



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**ENTRENAMIENTO Y PLANEACIÓN AUTOMÁTICA DE PROCESOS DE
ENSAMBLE Y FABRICACIÓN UTILIZANDO REALIDAD VIRTUAL Y
SISTEMAS HÁPTICOS**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Doctor en Ingeniería Mecánica

Presenta:

M.I. Enrique Gallegos Nieto

Asesor:

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo

San Luis Potosí, S. L. P.

Agosto de 2017



Acta No. 791
791

Nombre del sustentante:

Enrique

Gallegos

Nieto



Enrique Gallegos

Firma del sustentante

En la Ciudad de San Luis Potosí, capital del estado del mismo nombre, a los 29 días del mes de Agosto de 2017, se reunieron ante el suscrito, Secretario General de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, los Señores Ingenieros: Dr. Dirk Frederik de Lange

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo (Asesor)

Dr. Elias Rigoberto Ledesma Orozco

Dr. Gilberto Mejía Rodríguez

Dr. Emilio Jorge González Galván

con el carácter de Jurado Calificador y con el objeto de celebrar el examen de:

Doctorado en Ingeniería Mecánica

que sustentó el (la) Señor (ita):

Enrique Gallegos Nieto

De conformidad con el acuerdo dictado por el Señor Rector de la Universidad y en vista de que el (la) sustentante comprobó legalmente haber efectuado todos los estudios profesionales y de posgrado exigidos por el Plan de Estudios en vigor para dicho posgrado.

El examen dio principio a las 18 hrs. 00 minutos y terminó a las 20 hrs. 30 minutos del día de la fecha.

En base al cumplimiento de los requisitos aprobados por el H.

Consejo Directivo para: este programa de
doctorado y

conforme a la votación que por escrutinio secreto hizo el H. Jurado Calificador, el (la) sustentante resultó aprobado por unanimidad.

Para constancia se levantó la presente acta que firman los Señores Sinodales ante el Secretario General de la Facultad que autoriza.

Elias Rigoberto Ledesma Orozco Dr. Hugo Iván Medellín Castillo

Gilberto Mejía Rodríguez
Dr. Gilberto Mejía Rodríguez

Dirk Frederik de Lange
Dr. Dirk Frederik de Lange

Emilio Jorge González Galván
Dr. Emilio Jorge González Galván



Universidad Autónoma
de San Luis Potosí

20 de julio de 2017

**M.I. ENRIQUE GALLEGOS NIETO
P R E S E N T E**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hugo Iván Medellín Castillo** Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Doctor en Ingeniería Mecánica**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de julio del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Entrenamiento y planeación automática de procesos de ensamble y fabricación utilizando realidad virtual y sistemas hápticos”

Introducción.

1. Antecedentes teóricos.
2. Desarrollo del sistema de planeación y entrenamiento virtual de ensamble.
3. Entrenamiento virtual de procesos de ensamble.
4. Planeación virtual de procesos de ensamble y fabricación.
5. Evaluación del entrenamiento y planeación virtual de ensamblajes.
6. Análisis de resultados.

Conclusiones.

Bibliografía.

Apéndices

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ
DIRECTOR

DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



FACULTAD DE
INGENIERÍA

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

El proceso de ensamble es importante durante el desarrollo de un producto, y su costo usualmente rebasa el 50% de los costos totales de producción. Por lo anterior, se han desarrollado un gran número de trabajos de investigaciones relacionados al estudio de los procesos de ensamble. Sin embargo, los sistemas tradicionales en la planeación de ensambles tales como CAD's y algoritmos genéticos, aún están limitados debido a que no consideran la experiencia humana, ni las restricciones físicas que el usuario experimenta en el mundo real (colisiones e interacción entre los objetos). Recientemente las técnicas de realidad virtual-háptica se han sumado en la exploración de este campo de estudio; no obstante, las plataformas propuestas se centran en la evaluación de su funcionamiento interno y se limitan únicamente al cálculo del tiempo para completar la tarea, quedando como una herramienta de ensamble convencional que sólo simula el ensamble sin llegar al análisis y generación del plan de ensamble.

Por lo anterior, en este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de realidad virtual asistido por dispositivos hápticos para llevar a cabo tareas de entrenamiento y planeación virtual de ensambles. El objetivo de la investigación es evaluar la efectividad de las técnicas de realidad virtual y sistemas hápticos como una herramienta para mejorar el desempeño de la planeación y entrenamiento de procesos de ensamble y fabricación. El sistema HAMS desarrollado comprende módulos de entrenamiento y planeación de ensambles virtuales que permiten evaluar la influencia y efecto de los sistemas de ensamble virtual-háptico con respecto a los métodos tradicionales de entrenamiento y planeación de ensambles. Las características más sobresalientes del sistema HAMS son: 1) permite la capacitación y entrenamiento virtual de tareas de ensamble, 2) facilita el análisis del diseño y configuración de productos, y su influencia en el desempeño del proceso de ensamble, 3) genera automáticamente el plan de ensamble a partir de la información obtenida del ensamble virtual-háptico, 4) permite el diseño y balanceo de una línea de producción a partir de la ejecución del ensamble virtual, 5) genera código para ensamble robóticos a partir de la ejecución del ensamble virtual.

Los resultados de entrenamiento virtual mostraron una mejora significativa de hasta un 80% en el desempeño del ensamble real para el personal que se entrenó a través de sistemas HAMS, comparado con las personas que se sometieron a un entrenamiento tradicional. Los resultados también revelaron que la efectividad del entrenamiento virtual-háptico depende de la complejidad del ensamble, es decir, entre más compleja sea la tarea, mayor será la efectividad del entrenamiento virtual. Por otro lado, el sistema HAMS demostró ser una herramienta efectiva en el proceso de planeación de ensamble, ya que aprovecha la experiencia e intuición del experto. De esta manera, el sistema HAMS no está limitado a la simple ejecución del ensamble virtual, sino que aprovecha las técnicas de realidad virtual y los sistemas hápticos para la obtención de información técnica que ayuda a diseñar un proceso real de ensamble, desde sus primeras pruebas de ensamble hasta la configuración de la línea de producción.

ABSTRACT

The assembly process is important during the development of a product, and its cost usually exceeds 50% of the total production costs. Due to the above, a large number of research work related to the study of assembly processes has been developed. However, traditional systems in assembly planning such as CAD's and genetic algorithms, are still limited because they don't consider the human experience or physical constraints that the user experiences in the real world (collisions and interaction between objects). Recently the techniques of virtual-haptic reality have been added in the exploration of this field of study; however, the platforms focus on the evaluation of their internal operation and are limited to the calculation of the time completion task, remaining as a conventional assembly tool that only simulates the assembly without achieving the analysis and generation of the assembly plan.

Therefore, this work presents the development of a virtual reality system assisted by haptic devices to carry out training task and virtual assembly planning. The objective of the research is to evaluate the effectiveness of virtual reality techniques and haptic systems as a tool to improve the performance of planning and training of assembly and manufacturing processes. The HAMS system developed includes training modules and planning of virtual assemblies that allow to evaluate the influence and effect of the virtual-haptic assembly systems with respect to the traditional methods of training and assembly planning. The most outstanding features of the HAMS system are: 1) allows the training and virtual training of tasks of assembly, 2) facilitates the analysis of the design and configuration of products, and their influence on the performance of the assembly process, 3) automatically generates the assembly plan from the information obtained from the virtual-haptic assembly, 4) allows the design and balancing of a production line from the execution of the virtual assembly, 5) generates the code for robotic assembly from the execution of the virtual assembly.

The virtual training results showed a significant improvement of up to 80% in actual assembly performance for people who trained through HAMS systems compared to those who underwent traditional training. The results also revealed that the effectiveness of virtual-haptic training depended on assembly task complexity, that is, the greater the task complexity, the greater the effectiveness. On the other hand, the HAMS system proved to be an effective tool in the assembly planning process, since it takes advantage of the expert's experience and intuition. In this way, the HAMS system is not limited to the simple execution of the virtual assembly, but it takes advantage of the virtual reality techniques and the haptic systems for the obtaining of technical information that helps to design a real process of assembly, from its first tests of assembly to the configuration of the production line.

EG Jr.

A ti que sin saberlo ni pedirlo llegaste a formar parte de mí vida. ¿Cuánto te quiero?... no sé explicarlo del todo bien, sólo sé que daría mi vida por ti si fuera necesario, eres un pedacito de mi alma desde el segundo aquel en que llegaste a este mundo y tu corazoncito comenzó a latir.

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento:

- Primeramente quiero agradecer a DIOS y a la VIDA por permitirme recorrer este camino académico lleno de retos, metas, alegrías, obstáculos, etc. Una meta que en un principio se ve difícil de alcanzar pero una vez lograda se convierte en un compromiso social y moral para con los demás.
- A mi madre Catalina Nieto Alonso que con su cariño y amor siempre me ha guiado y ha estado a mi lado en todo momento. Por su valioso apoyo moral y económico en los momentos difíciles.
- A mi padre Enrique Gallegos Orozco que con su ejemplo me ha hecho quien soy ahora.
- A Karla Melissa Torres Cruz por su apoyo y comprensión durante esta etapa de mi vida. Por su paciencia en la parte final de este proyecto.
- A mi asesor de tesis, el Dr. Hugo Iván Medellín Castillo por todos sus comentarios y consejos para llevar por buen camino este proyecto, por todo su tiempo que con gran profesionalismo y calidad dedicó a este trabajo de tesis. Por estar siempre disponible para escuchar con empatía sobre problemas o vivencias personales que durante este largo camino está expuesto el asesorado. Siempre listo para transmitir un buen consejo que nos alienta a continuar y concluir este trabajo.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico durante mis estudios que sin este apoyo sería prácticamente imposible lograrlo.
- Al Comité Académico del Posgrado en Ingeniería Mecánica por su contribución a mi formación académica.
- A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por haberme dado una formación integral, por brindarme los elementos necesarios para crecer como persona.

San Luis Potosí, Agosto de 2017

Enrique Gallegos Nieto

DATOS GENERALES

Título:

Entrenamiento y planeación automática de procesos de ensamble y fabricación utilizando realidad virtual y sistemas hápticos.

Tipo de trabajo:

Investigación aplicada en áreas de ingeniería, tecnología, innovación y desarrollo tecnológico.

Áreas académicas:

Diseño, Manufactura, Planeación de ensamblajes, Realidad virtual, Sistemas hápticos.

Responsable:

M.I. Enrique Gallegos Nieto

Estudiante del programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Director:

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo

Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Palabras clave:

Ensamblajes virtuales, realidad virtual, sistemas hápticos, entrenamiento de ensamblajes virtuales, efectividad, rendimiento del ensamble real, planeación de ensamblajes virtuales, criterios de evaluación de ensamblajes, instrucciones de ensamble, línea de producción, ensamble robótico.

Resumen..... i

Dedicatoria..... iii

Agradecimientos iv

Datos generales v

Contenido..... vi

Índice de figuras..... x

Índice de tablas xvi

Nomenclatura xvii

Publicaciones obtenidas xx

Introducción 1

 Planeación de ensambles 1

 Realidad virtual 2

 Sistemas hápticos 3

 Planeación virtual de ensambles 3

 Justificación..... 4

 Hipótesis..... 4

 Objetivos generales 5

 Objetivos específicos..... 5

 Organización de la tesis..... 5

Capítulo 1: Antecedentes teóricos 7

 1.1 Planeación de ensambles..... 7

 1.1.1 Secuencias de ensambles 7

| | |
|--|-----------|
| 1.1.2 Representación de secuencias de ensamble..... | 9 |
| 1.1.3 Generación de planes de ensamble..... | 10 |
| 1.1.4 Evaluación y selección de planes de ensamble | 10 |
| 1.2 Sistemas de realidad virtual..... | 11 |
| 1.2.1 Realidad virtual en ingeniería..... | 12 |
| 1.2.2 Sistemas de ensambles virtuales..... | 13 |
| 1.2.3 Sistemas de ensambles virtuales hápticos | 16 |
| 1.3 Entrenamiento virtual de ensamble | 19 |
| 1.4 Planeación y evaluación virtual de ensambles | 23 |
| 1.5 Balanceo virtual de líneas de producción..... | 24 |
| Capítulo 2: Desarrollo del sistema de planeación y entrenamiento virtual de ensambles ... | 29 |
| 2.1 Integración..... | 29 |
| 2.2 Creación de modelos | 32 |
| 2.3 Manipulación háptica y fuerzas de retroalimentación..... | 34 |
| 2.4 Características adicionales del sistema HAMS | 37 |
| 2.4.1 Funciones del dispositivo háptico | 37 |
| 2.4.2 Visualización de las trayectorias de ensamble | 37 |
| 2.4.3 Ajuste de parámetros de simulación en tiempo de ejecución..... | 38 |
| 2.5 Metodologías del ensamble virtual..... | 39 |
| 2.5.1 Modelado basado en la física | 39 |
| 2.5.2 Modelado basado en restricciones..... | 40 |
| Capítulo 3: Entrenamiento virtual de procesos de ensamble | 43 |
| 3.1 Módulo de entrenamiento de ensambles virtuales | 43 |
| 3.2 Registro y evaluación del proceso de ensamble | 45 |
| Capítulo 4: Planeación virtual de procesos de ensamble y fabricación | 49 |

| | |
|--|------------|
| 4.1 Módulo de planeación y evaluación de ensamblajes virtuales..... | 49 |
| 4.1.1 Generación del plan de ensamble | 49 |
| 4.1.2 Evaluación del plan de ensamble | 60 |
| 4.2 Módulo de balanceo de línea..... | 61 |
| 4.3 Módulo robótico..... | 65 |
| Capítulo 5: Evaluación del entrenamiento y planeación virtual de ensamblajes..... | 71 |
| 5.1 Evaluación del entrenamiento virtual..... | 71 |
| 5.1.1 Tareas de ensamble..... | 72 |
| 5.1.2 Modos de entrenamiento de ensamblajes virtuales | 72 |
| 5.1.3 Participantes | 72 |
| 5.1.4 Metodología experimental..... | 72 |
| 5.2 Evaluación de la planeación virtual de ensamblajes | 74 |
| 5.2.1 Caso de estudio 1 | 75 |
| 5.2.2 Caso de estudio 2..... | 79 |
| 5.3 Balanceo de línea de fabricación..... | 96 |
| 5.3.1 Definición de las estaciones de trabajo | 96 |
| 5.3.2 Análisis de la línea de producción..... | 103 |
| 5.4 Ensamble robótico..... | 105 |
| Capítulo 6: Análisis de resultados | 109 |
| 6.1 Entrenamiento virtual de ensamblajes | 109 |
| 6.1.1 Análisis ANOVA..... | 110 |
| 6.1.2 Efectividad del entrenamiento virtual de ensamble..... | 112 |
| 6.1.3 Desempeño del ensamble virtual vs real | 116 |
| 6.1.4 Discusión | 117 |
| 6.2 Planeación virtual de ensamblajes | 118 |

| | |
|---|-----|
| 6.2.1 Caso de estudio 1 | 118 |
| 6.2.2 Caso de estudio 2..... | 123 |
| 6.2.3 Discusión | 128 |
| 6.3 Módulo de balanceo de línea..... | 130 |
| 6.3.1 Diseño de la línea de producción..... | 133 |
| 6.4 Módulo robótico | 134 |
| Conclusiones | 137 |
| Bibliografía | 143 |
| Apéndices | 151 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ciclo de vida de un producto..... | 1 |
| Figura 2. Principio de operación de los sistemas hápticos..... | 3 |
| Figura 3. Diferentes secuencias de ensamble. | 4 |
| Figura 1.1. Efecto de la planeación del ensamble en el proceso de fabricación..... | 7 |
| Figura 1.2. Secuencia de ensamble no monótona. | 8 |
| Figura 1.3. Secuencia de ensamble considerada no lineal. | 9 |
| Figura 1.4. Secuencia de ensamble considerada no conectada. | 9 |
| Figura 1.5. Requerimiento para que una secuencia de ensamble sea factible. | 9 |
| Figura 1.6. Gráfica AND/OR para un ensamble de tres piezas. | 10 |
| Figura 1.7. Aplicaciones de realidad virtual en diferentes áreas: a) Ingeniería [48], b) Educación [49], c) Arte [50], d) Medicina [51], e) Social [52] y f) Militar [53]..... | 11 |
| Figura 1.8. Máquina virtual de medición de coordenadas: a) configuración del sistema HVCMM y b) medición virtual de un motor [54]. | 12 |
| Figura 1.9. Interfaz y ejemplos del proceso de operaciones de maquinado [55]. | 13 |
| Figura 1.10. Fresadora: a) zona de trabajo real y b) modelo virtual [56]. | 13 |
| Figura 1.11. Sistema VTS: a) Interacción del usuario con VTS y b) Escena virtual del sistema VTS [67]. | 15 |
| Figura 1.12. Simplificación del ensamble [68]. | 16 |
| Figura 1.13. Casco de realidad virtual con guantes [72]. | 17 |
| Figura 1.14. Ensamble dentro de la cabina de VEGAS [73]. | 18 |
| Figura 1.15. Sistema de ciber esfera [58]. | 18 |
| Figura 1.16. Sistema virtual HTI sphere. 1- tierra; 2- pared; 3- techo; 4- proyector; 5- pantalla esférica; 6- operador; 7- dispositivo háptico; 8- simulador de movimiento; 9- computadora; 10- estación de trabajo; 11- escena virtual [76]. | 19 |

| | |
|---|----|
| Figura 1.17. Efectividad y eficiencia del entrenamiento virtual de ensamble. | 20 |
| Figura 1.18. Componente móvil de realidad virtual incluyendo una pulsera háptica [84]. | 21 |
| Figura 1.19. Problemas de ensamble [93]. | 22 |
| Figura 1.20. Arquitectura del sistema desarrollado por [121]. | 25 |
| Figura 1.21. Gráfica de precedencia. | 26 |
| Figura 1.22. Diseño y clasificación de ALB. | 26 |
| Figura 2.1. Arquitectura del sistema HAMS. | 31 |
| Figura 2.2. Interfaz del sistema HAMS. | 32 |
| Figura 2.3. Simplificación de piezas virtuales. | 33 |
| Figura 2.4. Representación del objeto virtual para los módulos físico, gráfico y háptico. | 33 |
| Figura 2.5. Etapas principales de interacción del objeto virtual y el usuario. | 35 |
| Figura 2.6. Manipulación del objeto virtual. | 36 |
| Figura 2.7. Rotación del objeto virtual: a) respecto al centro geométrico y b) respecto al punto seleccionado por el usuario. | 37 |
| Figura 2.8. Visualización de la trayectoria del ensamble virtual (movimientos del usuario). | 38 |
| Figura 2.9. Panel de propiedades hápticas y físicas. | 39 |
| Figura 2.10. Características principales de un simulador físico. | 40 |
| Figura 2.11. Ensamble basado en restricciones. | 41 |
| Figura 3.1. Diagrama de flujo del módulo de entrenamiento. | 44 |
| Figura 3.2. Reporte del entrenamiento de ensamble. | 46 |
| Figura 3.3. Interfaz del módulo de entrenamiento. | 47 |
| Figura 4.1. Diagrama de flujo del módulo de planeación. | 50 |
| Figura 4.2. Generación automática del plan de ensamble para un producto. | 51 |
| Figura 4.3. Reporte del plan de ensamble. | 52 |
| Figura 4.4. Conceptos de distancia involucradas en el ensamble virtual. | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.5. Conceptos de posición inicial y final de las piezas dentro del ensamblaje virtual..... | 53 |
| Figura 4.6. Conceptos de incrementos dentro de una trayectoria virtual de ensamblaje..... | 54 |
| Figura 4.7. Conceptos de energía que consume una pieza virtual. | 55 |
| Figura 4.8. Representación del espacio de trabajo virtual. | 57 |
| Figura 4.9. Representación del concepto de manipulación del ensamblaje..... | 57 |
| Figura 4.10. Interfaz del módulo de planeación. | 59 |
| Figura 4.11. Instrucciones y representación del plan de ensamblaje..... | 60 |
| Figura 4.12. Interfaz para la evaluación de planes de ensamblaje..... | 61 |
| Figura 4.13. Técnicas del balanceo de línea: a) Repartir el trabajo y b) agregar más personal.... | 62 |
| Figura 4.14. Diagrama de flujo del módulo de balanceo de línea. | 63 |
| Figura 4.15. Interfaz del módulo de balanceo de línea. | 64 |
| Figura 4.16. Diagrama de flujo del módulo robótico..... | 66 |
| Figura 4.17. Ensamblaje robótico a partir del ensamblaje virtual-háptico dentro de HAMS. | 67 |
| Figura 4.18. Interfaz del módulo robótico. | 67 |
| Figura 4.19. Resolución de la trayectoria de ensamblaje: a) trayectoria completa y b) trayectoria suavizada..... | 68 |
| Figura 4.20. Resolución de la trayectoria de ensamblaje. | 69 |
| Figura 5.1. Modelos virtuales (izquierda) y reales (derecha): a), b) cubo rompecabezas; c), d) pirámide rompecabezas; e), f) bomba de aceite; g), h) actuador lineal; y i), j) compresor. | 71 |
| Figura 5.2. Metodología experimental del módulo de entrenamiento. | 74 |
| Figura 5.3. Metodología experimental del módulo de planeación..... | 75 |
| Figura 5.4. Actuador lineal. | 76 |
| Figura 5.5. Secuencias de ensamblaje no-factible con problemas de: a) accesibilidad y b) estabilidad. | 76 |
| Figura 5.6. Motor de aire. | 79 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.7. Piezas simplificadas del motor de aire: a) piezas originales y b) piezas simplificadas. | 80 |
| Figura 5.8. Evolución de las configuraciones de ensamble: a) y b) primera y segunda configuración respectivamente..... | 80 |
| Figura 5.9. Tercera configuración propuesta. | 81 |
| Figura 5.10. Cambios para mejorar el ensamble virtual: a) configuración anterior y b) configuración actual..... | 81 |
| Figura 5.11. Rotación de las piezas 2, 3, 8 y 10 para mejorar el ensamble virtual..... | 82 |
| Figura 5.12. Cambios para mejorar el ensamble virtual: a) agujero mal ubicado para insertar una pieza y b) agujero en su posición correcta. | 82 |
| Figura 5.13. Cambios para mejorar el ensamble virtual: a) configuración anterior y b) configuración actual..... | 83 |
| Figura 5.14. Rotación de las piezas 15, 19, 20, 22 y 23 para mejorar el ensamble virtual..... | 83 |
| Figura 5.15. Pieza mal ensamblada..... | 84 |
| Figura 5.16. Análisis de estabilidad de la pieza 2: a) piezas ubicadas en su posición inicial, b) pieza 2' inestable y c) colapso de la pieza 2'. | 85 |
| Figura 5.17. Análisis de estabilidad: a) pieza 3, b) pieza 8, c) pieza10, d) pieza 15, e) pieza 19, f) pieza 20, g) pieza 22 y h) pieza 23..... | 85 |
| Figura 5.18. Configuración inicial final del ensamble actual. | 86 |
| Figura 5.19. Sub-ensambles propuestos para un mejor realismo del ensamble virtual. | 87 |
| Figura 5.20. Piezas del motor de aire, considerando los sub-ensambles propuestos..... | 88 |
| Figura 5.21. Nueva configuración de ensamble, considerando los sub-ensambles propuestos... | 89 |
| Figura 5.22. Coplanaridad entre la pieza 6 y 4. | 89 |
| Figura 5.23. Análisis de interferencia: a) Pieza 4 mal ensamblada, b) interferencia de la pieza 2 con la pieza 4 y c) ensamble correcto de la pieza 4 con la pieza 6..... | 90 |
| Figura 5.24. Corrección de interferencia: a) modelado de muesca para garantizar el ensamble y b) vista de perfil del ensamble correcto. | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.25. Análisis de energía: a) trayectoria de ensamble 1 y b) trayectoria de ensamble 2. .. | 91 |
| Figura 5.26. Espacio de trabajo de ambas trayectorias de ensamble. | 92 |
| Figura 5.27. Diagrama de enlaces. | 93 |
| Figura 5.28. Representación gráfica de todas las secuencias validad de ensamble. | 94 |
| Figura 5.29. Secuencia de ensamble: a) factible y b) no-factible. | 94 |
| Figura 5.30. Estaciones de ensamble. | 96 |
| Figura 5.31. Instrucciones de ensamble de la tarea A. | 96 |
| Figura 5.32. Instrucciones de ensamble de la tarea B. | 97 |
| Figura 5.33. Instrucciones de ensamble de la tarea C. | 97 |
| Figura 5.34. Ubicación de los tornillos. | 98 |
| Figura 5.35. Instrucciones de ensamble de la tarea D. | 99 |
| Figura 5.36. Instrucciones de ensamble de la tarea E. | 100 |
| Figura 5.37. Ubicación de tornillos. | 101 |
| Figura 5.38. Instrucciones de ensamblados de la tarea F. | 102 |
| Figura 5.39. Instrucciones de ensamble de la tarea G. | 103 |
| Figura 5.40. Instrucciones de ensamble de la tarea H. | 103 |
| Figura 5.41. Ruta crítica para las estaciones de ensamble del motor de aire. | 104 |
| Figura 5.42. Gráfica de Gantt para las estaciones del motor de aire. | 104 |
| Figura 5.43. Ensamble virtual. | 105 |
| Figura 5.44. Trayectoria de ensamble: a) virtual y b) robótico. | 106 |
| Figura 5.45. Trayectorias de ensamble virtual (derecha) y robótica (izquierda): a), b) trayectoria de ensamble completa; c), d) trayectoria de ensamble nítida. | 107 |
| Figura 6.1. Participantes durante la ejecución de una tarea de ensamble: a) virtual en el sistema HAMS y b) real. | 109 |
| Figura 6.2. Gráfica de residuos normalizados. | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.3. Promedio real TCTs de las tareas de ensamble: a) cubo, b) pirámide, c) bomba de aceite, d) actuador lineal, y e) compresor. | 114 |
| Figura 6.4. Efectividad del entrenamiento virtual de ensamble vs complejidad del ensamble. . | 115 |
| Figura 6.5. Valor del TCT para: a) ensamble virtual, b) ensamble real. | 116 |
| Figure 6.6. Visualización de las trayectorias de ensamble: a) cilindro y b) todas la piezas. | 120 |
| Figura 6.7. Diferencia entre ambas secuencias de ensamble: a) secuencia 1 y b) secuencia 2. . | 121 |
| Figura 6.8. Espacio de trabajo para ambas secuencias de ensamble del actuador lineal. | 122 |
| Figura 6.9. Ángulos de manipulación para ambas secuencias de ensamble del actuador lineal. | 122 |
| Figura 6.10. Espacio de trabajo para las cuatro secuencias de ensamble del motor de aire. | 125 |
| Figura 6.11. Giro de 180° del pistón para colocarlo en su posición final. | 126 |
| Figura 6.12. Sub-ensambles propuestos. | 127 |
| Figura 6.13. Relación de secuencias de ensamble y conjuntos. | 127 |
| Figura 6.14. Corrección de secuencias de ensamble mediante el sistema HAMS. | 128 |
| Figura 6.15. Tareas de ensamble real vs virtual. | 129 |
| Figura 6.16. Planeación de ensambles virtuales, diferentes técnicas. | 129 |
| Figura 6.17. Gráfica comparativa del balanceo de línea: a) eficiencia, b) productividad, c) unidades por turno y d) total de personas. | 133 |
| Figura 6.18. Diseño de la línea de producción en línea recta del motor de aire. | 133 |
| Figura 6.19. Diseño de línea de producción en U del motor de aire. | 134 |
| Figura 6.20. Código de la trayectoria de ensamble generado por HAMS para ser utilizado en un robot. | 135 |
| Figura 6.21. Trayectoria de ensamble robótico: a) completa y b) suavizada. | 135 |
| Figura C1. Análisis de un ensamble a través de HAMS. | 138 |
| Figura A1. Reporte del plan de ensamble para el motor de aire. | 151 |
| Figura B1. Instrucciones y representación del plan de ensamble para el motor de aire. | 153 |
| Figura C1. Ensamble realizado por: a) sistema HAMS y b) robot. | 157 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1.1. Principales características de los estudios del entrenamiento virtual de ensambles.... | 21 |
| Tabla 1.2. Principales características de la planeación de ensambles en la literatura. | 24 |
| Tabla 2.1. Representación gráfica de los movimientos del usuario..... | 38 |
| Tabla 5.1. Información de las piezas de ensamble..... | 78 |
| Tabla 5.2. Información de la tarea de ensamble. | 79 |
| Tabla 5.3. Criterios evaluados de ambas trayectorias de ensamble..... | 91 |
| Tabla 5.4. Secuencias de ensamble..... | 92 |
| Tabla 5.5. Tiempos totales para cada estación de ensamble..... | 104 |
| Tabla 6.1. Promedio del TCT y DS de la tarea real de ensamble. | 110 |
| Tabla 6.2. Resultados del ANOVA para todas las tareas de ensamble real..... | 112 |
| Tabla 6.3. Efectividad del entrenamiento virtual de ensamble. | 113 |
| Tabla 6.4. Métricas de ensamble para las secuencias del actuador lineal..... | 119 |
| Tabla 6.5. TCT en porcentajes del ETCT y NPTCT. | 119 |
| Tabla 6.6. TAD en porcentajes del EAD y NPAD. | 120 |
| Tabla 6.7. Métricas de ensamble para las secuencias del motor de aire. | 124 |
| Tabla 6.8. Resultados del primer balanceo de línea..... | 131 |
| Tabla 6.9. Resultados del balanceo de línea con alta eficiencia basado en el número de operadores por estación de ensamble. | 131 |
| Tabla 6.10. Diferentes casos de balanceo de línea del motor de aire. | 132 |
| Tabla C1. Principales plataformas para el entrenamiento virtual de ensamble..... | 138 |
| Tabla C2. Principales plataformas en la evaluación de planes de ensamble. | 139 |

