visuales para el usuario, y la posibilidad de ensamblar piezas virtuales. En esta etapa, se llevó a cabo un procedimiento experimental, cuyos resultados y análisis, ayudaron a corroborar como verdadera la hipótesis en la cual se sustenta este trabajo de tesis.

Dentro del actual trabajo, la aportación más grande es el desarrollo e implementación de una nueva técnica híbrida, la cual provee una solución al problema, no antes resuelto completamente, de la localización en todo momento de las manos del usuario. Se implementaron además, otras técnicas de realidad virtual y ambientes virtuales, los cuales ayudaron a incrementar la interacción natural, y la percepción de realismo que el sistema le brinda al usuario. También se llevaron a cabo procesos experimentales para corroborar la validez de los métodos empleados. Finalmente, gracias a los experimentos finales, se pudo comprobar como verdadera, la hipótesis en la cual se sustenta esta investigación y tesis: “La integración de las tecnologías de realidad aumentada con elementos de ambientes virtuales, mejorara el desempeño de los usuarios en tareas de manipulación y ensamblaje virtual”.

Aun con los resultados obtenidos, el trabajo no se detiene en este punto, si no que sirve de línea inicial para continuar investigando. Basado en los resultados obtenidos, y

retroalimentación recibida en los cuestionarios aplicados a los sujetos de prueba, además de la consulta de distintas fuentes, se consideran como trabajos futuros inmediatos:

- Implementación de dispositivos hápticos.
- Adquisición e implementación de HMD.
- Adquisición e implementación de sistemas de captura de alta velocidad.
- Desarrollo e implementación de un algoritmo de agarrado preciso, para piezas cóncavas.
- Búsqueda de alternativas de hardware más económico, para acercar este tipo de sistemas a individuos e instituciones que no pueden costear los gastos de hardware profesional de alto costo.

Finalmente y como conclusión, en este trabajo de tesis, se hizo uso de las técnicas y herramientas de la realidad virtual, pero aplicándolas a la realidad aumentada. Con esto, se logra una interacción más natural y realista que los trabajos realizados anteriormente en realidad aumentada. Esto esperamos, abra las puertas a futuros trabajos, los cuales no limiten su visión al uso de solo un conjunto de técnicas y herramientas. Sino que, futuros investigadores hagan uso de toda la gran gama de tecnologías, técnicas y herramientas que encuentren a su disposición, y que pueden ir más allá de las existentes en la realidad virtual y aumentada.