NOMENCLATURA

| | |
|------------|---|
| a | Aceleración (m/s^2) |
| ALB | Balanceo de línea de ensamble (Assembly Line Balancing) |
| AM | Manipulabilidad del ensamble (Assembly manipulability) |
| ANOVA | Análisis de varianza (Analysis of Variance) |
| APE | Eficiencia potencial del ensamble (Assembly potential efficiency) |
| AR | Realidad aumentada (Augmented Reality) |
| <i>c</i> | Tiempo del ciclo de la línea de producción |
| CAD | Diseño asistido por computadora (Computer Aided Design) |
| CAE | Ingeniería asistida por computadora (Computer Aided Engineering) |
| CAM | Manufactura asistida por computadora (Computer Aided Manufacturing) |
| CAVE | Entorno virtual dentro de un cubo (Cave Assisted Virtual Environment) |
| CBM | Modelado basado en restricciones (Constraint Based Modeling) |
| Δ_x | Incremento de la distancia en la dirección <i>x</i> |
| Δ_y | Incremento de la distancia en la dirección <i>y</i> |
| Δ_z | Incremento de la distancia en la dirección <i>z</i> |
| DOF | Grados de libertad (Degree of Freedom) |
| E_m | Eficiencia por estación de trabajo |
| EAD | Distancia efectiva del ensamble (Effective assembly distance) |
| EHD | Distancia efectiva de manipulación (Effective handling distance) |
| EHT | Tiempo efectivo de manipulación (Effective Handling Time) |
| EPE | Energía potencial efectiva (Effective potencial energy) |
| ETCT | Tiempo efectivo de la tarea (Effective task completion time) |
| f_x | Factores de pérdida por fricción que afecta a Δ_x |
| f_y | Factores de pérdida por fricción que afecta a Δ_y |
| f_z | Factores de pérdida por fricción que afecta a Δ_z |
| F | Fuerza (Newton) |
| FO | Orientación final (Final orientation) |
| FP | Punto final (Final point) |

| | |
|--------|--|
| HAMS | Sistema de manufactura y ensambles háptico (Haptic Assembly Manufacturing System) |
| HDM | Pantalla montada en la cabeza (Head Mounted Display) |
| HE | Eficiencia de manipulación (Handling efficiency) |
| HVCM | Máquina de medición de coordenadas virtual háptica (Haptic Virtual Coordinate Measuring Machine) |
| HP | Manipulación de la pieza (Handlind part) |
| k | Rigidez del resorte |
| m | Masa (kilogramos) |
| MIVAS | Sistema multi-modal inmersivo de ensambles virtuales (Multi-modal Immersive Virtual Assembly System) |
| MFC | Microsoft Foundation Classes |
| MRA | Masa Resorte Amortiguado |
| NDBG | Gráfica de bloques no-direccional (Non-directional blocking graph) |
| NPAD | Distancia de ensamble no-productiva (Non-productive assembly distance) |
| NPAT | Tiempo de ensamble no-productivo (Non-productive assembly time) |
| NPHD | Distancia de manipulación no productiva (Non-productive handling distance) |
| NPTCT | Tiempo no-productivo de la tarea (Non-productive task completion time) |
| O_i | Número de operadores en la estación de ensamble |
| ρ | Densidad (kg/m^3) |
| PBM | Modelado basado en la física (Physics Based Modeling) |
| PE | Energía potencial (Potential energy) |
| PEE | Eficiencia de la energía potencial (Potential energy efficiency) |
| RV | Realidad virtual |
| SP | Punto inicial (Start point) |
| STAAT | Herramienta de análisis de ensamble Stanford (Stanford Assembly Analysis Tool) |
| STL | Estereolitografía o lenguaje de teselado estándar (Standard Tessellation Language) |
| T_i | Tiempo de las estaciones de trabajo |

| | |
|----------------------------|--|
| TAD | Distancia total del ensamble (Total assembly distance) |
| TAE | Energía total del ensamble (Total assembly energy) |
| TAAE | Eficiencia de la energía total del ensamble (Total assembly energy efficiency) |
| TCT | Tiempo para completar la tarea (Task Completion Time) |
| TE | Energía total (Total energy) |
| TEE | Eficiencia de la energía total (Total energy efficiency) |
| THA | Manipulación total del ensamble (Total handling assembly) |
| V | Volumen (m ³) |
| VAPPE | Entorno de planificación de procesos de ensamble virtual (Virtual Assembly Process Planning Environment) |
| VBB | Construcción virtual de block (Virtual Building Block) |
| VEDA | Entorno virtual de diseño de ensambles (Virtual Environment Design for Assembly) |
| VEGAS | Entorno virtual para el ensamble en general (Virtual Environment for General Assembly) |
| VTK | Visualization Tool Kit |
| VTS | Estudio de entrenamiento virtual (Virtual Training Studio) |
| WS | Espacio de trabajo (Works pace) |
| <i>y_{max}</i> | Máxima elevación de la pieza |
| <i>y_{min}</i> | Mínima elevación de la pieza |
| <i>y_{final}</i> | Altura de la posición final de la pieza |
| <i>y_{inicial}</i> | Altura de la posición inicial de la pieza |

PUBLICACIONES OBTENIDAS

El desarrollo del presente trabajo de investigación ha permitido lograr las siguientes publicaciones:

- Gallegos-Nieto, E., Medellín-Castillo, H. and Gonzalez-Badillo, G. (2014). Análisis y evaluación del entrenamiento de procesos de ensamble utilizando realidad virtual y sistemas hápticos. Memorias del XX Congreso Internacional Anual de la SOMIM, pp. 658-665, 24 al 26 de Septiembre de 2014, Juriquilla, Querétaro, México. ISBN 978-607-96746-4-9.
- Gallegos-Nieto, E., Medellín-Castillo, H., Gonzalez-Badillo, G. and Lim, T. (2014). Virtual training of assembly tasks using virtual reality techniques and haptic system. Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2014. Vol. 2B: Advanced Manufacturing, pp. 1-9, November 14-20, 2014, Montreal, Quebec, Canada. ISBN: 978-0-7918-4644-5. doi:10.1115/IMECE2014-39270.
- Medellín-Castillo, H., Gallegos-Nieto, E., Espinosa-Castañeda, R. and Rodríguez-Obregón, D. (2015). Desarrollo de un sistema de realidad virtual asistido por dispositivos hápticos para la enseñanza-aprendizaje del sistema Braille. Revista de Prototipos Tecnológicos. Vol. 1, No. 1, pp. 10-22.
- Medellín-Castillo, H., González-Badillo, G., Govea, E., Espinosa-Castañeda, R. and Gallegos-Nieto, E. (2015). Development of haptic-enabled virtual reality applications for engineering, medicine and art. Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2015, pp. 1-10, November 13-19, 2015, Houston, Texas.
- Gallegos-Nieto, E., Medellín-Castillo, H. and González-Badillo, G. (2015). Generación automática de planes de ensamble utilizando un sistema virtual-háptico de ensambles. Memorias del XXI Congreso Internacional Anual de la SOMIM. Tema A2b Manufactura: Procesos de manufactura y ensambles, pp. 0529-0538. 23 al 25 de Septiembre de 2015, Coatzacoalcos, Veracruz, México.
- Gallegos-Nieto, E., Medellín-Castillo, H., González-Badillo, G., Lim, T. and Ritchie, J. (2017). The analysis and evaluation of the influence of haptic-enabled virtual assembly training on real assembly performance. The international journal of advanced manufacturing technology. Vol. 8 No. 1, pp. 581 - 598.

Planeación de ensambles

La planificación es una parte intrínseca del comportamiento humano, a menudo realizado inconscientemente en la vida cotidiana de las personas. En términos generales, la planeación puede considerarse como la actividad de idear medios para lograr las metas deseadas bajo ciertas limitaciones y con escasos recursos. Por lo tanto, tres componentes básicos de cualquier actividad de planeación son: objetivos, restricciones y recursos. Un planeador inteligente (humano o programa de computación) debe tener la capacidad de entender, representar y administrar estos tres componentes. En ocasiones, el plan de la planificación se amplía para incluir actividades relacionadas con el monitoreo del plan, lo que asegura que los planes generados puedan ejecutarse correctamente. En este sentido, un planificador inteligente, también debe tener la capacidad de tomar retroalimentación desde la fase de ejecución del plan para futuras mejoras y adaptarse a un entorno cambiante para diferentes necesidades. Por lo tanto, la planificación es una actividad de monitoreo y re-planificación que le da a un planificador la capacidad de lidiar con situaciones imprevistas del mundo real. Debido a que la actividad de planeación forma parte de la inteligencia humana, ha sido el enfoque de innumerables estudios dentro de diferentes disciplinas teóricas y prácticas [1].

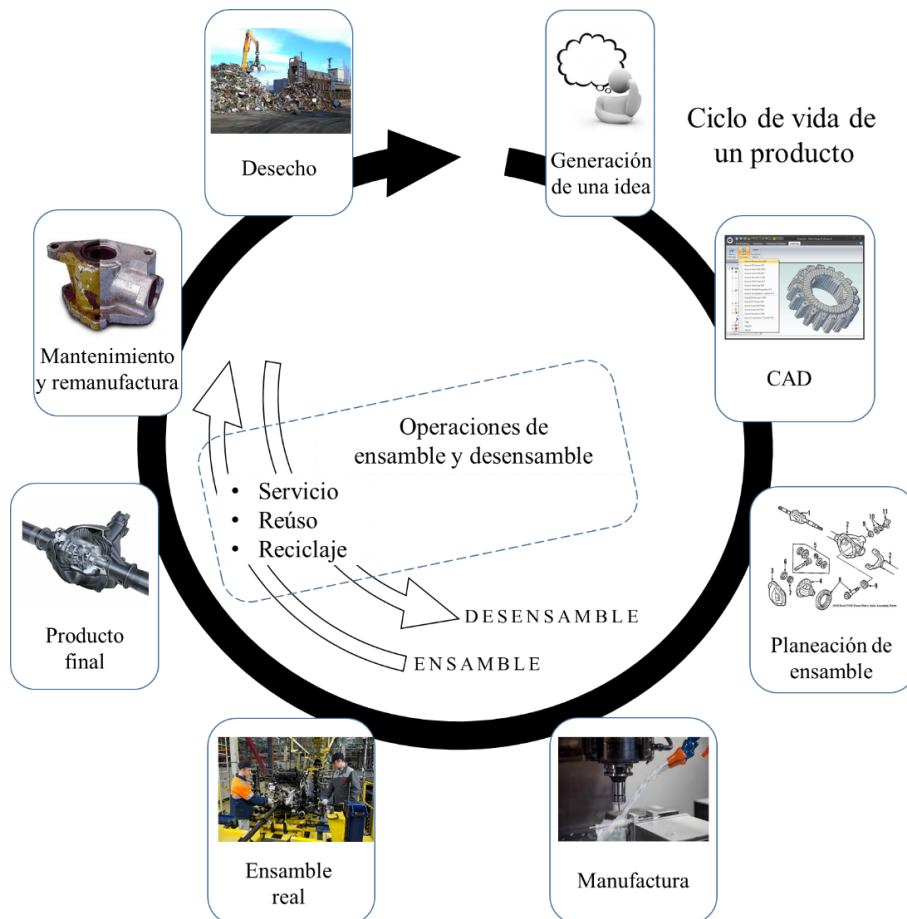


Figura 1. Ciclo de vida de un producto.

La planeación de ensambles dentro de la industria, es considerada como una etapa muy importante en el ciclo de vida de un producto, debido al impacto que tiene en el diseño, mantenimiento y reciclaje del producto, Figura 1. Además, la demanda de servicio de productos, re-fabricación y reciclaje ha forzado a las compañías a considerar la facilidad de ensamble y desensamble del producto durante su etapa de diseño.

En el proceso de ensamble industrial, una importante parte de la actividad del proceso de planeación es la determinación de la secuencia de ensamble del producto, la cual consiste en determinar un orden factible de combinación de los componentes para construir el producto completo. Esta tarea es usualmente llevada a cabo por un planeador, quien cuidadosamente examina el plano del ensamble y genera las secuencias o estrategias de ensamble mediante el desensamble mental del producto y el razonamiento acerca de las diversas restricciones. Las restricciones raramente conducen a una única secuencia de ensamble. Los productos industriales de diez o veinte componentes típicamente presentan cientos de posibles secuencias de ensamble. Resulta muy probable que el planificador no tiene la capacidad de generar y evaluar todas las posibles secuencias de ensamble, especialmente para un producto no trivial. El planeador usualmente considera sólo un conjunto muy pequeño de estas posibilidades y toma la decisión de cual secuencia usará para el producto. Esto significa que buenas secuencias de ensamble potenciales pueden llegar a omitirse. Las técnicas y/o procedimientos sistemáticos para generar todas las posibles secuencias de ensamble de cualquier producto dado puede ayudar a superar este problema.

Realidad virtual

El concepto de realidad virtual (RV) no es nuevo, sus orígenes pueden remontarse al trabajo realizado por Ivan Sutherland [47], que introdujo los conceptos clave de inmersión en un mundo simulado y de entradas y salidas sensoriales completas, que son la base de la investigación actual en ambientes virtuales. Para ello se definieron los siguientes desafíos:

- La pantalla es una ventana a través de la cual se puede observar un mundo virtual.
- El reto es hacer que el mundo parezca real, actúe de verdad, suene y se sienta real.

Los desafíos de Sutherland prometen una simulación de presencia ofrecida a los usuarios mediante una interfaz al mundo sintético. Dichos preceptos se han convertido en la línea de investigación para una creciente comunidad de investigadores. En un futuro, la realidad virtual pretende superar las barreras de interfaz entre humanos y computadoras. Las tecnologías de realidad virtual han abierto las puertas a nuevos tipos de aplicaciones que explotan las posibilidades que ofrecen las simulaciones reales.

La realidad virtual permite introducir al usuario dentro de un ciclo de simulación en tiempo real, inmerso en un mundo artificial que responde a sus acciones. El grado de inmersión se refiere a que tan profundamente está sensorialmente involucrado el usuario en ambiente virtual, es decir, que tanto puede ver, escuchar y sentir, e incluso oler y saborear los objetos virtuales. Existen por lo tanto diferentes niveles de inmersión en un sistema de realidad virtual. El grado de inmersión será mayor cuando el sistema desconecta (aisla) totalmente al usuario del mundo real, que cuando lo hace de manera parcial. En cuanto al sentido de la vista, existen sistemas inmersivo, basados principalmente en sistemas de escritorio, cascos HMD, Cuevas y ciber-esferas [58].

Debido a su gran potencial de análisis y simulación, la realidad virtual ha sido ampliamente investigada dentro de la ingeniería. En este sentido se han desarrollado poderosas herramientas de diseño debido a su capacidad de proveer un ambiente tridimensional que permite interactuar con los objetos virtuales,

utilizando los movimientos naturales del cuerpo, con la asistencia de dispositivos periféricos adicionales como guantes, sistemas de tele-presencia, sistemas hápticos, etc. [48].

Sistemas hápticos

Los sistemas hápticos representan una de las herramientas más importantes para la interacción con los objetos virtuales. El término háptico proviene del griego *haptesthai* que significa tocar, por lo que los objetos virtuales pueden ser tocados y manipulados con dichos dispositivos. El primer dispositivo háptico fue desarrollado y comercializado en los años 90's [2], ahora las investigaciones de ensambles virtuales asistidos por dispositivos hápticos han estado en constante crecimiento. Sin embargo, fuera de la comunidad de investigadores, los sistemas hápticos continúan siendo un concepto desconocido.

Los dispositivos hápticos proporcionan una navegación tridimensional y retroalimentación de dos tipos de fuerzas. La primera simula la dureza, el peso y la inercia de los objetos virtuales; y la segunda permite la retroalimentación de fuerza, simulando las condiciones de superficie tales como geometría, suavidad y temperatura [3]. La fuerza de retroalimentación táctil se clasifica en simulaciones mecánicas, térmicas, químicas y eléctricas, mientras que se considera que la cinestesia consta de cuatro puntos clave, fuerza, torque, dirección y ángulo [4]. Los sistemas hápticos pueden ser interpretados bajo diversos conceptos tales como: percepción háptica, retroalimentación háptica e interfaz háptica. La interfaz háptica es comúnmente utilizada para llevar a cabo la manipulación de objetos virtuales. El principio de operación de los sistemas hápticos se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Principio de operación de los sistemas hápticos.

Planeación virtual de ensambles

Con el surgimiento reciente de los sistemas hápticos, se ha logrado incorporar el sentido del tacto y retroalimentación de fuerza en los entornos virtuales. De esta manera, las tecnologías hápticas pueden mejorar los sistemas de realidad virtual, en particular los sistemas enfocados al análisis de ensambles virtuales. Por lo tanto, los sistemas virtual-háptico permiten un ambiente más intuitivo y natural para simular el proceso de ensamble durante la fase de diseño, incluso antes de crear cualquier prototipo físico. De esta manera se puede generar un plan de ensamble más apegado a la realidad, con la ventaja de no necesitar la fabricación de las piezas, y con la noción de accesibilidad y estabilidad, Figura 3. La Figura 3a muestra dos planes de ensamble para llevar a cabo el ensamble del producto $\{A - B - C\}$, sin embargo, el plan 2 muestra un problema de accesibilidad porque resulta complicado colocar la pieza B una vez que la pieza A ya ha sido ensamblada. Un problema similar ocurre con el ensamble de la Figura 3b, El plan 2 presenta un problema de estabilidad al colocar primero las piezas A y C. Estos problemas tan evidentes en el mundo real resultan muy complicados de identificar con los métodos tradicionales y algoritmos abstractos de planeación de ensambles. Por lo tanto, la integración de la realidad virtual y los sistemas hápticos han sido adoptados para simular las tareas de ensamble de una manera natural y libre, siendo una herramienta poderosa en las etapas de diseño, planificación y entrenamiento.

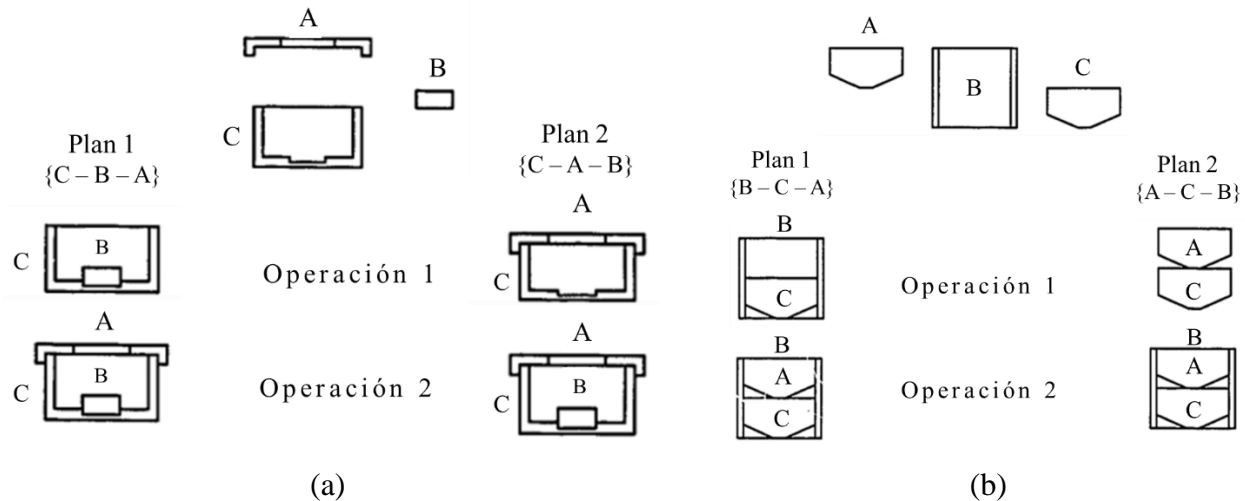


Figura 3. Diferentes secuencias de ensamblaje.

Justificación

Típicamente la mano de obra involucrada en la producción de las operaciones individuales de componentes tales como el corte de metal, formado, maquinado, moldeado de plásticos y acabado, representan entre el 8% y el 30% de los costos totales de fabricación del producto. Por otro lado la mano de obra necesaria en la inspección y pruebas comúnmente representan entre el 4% y el 15% de los costos de fabricación del producto. Mientras que la mano de obra involucrada en la ejecución del ensamblaje representa hasta el 50% y el 75% de los costos totales de producción. Por lo tanto, es evidente que los mayores ahorros en costos de fabricación se pueden lograr en el proceso de ensamblaje [5].

Los sistemas tradicionales de diseño asistido por computadora (CAD) y la planeación de ensamblajes asistido por computadora (CAPP) aún están limitados ya que no toman en cuenta la experiencia humana y el conocimiento adquirido para hacer de una manera más intuitiva la planeación de procesos de ensamblaje. Además, algunos aspectos como pruebas de calidad, layout del área de trabajo, ergonomía y limitaciones y restricciones físicas que el usuario experimenta en el mundo real, tales como colisiones e interferencia entre objetos, no son considerados durante la evaluación del ensamblaje en los sistemas CAD y CAPP. Recientemente se ha propuesto el uso de los sistemas de realidad virtual para simular, analizar y optimizar procesos de manufactura incluyendo los procesos de ensamblaje. Algunas de las ventajas de los sistemas de RV sobre los sistemas CAD es la mejora en la visualización 3D y la manipulación de la cámara, lo cual permite una navegación más intuitiva en el ambiente virtual. Los sistemas de RV representan una herramienta poderosa para el entrenamiento humano en el desempeño de tareas que de otra manera serían costosas o peligrosas de ser duplicadas en el mundo real.

Los investigadores que diseñan, desarrollan y evalúan las plataformas de ensamblajes virtuales, han limitado el uso potencial de la RV y los sistemas hápticos a la simple tarea de ensamblar un producto de manera virtual, sin proveer una planeación integral y evaluación de procesos de ensamblaje, con información técnica útil que ayude a diseñar y definir un proceso real de ensamblaje, tal como tiempos, consumo de energía, grados de libertad, espacio de trabajo requerido, manipulabilidad, etc.

Hipótesis

La hipótesis del presente proyecto de investigación es que el uso de técnicas de realidad virtual y sistemas hápticos puede mejorar la eficiencia del entrenamiento y planeación de procesos de ensamblajes y/o fabricación. Esta mejora es en términos de tiempo de planeación, precisión de la planeación y reducción de errores mediante las simulaciones virtuales respectivas.