Referencias

- [1] J. L. Nevins, and D. E. Whitney, "Assembly research," *Automatica*, vol. 16, no. 6, pp. 595-613, 1980/11/01, 1980.
- [2] A. Delchambre, "A pragmatic approach to computer-aided assembly planning," *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, pp. 1600-1605 vol.3, 13-18 May 1990, 1990.
- [3] V. N. Rajan, K. Sivasubramanian, and J. E. Fernandez, "Accessibility and ergonomic analysis of assembly product and jig designs," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 23, no. 5-6, pp. 473-487, 3/20/, 1999.
- [4] S. Jayaram, H. I. Connacher, and K. W. Lyons, "Virtual assembly using virtual reality techniques," *Computer-Aided Design*, vol. 29, no. 8, pp. 575-584, 1997.
- [5] J. R. Wilson, "Virtual environments and ergonomics: needs and opportunities," *Ergonomics*, vol. 40, no. 10, pp. 1057-1077, 1997.
- [6] A. C. Boud, C. Baber, and S. J. Steiner, "Virtual Reality: A Tool for Assembly?," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 9, no. 5, pp. 486-496, 2000/10/01, 2000.
- [7] J.-h. Liu, R.-x. Ning, J. Yao, and B.-l. Wan, "Product lifecycle-oriented virtual assembly technology," *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, vol. 1, no. 4, pp. 388-395, 2006/12/01, 2006.
- [8] U. Zaldivar-Colado, "Planification d'assemblage en environnement virtuel," Laboratoire D'Ingenierie Des Systemes De Versailles, Universite Vesailles Saint-Quentin-En-Yvelines, France, 2009.
- [9] A. Seth, J. Vance, and J. Oliver, "Virtual reality for assembly methods prototyping: a review," *Virtual Reality*, vol. 15, no. 1, pp. 5-20, 2011/03/01, 2011.
- [10] P. Xia, A. Lopes, M. Restivo, and Y. Yao, "A new type haptics-based virtual environment system for assembly training of complex products," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1-4, pp. 379-396, 2012/01/01, 2012.
- [11] P. Carlson, A. Peters, S. B. Gilbert, J. M. Vance, and A. Luse, "Virtual Training: Learning Transfer of Assembly Tasks," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 6, pp. 770-782, 2015.
- [12] C. Richard, and M. R. Cutkosky, "Contact force perception with an ungrounded haptic interface," *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, pp. 181-187, 1997.
- [13] M. Turner, D. Gomez, M. Tremblay, and M. Cutkosky, "Preliminary tests of an arm-grounded haptic feedback device in telemanipulation," *Proc. of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, vol. 64, pp. 145-149, 1998.
- [14] J. Kjeldskov, "Combining Interaction Techniques and Display Types for Virtual Reality," *Proceedings of OzCHI 2001 : Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group*, pp. 77-83, 2001.
- [15] T. Ronald, Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *In Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, no. 4, pp. 355-385, 1997.
- [16] D. W. F. van Krevelen, and R. Poelman, "A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations," *The International Journal of Virtual Reality*, vol. 9, no. 2, pp. 1-20, 2010.
- [17] A. C. Boud, D. J. Haniff, C. Baber, and S. J. Steiner, "Virtual reality and augmented reality as a training tool for assembly tasks," *Information Visualization, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, pp. 32-36, 1999.

- [18] S. K. Ong, and Z. B. Wang, "Augmented assembly technologies based on 3D bare-hand interaction," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 1-4, 2011.
- [19] S. Henderson, and S. Feiner, "Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 17, no. 10, pp. 1355-1368, 2011.
- [20] S. J. Henderson, and S. K. Feiner, "Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task," *Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2011 10th IEEE International Symposium on*, pp. 191-200, 26-29 Oct. 2011, 2011.
- [21] R. Radkowski, and C. Stritzke, "Interactive hand gesture-based assembly for augmented reality applications," *The Fifth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*, pp. 303-308, 2012.
- [22] R. A. Española. "Realidad Virtual," 14/01, 2016; <http://lema.rae.es/drae/?val=realidad>.
- [23] G. C. Burdea, and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [24] C. E. Kim, and J. M. Vance, "Using VPS (Voxmap PointShell) as the basis for interaction in a virtual assembly environment," *ASME 2003 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 1153-1161, 2003.
- [25] S. Jayaram, W. Yong, U. Jayaram, K. Lyons, and P. Hart, "A Virtual Assembly Design Environment." pp. 172-179.
- [26] A. L. Fuhrmann, and B. Greimel, "TEACHING IN VIRTUAL REALITY-CONCEPTS AND EVALUATION," 2001.
- [27] L. Dipietro, A. M. Sabatini, and P. Dario, "A survey of glove-based systems and their applications," *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, vol. 38, no. 4, pp. 461-482, 2008.
- [28] P. Fuchs, G. Moreau, and J.-M. Burkhardt, *Le traité de la réalité virtuelle Volume 2 - L'interfaçage : l'immersion et l'interaction en environnement virtuel*: Presse des Mines, 2006.
- [29] S. Garbaya, and U. Zaldivar-Colado, "The affect of contact force sensations on user performance in virtual assembly tasks," *Virtual Reality*, vol. 11, no. 4, pp. 287-299, 2007/10/01, 2007.
- [30] A. Gomes de Sá, and G. Zachmann, "Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes," *Computers & Graphics*, vol. 23, no. 3, pp. 389-403, 1999.
- [31] U. Zaldivar-Colado, and S. Garbaya, "Virtual assembly environment modelling," *ASME-AFM 2009 World Conference on Innovative Virtual Reality*, pp. 157-163, 2009.
- [32] H. Wan, Y. Luo, S. Gao, and Q. Peng, "Realistic virtual hand modeling with applications for virtual grasping," in *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry*, Singapore, 2004, pp. 81-87.
- [33] R. G. Dewar, I. D. Carpenter, J. M. Ritchie, and J. E. L. Simmons, "Assembly planning in a virtual environment," *Innovation in Technology Management - The Key to Global Leadership. PICMET '97: Portland International Conference on Management and Technology*, pp. 664-667, 27-31 Jul 1997, 1997.
- [34] G. C. Burdea, "Invited review: the synergy between virtual reality and robotics," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 3, pp. 400-410, 1999.
- [35] R. Gupta, "Prototyping and design for assembly analysis using multimodal virtual environments," Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1995.