Objetivo general

El objetivo general del presente proyecto es el análisis y evaluación de las técnicas de realidad virtual y sistemas hápticos como una herramienta para mejorar las técnicas de entrenamiento y planeación de procesos de ensamble y fabricación. Parte de este estudio y análisis comprende el desarrollo de módulos de entrenamiento y planeación de ensambles virtuales, que permitan evaluar las ventajas y capacidades de los sistemas de ensamble virtual-háptico con respecto a los métodos tradicionales de entrenamiento y planeación de ensambles.

Objetivos específicos

Para lograr el objetivo general de este trabajo de investigación, se definen los siguientes objetivos particulares:

- ✓ Desarrollar la plataforma virtual-háptica para llevar a cabo procesos virtuales de ensamble.
- ✓ Desarrollar y evaluar una herramienta de entrenamiento virtual de operaciones de ensamble.
- ✓ Generar automáticamente el plan de ensamble a partir de la ejecución del ensamble virtual.
- ✓ Representar automáticamente el plan de ensamble a partir de la ejecución del ensamble virtual.
- ✓ Analizar y evaluar las operaciones y trayectorias de ensamble correspondientes al proceso de ensamble virtual. Analizar el proceso de planeación de ensambles tradicional y el proceso de planeación virtual-háptico.
- ✓ Analizar el diseño de una línea de producción a partir de la ejecución del ensamble virtual correspondiente a cada estación de trabajo. Generar el código para que un robot realice el ensamble real a partir del ensamble virtual realizado por el usuario.

Organización de la tesis

El presente documento de tesis está organizado de la siguiente manera. En el Capítulo 1 se presentan los conceptos relacionados al trabajo de tesis, así como una revisión y análisis del estado del arte en la planeación de ensambles y su importancia en el desarrollo de nuevos productos. En el Capítulo 2 se describe el desarrollo del sistema de ensambles virtuales HAMS. Dentro de este capítulo se presentan las características y funcionalidad de los ocho módulos que integran la plataforma HAMS. En el Capítulo 3 se presenta el desarrollo del módulo de entrenamiento virtual de ensambles, el cual fue desarrollado con el objetivo de investigar, analizar y evaluar la influencia e impacto del entrenamiento virtual de ensamble en el desempeño de tareas reales de ensamble. En el Capítulo 4 se muestra el desarrollo e implementación del módulo de planeación y evaluación de ensambles virtuales, así como los módulos de balanceo de línea y robótico. En el Capítulo 5 se describen las pruebas realizadas para evaluar el sistema HAMS como una herramienta virtual de entrenamiento y planeación de ensambles. Los resultados de estas pruebas experimentales de evaluación se analizan y discuten en el Capítulo 6. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo de tesis, exponiendo los resultados más relevantes y las contribuciones aportadas.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES TEÓRICOS

Este capítulo presenta una revisión de los antecedentes teóricos y trabajos previos relacionados a esta tesis. La revisión comienza con la descripción de la planeación de ensambles y la importancia que representa en el desarrollo de nuevos productos. Posteriormente se describen los métodos tradicionales y las limitantes que aún existen para llevar a cabo la planeación automática de ensamble. Por último, se presenta el concepto de realidad virtual-háptica como una herramienta alternativa para la generación automática de planes de ensambles, se describen las plataformas desarrolladas y reportadas en la literatura para este propósito, así como plataformas virtual-háptico para el entrenamiento de ensambles.

1.1 Planeación de ensambles

La planeación de ensambles es una de las etapas más importantes en el desarrollo de un nuevo producto, en el cual se define la forma en la cual el producto será ensamblado. La operación de ensamble representa una gran proporción del costo total de fabricación de un producto. Sin embargo, el ensamble es uno de los procesos de fabricación menos estudiados y por lo tanto menos comprendidos [6]. Los estudios existentes actualmente se centran sólo en el diseño de ensamble para piezas con geometrías regulares o simplificadas con el fin de facilitar el ensamble. La mayor parte del diseño de un sistema de ensamble en la industria se basa en el acoplamiento, alineación o compensación de las caras regulares de cada una de las partes coincidentes del ensamble [7]. Una buena planeación de ensamble puede incrementar la eficiencia y la calidad del producto [8], así como disminuir el costo y tiempo del proceso total de manufactura del producto, Figura 1.1. Un ensamble es más que unir piezas, es la actividad en donde todos los procesos de diseño, ingeniería, manufactura y logística se reúnen para crear un objeto que realiza una función.

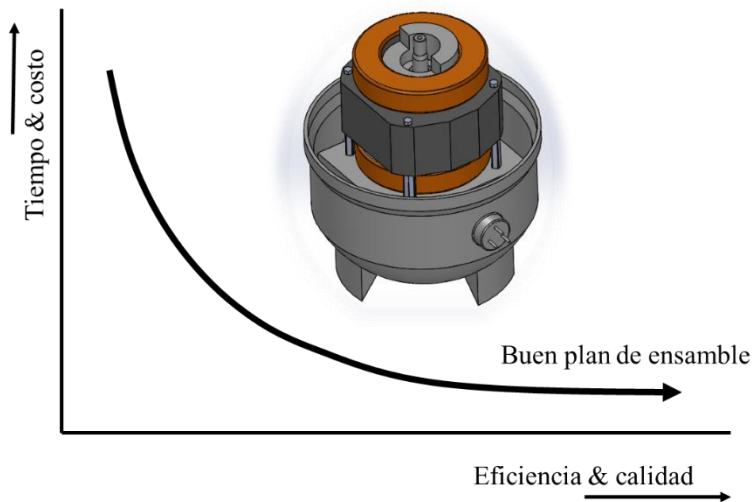


Figura 1.1. Efecto de la planeación del ensamble en el proceso de fabricación.

1.1.1 Secuencias de ensambles

Seleccionar la secuencia para unir las piezas o sub-ensambles en un ensamble mecánico de un producto puede afectar drásticamente la eficiencia y efectividad de un proceso de ensamble [9]. Por ejemplo, una secuencia puede requerir menos movimientos, menos energía, menos tiempo, que otras secuencias. La selección de la secuencia de ensamble es usualmente determinada por un experto en ensamble. En el caso de manufactura, la selección es típicamente realizada por un ingeniero industrial. En el caso de una reparación, la selección es hecha por el personal de mantenimiento. En

ninguno de los casos parece seguirse un procedimiento sistemático y claro. En términos generales, una secuencia de ensamble de un producto consta de un conjunto de partes ordenadas y colocadas en una posición relativa que obedecen a una familia de movimientos permitidos. El objetivo es producir una secuencia de operaciones que resulte en la construcción del producto a partir de sus piezas individuales. Cada operación puede combinar un conjunto de sub-ensambles, usando un movimiento permitido.

Una secuencia de ensamble puede dividirse en una lista equivalente de movimientos o trayectorias de ensamble llamadas operaciones. Esta representación permite que se apliquen restricciones adicionales a las operaciones, definiendo así los tipos de secuencias de ensamble. Se consideran diferentes tipos de secuencias de ensamble tales como conectividad, monotonicidad y linealidad. Estos tipos de secuencias de ensamble se presentan tanto en la ejecución del ensamble por un robot o por un humano, así como para la generación automática de ensamble [10].

1.1.1.1. Monotonicidad

El número de manos necesarias para ejecutar una secuencia de ensamble es sólo un aspecto de la dificultad de la tarea de ensamble. Otra dificultad es el número de posiciones intermedias que la pieza ocupa antes de ser colocada en su posición final; las piezas se mantienen en una posición relativa hasta el final de la secuencia de ensamble. Una secuencia de ensamble es monótona si cada pieza requiere un movimiento para unirla a un sub-ensamble cada vez más grande. En otras palabras, una secuencia de ensamble monótona consiste en colocar cada pieza en su posición final con respecto a las demás piezas. Cualquier secuencia de ensamble para un producto de n piezas se considera monótono si la construcción del ensamble total consta de n movimientos. La Figura 1.2 muestra un producto que no obedece las características de una secuencia de ensamble monótona, ya que para ser ensamblado primero se coloca la pieza P2 dentro de la pieza P1, posteriormente $\{P1 - P2\}$ se insertan dentro de la pieza P3, por último, la pieza P2 se desliza hacia la derecha [11]. El ensamble consta de tres piezas, y para completar el ensamble es necesario realizar cuatro movimientos, por ende, no es un ensamble monótono. Para que este ensamble sea considerado monótono debe ser ensamblado con tres movimientos.

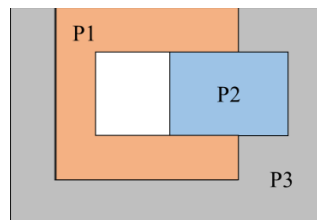


Figura 1.2. Secuencia de ensamble no monótona.

1.1.1.2. Linealidad

Una restricción utilizada para diversos sistemas de planeación de ensamble es la linealidad [11], [12]. Una secuencia de ensamble lineal no permite el movimiento de más de una pieza a la vez. Las secuencias de ensamble lineales no permiten el uso de sub-ensambles. La Figura 1.3 muestra un producto de cuatro piezas que no puede ser ensamblado utilizando una secuencia de ensamble lineal, ya que al menos un sub-ensamble tiene que utilizarse [13]. Es decir, no se puede desensamblar quitando una sola pieza, por lo menos es necesario mover al mismo tiempo dos piezas, por ejemplo las piezas $\{P1 - P2\}$ se mueven hacia arriba.

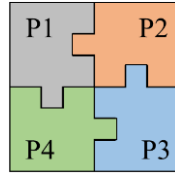


Figura 1.3. Secuencia de ensamble considerada no lineal.

1.1.1.3. Conectividad

Las restricciones de monotonicidad y linealidad en las secuencias de ensamble se basan en el movimiento permitido para las piezas. Por el contrario, una restricción frecuentemente utilizada es que el sub-ensamble construido presente conectividad [13]. Una secuencia de ensamble presenta conectividad cuando cada pieza ensamblada está en contacto con otra pieza previamente ensamblada [14]. La conectividad de un sub-ensamble tiene sentido para ejecutar una secuencia, ya que es difícil mantener la estabilidad de un sub-ensamble cuando ni siquiera está conectado. La Figura 1.4 muestra un producto que carece de conectividad, ya que la pieza P1 y P2 no muestran conectividad.

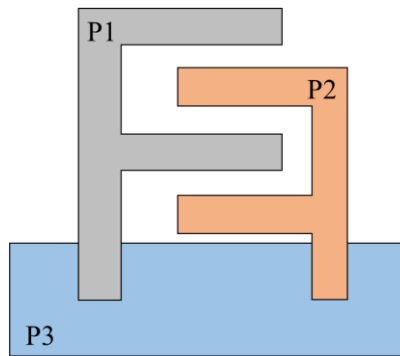


Figura 1.4. Secuencia de ensamble considerada no conectada.

1.1.2 Representación de secuencias de ensamble

Una secuencia de ensamble puede ser representada por una lista ordenada de tareas; por lo tanto, es posible representar el conjunto de todas las secuencias de ensamble por un conjunto de listas, cada una correspondiente a una secuencia de ensamble diferente. Una secuencia de ensamble es factible si todas sus tareas de ensamble son geométrica y mecánicamente factibles, y todos sus sub-ensambles son estables, Figura 1.5.

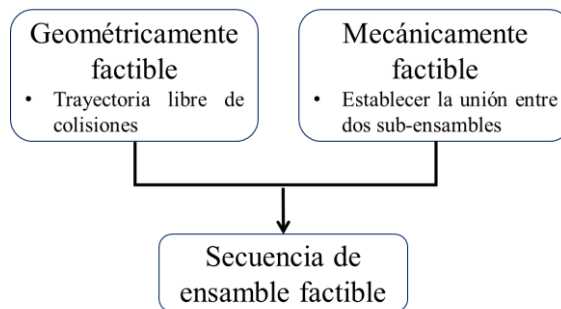


Figura 1.5. Requerimiento para que una secuencia de ensamble sea factible.

Una secuencia de ensamble puede ser representada de diferentes maneras: 1) lista ordenada de tareas; 2) lista ordenada de vectores binarios; 3) lista ordenada del conjunto de partes; y 4) lista ordenada de sub-ensambles de conexión. Los métodos tradicionales para la representación de secuencias de

ensambles han sido desarrollados por varios investigadores y su construcción se basa en: gráficas AND/OR [9], [15]-[19], Figura 1.6; diagramas de enlace [20], [21]; y representaciones NDBG (Non-Directional Blocking Graph) [22]. También se han desarrollado un conjunto de preguntas lógicas para establecer la relación entre las conexiones desarrolladas que aseguran la factibilidad de la secuencia de ensamble [23].

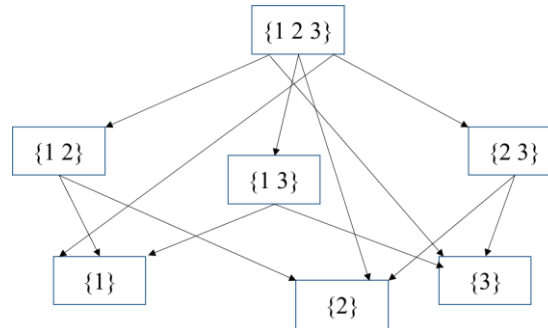


Figura 1.6. Gráfica AND/OR para un ensamble de tres piezas.

1.1.3 Generación de planes de ensamble

Uno de los trabajos más importantes en la generación de secuencias de ensamble es el desarrollo de algoritmos para la generación de secuencias de ensambles que sean correctas y completas [15]. El problema en la generación de secuencias de ensamble se puede convertir en un problema de generación de secuencias de desensamble. Varios sistemas de planeación de ensamble han sido reportados en [24]. Los métodos para la representación de secuencias de ensamble proveen la generación de todas las secuencias factibles de ensamble. Sin embargo, conforme el número de partes en un producto se incrementa, el número de secuencias de ensamble aumenta exponencialmente [9]; por lo que encontrar la secuencia de ensamble óptima se convierte en un verdadero reto. La inteligencia artificial resultó ser una herramienta útil para enfrentar este problema, reduciendo el tiempo requerido para localizar la secuencia de ensamble óptima. Muchos autores han implementado algoritmos genéticos y sus variaciones [25]-[29], algoritmos de recocido simulado [30]-[32], algoritmo de colonias de hormiga [33]-[35], optimización por nube de partículas [36]-[39], y redes neuronales [40]-[42].

1.1.4 Evaluación y selección de planes de ensamble

Los métodos descritos en la sección anterior se enfocan en la generación del conjunto de todas las secuencias de ensamble factibles, dejando a un lado la evaluación y selección de la secuencia a utilizar. La selección de una secuencia de ensamble, requiere la especificación de criterios de evaluación que permitan comparar diferentes soluciones [43]. Diversos criterios de ensamble han sido propuestos en la literatura con el fin de apoyar al planeador en la selección del mejor plan de ensambles [44], [45].

Se han realizado esfuerzos por varios investigadores para lograr una planeación óptima de ensamble. Homem de Mello et al. [19] utilizan un ensamble de cuatro piezas ilustrado mediante gráficas AND/OR para encontrar el mejor plan de ensamble con base en la ponderación de las operaciones según la complejidad y estabilidad de los sub-ensambles. Romey et al. [22] presentan un software llamado STAAT (Stanford Assembly Analysis Tool) capaz de determinar cómo ensamblar un producto, dando la descripción del ensamble. Incorporado dentro de un sistema CAD (Computer Aided Design), el STAAT puede proveer retroalimentación sobre el ensamble del producto que se está diseñando. Debido al aumento exponencial de las secuencias de ensamble por el aumento en el

número de piezas, las técnicas de inteligencia artificial se han aplicado a la generación óptima del plan de ensamble. El principal objetivo de estos métodos es la generación de la planeación óptima de ensamble, considerando algunos criterios tales como: costo total del ensamble, tiempo total de ensamble y estabilidad. Sin embargo, el gran problema radica en que todos estos métodos son algoritmos abstractos, excluyendo la experiencia e intuición del planeador.

1.2 Sistemas de realidad virtual

De acuerdo a Jayaram et al. [46], la realidad virtual (RV) se define como el uso de ambientes sintéticos generados por computadora y el hardware asociado para proveer al usuario con la ilusión de presencia física dentro de dicho ambiente, es decir, es un ambiente sintético generado por computadora y otros dispositivos externos que permiten la interacción del usuario con el fin de crear la sensación de que dicho ambiente es real. El crecimiento tecnológico en los últimos años ha conducido al desarrollo de sistemas RV capaces de sumergir al usuario dentro de un ambiente virtual tridimensional, donde el usuario puede interactuar con los objetos virtuales en tiempo real. Esta interacción está basada principalmente en la visualización del ambiente virtual y los objetos. La RV ha sido exitosamente usada en el desarrollo de aplicaciones en diferentes áreas de la ciencia, tales como: ciencias básicas, ciencias sociales, educación, entretenimiento e ingeniería, Figura 1.7. El proyecto llamado “The ultimate display” podría ser considerado como el origen de la realidad virtual. En este proyecto el monitor fue considerado como una ventana al mundo virtual, que se ve, se comporta y se siente como si fuera real [47].

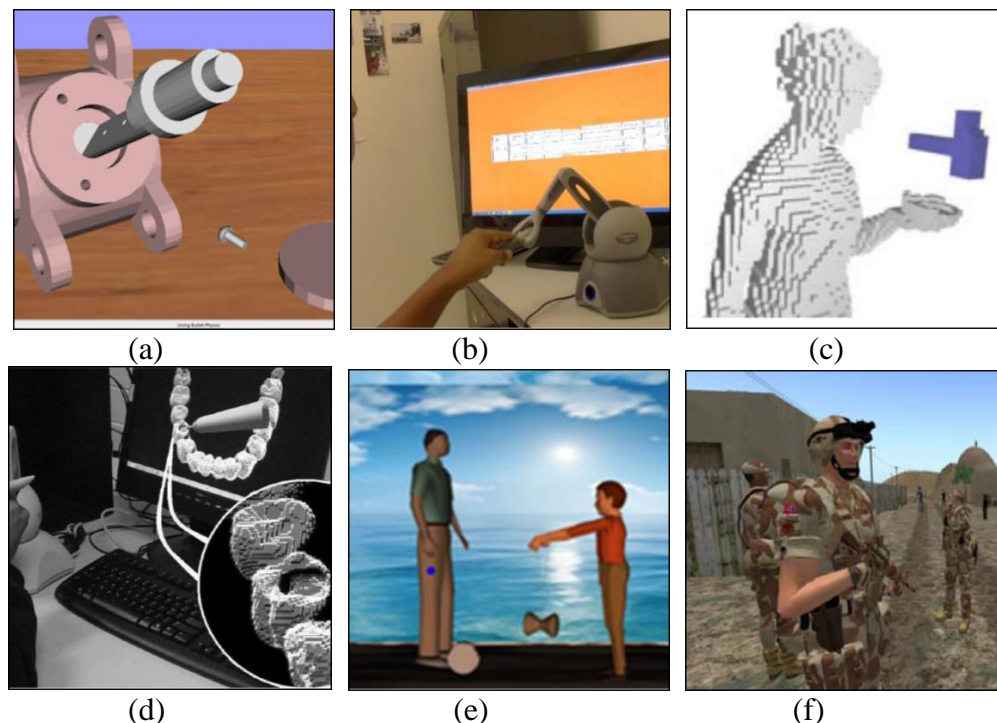


Figura 1.7. Aplicaciones de realidad virtual en diferentes áreas: a) Ingeniería [48], b) Educación [49], c) Arte [50], d) Medicina [51], e) Social [52] y f) Militar [53].

1.2.1 Realidad virtual en ingeniería

La ingeniería asistida por computadora (CAE) y la manufactura asistida por computadora (CAM), son tradicionalmente herramientas informáticas para simular los procesos de diseño y manufactura. Sin embargo, aún existe la necesidad de evaluar de una manera más intuitiva diversos aspectos técnicos tales como la factibilidad y facilidad de manufacturar un componente durante la fase de diseño con el propósito de asegurar que el producto pueda ser construido exitosamente en términos de calidad, costo y tiempo. Con el objetivo de lograr un proceso de diseño y manufactura más eficiente, surge la necesidad de integrar diversas funciones como son el modelado virtual, manufactura virtual, planeación de trayectorias y fabricación de prototipos rápidos en una sola aplicación que pueda ofrecer todas estas características.

Paralelo al desarrollo de plataformas de ensamblajes virtuales, varios autores han desarrollado aplicaciones de realidad virtual con diversos propósitos. Chen et al. [54] desarrolló una máquina virtual para la medición de coordenadas llamada HVCMM (Haptic Virtual Coordinate Measuring Machine), Figura 1.8. El sistema HVCMM utiliza las técnicas de modelado háptico para la programación de una máquina de medición de coordenadas. El dispositivo háptico es utilizado para controlar la sonda de medición y colocarla en la superficie de un modelo CAD para generar la trayectoria de la inspección. Con este sistema es mucho más fácil generar una trayectoria de medición libre de colisiones, además puede ser utilizada para el entrenamiento en la operación de una máquina de medición por coordenadas real.

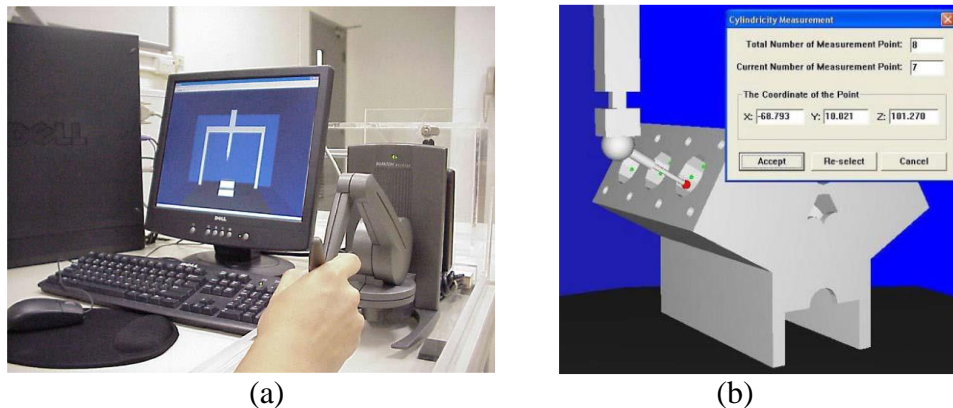


Figura 1.8. Máquina virtual de medición de coordenadas: a) configuración del sistema HVCMM y b) medición virtual de un motor [54].

La aplicación de sistemas hápticos dentro de ambientes virtuales es particularmente relevante en el campo del maquinado, donde el material y los costos son altos. Fletcher et al. [55] presentó un sistema virtual-háptico para la planeación de procesos que permite al operador cargar y configurar un tocho para maquinado, configuración y secuencia de operación, y posteriormente generar el tiempo estimado del plan del proceso. Las operaciones de fresado, taladrado y torneado pueden llevarse a cabo en el sistema propuesto, Figura 1.9.

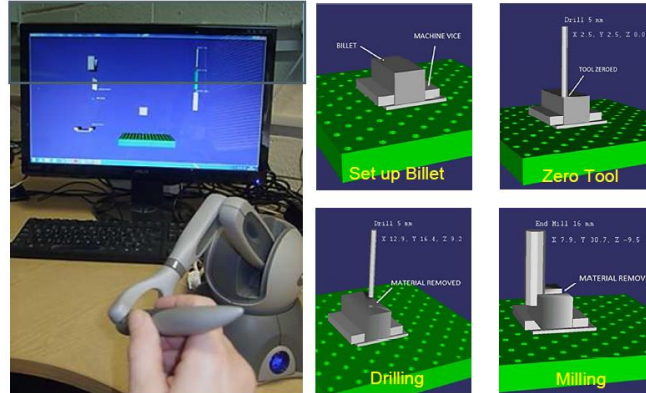


Figura 1.9. Interfaz y ejemplos del proceso de operaciones de maquinado [55].

Una herramienta para la simulación de una máquina de control numérico basado en realidad virtual fue desarrollada por Pérez et al. [56]. La fresadora virtual de 3 ejes, se diseñó con propósitos educativos y de entrenamiento. El sistema desarrollado es capaz de adaptar la máquina para añadir nuevos dispositivos o trabajar como una celda de manufactura, Figura 1.10.

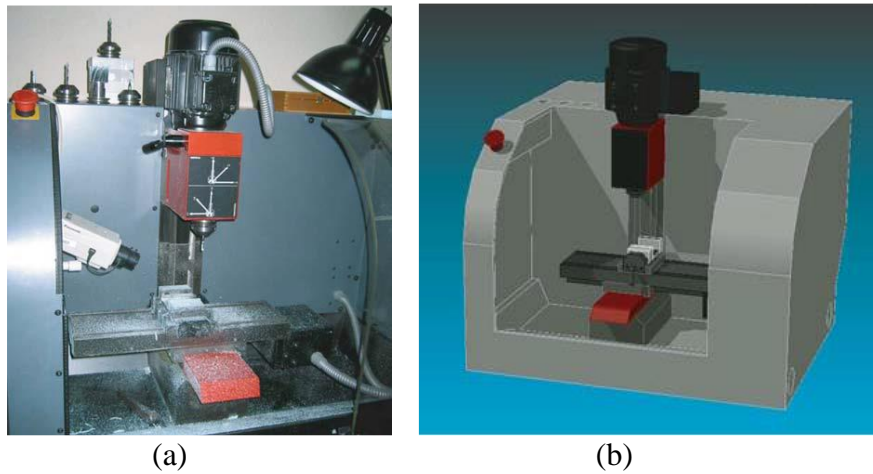


Figura 1.10. Fresadora: a) zona de trabajo real y b) modelo virtual [56].

1.2.2 Sistemas de ensamble virtuales

Dentro del área de manufactura virtual, gran parte de los trabajos se enfocan al estudio del proceso de ensamblaje. A lo largo de este tiempo, diversos autores han expresado la definición del ensamblaje virtual como:

- Jayaram et al. [46] “...el uso de herramientas de computadora para asistir o proveer al usuario con decisiones de ingeniería relacionadas al ensamblaje a través del análisis, modelos predictivos, visualización y presentación de datos sin la realización física del producto o procesos de soporte”.
- Seth et al. [57] “... la capacidad de ensamblar representaciones virtuales de modelos físicos en un ambiente virtual inmersivo generado por computadora al simular el comportamiento realista del entorno, la dinámica de los objetos virtuales y la interacción entre las partes, reduciendo así la necesidad de construir prototipos físicos para probar el ensamblaje, resultando en mejores decisiones de diseño y ensamblaje”.
- Xia et al. [58] “... utilizar tecnología de realidad virtual, gráficos por computadora, inteligencia artificial, teoría y métodos de ensamblaje para construir un modelo virtual de un producto, el ambiente virtual del espacio de trabajo y la distribución del ensamblaje con el fin de simular y analizar de manera interactiva el resultado del diseño del producto y el proceso de ensamblaje”.

Expertos en la planeación de ensamblajes aún utilizan métodos tradicionales en donde modelos CAD 3D son examinados en pantallas 2D con el objetivo de evaluar y determinar la secuencia de ensamble de un nuevo producto. Como verificación final, un prototipo físico es construido y ensamblado por trabajadores que identifican los problemas que pudiera presentar durante el ensamble. Las tareas de ensamble suelen ser complicadas, por lo que estos métodos tienden a consumir mucho tiempo, ser costosos y propensos a errores [57].

Los sistemas de ensamble virtuales ofrecen a los usuarios una aproximación para ensamblar representaciones virtuales de modelos físicos a través de simular su comportamiento físico en un ambiente virtual y validar de esta manera el desempeño del ensamble del producto en las primeras etapas del proceso de diseño antes de construir cualquier prototipo físico. La reducción o eliminación de prototipos físicos requeridos para la validación del ensamble, pueden reducir considerablemente el ciclo de desarrollo del producto, y conducir a la toma de mejores decisiones de diseño [59].

Las técnicas RV han demostrado ser una herramienta de utilidad en el diseño de productos. La RV provee un ambiente intuitivo donde el diseñador puede interactuar fácilmente con las partes y llevar a cabo revisiones de diseño sin necesidad de prototipos físicos. Para lograr una planeación de ensamblajes exitosa se debe considerar la intuición y la interacción del humano [60]. Los sistemas de ensamblajes virtuales pueden habilitar la generación de planes de ensamble de manera automática y la optimización del proceso de diseño a través del diseño basado en el ensamble [61]. La RV permite interactuar con modelos CAD tridimensionales con el mismo grado de libertad que los objetos reales. El ensamble virtual permite al diseñador evaluar si existen limitantes al momento de ensamblar piezas para construir un producto y así poder realizar cambios en el diseño que permitan mejorar el proceso de ensamble, ahorrando recursos al no fabricar partes de prueba o prototipos que resulten poco útiles. Además, el uso de RV facilita la integración y participación de todo el equipo de trabajo en el proceso de diseño [48].

La actividad fundamental relacionada al proceso de planeación virtual de ensamble es el ensamble interactivo. Los pasos generales del proceso de planeación de ensamblajes virtuales son [62]:

1. Modelado del producto en un sistema CAD.
2. Ejecución del ensamble de forma interactiva.
3. Generación automática de un plan del proceso de ensamble basado en la experiencia.
4. Uso del plan de ensamble virtual en un proceso de ensamble real.

Las aplicaciones de las plataformas de ensamblajes virtuales tienen diversos objetivos, centrándose principalmente en la simulación de tareas de simulación espacial, tales como diseño mecánico, planeación y evaluación de ensamblajes. Gupta et al. [63] demostró que la simulación multimodal en un ambiente virtual puede ser usada para evaluar y comparar diseños alternativos usando el diseño para el análisis de ensamblajes. El experimento mostró que este método es capaz de replicar los resultados experimentales en los que el aumento en los tiempos de ensamble se correlaciona con el aumento en la dificultad en la tarea de ensamble. Sin embargo, el tiempo completo de ensamble que presenta esta técnica es aproximadamente dos veces el tiempo completo de ensamble usando el modelo físico. Diversos factores asociados a esta diferencia temporal han sido identificados pero su efecto no ha sido cuantificado. Por su parte Simmons et al. [64] propuso como resultado de la planeación del ensamble un conjunto de instrucciones que describen precisamente la secuencia de ensamble, los métodos y materiales de unión, herramientas, moldes y cualquier método de prueba e inspección relevante. Establece también que cualquier herramienta de ensamble virtual requiere de

incluir al menos dos atributos relevantes del proceso: la secuencia de ensamble y los métodos de unión entre las piezas. Yuan et al. [65] presentó una propuesta de la planeación interactiva de ensamble, la cual incluye una interfaz intuitiva para desarrollar tareas de ensamble directamente en un mundo virtual. El planeador interactivo extrae la información del ensamble mecánico y determina trayectorias de movimiento utilizando una red neuronal. El sistema propuesto es capaz de producir secuencias de ensamble alternativas automáticamente y generar instrucciones para programación robótica. Zhu et al. [62] desarrollaron el sistema VAPPE (Virtual Assembly Process Planning Environment) con el fin de analizar productos complejos dentro de la planeación de procesos de ensamble. Dicho sistema contiene dos módulos diferentes, una interfaz del software Pro/E y un módulo de ensambles virtual interactivo. El módulo Pro/E proporciona una herramienta para definir los modelos interactivos de ensamble y puede exportar la información del ensamble del producto, el cual es usado para la interacción del ensamble virtual. El módulo de ensambles virtuales interactivos proporciona el ambiente virtual en donde el usuario puede ensamblar el producto mediante un proceso interactivo. Adicionalmente, este módulo proporciona una herramienta y una librería para que el usuario importe y manipule una herramienta o equipo para ensamblar un componente.

Por otra parte, Brough et al. [66] desarrollaron el VTS (Virtual Training Studio), un sistema de ensambles virtuales que permite la supervisión del entrenamiento, generando las instrucciones y permitiendo a los usuarios aprender las operaciones de ensamble en un ambiente virtual. El sistema está enfocado en el entrenamiento cognitivo, de tal modo que los entrenados puedan aprender a reconocer partes, secuencias de ensamble y orientaciones durante la operación. El sistema utiliza tres modos de funcionamiento: simulación interactiva, animación tridimensional y video. Las características principales del sistema son: manejo de simetrías, detección de errores, animaciones dinámicas, anotaciones de instrucciones ambiguas, generación automática de instrucciones en texto para el entrenamiento, Figura 1.11.



Figura 1.11. Sistema VTS: a) Interacción del usuario con VTS y b) Escena virtual del sistema VTS [66].

Xiao et al. [67] presentó un método de simplificación dinámica de ensambles con el propósito de interactuar en tiempo real con el proceso de ensamble virtual de productos complejos. El modelo del ensamble es simplificado removiendo características irrelevantes del modelo pero dejando la apariencia del mismo, Figura 1.12. Este trabajo presenta tres ventajas importantes: 1) el método de simplificación de modelos CAD se ha mejorado; 2) el reconocimiento de las características de ensamble pueda ser aprovechada al máximo para ver al ensamble como un todo; y 3) basado en la estrategia de divide y vencerás, el proceso de reconocimiento de las características de ensamble se acelera, adoptando un algoritmo de isomorfismo mejorado.

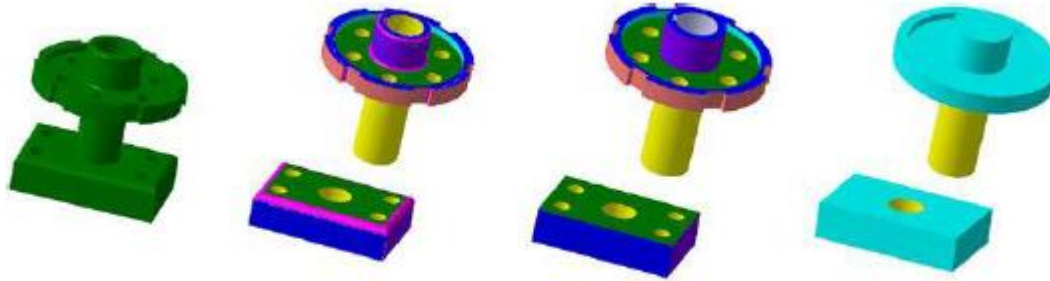


Figura 1.12. Simplificación del ensamble [67].

1.2.3 Sistemas de ensambles virtuales hápticos

El uso de sistemas hápticos ha sido ampliamente recomendado en la literatura con el objetivo de aumentar y mejorar el nivel de realismo. Los sistemas RV deben incorporar el sentido del tacto y la cinestesia con el fin de que el diseñador sea capaz de ver, tocar y manipular los objetos virtuales sin necesidad de construir prototipos físicos. Adams et al. [68] presentó una plataforma de ensambles virtuales llamada VBB (Virtual Building Block) que emula el comportamiento de bloques de LEGO®. Con una mano, el usuario toma la pieza virtual, en la otra mano el usuario sostiene un ratón inalámbrico con dos botones. El operador ve una representación gráfica en 3D de la escena en un monitor y siente una representación háptica de la escena a través de una pantalla exalubur. Por otro lado, Gupta et al. [63] evaluaron la facilidad de maniobra y ensamble mediante un ambiente virtual. En este mismo trabajo se presentó el sistema VEDA (Virtual Environment Design for Assembly), en el cual el usuario puede observar representaciones virtuales de los objetos y escuchar sonidos cuando los objetos chocan. El sistema permite sentir y manipular los objetos a través de una interfaz háptica utilizando dos dedos, permite interacciones dinámicas entre objetos virtuales y utiliza representaciones en dos dimensiones de los objetos con el fin de mantener tasas de actualización altas en la simulación. Como caso de evaluación utiliza el ensamble de un perno en un agujero. Se reporta que el tiempo de ensamble virtual es aproximadamente dos veces mayor que el tiempo de ensamble real, sin embargo las tendencias en la variación en el tiempo de ensamble virtual con respecto a parámetros como fricción, tolerancias, distancias de manipulación y redondeo de bordes son iguales a las tendencias de variación del tiempo del ensamble real. Se concluye que el uso de un sistema con retroalimentación de fuerza acerca más a la realidad la situación simulada.

Howard et al. [69] investigaron la facilidad de utilizar un ambiente virtual-háptico de escritorio como una herramienta de diseño para la evaluación de operaciones de ensamble. La introducción de las características de realidad virtual en computadoras de escritorio, como la visión estéreo, fomentan aún más el uso de esta tecnología en el proceso cotidiano de diseño de ingeniería. La aplicación combina varios paquetes de software, que incluyen: VR Juggler, open dynamics engine (ODE)/open, OpenHaptics y librerías de OpenGL/GLM/GLUT para explorar los beneficios y limitantes de combinar dispositivos hápticos con modelos basados en el comportamiento físico. La retroalimentación de fuerza puede sentirse en ambas manos si se utilizan dos dispositivos hápticos para la interacción de partes complejas. Los resultados sugieren que los sistemas de escritorio son un medio de simulación asequible y portátil para aplicaciones de ensamble industrial; sin embargo, la principal deficiencia de estos sistemas es que la sensación de inmersión no es muy buena.

Los sistemas HMD (Head Mounted Display), guantes y otros dispositivos interactivos encierran la visión del operador, así como el escuchar sonidos del entorno. En estos sistemas, el operador realmente se convierte en un participante dentro del sistema y puede interactuar con el entorno virtual. El sentido inmersivo es mejor que en los sistemas de escritorio; sin embargo, debido a las características del HMD se tienen deficiencias en la restricción sensorial intensiva, la relación y baja

resolución, así como la fatiga visual. Un sistema HDM fue desarrollado por Kashiwa et al. [70] con el propósito de realizar ensambles industriales y mantenimiento. En este sistema, diferentes procedimientos de ensamble y desensamble fueron modelados usando redes de Petri y posteriormente acoplados al ambiente virtual. Otro sistema de realidad virtual utilizando HDM fue desarrollado por Holt et al. [71], Figura 1.13. El objetivo del sistema fue el planear y evaluar el ensamble de arneses de cables. Los resultados mostraron ventajas del uso de realidad virtual sobre los sistemas CAD.



Figura 1.13. Casco de realidad virtual con guantes [71].

Los sistemas de realidad virtual llamados CAVE (Cave Assisted Virtual Environment), comenzaron a desarrollarse a principios de la década de los 90's. La CAVE es una habitación cuyas paredes, piso y techo se componen de grandes pantallas. Las imágenes de alta resolución se proyectan en estas pantallas mediante proyectores de alta potencia. Utilizando lentes estereoscópicas, el operador puede observar escenas virtuales tridimensionales en cualquier posición del espacio. Los sistemas CAVE permiten un entorno visual de gran ángulo de visión y compartido por varias personas. Sin embargo presentan algunas deficiencias, principalmente su costo es muy alto porque se requiere más espacio y más equipo. Además, el operador aún está limitado a una espacio estrecho de trabajo y no es capaz de caminar un larga distancia dentro del entorno virtual. Johnson et al. [72] desarrollaron un sistema de ensambles llamado VEGAS (Virtual Environment for General Assembly), el cual está basado en los sistemas CAVE. VEGAS utiliza guantes para el movimiento de agarre humano, el software VRJuggler para el ambiente virtual y Voxmap PointShell (VPS) para la detección de colisiones, Figura 1.14. Un sistema similar fue desarrollado por Wan et al. [73], quienes crearon un sistema multi-modal inmersivo de ensambles virtuales llamado MIVAS (Multi-modal Immersive Virtual Assembly System). Al ver la aplicación de ensambles virtuales como una máquina de estado finito, incorporaron dispositivos de seguimiento, guantes de datos, comandos de voz, sonidos humanos, sistemas CAVE de cuatro caras completamente inmersivo, junto con técnicas de optimización tanto para modelos complejos de ensambles como para operaciones de ensamble que proveen una forma natural e intuitiva de la planeación y entrenamiento de ensambles.



Figura 1.14. Ensamble dentro de la cabina de VEGAS [72].

Los sistemas de esfera cibernética mejoran el caminado del usuario dentro del ambiente virtual, reduciendo la limitante de poner al usuario en una posición fija o con poca movilidad. Con el objetivo de reducir esta limitante, la Universidad de Warwick en colaboración con varias compañías, han desarrollado un sistema de inmersión total [74]. Como se muestra en la Figura 1.15, una esfera grande, hueca y translúcida es soportada por medio de un cojín de aire de baja presión como dispositivo de visualización en el sistema. Este cojín de aire permite que la esfera gire en cualquier dirección. El usuario es capaz de entrar a la esfera por medio de una escotilla. Los movimientos de marcha del operador hacen que la esfera gire. Las imágenes se proyectan sobre la superficie de la esfera mediante proyectores de alta potencia. Las señales proporcionadas por los sensores alimentan a la computadora mediante cables. La ciber esfera es el primer sistema para realizar el caminado libre del usuario dentro de un entorno virtual totalmente inmersivo. Las limitantes actuales de este sistema son que debido a que es una esfera cerrada, todos los dispositivos interactivos tienen que ser inalámbricos, y la mayoría no pueden obtenerse del mercado. Otra limitante es la fabricación de la esfera, ya que tiene que soportar al usuario y servir como pantalla [58].



Figura 1.15. Sistema de ciber esfera [58].

Por otro lado, Xia et al. [75] desarrolló una esfera de realidad virtual asistida por dispositivos hápticos llamada HTIsphere, Figura 1.16. En un cuarto grande, se instala el simulador de movimiento, diseñado para implementar la marcha libre del operador. Una tapa esférica de 5.5 m de diámetro se usa como pantalla de visualización. Los proyectores de alta potencia se fijan en la pared y el techo

para proyectar las escenas virtuales generadas por la estación de trabajo en la pantalla esférica para producir un entorno virtual. Un dispositivo háptico se fija en el simulador de movimiento como herramienta de interacción, los seguidores están conectados a los pies del usuario para capturar su posición y orientación. El usuario puede utilizar lentes estereoscópicas para observar las escenas virtuales en 3D, al mismo tiempo que opera el sistema háptico para interactuar con el entorno virtual. Durante el proceso de ensamble el usuario puede caminar dentro del simulador de movimiento.

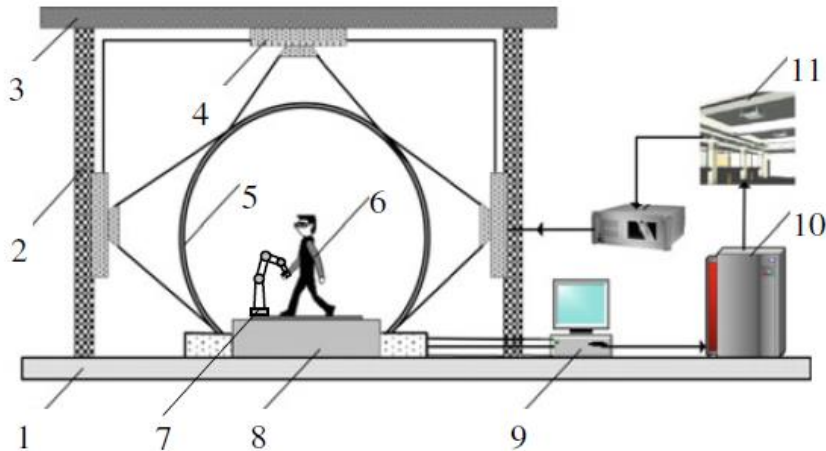


Figura 1.16. Sistema virtual HTI sphere. 1- tierra; 2- pared; 3- techo; 4- proyector; 5- pantalla esférica; 6- operador; 7- dispositivo háptico; 8- simulador de movimiento; 9- computadora; 10- estación de trabajo; 11- escena virtual [75].

1.3 Entrenamiento virtual de ensamble

El entrenamiento virtual es una poderosa herramienta para capacitar personal en tareas difíciles, costosas o peligrosas para realizar en el mundo real. El principal objetivo del entrenamiento virtual es transferir al usuario conocimientos y habilidades que pueda desarrollar en el mundo real. Los entrenamientos virtuales son ampliamente utilizados en operaciones industriales [76], [77]; operaciones en plantas eléctricas [78]; manejo de vehículos, control de tráfico, mantenimiento [79]; procedimientos médicos [51], [80]-[81]; operaciones militares [53]. Sin embargo, esto no ha sido el caso para la mayoría de los procesos de ensamble de productos.

El entrenamiento tradicional de ensamble tiene la principal desventaja de requerir componentes físicos, instalaciones especiales, incluso acceso a la línea de producción real. Por lo anterior el entrenamiento puede llegar demasiado tarde en el efímero ciclo de vida de un producto para influir en su diseño de una manera rentable. Una alternativa de solución es el entrenamiento virtual de ensambles. Si bien, la constante investigación está impulsando el desarrollo de nuevos entornos virtuales, la mayoría de los investigadores se centran solamente en analizar las funcionalidades de los sistemas de realidad virtual propuestos, en lugar de analizar la efectividad en el mundo real. Por otra parte, ninguno de los estudios ha evaluado completamente el efecto del entrenamiento virtual de ensambles en el desempeño del ensamble real, particularmente utilizando diferentes modos de entrenamiento de ensambles virtuales y en tareas complejas de ensambles. Por lo tanto, la eficacia y eficiencia del entrenamiento virtual de ensambles aún no ha sido investigado. Un método para determinar la efectividad del entrenamiento virtual de ensambles, es evaluar y comparar la tarea de ensamble real después que el usuario ha sido sometido al entrenamiento virtual. La eficiencia de completar una tarea de ensamble real es evaluada comúnmente en términos del tiempo para completar la tarea (TCT, por sus siglas en inglés) de ensamble, ya que representa el costo del producto. La Figura 1.17 muestra los conceptos de efectividad y eficiencia del entrenamiento virtual de ensamble.

| | | | |
|--|--------------------------|---|--|
| Exactitud de la tarea de ensamble / Tiempo para completar la tarea de ensamble | Eficiente (correcto) | Correcta realización del ensamble, pero ineficiente (lento) | Correcta realización del ensamble y eficiente (rápido) |
| | Ineficiente (incorrecto) | Incorrecta realización del ensamble, e ineficiente (lento) | Incorrecta realización del ensamble, pero eficiente (rápido) |
| | | Ineficiente (lento) | Eficiente (rápido) |

Tiempo para completar la tarea de ensamble / Exactitud de la tarea de ensamble

Figura 1.17. Efectividad y eficiencia del entrenamiento virtual de ensamble.

El sistema VTS desarrollado por Brough et al. [66] permite crear las instrucciones de ensamble y cuenta con tres modos de entrenamiento: (1) simulación interactiva, (2) animación 3D y (3) video. Para lograr buenos resultados de entrenamiento los practicantes requieren supervisión. El supervisor puede participar dentro de la escena virtual, monitoreando las acciones del usuario y asistiéndolo durante su participación, con el propósito de mejorar el entendimiento del practicante. Se realizó un estudio que involucró a 30 personas y dos tutoriales para evaluar el desempeño del sistema, evitando el uso de dispositivos hápticos con el propósito de mantener bajo el costo computacional de los sistemas.

El esfuerzo de investigación para el entrenamiento de ensambles también se ha centrado en técnicas de realidad aumentada. Un procedimiento general para el entrenamiento de ensambles utilizando realidad aumentada fue propuesto por Illiano et al. [82]. El principal objetivo fue entrenar operadores en el ensamble de una transmisión de engranes planetarios con la ayuda de un dispositivo de mano, utilizando un enfoque variante con sensores de retroalimentación en el entorno de trabajo. Webel et al. [83] desarrolló una plataforma para la interacción multimodal, basada en realidad aumentada para tareas de entrenamiento. Implementaron la retroalimentación háptica mediante pulseras vibro táctiles para aplicar estímulos de vibración al brazo humano, antebrazo y muñeca, Figura 1.18. La evaluación realizada involucra dos grupos experimentales: grupo 1- control: los participantes realizaron una vez la tarea física mientras estaban viendo un video instructivo mostrando los pasos de la tarea; grupo 2- AR (Augmented Reality): los participantes realizaron la tarea física una vez usando la plataforma de realidad virtual. Los resultados muestran que después de una sesión de entrenamiento, el nivel en las habilidades de quienes entrenaron en la plataforma de realidad aumentada fue más alto que el nivel de habilidades de quienes siguieron el método tradicional de entrenamiento. Sin embargo, una de las principales limitantes en el uso de realidad aumentada para entrenamiento de ensambles es la necesidad de determinar cuándo, qué y dónde mostrar la información virtual en el mundo real, lo que requiere al menos una comprensión parcial del espacio de trabajo donde se llevará a cabo el ensamble.



Figura 1.18. Componente móvil de realidad virtual incluyendo una pulsera háptica [83].

La Tabla 1.1 resume las características clave de los trabajos de investigación en el área del entrenamiento virtual de ensamblajes. Estas principales características han sido divididas en cinco categorías: modo de entrenamiento, tareas de ensamblaje, manipulación de las piezas, evaluación del ensamblaje y evaluación de la efectividad. Los modos de entrenamiento virtual de ensamblaje considerados en la literatura han sido tres: 1) virtual-háptico (el usuario siente una fuerza de retroalimentación durante el entrenamiento virtual de ensamblaje), 2) virtual (el entrenamiento virtual de ensamblaje se lleva a cabo sin fuerza de retroalimentación) y 3) visual (se muestra un video del entrenamiento de ensamblaje). Varios autores han considerado el uso de sistemas hápticos en las actividades del entrenamiento virtual de ensamblajes, sin embargo, ninguno ha analizado ni comparado la efectividad de estos tres modos. Considerando la complejidad de las tareas de ensamblaje, la medida real de la complejidad de las tareas de ensamblaje podría ser una combinación de varios parámetros como el número de partes, la complejidad geométrica de las piezas, el número de secuencias de ensamblaje factibles, el número de operaciones de ensamblaje y el número de partes reorientadas durante el ensamblaje, entre otras.

Tabla 1.1. Principales características de los estudios del entrenamiento virtual de ensamblaje.

| Entrenamiento virtual de ensamblajes (Autores) | Modo de entrenamiento | | | Tareas de ensamblaje | | | Manipulación de las piezas | | Evaluación del ensamblaje | | Evaluación de la eficiencia del entrenamiento virtual de ensamblajes |
|--|-----------------------|---------|--------|----------------------|-----------------------|-------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|-------|--|
| | Virtual - háptico | Virtual | Visual | No. de tareas | No. partes/ensamblaje | Complejidad | Libre | Uso de restricciones | TCT | ANOVA | |
| Oren et al. [84] | X | | | 1 | 6 | SC | X | | X | | X |
| Xia et al. [85] | X | X | | 1 | 2 | SC | X | X | X | | |
| Tching et al. [86] | X | | | 1 | 2 | S | X | X | X | | |
| Bordegoni et al. [87] | X | | | 1 | 2 | SC | X | | | | X |
| Vo et al. [88] | X | X | | 2 | 4 | S | X | | X | X | |
| Brough et al. [66] | | X | X | 2 | 11 | C | X | | | | X |
| Garbaya et al. [89] | X | X | | 1 | 2 | SC | X | | X | X | |
| Jayaram et al. [90] | | X | | 2 | 2 | SC | X | | | | X |
| Adams et al. [68] | X | X | | 1 | 37 | SC | X | | X | X | X |
| Boud et al. [91] | | X | | 1 | 8 | S | X | | X | X | X |

S- simple, SC- semi-complejo, C- complejo

Goldwasser y Motwani [45] propusieron el estudio del costo del ensamble mediante la introducción de una colección de medidas básicas de complejidad: menor número de direcciones, menor número de reorientaciones, menor número de pasos no lineales, menor número de pasos y mínima profundidad de una secuencia de ensamble. Por otro lado, Ghandi y Masehian [92] presentaron las principales características de un problema de ensambles considerando dos aspectos, Figura 1.19: problemas del modelo y problemas naturales. También comentaron que cuando las partes de un ensamble son geometrías simples, entonces, la complejidad de la tarea de ensamble puede ser medido en términos del número de partes, n , pero si las partes son complejas, entonces el número total de vértices de las piezas es la métrica apropiada que refleja la complejidad de la tarea. Basado en estas definiciones de la complejidad del ensamble, se puede decir que una tarea de ensamble compleja involucra un gran número de partes con geometrías complejas, mientras que una tarea de ensamble simple, involucra pocas piezas con geometrías simples.