- [36] R. Gupta, D. Whitney, and D. Zeltzer, "Prototyping and design for assembly analysis using multimodal virtual environments," *Computer-Aided Design*, vol. 29, no. 8, pp. 585-597, 1997.
- [37] V. Buchmann, S. Violich, M. Billingham, and A. Cockburn, "FingARtips: gesture based direct manipulation in Augmented Reality," *Proceedings of the 2nd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, pp. 212-221, 2004.
- [38] P. P. Valentini, "Interactive virtual assembling in augmented reality," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 3, no. 2, pp. 109-119, 2009.
- [39] C. Wu, and H. Wang, "A Multi-Modal Augmented Reality Based Virtual Assembly System," *Proceedings of the International Conference on Human-centric Computing 2011 and Embedded and Multimedia Computing 2011*, Lecture Notes in Electrical Engineering J. J. Park, H. Jin, X. Liao and R. Zheng, eds., pp. 65-72: Springer Netherlands, 2011.
- [40] Z. B. Wang, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, "Augmented reality aided interactive manual assembly design," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 5-8, pp. 1311-1321, 2013/11/01, 2013.
- [41] S. Jayaram, U. Jayaram, W. Yong, H. Tirumali, K. Lyons, and P. Hart, "VADE: a Virtual Assembly Design Environment," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 19, no. 6, pp. 44-50, 1999.
- [42] H. J. Bullinger, M. Richter, and K. A. Seidel, "Virtual assembly planning," *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 10, no. 3, pp. 331-341, 2000.
- [43] A. Seth, H.-J. Su, and J. M. Vance, "A desktop networked haptic VR interface for mechanical assembly," *ASME 2005 international mechanical engineering congress and exposition*, pp. 173-180, 2005.
- [44] A. Seth, H.-J. Su, and J. M. Vance, "SHARP: a system for haptic assembly and realistic prototyping," *ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 905-912, 2006.
- [45] X. Junjie, Z. Gang, and T. Dunming, "A Motion Parallax Rendering Approach to Real-time Stereoscopic Visualization for Aircraft Virtual Assembly," *Virtual Reality and Visualization (ICVRV), 2012 International Conference on*, pp. 1-6, 14-15 Sept. 2012, 2012.
- [46] T. P. Caudell, and D. W. Mizell, "Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes," *System Sciences, 1992. Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on*, vol. ii, pp. 659-669 vol.2, 7-10 Jan 1992, 1992.
- [47] S. Feiner, B. Macintyre, and D. Seligmann, "Knowledge-based augmented reality," *Commun. ACM*, vol. 36, no. 7, pp. 53-62, 1993.
- [48] D. Sims, "New realities in aircraft design and manufacture," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 14, no. 2, pp. 91, 1994.
- [49] S. Feiner, B. MacIntyre, and T. Höllerer, "Wearing it out: First steps toward mobile augmented reality systems," *First International Symposium on Mixed Reality (ISMR 1999)*, 1999.
- [50] V. Raghavan, J. Molineros, and R. Sharma, "Interactive evaluation of assembly sequences using augmented reality," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 3, pp. 435-449, 1999.
- [51] W. Friedrich, "ARVIKA-augmented reality for development, production and service," *Mixed and Augmented Reality, 2002. ISMAR 2002. Proceedings. International Symposium on*, pp. 3-4, 2002, 2002.