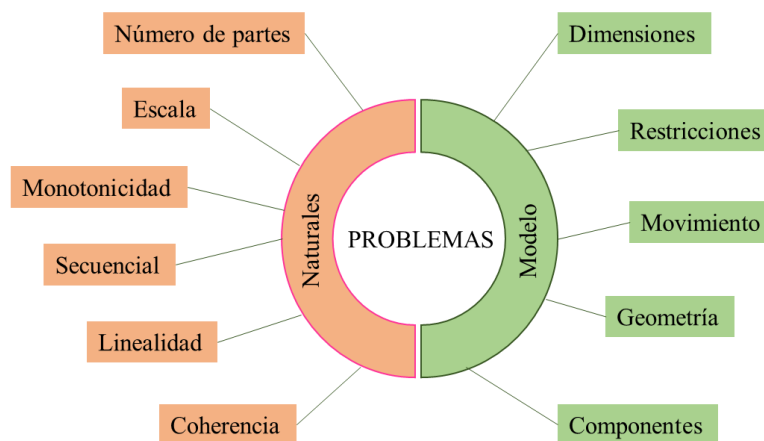


Figura 1.19. Problemas de ensamble [92].

Se puede observar en la Tabla 1.1 que el entrenamiento virtual de ensamble reportado en la literatura se ha centrado principalmente en ensambles simples con pocas piezas y geometrías primitivas. Tres niveles de complejidad han sido identificados: 1) simple (S), figuras virtuales primitivas o generadas con una operación booleana; 2) semi-complejo (SC), las figuras virtuales son modeladas con más de una operación booleana pero son modelos simplificados de objetos reales; y 3) complejo (C), las figuras virtuales corresponden a las figuras complejas reales. Brough et al [66] realizó tareas de ensamble relativamente complejas, sin embargo no involucró sistemas hápticos para la manipulación de los objetos virtuales. Aunque reconocen los beneficios de los sistemas hápticos, estos fueron omitidos con la finalidad de mantener bajo el costo computacional de su sistema. Debido a que los sistemas de realidad virtual-hápticos requieren un alto costo computacional, muchos sistemas que se presentan en la literatura, realizan tareas de ensambles simples, como el clásico *perno en agujero* (peg and hole).

La Tabla 1.1 también muestra que la mayoría de los estudios en la literatura han considerado la manipulación libre de los objetos virtuales; es decir, los objetos virtuales tienen un comportamiento físico similar al mundo real y son libres de ser manipulados por el usuario. Muy pocos trabajos han usado restricciones para reducir los grados de libertad de los objetos virtuales mientras se lleva a cabo el entrenamiento virtual del ensamble. De acuerdo a la Tabla 1.1, el desempeño del entrenamiento virtual de ensamble ha sido evaluado en términos del TCT, ya que es el parámetro más representativo del proceso de ensamble, indicando implícitamente el costo del ensamble, la complejidad del ensamble y la habilidad del usuario para llevar a cabo dicho ensamble. Los análisis ANOVA se han

usado para demostrar el significado y la validación de los datos estadísticos relacionados al entrenamiento virtual de ensamble. Evaluaciones heurísticas han sido también utilizadas para evaluar el desempeño general de los sistemas virtuales de ensamble basados en la percepción del usuario, satisfacción y cuestionarios de retroalimentación.

Aunque varios trabajos de investigación se han centrado en el análisis y evaluación del entrenamiento virtual de ensamble, un número limitado de investigaciones ha evaluado su eficacia. Boud et al. [91] exploró el efecto de utilizar realidad virtual para el entrenamiento de ensamblajes por operadores humanos. Los resultados muestran que el TCT fue mayor para los participantes que entrenaron utilizando un dibujo en dos dimensiones antes de ensamblar el producto real que los participantes entrenados en un ambiente virtual. También observaron que la limitante más significativa fue la falta de retroalimentación háptica dentro del ambiente virtual. Las pruebas experimentales del sistema VBB realizadas por Adams et al. [67] mostraron una mejora significativa en el desempeño del ensamble con entrenamiento virtual-háptico en comparación con el entrenamiento tradicional utilizando videos. Oren et al [84] comparó la transferencia del conocimiento del entrenamiento virtual de ensamble versus el entrenamiento real basado en el tiempo de entrenamiento y ensamble real de un rompecabezas tridimensional de madera. Los resultados mostraron que el entrenamiento virtual reduce el tiempo real de ensamble en comparación con el entrenamiento físico. Sin embargo, ninguno de los estudios en la literatura ha analizado y comparado la efectividad del entrenamiento virtual de ensamblajes utilizando diferentes modos de entrenamiento y tareas de ensamble con varios niveles de complejidad. Por lo tanto, se necesita más trabajo de investigación para evaluar completamente el impacto y los beneficios del entrenamiento virtual de ensamblajes en el desempeño del ensamble real.

1.4 Planeación y evaluación virtual de ensamblajes

La planeación y evaluación constituyen la piedra angular en operaciones de ensamble. Cuando se analiza un ensamble de un nuevo producto, el objetivo es obtener el mejor plan de ensamble considerando criterios de ensamble y necesidades del planeador, objetivo que debe ser cumplido en el menor tiempo posible, ya que el mercado global así lo exige. Las técnicas de realidad virtual-háptica se han sumado en la exploración de este campo, sin embargo, las plataformas existentes, actualmente se centran en la evaluación de su funcionamiento interno y están limitadas únicamente al cálculo del TCT, quedando como una herramienta de ensamble convencional que sólo simula el ensamble sin llegar a la generación de los ensamblajes, y mucho menos, obtener el mejor plan de ensamble.

La Tabla 1.2 resume las características clave de los trabajos de investigación en el área de planeación de ensamblajes virtuales. Estas características principales han sido divididas en cuatro categorías principales: evaluación del sistema, generación de secuencias, métricas de ensamble analizadas, plan de ensamble. Las métricas de ensamble más analizadas en la literatura son cuatro: tiempo para completar la tarea de ensamble (TCT), DOF, estabilidad y accesibilidad.

La generación, representación y evaluación de planes de ensamble en plataformas virtuales, aún no ha sido ampliamente explorada, limitándose únicamente a la evaluación de las diferentes métricas de ensamble. En la Tabla 1.2 se puede observar que los autores se centran principalmente en la evaluación de sus sistemas. El TCT es la única métrica analizada, considerando que la accesibilidad en los sistemas de realidad virtual-háptica ya está incluida por defecto. Para los autores, el TCT es sin duda la métrica más importante *“El tiempo es dinero”*; sin embargo, existen otras métricas importantes que deben ser consideradas al evaluar diferentes planes de ensamble, tales como: distancias, posiciones, orientaciones, energías, espacio de trabajo, etc. La selección del mejor plan de ensamble es una combinación entre el mejor TCT y las necesidades específicas del planeador. Por

otra parte, la Tabla 1.2 muestra la carencia de investigación en la representación, generación y evaluación de diferentes estrategias de ensamble.

Tabla 1.2. Principales características de los estudios de la planeación de ensamble en la literatura.

| | Evaluación de planes de ensamble (Autores) | Evaluación del sistema | Generación de secuencias | Métricas del ensamble analizadas | | | | Plan de ensamble | | |
|-----------------|--|------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----|-------------|---------------|------------------|----------------|----------------|
| | | | | TCT | DOF | Estabilidad | Accesibilidad | Representación | Generación | Evaluación |
| Virtual-háptico | Xia et al. [85] | X | | X | | | X | | | |
| | Tching et al. [86] | X | | X | | | X | | | |
| | Bordegoni et al. [87] | X | | X | | | X | | | |
| | Vo et al. [88] | X | | X | | | X | | | |
| | Garbaya et al. [89] | X | | X | | | X | | | |
| | Adams et al. [68] | X | | X | | | X | | | |
| | Yoon [93] | X | | X | X | | X | | | X ¹ |
| | Seth [94] | X | | X | | | X | | | X ² |
| | Jia [95] | X | | X | | | X | | | |
| | Ladeveze [96] | X | | X | | | X | | | |
| Hassan [97] | X | | | | | X | | | X ³ | |
| Virtual | Gao et al. [59] | X | | X | X | X | X | | | |
| | Brough et al. [66] | X | | X | | | | | | |
| | Jayaram et al. [90] | X | | X | | | | | | |
| | Boud et al. [91] | X | | | | | X | | | |
| | Aleotti et al. [98] | X | | | | X | X | | | |

¹ Ambiente virtual en 2D

² Únicamente mencionado

³ En colaboración con algoritmo *Ant colony*

En general, se puede observar que aunque se han desarrollado un gran número de trabajos de investigación relacionados al ensamble virtual, éstos se han limitado al desarrollo de sistemas de ensamble virtual y su potencial en la planificación y evaluación completa de ensambles con información útil para el proceso real de ensamble. Pocos trabajos se han enfocado a realizar una evaluación del efecto e impacto que este tipo de sistemas tienen en los procesos de planeación y evaluación de ensambles, así como en el entrenamiento de tareas de ensamble.

1.5 Balanceo virtual de líneas de producción

En una línea de producción y ensamble, las unidades son transportadas con velocidad constante a través de estaciones de trabajo consecutivas. El problema de balanceo de línea de ensamble (ALB, por sus siglas en inglés) consiste en asignar tareas en una secuencia ordenada de estaciones de modo que sean satisfechas las relaciones de precedencia entre las tareas y se optimicen determinadas medidas de rendimiento [99]. En la literatura el objetivo usualmente es minimizar el número de estaciones de trabajo dentro de una línea durante el tiempo del ciclo de trabajo. El primer sistema desarrollado para las operaciones secuenciales de una línea de ensambles fue llamado COMSOAL [100]. En las últimas décadas, muchos algoritmos heurísticos han sido desarrollados para manejar diferentes tipos de problemas a los que se enfrenta el ALB [101]. Sin embargo, el problema ALB es muy diverso y complicado, en particular dentro del ambiente de manufactura global. Por lo tanto, es imposible el uso de un solo algoritmo o regla que resuelva y proporcione soluciones óptimas

garantizadas a todos los problemas del ALB [102]. En este sentido, varios sistemas ALB han sido desarrollados. Basado en las metodologías utilizadas para resolver estos problemas, la literatura muestra las siguientes categorías: modelos matemáticos [103]-[105], algoritmos de red de petri [106], [107], algoritmos genéticos [108]-[110], algoritmo de recocido simulado [111], [112], algoritmos de búsqueda tabú [113], algoritmos de colonia de hormigas [114]-[116], algoritmos de trayectoria más corta [117], algoritmos meméticos [118], algoritmos de abejas [119].

Los algoritmos desarrollados para el ALB son usualmente expresados en términos matemáticos, por lo que sólo pueden ser entendidos por expertos, pero no por el personal encargado del departamento de producción en planta. Jiao et al. [120] desarrollaron un sistema interactivo basado en la Web para un ALB, Figura 1.20. Con esta técnica, el usuario puede interactuar con el sistema sin conocimiento detallado del algoritmo. El personal de producción puede definir fácilmente su problema de ALB, detallando información de las tareas, tiempos, recursos, restricciones y objetivos. Por otra parte, manufacturar un producto dentro de una línea de ensamble requiere la división del producto en pequeños grupos llamados *tareas*. Desarrollar una tarea toma un *tiempo*, así como equipo especializado y habilidad del personal. Entre cada tarea existen restricciones de precedencia debido a las condiciones tecnológicas y de organización. Estos elementos pueden ser resumidos y visualizados en una *gráfica de precedencia*, Figura 1.21. La gráfica de precedencia contiene un nodo para cada tarea, cada nodo contiene el tiempo de tarea, la unión de los nodos es a través de restricciones de precedencia [121].

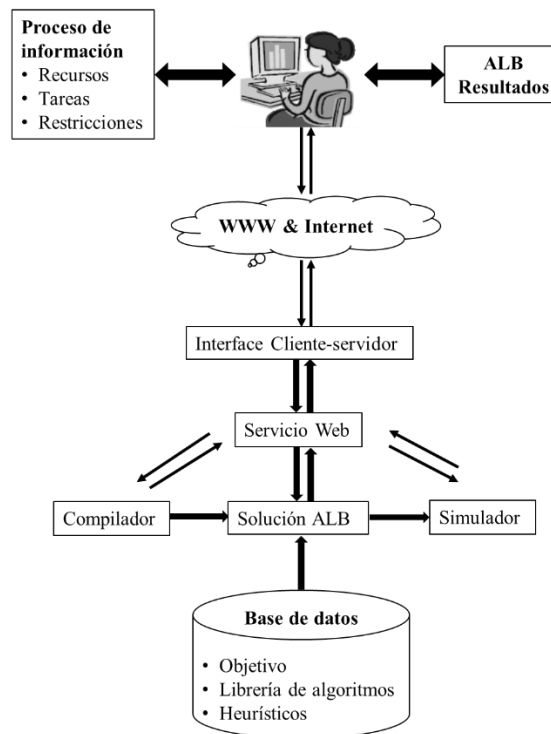


Figura 1.20. Arquitectura del sistema desarrollado por [120].

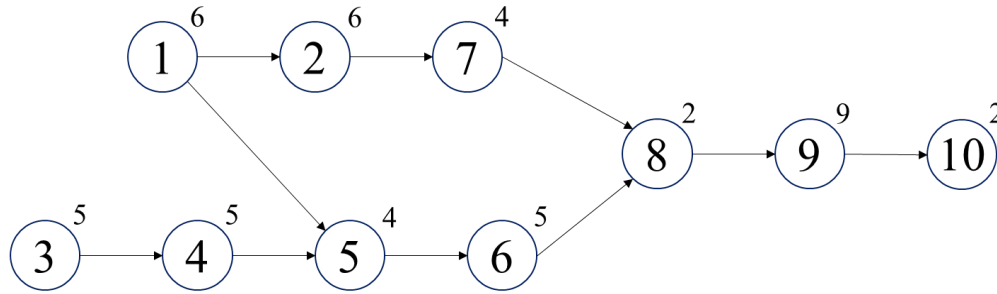


Figura 1.21. Gráfica de precedencia.

El problema de ALB contiene ocho características principales que se mencionan a continuación [121]:

1. Producción en masa de un producto homogéneo.
2. Proceso de producción.
3. Línea con tiempo de ciclo fijo.
4. Tiempo de operaciones determinadas (t , tiempo de la tarea).
5. Asignación sólo de restricciones de precedencia.
6. Diseño serial de la línea de producción con m estaciones.
7. Todas las estaciones igualmente equipadas con respecto a maquinaria y operadores.
8. Maximizar la eficiencia de la línea de producción: $E = t_{sum}/(m \cdot c)$ con un tiempo total de la tarea $t_{sum} = \sum_{j=1}^n t_j$, y un tiempo de ciclo $c = tiempo\ de\ producción\ por\ día/producción\ por\ día$; donde n es el número de estaciones de trabajo.

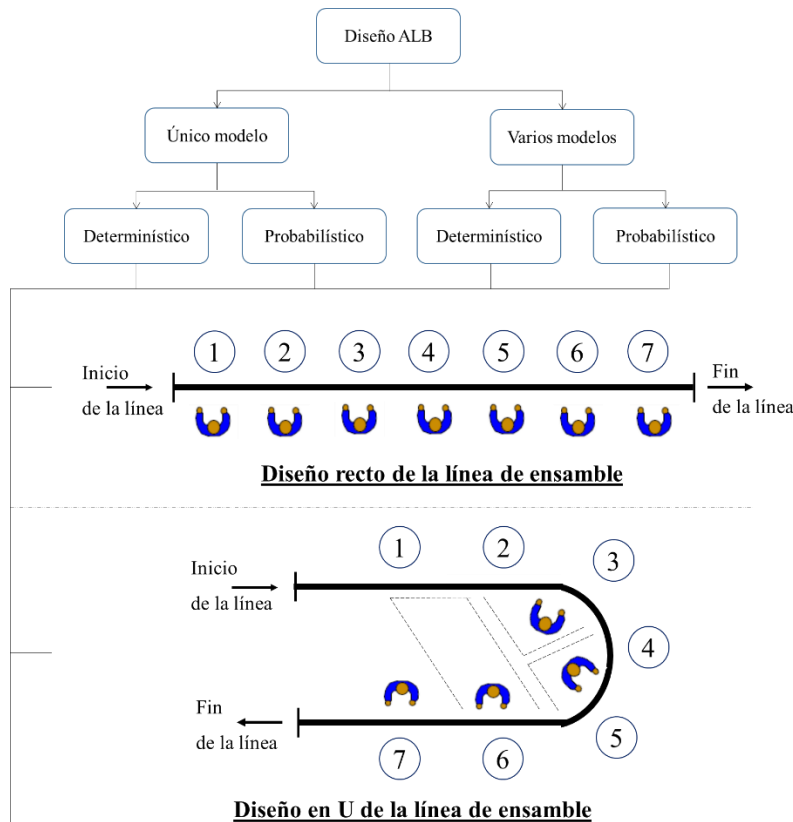


Figura 1.22. Diseño y clasificación de ALB.

El problema de ALB puede ser clasificado con base al número de modelos producidos en la línea, la naturaleza del tiempo de la tarea (determinístico o probabilístico) y la naturaleza del flujo (recto o en U). En la misma línea de ensamble, uno o más modelos de un producto pueden ser ensamblados. Si sólo un modelo es ensamblado en la línea, entonces el sistema es definido como un sistema de ensamble de un solo modelo, de lo contrario, se denominará como sistema de ensamble de varios modelos. Los tiempos de procesamiento de las tareas pueden ser determinísticas o probabilísticos. Si las tareas se realizan utilizando todas las herramientas y accesorios altamente calificados, entonces los tiempos de procesamiento de las tareas pueden ser aproximados a la cantidad determinista. Sin embargo, lo más común en operaciones de ensamble, es la variación del tiempo. Las disposiciones de las estaciones de trabajo en la línea de ensamble pueden ser en línea recta o en un formato U. En el formato U, un operador puede administrar más de una estación de trabajo, Figura 1.22 [122].

CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL SISTEMA DE PLANEACIÓN Y ENTRENAMIENTO VIRTUAL DE ENSAMBLES

En este capítulo se describen el funcionamiento y las principales características del sistema HAMS (Haptic Assembly Manufacturing System), el cual ha sido desarrollado como un sistema de realidad virtual, donde el usuario puede interactuar con los objetos virtuales de una manera intuitiva y natural. HAMS permite analizar un producto desde sus primeras pruebas de ensamble hasta el balanceo de la línea, incluyendo el entrenamiento y la evaluación de diversos parámetros y métricas que repercuten directamente en el desempeño del ensamble real.

2.1 Integración

El sistema HAMS ha sido desarrollado como una plataforma computacional para llevar a cabo tareas de entrenamiento, planeación y evaluación de ensambles virtuales con asistencia de dispositivos hápticos, así como el análisis de ensambles manual-robótico, y líneas de producción. La Figura 2.1 muestra la arquitectura del sistema HAMS propuesto, el cual consta de ocho módulos principales:

1. *Módulo de entrada.* Responsable de importar y cargar los modelos virtuales dentro del sistema HAMS en cualquiera de los tres formatos *.stl, *obj, y *.vtk. La función principal de este módulo es abrir e importar los archivos que contienen la descripción del modelo a cargar. Adicionalmente otras variables o parámetros referentes al modelo virtual, como el material y tipo de representación, también pueden ser asignadas al momento de importar el objeto.
2. *Módulo gráfico.* Encargado del renderizado gráfico, incluye la creación y representación gráfica de la escena virtual y los modelos tridimensionales, la visualización de trayectorias de ensamble, visualización de información en forma de texto, así como la creación y visualización de botones virtuales llamados “widgets” para modificar parámetros de simulación. Para este módulo, el sistema HAMS utiliza las librerías de código abierto “Visualization Toolkit (VTK) v5.10” [123], cuyo principal objetivo es la visualización de volúmenes y elementos 3D. VTK permite la creación y visualización de modelos primitivos como esferas, cilindros, cubos y conos, además de la visualización de modelos de forma arbitraria y compleja, representados por mallas triangulares.
3. *Módulo físico.* Responsable del comportamiento físico de los objetos virtuales, otorgándoles un movimiento dinámico realista, además de detección y respuesta a colisiones. En HAMS se utilizan tres simuladores de física: Bullet physics v2.81 [124], PhysX SDK v2.8 [125] y PhysX SDK v.3.1 [125]. Estos simuladores emplean la solución de ecuaciones de la mecánica Newtoniana para resolver el movimiento de los cuerpos rígidos, cuerpos flexibles y juntas cinemáticas. El sistema HAMS permite la selección del simulador físico durante la simulación virtual del ensamble, esto con el fin de seleccionar el simulador que mejor se adapte a las condiciones particulares del ensamble.
4. *Módulo háptico.* Encargado de calcular y proveer la fuerza de retroalimentación al usuario, proveyendo el sentido del tacto y cinestesia para el reconocimiento y manipulación de los objetos virtuales. En éste módulo se utilizan las librerías HLAPI de OpenHaptic v3.0 [126], las cuales son las librerías estándar para la programación de dispositivos hápticos tipo Phantom (Geomatic Touch) [126]. El sentido de tacto se crea por medio de detección de colisiones entre el cursor háptico y el objeto virtual. Adicionalmente el sistema HAMS permite la manipulación de objetos utilizando un dispositivo háptico en cada mano.
5. *Módulo de entrenamiento.* Responsable de proveer actividades de entrenamiento virtual de ensambles y llevar un registro de las actividades realizadas por cada usuario, así como proporcionar información al supervisor sobre el progreso de cada practicante. Este módulo

proporciona capacitación a través de tres modos de entrenamiento: virtual-háptico, virtual, y visual. Al iniciar el entrenamiento de un nuevo usuario, se genera una carpeta que contiene un archivo llamado *nombredelusuario.csv*, también contiene un video por cada sesión de entrenamiento. El archivo *.csv* contiene el historial completo de las sesiones de entrenamiento llevadas a cabo por el usuario. Esta información generada es de uso exclusivo del supervisor, permitiéndole evaluar el progreso del participante.

6. *Módulo de planeación*. El módulo de planeación se divide en dos fases, la primera se encarga de la generación de los planes de ensamble y la segunda lleva a cabo la evaluación de los planes de ensamble generados en la primera. Durante la primera fase se realiza un registro de todas las operaciones y movimientos que el planeador ha realizado durante la ejecución de la tarea de ensamble virtual, tales como tiempo, distancia, posición, orientación, energía, etc. Una vez completado el ensamble virtual por el planeador, se generan tres archivos que contienen la representación del plan de ensamble, las instrucciones del plan de ensamble, y la visualización del plan de ensamble (video). Cabe mencionar que la generación automática del plan de ensamble es por cada tarea de ensamble virtual que se realice, es decir, se generan tres archivos por cada simulación realizada. La segunda fase se encarga de analizar y evaluar los diferentes planes de ensamble generados para una misma tarea de ensamble, con el propósito de seleccionar el mejor plan de ensamble de acuerdo a diversos criterios según las necesidades del planeador.
7. *Módulo robótico*. Encargado de registrar y guardar las trayectorias y movimientos de ensamble generadas durante la simulación virtual con el fin de ser adecuadas y reproducidas por un robot. El código generado en este módulo se adecua para ser plenamente compatible con el robot particular que se tenga.
8. *Módulo de balanceo de línea*. Responsable de balancear la línea de producción para un producto en particular. El objetivo fundamental de este módulo es igualar los tiempos de trabajo en todas las estaciones del proceso de ensamble, así como calcular la eficiencia de la línea y otros parámetros tales como rendimiento del turno, total de personas en la línea de ensamble, costo, productividad, etc.

Los ocho módulos fueron desarrollados e integrados dentro de un programa de MFC (Microsoft Foundation Class), dentro de Visual Studio 2010. MFC permite crear una interfaz de usuario en un ambiente Windows basado en la orientación de objetos. También permite crear un sistema virtual flexible donde existen controles para cargar nuevos objetos, encender o apagar el dispositivo háptico, activar opciones de análisis, orientar vistas de la cámara y modificar parámetros de simulación entre otras funciones. La Figura 2.2 muestra la interfaz gráfica de usuario (GUI) de la plataforma HAMS.