- [52] A. Tang, C. Owen, F. Biocca, and W. Mou, "Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly," *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 73-80, 2003.
- [53] D. WILLERS, "Augmented Reality at Airbus," *International Symposium on Mixed & Augmented Reality*, 2006.
- [54] M. Hakkarainen, C. Woodward, and M. Billinghurst, "Augmented assembly using a mobile phone," *Mixed and Augmented Reality, 2008. ISMAR 2008. 7th IEEE/ACM International Symposium on*, pp. 167-168, 15-18 Sept. 2008, 2008.
- [55] N. Gavish, T. Gutierrez, S. Webel, J. Rodriguez, and F. Tecchia, "Design Guidelines for the Development of Virtual Reality and Augmented Reality Training Systems for Maintenance and Assembly Tasks," *BIO Web of Conferences*, vol. 1, pp. 00029, 2011.
- [56] J. N. Marcincin, J. Barna, M. Janak, L. u. N. Marcincinova, and V. Fecova, "Utilization of open source tools in assembling process with application of elements of augmented reality," in *Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, Hong Kong, China, 2011, pp. 427-430.
- [57] A. Peniche, C. Diaz, H. Trefftz, and G. Paramo, "Combining virtual and augmented reality to improve the mechanical assembly training process in manufacturing," *Proceedings of the 6th WSEAS international conference on Computer Engineering and Applications, and Proceedings of the 2012 American conference on Applied Mathematics*, pp. 292-297, 2012.
- [58] J. Novak-Marcincin, J. Barna, V. Fecova, and L. Novakova-Marcincinova, "Augmented reality applications in manufacturing engineering." pp. 65-68. 2012.
- [59] J. Barna, M. Janak, and J. Török, "Augmented Reality Application in the Assembling Process," *Manuf. and Ind. Eng.*, vol. 11, no. 1, 2012.
- [60] H. A. Adas, S. Shetty, and S. K. Hargrove, "Virtual and Augmented Reality based assembly design system for personalized learning," *Science and Information Conference (SAI), 2013*, pp. 696-702, 7-9 Oct. 2013, 2013.
- [61] G. Westerfield, A. Mitrovic, and M. Billinghurst, "Intelligent Augmented Reality Training for Assembly Tasks," *Artificial Intelligence in Education*, Lecture Notes in Computer Science H. C. Lane, K. Yacef, J. Mostow and P. Pavlik, eds., pp. 542-551: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [62] J. Zhu, S. K. Ong, and A. Y. C. Nee, "A context-aware augmented reality system to assist the maintenance operators," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 8, no. 4, pp. 293-304, 2014/11/01, 2014.
- [63] G. Westerfield, A. Mitrovic, and M. Billinghurst, "Intelligent Augmented Reality Training for Motherboard Assembly," *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, vol. 25, no. 1, pp. 157-172, 2015/03/01, 2015.
- [64] A. Syberfeldt, O. Danielsson, M. Holm, and L. Wang, "Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality," *Procedia Manufacturing*, vol. 1, pp. 98-109, 2015.
- [65] L. Ng, Z. Wang, S. Ong, and A. Nee, "Integrated product design and assembly planning in an augmented reality environment," *Assembly Automation*, vol. 33, no. 4, pp. 345-359, 2013.
- [66] K. Murakami, R. Kiyama, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose, "Poster: A wearable augmented reality system with haptic feedback and its performance in virtual assembly tasks," *3D User Interfaces (3DUI), 2013 IEEE Symposium on*, pp. 161-162, 16-17 March 2013, 2013.
- [67] P. Tamayo-Serrano, U. Zaldívar-Colado, X. Zaldívar-Colado, R. Bernal-Guadiana, and S. Tamayo-Serrano, "Desarrollo y Evaluación de una Técnica de Interacción con Objetos Virtuales para Sistemas de Ensamblaje Virtual, Aplicando Realidad Aumentada, Sistema de