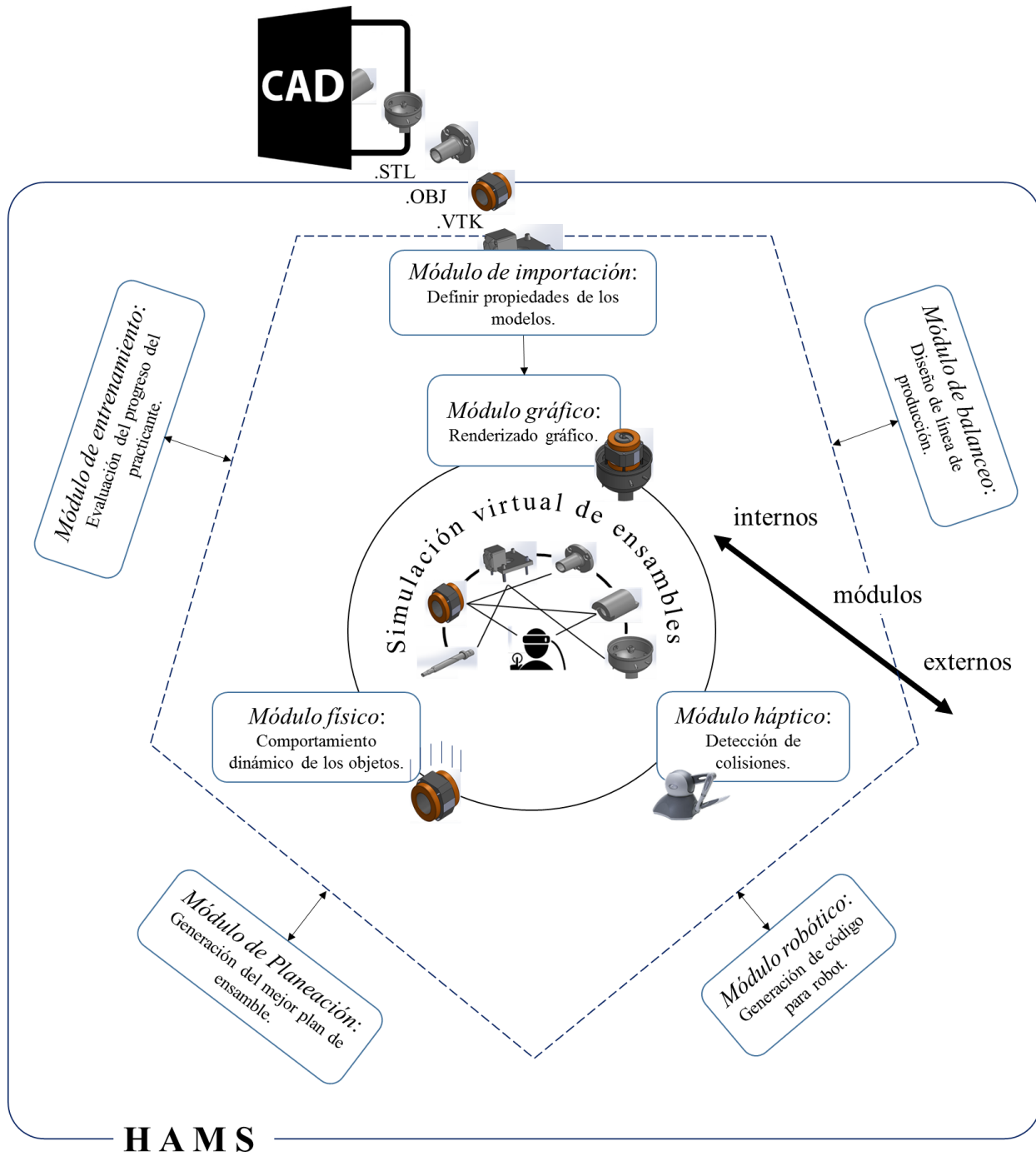
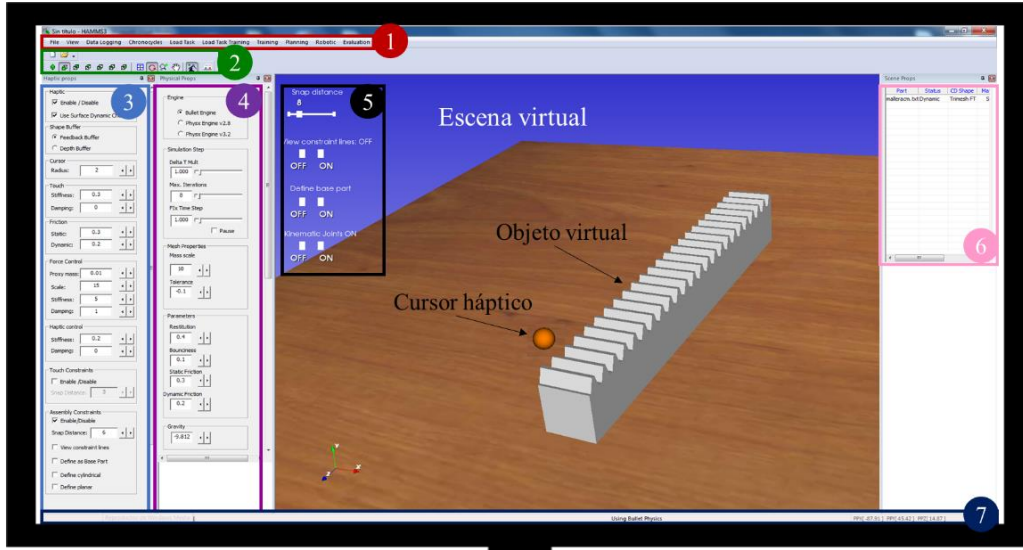


Figura 2.1. Arquitectura del sistema HAMS.



Sistemas hápticos



Lentes para visualización 3D

- 1 Menú principal
- 2 Manipulación de escena virtual
- 3 Panel de propiedades hápticas
- 4 Panel de propiedades físicas
- 5 Widgets
- 6 Panel de propiedades de la escena
- 7 Panel de información

Figura 2.2. Interfaz del sistema HAMS.

2.2 Creación de modelos

El sistema HAMS permite la importación de modelos CAD correspondientes a los objetos virtuales de la tarea de ensamble. Los archivos CAD deben ser cargados en los siguientes formatos: *.stl, *.obj, o *.vtk. Para reducir el costo computacional y mejorar el desempeño del ensamble virtual dentro del sistema, es importante simplificar las piezas que presenten un alto grado de complejidad, sin afectar su esencia. La Figura 2.3a muestra un perno roscado en sus extremos que al convertirlo en formato stl para cargarla dentro de HAMS, la malla generada contiene 19420 triángulos. Si se omite el roscado de la pieza, ya que no representa un cambio en el modelo que afecte su esencia, se observa que el número de triángulos se reduce considerablemente a 594, Figura 2.3b.

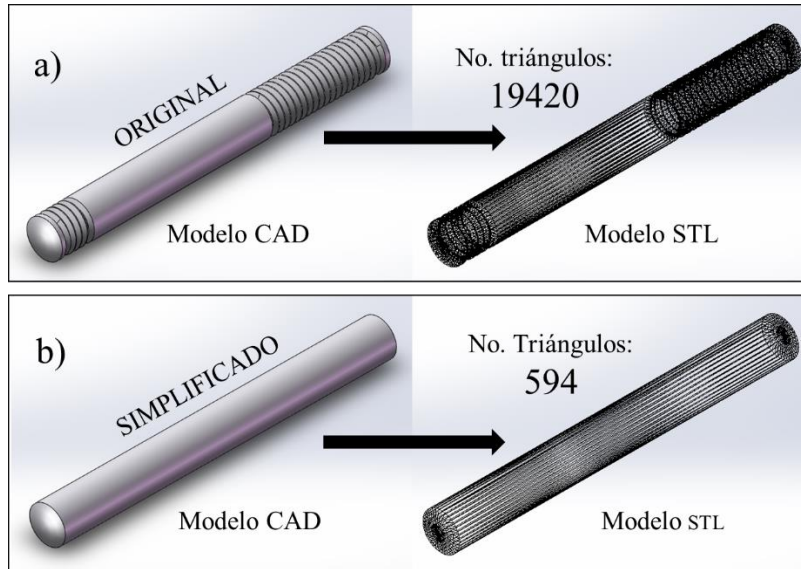


Figura 2.3. Simplificación de piezas virtuales.

Al importar un modelo CAD en el sistema HAMS, se crean tres representaciones del mismo objeto en tiempo real: háptica, física y gráfica, Figura 2.4:

- *Representación gráfica.* Encargada de mostrar al usuario el modelo como un objeto virtual en la pantalla. Su precisión depende de la resolución de la malla triangular al momento de generar el archivo STL.
- *Representación física.* Responsable de habilitar el comportamiento real y detección de colisiones entre los objetos virtuales. Su representación es invisible al usuario e independiente de la representación gráfica, es decir, puede ser completamente diferente; por ejemplo, si la representación gráfica es una cremallera, la representación física puede ser un rectángulo. Sin embargo, para el análisis de ensambles virtuales el modelo físico debe ser lo más fiel al modelo original, con el propósito de que el ensamble virtual sea comparable con el real.
- *Representación háptica.* Permite que los objetos virtuales puedan ser tocados y manipulados mediante el dispositivo háptico. El sentido del tacto se habilita mediante la detección de colisiones entre la representación háptica y el cursor háptico. El modelo háptico se crea con base al modelo gráfico, siendo invisible para el usuario.

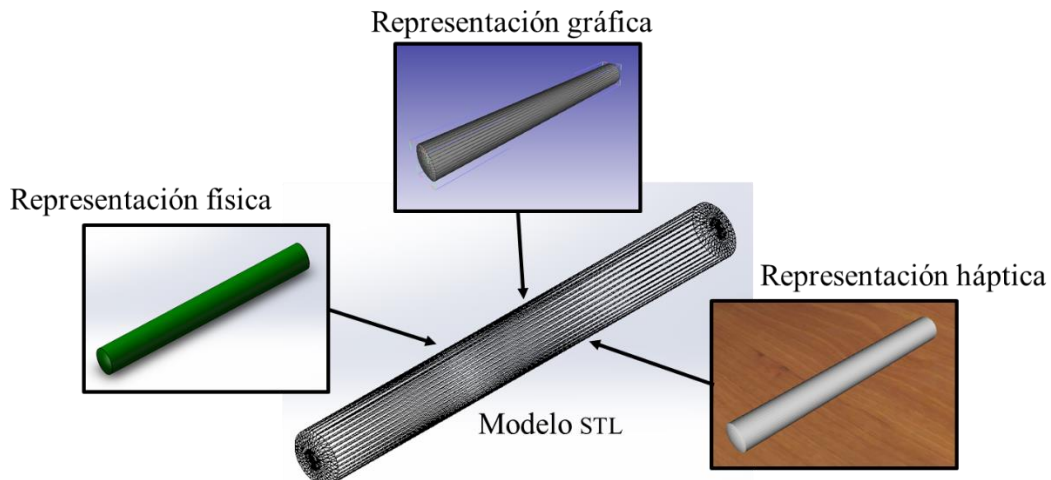


Figura 2.4. Representación del objeto virtual para los módulos físico, gráfico y háptico.

La simulación del ensamble virtual se puede llevar a cabo una vez que las tres representaciones han sido creadas. Posteriormente el usuario puede sentir y manipular los objetos virtuales por medio del dispositivo háptico y así realizar la simulación del ensamble virtual, esta fase es llamada “fase de interacción”.

Los modelos virtuales involucrados en la tarea de ensamble pueden ser cargados en el sistema HAMS de manera individual o grupal. Durante este proceso de importación se pueden definir otras variables o parámetros del modelo tales como: tipo de material y tipo de representación física. El tipo de material puede ser acero, plomo, madera o plástico, lo cual afecta la densidad y peso del objeto y modifica la percepción del peso y el comportamiento dinámico de los objetos virtuales.

2.3 Manipulación háptica y fuerza de retroalimentación

Durante la simulación virtual, la posición de los objetos es actualizada en pequeños intervalos de tiempo con el propósito de que el usuario perciba el comportamiento dinámico de los objetos virtuales. Por lo tanto, los tres módulos (gráfico, físico y háptico) deben ser actualizados y sincronizados en cada intervalo de tiempo. Cada módulo debe cumplir con una rapidez de actualización basada en los requerimientos de la percepción humana:

- *Módulo háptico.* Requiere una actualización de 1 kHz para lograr una precepción táctil adecuada para el ser humano.
- *Módulo gráfico.* Requiere una actualización de 60 Hz para que los movimientos del objeto virtual sean continuos para el usuario.
- *Módulo físico.* Requiere una actualización de 100 Hz para que los movimientos del objeto virtual sean realistas.

En la escena virtual el usuario es capaz de explorar táctilmente los objetos virtuales mediante el sistema háptico, así como sentir su peso, inercia y colisiones entre objetos dentro del ambiente virtual. Debido a que el cálculo de la posición y orientación de los objetos virtuales se basa en las fuerzas que actúan sobre él, la simulación física es la primera en actualizarse para determinar las nuevas posiciones de los objetos virtuales. Estos resultados son leídos por los dos módulos restantes (gráfico y háptico) para actualizar sus representaciones del objeto virtual.

Una vez que el usuario ejecuta y carga una tarea de ensamble dentro del ambiente virtual, puede interactuar de forma libre con el ambiente virtual de tres maneras, Figura 2.5:

1. *Escena virtual.* El usuario mueve el cursor háptico dentro del ambiente virtual, con el fin de reconocer la escena virtual o posicionar el cursor sobre un objeto.
2. *Reconocimiento táctil.* El usuario reconoce las piezas virtuales utilizando el dispositivo háptico. Por medio de la fuerza de retroalimentación, el usuario puede sentir y explorar la forma del objeto virtual.
3. *Manipulación.* El usuario selecciona un objeto y lo manipula utilizando el dispositivo háptico.

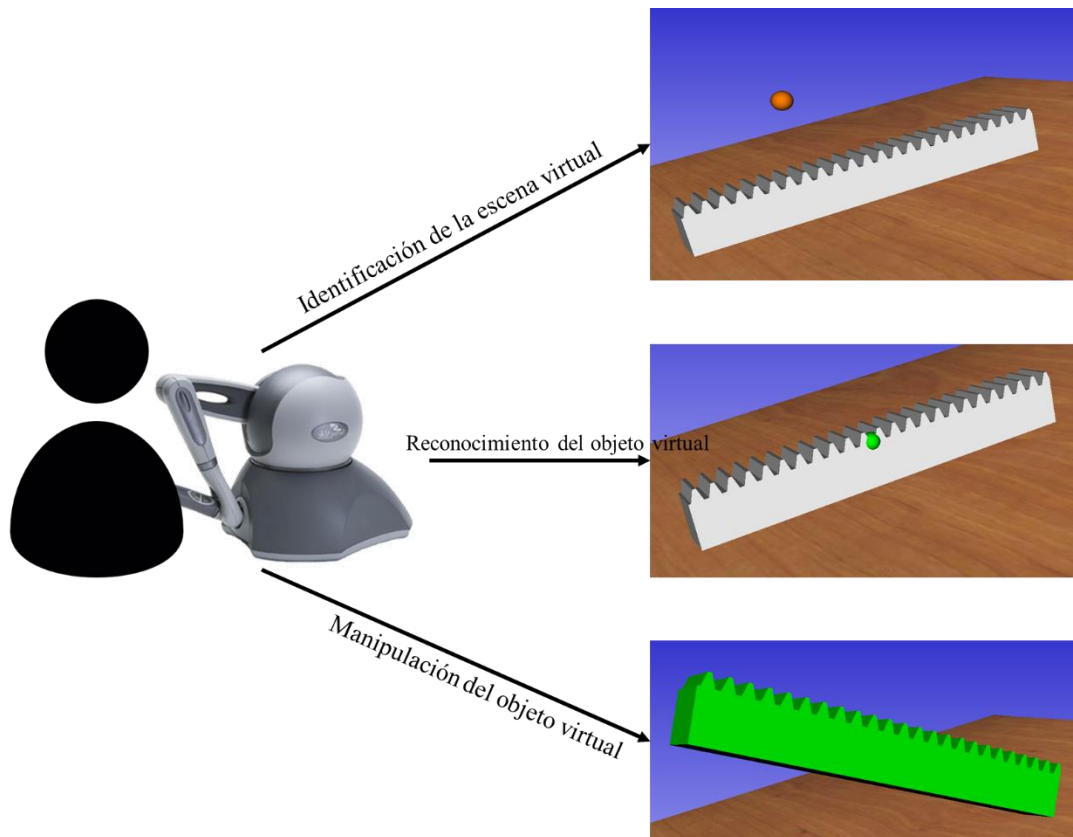


Figura 2.5. Etapas principales de interacción del objeto virtual y el usuario.

La manipulación de un objeto ocurre cuando el usuario toca una pieza y presiona el botón principal del dispositivo háptico, en este momento inicia la etapa de manipulación. En esta etapa el cursor háptico es acoplado de manera directa a la representación háptica, que a su vez es acoplada a la representación física por medio de un sistema masa-resorte-amortiguador (MRA). Al moverse el dispositivo háptico, el sistema MRA crea una fuerza, la cual se aplica al modelo físico para producir el movimiento. Finalmente, la posición y orientación del modelo gráfico es actualizado de acuerdo al modelo físico utilizando una matriz de transformación, Figura 2.6. Durante esta etapa, se calcula la fuerza de retroalimentación háptica, permitiendo sentir el peso, inercia y colisión del objeto virtual manipulado. El modelo MRA es ampliamente utilizado en el desarrollo de ensambles virtuales asistidos por dispositivos hápticos debido a que los resultados son buenos y su programación es de baja complejidad.

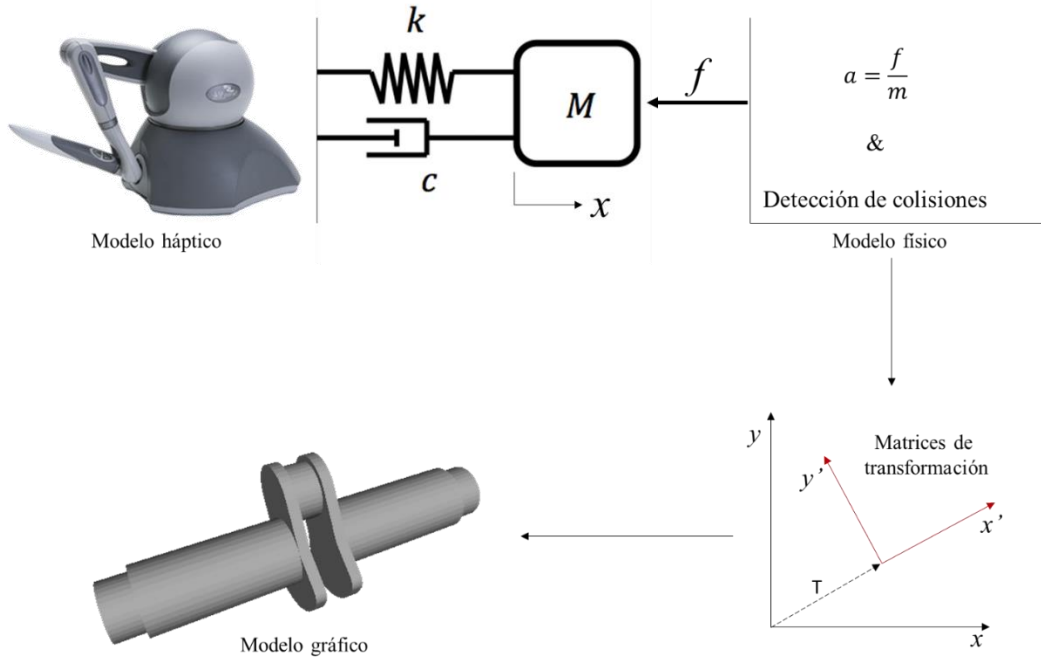


Figura 2.6. Manipulación del objeto virtual.

Además de las funciones para cargar modelos y llevar a cabo la manipulación e interacción de los objetos virtuales, el cálculo de la masa y la rotación de los objetos virtuales permite incrementar el realismo y la flexibilidad en el desempeño de las tareas de ensamble. En el sistema HAMS estos cálculos se realizan de la siguiente manera:

- *Cálculo de la masa del objeto virtual.* Las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los objetos virtuales se integra a partir de la aceleración, a , la cual se calcula con base a la fuerza neta ejercida sobre el objeto, F , y a su masa, m , por medio de la segunda Ley de Newton, $F = m \cdot a$. De esta manera los objetos sin masa carecen de movimiento. Al cargar un modelo dentro del sistema HAMS, el usuario define su material, cuya densidad está predefinida dentro del programa. Cuatro materiales se han considerado en HAMS debido a la diferencia de densidad que existe entre ellos: acero, aluminio, plomo y plástico, con una densidad de 7850, 2700, 11340 y 900 kg/m^3 respectivamente. Cabe mencionar que es posible programar tantos materiales como sea necesario. El cálculo de la masa (m) se obtiene una vez que se ha seleccionado la densidad del material (ρ) y se ha obtenido su volumen (V), mediante la siguiente ecuación:

$$m = \rho \cdot V \tag{2.1}$$

Dado que el dispositivo háptico Phantom Omni está limitado a una fuerza máxima de 3.3 N y una fuerza continua máxima de 0.88 N, el utilizar una fuerza mayor a esta pone en riesgo la integridad del equipo. Por esta razón los valores de densidad se escalan de tal manera que la masa de los objetos virtuales quede dentro del rango de fuerzas permitido por el dispositivo háptico.

- *Rotación del modelo virtual.* La rotación de los objetos virtuales dentro del sistema HAMS pueden ser de dos tipos, Figura 2.7: 1) rotación respecto al centro geométrico, independientemente del punto donde fue seleccionado para su manipulación, y 2) rotación respecto al punto seleccionado por el usuario para su manipulación. Esta segunda opción presenta un mejor realismo de manipulación sin embargo la detección de colisiones se ve afectada. La

selección del tipo de rotación de los objetos virtuales puede ser elegido por el usuario en tiempo real.

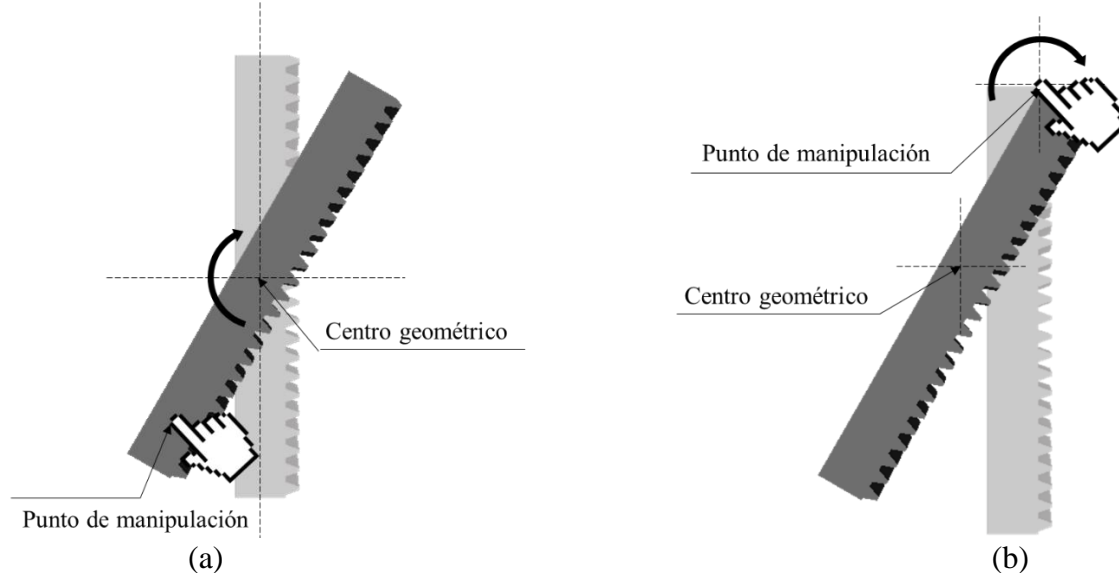


Figura 2.7. Rotación del objeto virtual: a) respecto al centro geométrico, b) respecto al punto seleccionado por el usuario.

2.4 Características adicionales del sistema HAMS

Dentro del sistema HAMS se han integrado funciones adicionales que permiten una simulación con mayor libertad, realismo, y control de los parámetros de simulación durante la ejecución en tiempo real. Tales funciones se describen a continuación.

2.4.1. Funciones del dispositivo háptico

El sistema HAMS permite la manipulación de los objetos mediante uno o dos dispositivos hápticos, haciendo posible el ensamble virtual con ambas manos. La habilitación de ambos dispositivos hápticos es de manera automática dentro del sistema, es decir, HAMS detecta el número de dispositivos hápticos que se usarán dentro de la simulación. De no detectar ningún dispositivo conectado se envía un mensaje de advertencia. Otra función del dispositivo háptico es que puede ser utilizado como un mouse convencional al salir del espacio de trabajo, permitiendo acceder a cualquier menú o botón que esté fuera de este.

2.4.2. Visualización de las trayectorias de ensamble

Durante el proceso de simulación de ensambles se genera y registra información fundamental para posteriormente analizar, evaluar y optimizar el proceso de ensamble. La información más relevante de este proceso está implícita en los movimientos realizados por el usuario dentro del ambiente virtual, por lo que el usuario no percibe este proceso de registro. En HAMS es posible identificar y visualizar los movimientos realizados por el usuario durante una tarea de ensamble virtual, Figura 2.8:

- *Wandering.* Fase de identificación de la escena virtual, en la cual el usuario mueve el cursor háptico dentro del espacio virtual con el objetivo de reconocer la escena o posicionar el cursor sobre un objeto virtual.
- *Touching.* Fase de reconocimiento del objeto virtual, en esta fase el cursor háptico está en contacto con la pieza virtual, de este modo el usuario logra reconocer el objeto a través del sentido del tacto.

- *Controlling*. Fase de manipulación, en la cual el usuario selecciona y manipula un objeto virtual para llevarlo a su posición final y así construir el ensamble virtual.

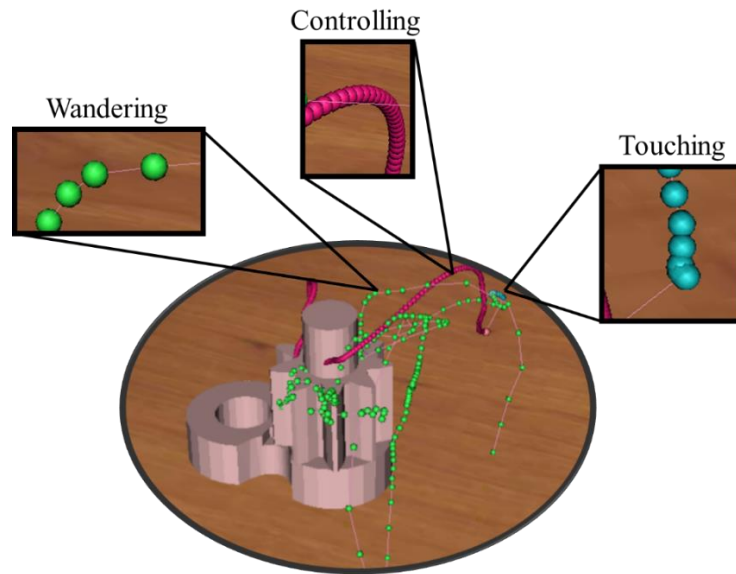


Figura 2.8. Visualización de la trayectoria del ensamble virtual (movimientos del usuario).