- Captura de Movimientos y Comportamiento Dinámico.," *XVII COMRob 2015*, pp. 396-403, 2015.
- [68] C. G. Morcillo, D. V. Fernandez, J. A. A. Jimenez, and J. J. C. Sanchez, *Realidad Aumentada Un Enfoque Practico con ARToolKit y Blender*, España: Bubok Publishing S.L.
- [69] U. Zaldivar-Colado, J. Lizárraga-Reyes, S. Garbaya, X. Zaldívar-Colado, D. Murillo-Campos, and C. G. Martínez-Tirado, "Técnica de Interacción para el Agarrado y Manipulación de Objetos en Ensamble Virtual," in *COMRob XII*, 2010.
- [70] P. Tamayo-Serrano, U. Zaldívar-Colado, X. Zaldívar-Colado, R. Bernal-Guadiana, and S. Tamayo-Serrano, "Desarrollo y Evaluación de una Técnica Híbrida Opto-Electromagnética, para la Manipulación de Objetos Virtuales en Sistemas de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada.," *XVII COMRob 2015*, pp. 404-411, 2015.
- [71] L.-R. Jorge, "Técnica de Interacción para el Agarrado y Manipulación de Objetos en Ensamble Virtual," Universidad Autonoma de Sinaloa, Mazatlan, Mexico, 2013.

Anexos

A. Cuestionario

Nombre:	Sexo: H M	Edad:
Numero de Persona en Iniciar las Pruebas:	/	/2015

	Marcas	Tracker	Híbrido	Fecha y Hora del Inicio de la prueba
Prueba 1				
Prueba 2				
Prueba 3				

Responda las preguntas según su percepción. Las preguntas de rango van de 1 a 10, donde 1 es la menor calificación posible y 10 es la mayor calificación posible.

1) ¿Cómo consideras el nivel de realismo de cada experimento?

Marcas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tracker	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Híbrido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Comentarios: _____

2) ¿Cómo consideras el nivel de precisión para realizar la tarea de cada experimento?

Marcas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tracker	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Híbrido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Comentarios: _____

3) ¿Califique la facilidad para realizar cada experimento? (1 extremadamente difícil; 10 extremadamente fácil)

Marcas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tracker	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Híbrido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Comentarios: _____

- 4) ¿Si tuvieras que realizar una simulación, usarías un ambiente como este?
Sí No

Comentarios Finales: _____

B. Datos de la Etapa 3

TCT en Segundos		
Marcas	Tracker	Híbrido
19.157	11.622	8.439
2.948	15.35	8.892
11.466	8.845	8.721
8.892	5.569	14.679
12.371	11.014	9.984
13.915	10.967	15.444
11.248	9.781	8.361
6.318	4.867	6.147
10.389	13.026	13.12
6.677	8.626	17.036
42.261	32.838	8.097
14.789	37.955	11.981
7.675	9.469	9.36
5.523	64.303	8.892
5.912	17.987	6.085
7.801	6.427	7.753
16.037	40.997	21.014
16.614	8.627	11.029
8.112	15.788	16.349
35.147	20.951	31.106
18.487	11.388	10.92
7.317	12.184	9.828
8.268	42.12	19.422
6.021	5.835	6.037
13.712	18.751	44.694
10.28	14.196	9.251
12.963	8.954	8.159
9.703	16.38	8.33
11.248	6.069	11.294
16.645	15.319	14.18

TCT PAIRWISE COMPARISONS
[Marcas]vs[Tracker] $t(29)=1.60$ $p<0.1209$
[Marcas]vs[Híbrido] $t(29)=0.12$ $p<0.9022$
[Tracker]vs[Híbrido] $t(29)=1.54$ $p<0.1354$