Los movimientos de *wandering*, *touching* y *controlling* son almacenados en cada ciclo de simulación dentro de un archivo de texto. El ciclo de simulación se ejecuta de manera continua durante el funcionamiento del programa y puede ser fijo o variable. El ciclo de simulación fijo se encuentra en un rango de 1/300s a 1/60s y el ciclo de simulación variable está en función del procesador. De esta manera, los datos son almacenados y se hace posible leer el archivo y representarlos de manera gráfica en la misma escena virtual mediante crono-ciclos, Figura 2.8. Los crono-ciclos muestran la trayectoria del ensamble virtual, mostrando de manera gráfica los movimientos del usuario durante el ensamble, también son una manera intuitiva de observar y analizar la información del proceso del ensamble virtual. Para representar los movimientos del usuario dentro del ambiente virtual, los crono-ciclos utilizan esferas de diferente color, representando de manera independiente cada una de las fases de *wandering*, *touching* y *controlling*, Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Representación gráfica de los movimientos del usuario.

| Representación gráfica | Interpretación |
|---------------------------------|---|
| ● Wandering | Fase de identificación de la escena virtual |
| ● Touching | Fase de reconocimiento del objeto virtual |
| ● Controlling | Fase de manipulación del objeto virtual |
| ● ● Espaciamiento entre esferas | Velocidad del movimiento de la pieza manipulada |

También es posible guardar los tiempos de simulación referentes a los tres módulos (físico, háptico y gráfico). Así como guardar la fuerza y el torque ejercidos por el dispositivo háptico durante el ensamble.

2.4.3. Ajuste de parámetros de simulación en tiempo de ejecución

Con el propósito de analizar y evaluar los parámetros de simulación presentes en el proceso de ensamble, se han parametrizado las variables principales de los módulos físico y háptico. Mediante

paneles el usuario es capaz de manipular y ajustar los valores de estas variables en tiempo de ejecución del programa. HAMS cuenta con un panel de propiedades hápticas y un panel de propiedades físicas, Figura 2.9. En el panel de propiedades hápticas es posible activar y desactivar el dispositivo háptico, ajustar el tamaño del cursor, modificar propiedades tales como la rigidez, el amortiguamiento y la fricción que el usuario experimenta al tocar un objeto virtual. La fuerza de retroalimentación también es una variable que puede ser modificada en este panel. Dentro del panel de propiedades físicas, se puede seleccionar el tipo de simulador físico durante la ejecución del ensamble. La masa, gravedad y fricción son variables que pueden ser reguladas en este panel. Finalmente también es posible modificar el paso o intervalo de tiempo que el simulador físico utiliza para actualizar las posiciones en cada ciclo de simulación. Ambos paneles se ocultan automáticamente una vez que el cursor del mouse ha salido de éstos, permitiendo una escena virtual amplia para que el usuario no sea perturbado y pueda lograr una mejor concentración durante el proceso del ensamble virtual.

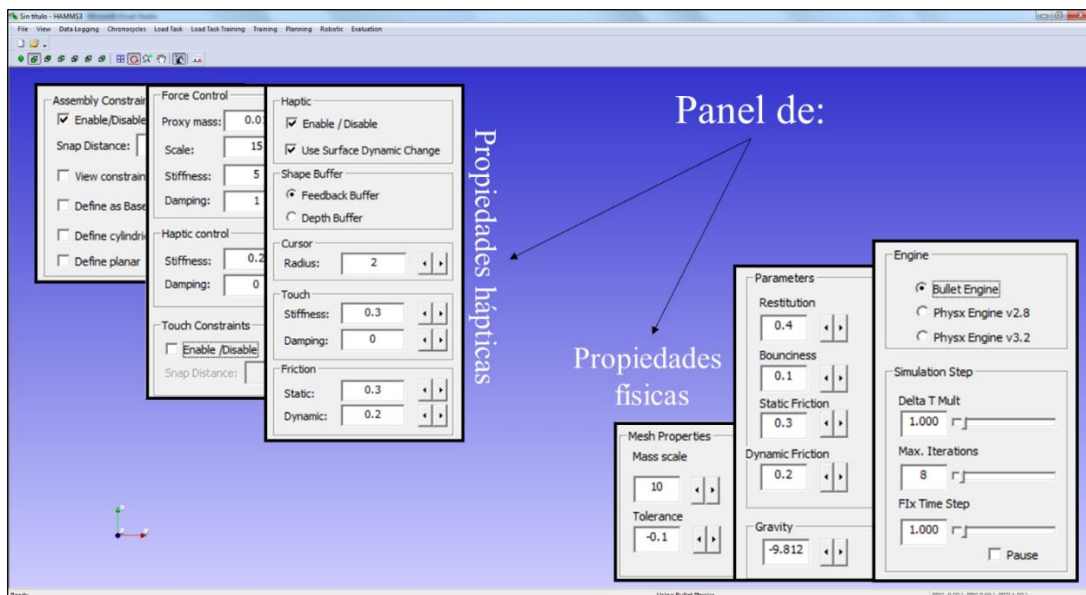


Figura 2.9. Panel de propiedades hápticas y físicas.

2.5 Metodologías de ensamble virtual

En la literatura se reconocen dos metodologías para realizar el ensamble virtual de una manera libre y natural: modelado basado en la física (PBM, por sus siglas en inglés) y modelado basado en restricciones (CBM, por sus siglas en inglés). Estas metodologías permiten a los objetos virtuales interactuar entre sí, permitiendo al usuario sentir los contactos y detectar las colisiones a través del dispositivo háptico. Todo esto con la finalidad de realizar el ensamble virtual con la misma libertad con que se hace en el mundo real. El sistema HAMS incluye ambas metodologías, e incluso se puede realizar el ensamble de una manera híbrida considerando el uso simultáneo de las dos metodologías, lo que permite aprovechar las ventajas de cada uno y minimizar sus inconvenientes.

2.5.1. Modelado basado en la física

Bajo este concepto y con el propósito de que los objetos virtuales tengan un comportamiento libre y dinámico al momento de ser manipulados por el usuario, las piezas del ensamble virtual están sometidas a las propiedades físicas reales y experimentan efectos tales como: gravedad, fricción, restricciones y fuerzas de contacto. La detección de colisiones previene el traslape de los objetos virtuales y obedece a la Mecánica Newtoniana. Ésta es la principal característica que permite

experimentar el ensamble virtual como un proceso real. HAMS cuenta con tres simuladores físicos: “Bullet physics v2.81, PhysX SDK v2.8 y PhysX SDK v.3.1”, que pueden ser ejecutados durante el ensamble virtual de acuerdo a las necesidades del usuario. Los simuladores físicos presentan tres elementos principales que se describen a continuación, Figura 2.10:

- *Escena virtual.* Es el espacio virtual donde se lleva a cabo el proceso del ensamble. En HAMS las dimensiones de la escena virtual se definen al momento de cargar un objeto, es decir, se extraen las dimensiones del objeto virtual y su dimensión mayor es duplicada para establecer los lados del cubo de la escena virtual. Dentro de la escena virtual el efecto de la gravedad es 9.81 m/s^2
- *Ciclo de simulación.* Se refiere al intervalo de tiempo que le toma al simulador físico actualizar la posición y orientación del modelo virtual. Para aplicaciones de ensambles virtuales, el intervalo de tiempo puede ir de $1/300$ a $1/60$ s con el propósito de que el usuario perciba el comportamiento dinámico de los objetos virtuales.
- *Representación física.* Se encarga de proporcionar el comportamiento dinámico a los objetos virtuales, la representación física es independiente de la representación gráfica, sin embargo, para aplicaciones de ensambles se requiere que la representación física sea fiel a la representación gráfica con el propósito de aumentar el realismo y la detección de colisiones. Para otras aplicaciones donde la detección de colisiones pasa a segundo término, la representación física carece de importancia.

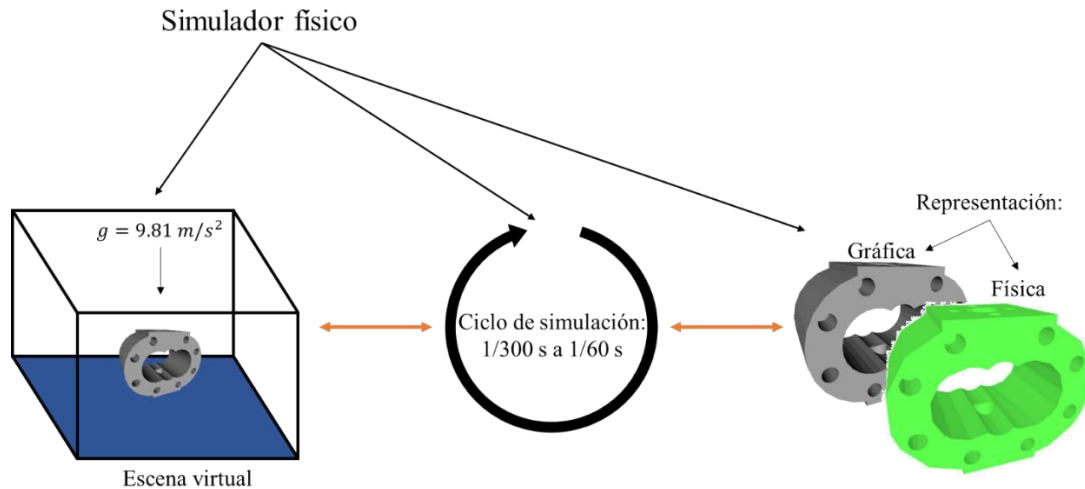


Figura 2.10. Características principales de un simulador físico.

2.5.2. Modelado basado en restricciones

Esta técnica utiliza restricciones geométricas previamente definidas, reduciendo los grados de libertad del objeto virtual al momento de ser ensamblado, es decir, la pieza a ensamblar se alinea automáticamente en su posición y orientación final, restringiendo su movimiento sólo en la dirección del ensamble. Las restricciones de ensamble pueden ser: concéntrico, paralelo, perpendicular, angular, etc. La Figura 2.11 ilustra el ensamble basado en restricciones, en donde las restricciones de concentricidad de cada pieza son detectadas automáticamente. Cada pieza a ensamblar se manipula de manera libre hasta acercarse a la pieza base, y al estar lo suficientemente cerca la pieza a ensamblar automáticamente se alinea y se restringe su movimiento, permitiendo sólo su traslación en la dirección de la restricción.

CAPÍTULO 3: ENTRENAMIENTO VIRTUAL DE PROCESOS DE ENSAMBLE

En este capítulo se presenta el desarrollo del módulo de entrenamiento virtual de ensamblajes, el cual fue desarrollado con el objetivo de investigar, analizar y evaluar la influencia e impacto del entrenamiento virtual de ensamblajes en el desempeño de tareas reales de ensamblaje. De este modo se determina qué tan efectivo es el entrenamiento virtual de ensamblajes en la transferencia de conocimientos y habilidades al usuario.

3.1 Módulo de entrenamiento de ensamblajes virtuales

El módulo de entrenamiento de ensamblajes fue diseñado para proporcionar capacitación y/o entrenamiento virtual en tareas de ensamblaje mecánico. En éste módulo se han considerado tres modos de entrenamiento:

1. *Virtual-háptico*. Permite llevar a cabo el entrenamiento virtual de ensamblajes con un comportamiento dinámico de los objetos virtuales, así como proporcionar al participante el sentido del tacto y cinestésico por medio del dispositivo háptico.
2. *Virtual*. Permite llevar a cabo el entrenamiento virtual de ensamblajes con un comportamiento dinámico de los objetos virtuales, pero sin retroalimentación háptica, es decir, no se proporciona al participante el sentido de tacto y cinestésico.
3. *Visual*. El entrenamiento es proporcionado por medio de un video que reproduce el ensamblaje completo realizado por un experto. Este tipo de entrenamiento se considerado el entrenamiento tradicional.

La Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo del módulo de entrenamiento del sistema HAMS.

Para un mejor control y administración de las sesiones de entrenamiento realizadas por cada participante (aplicable sólo a los modos de entrenamiento *Virtual-háptico* y *Virtual*), el acceso al módulo de entrenamiento es a través de una cuenta de usuario que cada participante debe crear en su primera sesión. Los pasos a seguir para realizar la primera sesión del entrenamiento virtual se muestran a continuación:

1. *Supervisor (Supervisor)*. El participante registra el nombre del supervisor. Es importante hacer mención que el módulo de entrenamiento puede ser usado por varios supervisores a la vez.
2. *Trainee (Participante)*. El participante registra su nombre completo con el objetivo de identificar perfectamente el archivo generado.
3. *User name (nombre de usuario)*. El participante registra un nombre de usuario o clave, con la cual se accede a las sesiones siguientes de entrenamiento.

Los pasos arriba mencionados sólo se llevan a cabo durante la primera sesión de entrenamiento, posteriormente el participante tendrá acceso al módulo de entrenamiento introduciendo únicamente su nombre de usuario.

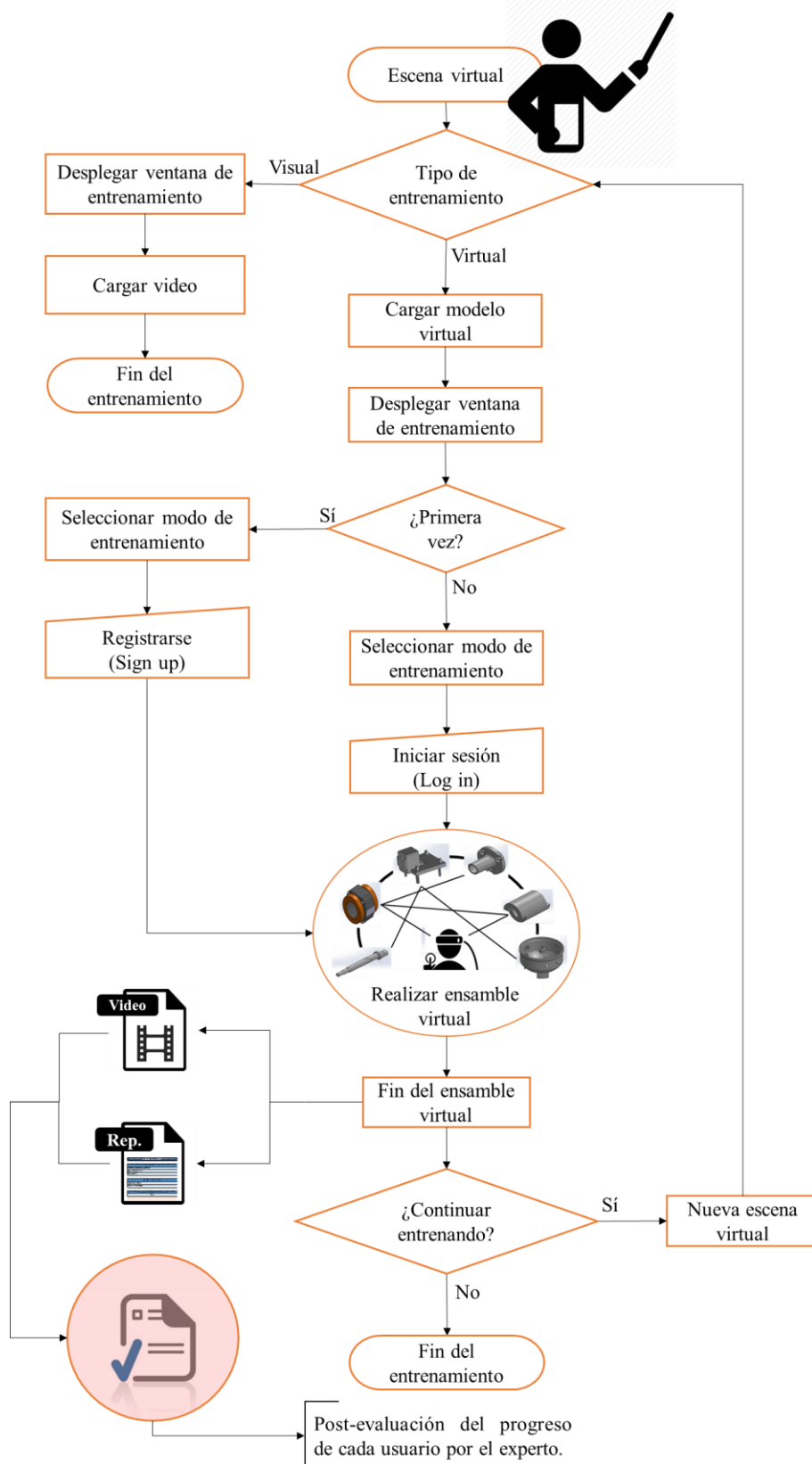


Figura 3.1. Diagrama de flujo del módulo de entrenamiento.

3.2 Registro y evaluación del proceso de ensamble

Durante la primera sesión de entrenamiento se crea un archivo de manera automática llamado *nombredeusuario.csv*, este archivo se divide en tres secciones principales que contienen la siguiente información, Figura 3.2:

Sección 1. La primera sección, llamada *SUPERVISED AND PERFORMED BY* (Supervisado y realizado por), contiene la siguiente información:

- *Supervisor (Supervisor)*. Nombre del supervisor encargado del entrenamiento.
- *Trainee (Participante)*. Nombre del participante.

Sección 2. La segunda sección, llamada *MODEL INFORMATION* (Información del modelo), contiene la siguiente información:

- *Assembly name (Nombre del ensamble)*. Registra de manera automática el nombre de la tarea que se va a realizar.

Sección 3.- La tercera sección, llamada *TRAINING INFORMATION* (Información del entrenamiento), es la sección más importante debido a que contiene información relevante del ensamble realizado por el participante. Esta información permite al supervisor llevar a cabo un análisis del progreso de cada participante. La información es generada automáticamente una vez que el usuario termina el ensamble virtual. Esta información se almacena en un archivo que consta de cinco criterios que se definen a continuación:

- *Training mode (Modo de entrenamiento)*. Registro automático el modo de entrenamiento – *Virtual-háptico* o *virtual*.
- *Date (Fecha)*. Registro automático de la fecha en que se realizó el entrenamiento virtual del ensamble, en un formato día/mes/año.
- *Time (Tiempo)*. Registro automático de la hora en que se realizó el entrenamiento virtual del ensamble, en un formato *hora:minuto:segundo*.
- *Task completion time (Tiempo completo de la tarea)*. Registra el tiempo para completar la tarea de ensamble virtual; es decir, el tiempo desde que se toma la primera pieza hasta soltar la última pieza involucrada en el ensamble virtual.
- *Training progress vs expert (Progreso del usuario vs el experto)*. Registra el progreso del usuario, el cual se define como la razón del tiempo que le toma a un experto completar el ensamble virtual entre el tiempo que le ha tomado al usuario realizar la misma tarea de ensamble:

$$\text{Progreso del usuario} = \frac{\text{tiempo experto}}{\text{tiempo usuario}} \quad (3.1)$$

Es importante mencionar que la información de cada usuario se va actualizando cada vez que el usuario inicia sesión y realiza una tarea de entrenamiento. La Figura 3.2 muestra el archivo *nombredeusuario.csv* que se genera durante la primera sesión de entrenamiento. En sesiones posteriores del participante, se agrega de manera automática a este mismo archivo una sección nueva de *TRAINING INFORMATION*, con información actualizada del entrenamiento. De esta manera el registro de la información del entrenamiento permite al supervisor evaluar el progreso del participante.

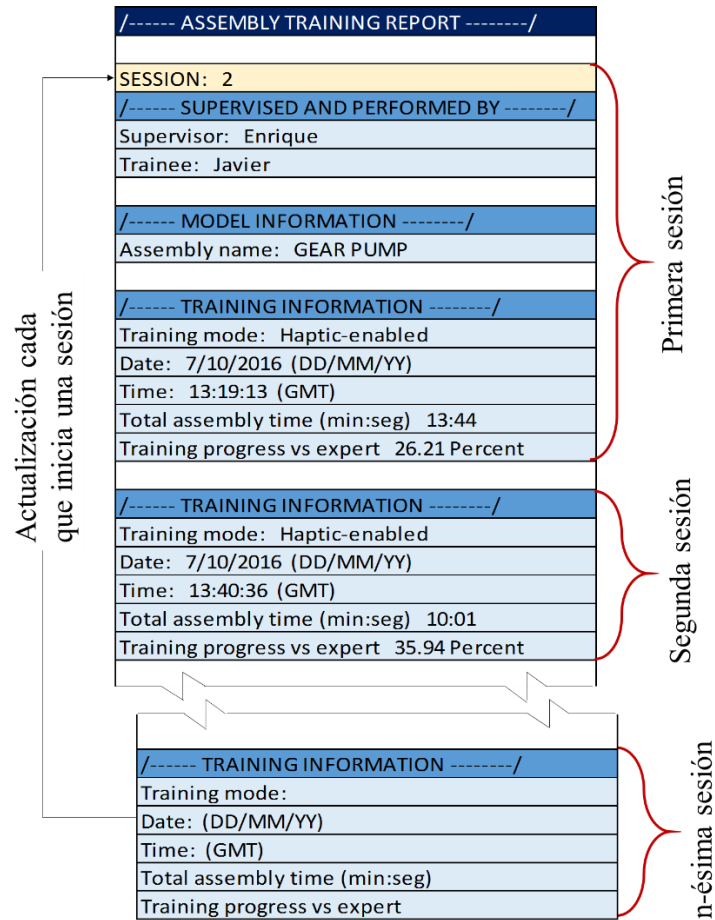


Figura 3.2. Reporte del entrenamiento virtual de ensamble.

Por cada ensamble realizado por el usuario también se genera automáticamente un video de la tarea virtual de ensamble realizada, y se registra como un archivo de video llamado *nombredeusuario_númerodesesión.wmv*. Este video permite al supervisor monitorear y tener una visión más amplia del progreso o estancamiento del participante, y así poder dar al usuario una retroalimentación más efectiva sin necesidad de estar presente durante la sesión de entrenamiento.

La interfaz del módulo de entrenamiento de ensamble se muestra en la Figura 3.3.

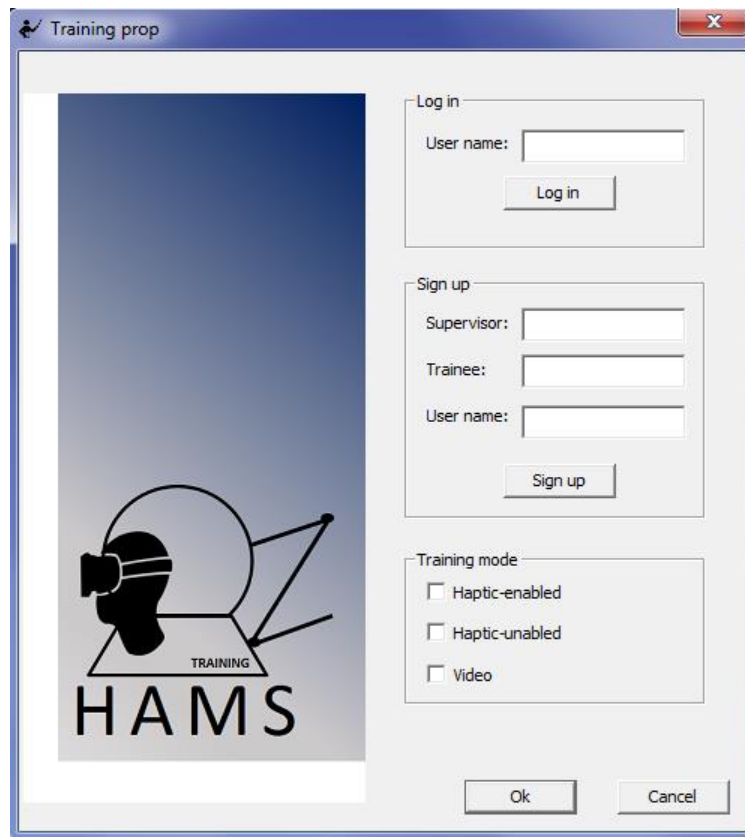


Figura 3.3. Interfaz del módulo de entrenamiento.

CAPÍTULO 4: PLANEACIÓN VIRTUAL DE PROCESOS DE ENSAMBLE Y FABRICACIÓN

En este capítulo se presenta el desarrollo de un nuevo método de generación automática de planes de ensamble a partir de la información obtenida del proceso de ensamble virtual-háptico realizado por el usuario en el sistema HAMS. El método se basa en el registro, análisis e identificación de los movimientos y operaciones de ensamble, tales como secuencias, tiempos, posiciones, distancias, etc. Con esta información el sistema es capaz de generar el plan de ensamble requerido para el proceso real de ensamble.

4.1. Módulo de planeación virtual de ensamblajes

El módulo de planeación virtual de ensamblajes desarrollado en la plataforma HAMS, permite analizar el diseño y configuración de productos y su influencia en el desempeño del proceso de ensamble. El objetivo de este módulo es evaluar el diseño para ensamblajes, así reducir el tiempo de desarrollo y manufactura de nuevos productos, aprovechando las características intuitivas que brindan los sistemas de realidad virtual asistidos por sistemas hápticos. La Figura 4.1 muestra el diagrama de flujo del módulo de planeación desarrollado. A diferencia del módulo de entrenamiento, el módulo de planeación es de acceso directo para el personal, es decir, no es necesario introducir una contraseña ya que está enfocado al personal especializado de diseño y manufactura. Dentro del módulo de planeación de ensamble se realizan dos de las tareas más importantes, la generación de planes de ensamble y la evaluación de éstos planes de ensamble.

4.1.1. Generación del plan de ensamble

Para la generación del plan de ensamble el sistema registra todos los movimientos realizados por el experto durante el proceso de ensamble virtual. La información de cada ensamble virtual realizado se registra automáticamente en tres archivos: un archivo tipo *.csv, el cual contiene el reporte técnico del ensamble; un archivo *.jpg con las instrucciones y secuencia del ensamble; y un archivo *.wmn con un video del ensamble virtual realizado, Figura 4.2. Una vez seleccionada la ubicación y nombre con que se guardará el reporte del ensamble, se guardan las instrucciones y el video del ensamble con el mismo nombre y en la misma ubicación, esto con el fin de identificar perfectamente a qué ensamble pertenecen los tres archivos. Estos archivos se complementan entre sí con el objetivo de obtener una información completa y detallada del ensamble virtual realizado. La Figura 4.3 muestra un reporte completo de un ensamble virtual, el cual comprende siete secciones:

Sección 1.- La primera sección, llamada JOB INFORMATION (Información del trabajo), contiene la siguiente información:

- *Name of assembly planner (Nombre del planeador).* Nombre del planeador que lleva a cabo el ensamble virtual.
- *Date (Fecha).* Fecha en que se realizó el entrenamiento del ensamble virtual, en formato día/mes/año.
- *Time (Tiempo).* Hora en que se realizó el entrenamiento del ensamble virtual, en formato hora:minuto:segundo.