LT en Segundos		
Marcas	Tracker	Híbrido
14.727	5.99	5.522
1.622	12.62	2.543
8.861	6.568	5.102
5.475	3.728	12.246
6.427	7.036	6.412
9.048	8.83	11.154
9.407	7.207	5.865
3.588	3.26	3.339
7.971	9.718	9.516
4.992	5.99	13.214
37.487	30.576	6.365
11.622	31.107	8.986
6.021	7.347	6.022
3.557	59.826	6.427
4.43	13.245	4.571
5.507	4.259	5.445
8.611	28.298	12.59
13.634	5.632	7.769
5.148	3.807	5.974
29.719	17.113	28.564
6.552	5.413	7.316
4.384	8.456	6.817
5.741	24.976	16.348
4.633	4.4	3.775
7.847	12.745	31.574
6.833	8.19	6.396
4.758	5.896	7.504
5.913	9.703	4.976
8.284	4.914	7.566
12.573	11.981	11.434

LT PAIRWISE COMPARISONS
[Marcas]vs[Tracker] t(29)=1.50 p< 0.1439
[Marcas]vs[Híbrido] t(29)=0.13 p< 0.8956
[Tracker]vs[Híbrido] t(29)=1.39 p< 0.1763

IT en Segundos		
Marcas	Tracker	Híbrido
4.741	1.2552	4.5207
2.396	2.4315	4.6465
1.0997	1.2586	1.5913
6.0204	2.3537	1.9358
1.9977	2.4854	3.0737
3.8812	5.6852	1.6445
1.9891	4.8297	1.0885
0.7611	4.1219	1.1217
6.0228	4.8732	5.7429
2.3626	0.6036	6.1173
1.4039	1.3035	2.8045
6.6678	2.8727	1.3165
0.2859	2.9766	2.8047
3.3826	2.1751	5.114
7.2388	6.2341	4.3109
2.7955	1.7986	7.9498
6.5168	2.8112	1.1864
2.3511	3.8313	2.5184
3.6977	2.4302	2.1892
1.6947	1.334	3.587
2.121	1.0273	2.0135
2.9441	3.1259	5.036
1.6691	2.0876	3.4996
5.0439	3.5453	2.0631
0.3564	2.3215	1.6257
6.5153	1.724	5.9505
2.3688	2.5235	1.394
1.7624	0.6231	5.5505
2.9668	2.9435	5.9008
1.4698	3.3786	1.3203

IT PAIRWISE COMPARISONS
[Marcas]vs[Tracker] t(29)=1.19 p< 0.2428
[Marcas]vs[Híbrido] t(29)=0.36 p< 0.7220
[Tracker]vs[Híbrido] t(29)=1.28 p< 0.2106

IR en Segundos		
Marcas	Tracker	Híbrido
18.6999	0.8327	5.4903
28.1017	40.4342	19.0226
2.8929	3.4379	0.2027
0.5385	7.079	13.3462
7.198	2.8176	1.2176
19.3145	16.7033	14.128
12.2834	10.8519	1.5573
0.8029	22.4756	0.5585
19.3225	5.195	15.5862
1.2293	3.8006	11.3646
2.3286	2.1193	1.356
2.649	8.062	2.2678
3.4627	0.5654	0.1516
10.3622	8.309	7.2034
28.9419	30.2334	27.8154
3.8421	2.5345	28.5524
23.8709	36.6975	20.6308
8.5823	25.4543	2.0993
7.5237	3.238	3.8868
0.5884	1.7099	5.4083
22.2832	3.8947	4.115
10.6142	4.2454	3.303
3.3512	41.8172	0.4665
7.1508	34.3615	23.1068
2.958	6.0512	11.1938
30.9224	0.8677	10.2151
0.6568	32.2776	20.1367
5.7297	14.4993	8.5474
4.7005	34.7771	16.3742
11.3436	0.5787	9.6188

IR PAIRWISE COMPARISONS
[Marcas]vs[Tracker] t(29)=1.22 p< 0.2324
[Marcas]vs[Híbrido] t(29)=0.23 p< 0.8159
[Tracker]vs[Híbrido] t(29)=1.64 p< 0.1113

C. Publicaciones y Conferencias

Publicaciones

- “Desarrollo y Evaluación de una Técnica de Interacción con Objetos Virtuales para Sistemas de Ensamblaje Virtual, Aplicando Realidad Aumentada, Sistema de Captura de Movimientos y Comportamiento Dinámico”. En el XVII Congreso Mexicano de Robótica. San José del Cabo, B.C.S., del 11 al 13 de Noviembre de 2015.
- “Desarrollo y Evaluación de una Técnica Híbrida Opto-Electromagnética, para la Manipulación de Objetos Virtuales en Sistemas de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada”. En el XVII Congreso Mexicano de Robótica. San José del Cabo, B.C.S., del 11 al 13 de Noviembre de 2015.
- “Evaluation of Technological Resources on Public Higher Educational Institutions: A Case Study and Results”. En el EDULEARN15: 7th annual International Conference on Education and New Learning Technologies, Barcelona, España, del 6 al 8 de Julio de 2015.
- “An assembly training approach based on virtual and augmented reality strategies”. Enviado para revision en el INTED2016: 10th annual International Technology, Education and Development Conference, Valencia, España, del 7 al 9 de Marzo de 2016.

Conferencias

- Conferencia “Realidad Virtual y Robótica” en ceremonia inaugural en la XXI Semana Nacional de Ciencia y Tecnología en la Torre Académica de la UAS, Culiacán, Sinaloa. Los días 22 – 26 de Septiembre de 2014.
- Conferencia “Realidad Virtual y Robótica” en la XXI Semana Nacional de Ciencia y Tecnología en la Universidad Tecnológica de Culiacán. Culiacán, Sinaloa a 22 de Octubre de 2014.
- Conferencia “Robótica y Realidad Virtual” como parte del Ciclo de Conferencias Temáticas UPMYS 2015 en la Universidad Politécnica del Mar y la Sierra. La Cruz de Elota, Sinaloa. 28 de Enero de 2015.
- Conferencia “Robótica y Realidad Virtual”. Dirigida a los alumnos de sexto grado de la Esc. Prim. Fed. “Ángela Peralta”, en el marco de la semana de Ciencia y Tecnología 2015, por el Aula de Apoyo de Educación Especial de la Zona 10 Sector V. Mazatlán, Sinaloa a 20 de Abril de 2015.
- Conferencia “Realidad Virtual y Robótica”. En la Escuela Informática Navolato, Universidad Autónoma de Sinaloa. Navolato, Sinaloa a 18 de Mayo de 2015.
- Conferencia “La robótica y la realidad virtual: De la mano hacia el futuro”, en el marco de los festejos por el Día del Técnico Superior Universitario. En la Universidad Tecnológica de Escuinapa. Escuinapa de Hidalgo, Sinaloa a 18 de Junio de 2015.
- Conferencia “El Robot como herramienta indispensable en la era Espacial”. Dirigida a los niños del campamento de Verano del Centro de Ciencia 2015 “Mis Vacaciones en la Biblioteca”. Culiacán, Sinaloa a 2 de Julio de 2015.
- Conferencia “Estrategias para Manipulación de Objetos con Realidad Virtual”. En el evento académico XXXIII Aniversario de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas de la Universidad Autónoma de Sinaloa”. Culiacán, Sinaloa, 13 de Octubre de 2015.
- Conferencia “Interacción Natural con Realidad Aumentada para la Realización de Tareas de Manipulación y Ensamblaje de Objetos”. En la 22ª Semana Nacional de Ciencia y Tecnología. Culiacán, Sinaloa, 22 de Octubre de 2015.
- Ponencia “Desarrollo y Evaluación de una Técnica Híbrida Opto-Electromagnética, para la Manipulación de Objetos Virtuales en Sistemas de Ensamblaje Virtual con Realidad Aumentada”. En el XVII Congreso Mexicano de Robótica. San José del Cabo, B.C.S., 13 de Noviembre de 2015.