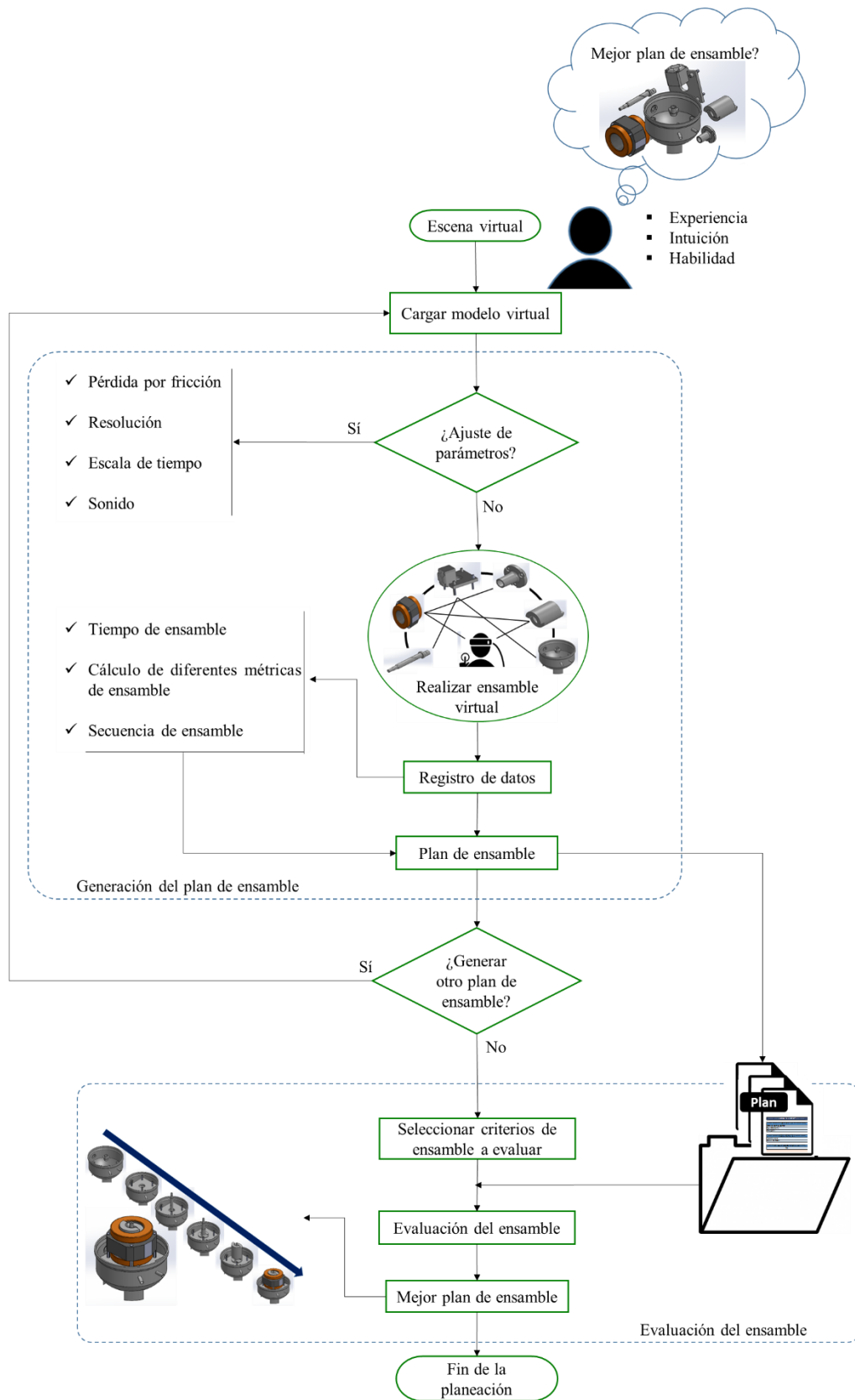


Figura 4.1. Diagrama de flujo del módulo de planeación.

Sección 2.- La segunda sección, llamada *MODEL INFORMATION* (Información del modelo), contiene la siguiente información:

- *Assembly name (Nombre del ensamble)*. Nombre de la tarea de ensamble a realizar.
- *Parts in the model (Partes del modelo)*. Número de piezas involucradas en el ensamble a realizar.

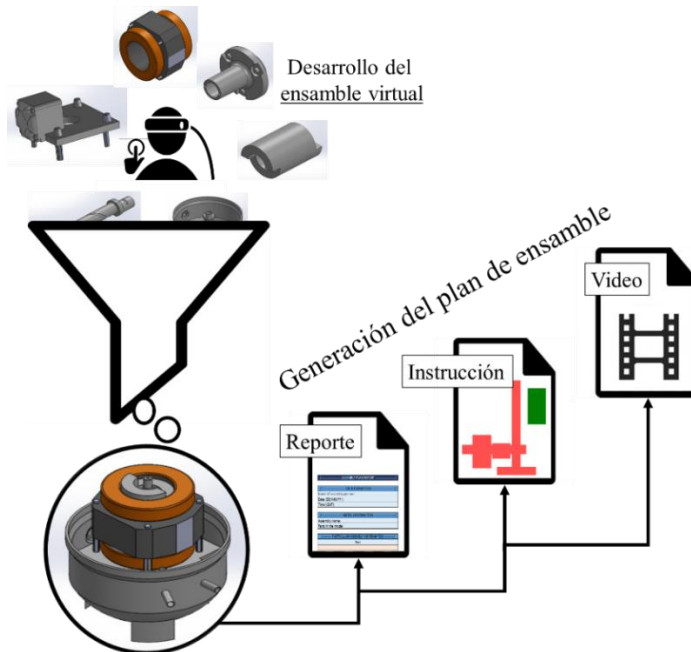


Figura 4.2. Generación automática del plan de ensamble para un producto.

Sección 3.- La tercera sección, llamada *PART ASSEMBLY INFORMATION* (Información de las piezas del ensamble), contiene información detallada de cada pieza manipulada durante el proceso de ensamble virtual. Esta información se genera de manera automática, y consta de 15 métricas de ensamble que se calculan para cada pieza involucrada durante el ensamble. También se genera automáticamente la secuencia de ensamble y la lista de partes involucradas en el proceso virtual de ensamble. La información que se registra por cada pieza es la siguiente:

- *Part (Parte)*. Número con el que se identifica la pieza dentro del sistema.
- *Name (Nombre)*. Nombre de la pieza tal y como aparece en el archivo *.stl.
- *Handling part (HP, Manipulación de la pieza)*. Número de veces que se manipuló la pieza durante el ensamble virtual.
- *Effective handling time (EHT, Tiempo efectivo de manipulación)*. Tiempo desde que se toma una pieza hasta que se suelta, si la pieza es manipulada más de una vez, los tiempos se acumulan.

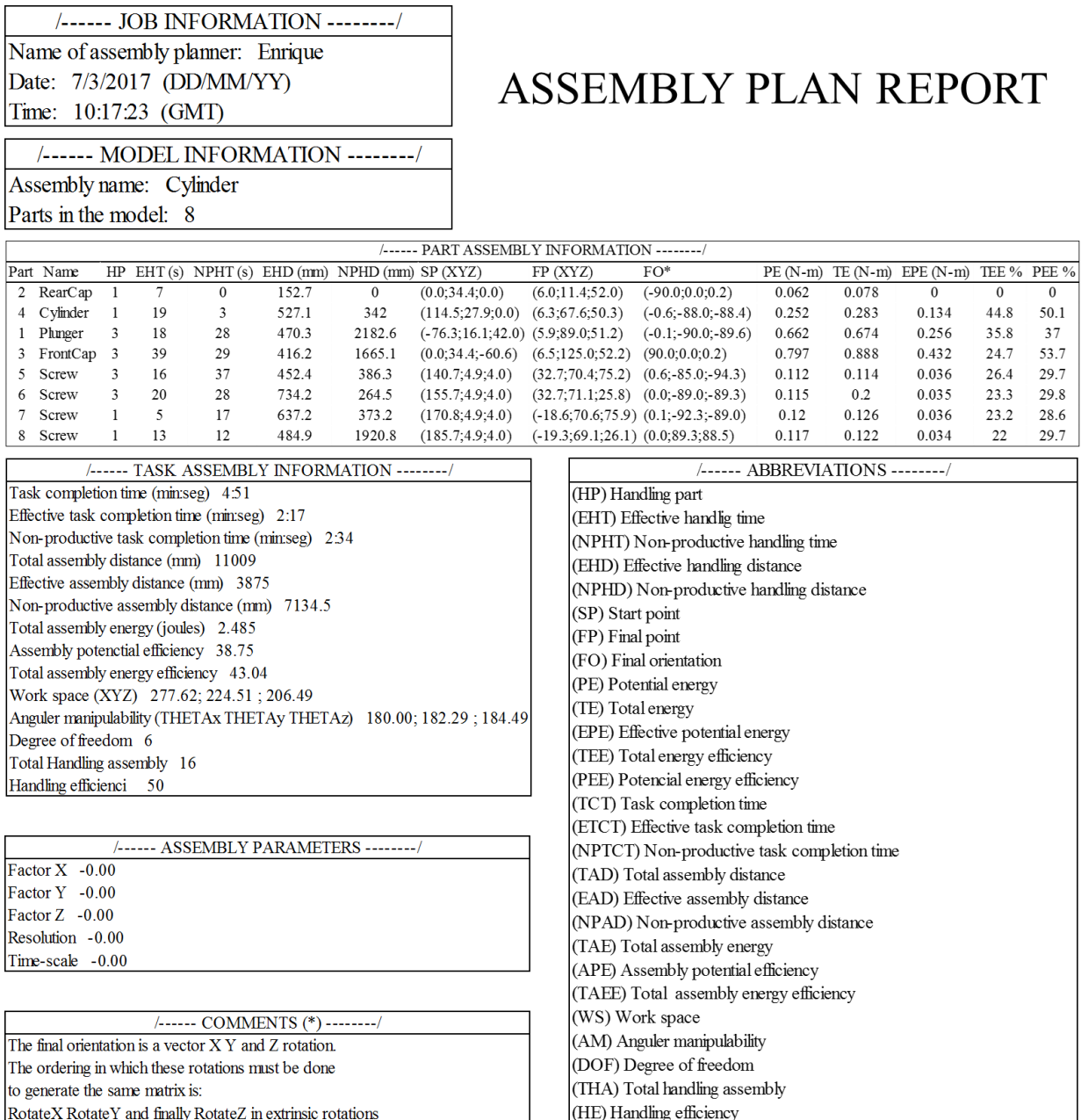


Figura 4.3. Reporte del plan de ensamble.

- *Non-productive assembly time (NPAT, Tiempo de ensamble no-productivo).* Tiempo desde que se suelta una pieza hasta que se toma otra, es decir, es el tiempo de traslado necesario para tomar la siguiente pieza. Este tiempo se le asigna a la pieza que se va a tomar.
- *Effective handling distance (EHD, Distancia efectiva de manipulación).* Distancia desde que se toma la pieza hasta que se suelta, esta distancia se acumula cuando se toma la pieza más de una vez.
- *Non-productive handling distance (NPHD, Distancia de manipulación no-productiva).* Distancia desde que se suelta una pieza hasta que se toma otra, corresponde a la distancia de traslado necesaria para tomar la siguiente pieza. Ésta distancia se le asigna a la pieza que se va a tomar.

La Figura 4.4 muestra los conceptos de EHD y NPAD, en donde se observa el proceso en que el usuario toma una pieza (paso 1) para manipularla y trasladarla una distancia EHD hasta su posición

final (paso 2). Posteriormente el usuario suelta la pieza (paso 3) para hacer el recorrido necesario (paso 4) hacia la siguiente pieza, NPAD, y tomarla (paso 5). Este proceso se realiza consecutivamente con todas las piezas hasta completar el ensamble total del producto.

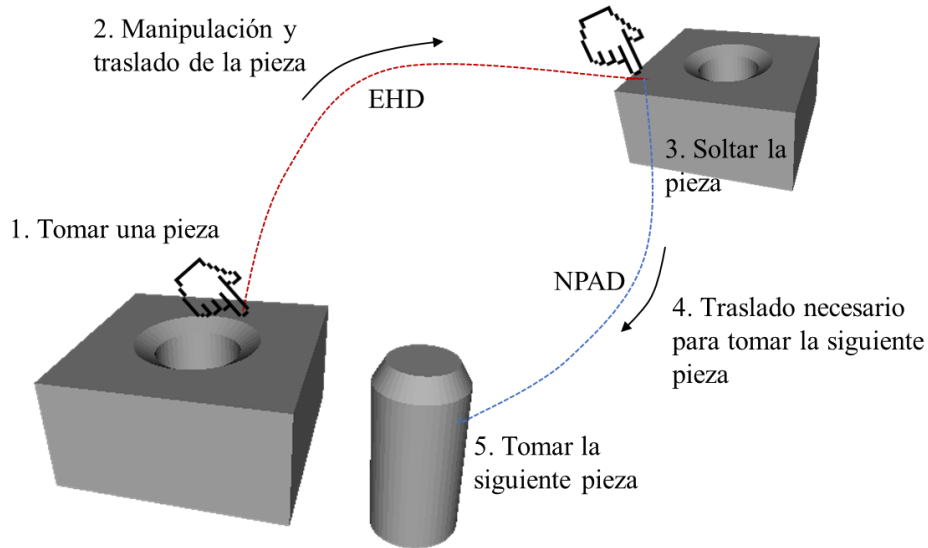


Figura 4.4. Conceptos de distancias involucradas en el ensamble virtual.

- *Start point (SP, Punto inicial)*. Coordenadas iniciales (x, y, z) de la pieza en la escena virtual.
- *Final point (FP, Punto final)*. Coordenadas finales (x, y, z) de la pieza en la escena virtual.
- *Final orientation (FO, Orientación final)*. Orientación final $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ de la pieza en la escena virtual. Es importante mencionar que la orientación final de la pieza se representa por un vector de rotación $[x, y, z]$. El orden en el cual estas rotaciones deben darse son: RotarX, RotarY y RotarZ en rotación extrínseca.

La Figura 4.5 muestra los conceptos de SP, FP y FO. La orientación inicial de las piezas virtuales no se considera, ya que todas las piezas se cargan con una orientación inicial de $\theta_x = 0$, $\theta_y = 0$ y $\theta_z = 0$.

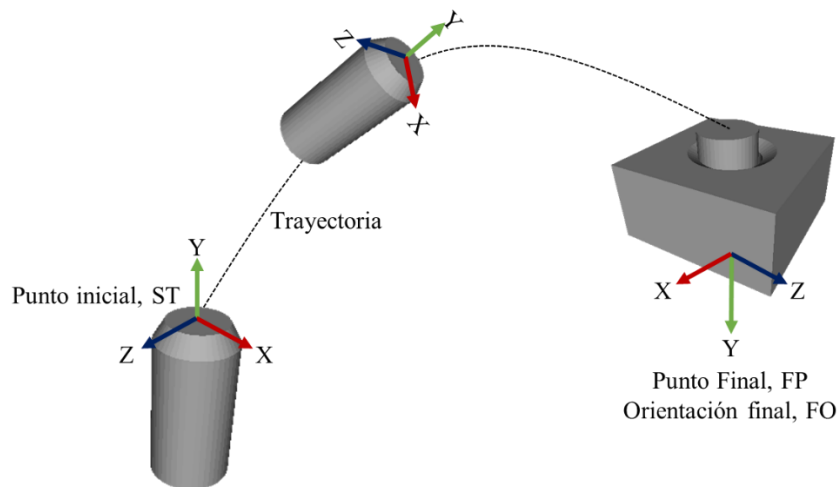


Figura 4.5. Conceptos de posición inicial y final de las piezas dentro del ensamble virtual.

- *Potential energy (PE, Energía potencial)*. Durante la trayectoria de ensamble de la pieza, se obtiene la altura máxima y la altura mínima que alcanzó la pieza. Posteriormente se calcula la energía potencial que se utilizó para manipular la pieza desde la altura mínima hasta la altura máxima. La PE se define como :

$$PE = mg(y_{max} - y_{min}) \tag{4.1}$$

donde: m es la masa de la pieza en kg, g es el efecto de la gravedad dentro de HAMS en m/s^2 , y_{max} es la máxima elevación de la pieza, y y_{min} es la mínima elevación de la pieza.

- *Effective potencial energy (EPE, Energía potencial efectiva)*. Durante la trayectoria de ensamble de la pieza, se obtiene la altura en la posición inicial y la altura en la posición final de la pieza. Posteriormente se calcula la energía potencial efectiva, definida como:

$$EPE = mg(y_{final} - y_{inicial}) \tag{4.2}$$

donde: y_{final} es la altura en la posición final de la pieza, y $y_{inicial}$ es altura en la posición inicial de la pieza.

- *Total energy (TE, Energía total)*. Para obtener la energía total requerida para manipular la pieza, se toma en cuenta todos los movimientos de la pieza dentro de la escena virtual y se define como:

$$TE = mg[\Delta_x f_x + \Delta_y f_y + \Delta_z f_z + (\Delta_y \text{ if } \Delta_y > 0)] \tag{4.3}$$

donde: $(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$ son el incremento en la dirección x , y y z respectivamente; (f_x, f_y, f_z) son los factores de pérdidas por fricción que oscilan entre 0 y 1, los cuales son propuestos por el diseñador y tienen como objetivo ponderar la energía que se consume al mover una pieza en la dirección x , y y z respectivamente.

La Figura 4.6 muestra la trayectoria de una pieza virtual, durante esta trayectoria, la actualización de la posición se obtiene por cada ciclo de simulación, cada posición está definida por $(x, y$ y $z)$. De esta manera se obtiene el incremento (Δ) en cada dirección como se observa en la figura. Por otro lado, la Figura 4.7 muestra los conceptos de PE, EPE y TE. En esta figura se observan la trayectoria de ensamble de un estator, así como las variables que permiten obtener los tres tipos de energía que consume el estator al ser manipulado para realizar el ensamble.

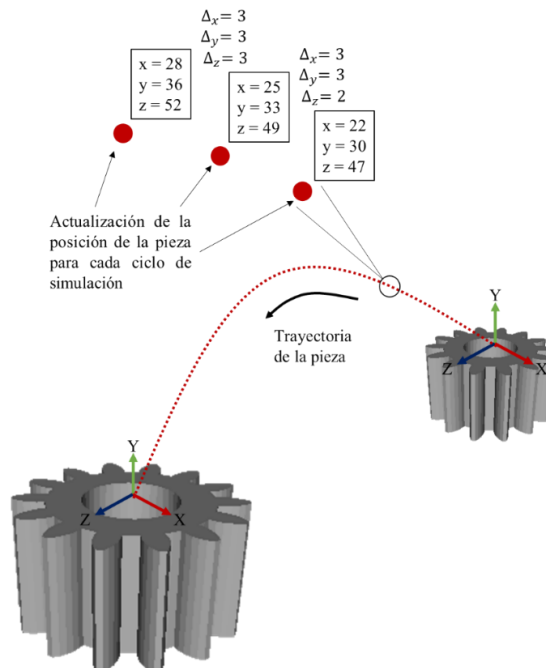


Figura 4.6. Concepto de incrementos dentro de una trayectoria virtual de ensamble.

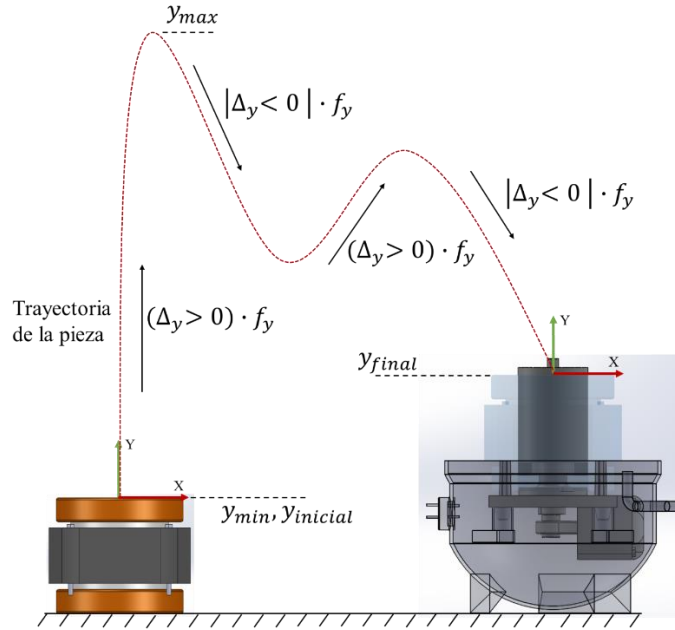


Figura 4.7. Conceptos de energía que consume una pieza virtual.

- *Potential energy efficiency (PEE, Eficiencia de la energía potencial)*. Eficiencia definida como la razón entre *EPE* y *PE*, se define como:

$$\eta_{PEE} = EPE/PE \tag{4.4}$$

- *Total energy efficiency (TEE, Eficiencia de la energía total)*. Eficiencia definida como la razón entre *EPE* y *TE*, se define como:

$$\eta_{TEE} = EPE/TE \tag{4.5}$$

Sección 4.- La cuarta sección, llamada *TASK ASSEMBLY INFORMATION* (Información de la tarea del ensamble), contiene la información y métricas generales del ensamble, permitiendo analizar y comparar varios planes de ensamble del mismo producto. La información generada automáticamente consta de las siguientes 14 métricas de ensamble:

- *Effective task completion time (ETCT, Tiempo efectivo de la tarea)*. Tiempo efectivo total del ensamble, se define como:

$$ETCT = \sum_{i=1}^n EHT \tag{4.6}$$

donde *n* es el número de piezas involucradas en el ensamble virtual.

- *Non-productive task completion time (NPTCT, Tiempo no-productivo de la tarea)*. Tiempo no-productivo total del ensamble, definido como:

$$NPTCT = \sum_{i=1}^n NPHT \tag{4.7}$$

- *Task completion time (TCT, Tiempo para completar la tarea)*. Tiempo total en completar la tarea de ensamble, desde que se toma la primera pieza hasta que se suelta la última pieza. Se define como:

$$TCT = ETCT + NPTCT \tag{4.8}$$

- *Effective assembly distance (EAD, Distancia efectiva del ensamble)*. Distancia total de manipulación de las piezas involucradas en el ensamble. Se define como:

$$EAD = \sum_{i=1}^n EHD \tag{4.9}$$

- *Non-productive assembly distance (NPAD, Distancia no-productiva de ensamble)*. Distancia total de traslado para tomar las piezas del ensamble. Se define como:

$$NPAD = \sum_{i=1}^n NPHD \quad (4.10)$$

- *Total assembly distance (TAD, Distancia total del ensamble)*. Distancia total del ensamble, definida como:

$$TAD = EAD + NPAD \quad (4.11)$$

- *Total assembly energy (TAE, Energía total del ensamble)*. Energía total requerida para realizar el ensamble virtual, se define como:

$$TAE = \sum_{i=1}^n TE \quad (4.12)$$

- *Assembly potencial efficiency (APE, Eficiencia potencial del ensamble)*. Eficiencia potencial total del ensamble definida como:

$$\eta_{APE} = \sum_{i=1}^n EPE / \sum_{i=1}^n PE \quad (4.13)$$

- *Total assembly energy efficiency (TAEE, Eficiencia de la energía total del ensamble)*. Registra la eficiencia de la energía total del ensamble, se define como:

$$\eta_{TAEE} = \sum_{i=1}^n EPE / \sum_{i=1}^n TE \quad (4.14)$$

- *Workspace (WS, Espacio de trabajo)*. Se refiere al espacio de trabajo utilizado durante el ensamble virtual. Dicho espacio de trabajo está representado por un prisma rectangular de dimensiones (x, y, z) , donde x corresponde a la diferencia entre los extremos máximos que las piezas involucradas en el ensamble alcanzaron en la dirección x ; para las dimensiones y y z el procedimiento es similar pero en las direcciones y y z , respectivamente. La Figura 4.8 muestra una vista aérea del ensamble de un compresor, por lo que las dimensiones en x y z del espacio de trabajo para dicho ensamble son de $x = (38 - (-28)) = 66$ unidades y $z = (59 - (-55)) = 114$ unidades. La evaluación de esta métrica permite una visualización cuantitativa del espacio de trabajo necesario para realizar el ensamble. Por ejemplo, una vez realizado el balance de línea, se puede diseñar la línea de producción considerando el espacio de trabajo necesario para cada estación de trabajo. De esta manera, si se analizan todos los productos a ensamblar dentro de la planta, se podrá diseñar el layout de la misma, permitiendo optimizar el área superficial de la planta o contemplar el terreno necesario para la construcción de la planta en caso de no contar con una. Por otro lado, se puede analizar el espacio de trabajo que el robot necesite para llevar a cabo un ensamble. Así como la concepción del tipo de robot necesario en caso de no contar con uno.
- *Assembly manipulability (AM, Manipulabilidad del ensamble)*. Registra el valor del ángulo máximo de rotación para cada eje (x, y, z) que se utilizó para realizar el ensamble virtual. La evaluación de esta métrica permite conocer el tipo de rotación (oscilación, cabeceo y/o balanceo) que el efector final de un robot necesita para poder completar el ensamble. Por otro lado, es un indicador del grado de destreza manual que un operador necesita para realizar el ensamble manual. El procedimiento para obtener el valor de la métrica AM es similar al obtenido para obtener la métrica WS. La Figura 4.9 muestra la carcasa del compresor que en su trayectoria de ensamble va girando alrededor del eje Y hasta llegar a su posición final que tiene un giro de 180° . Suponiendo que las otras piezas del ensamble giraron un ángulo menor de 180° en el eje Y, entonces se dice que el valor máximo de manipulación en el eje Y es de 180° para poder realizar el ensamble completo del compresor.

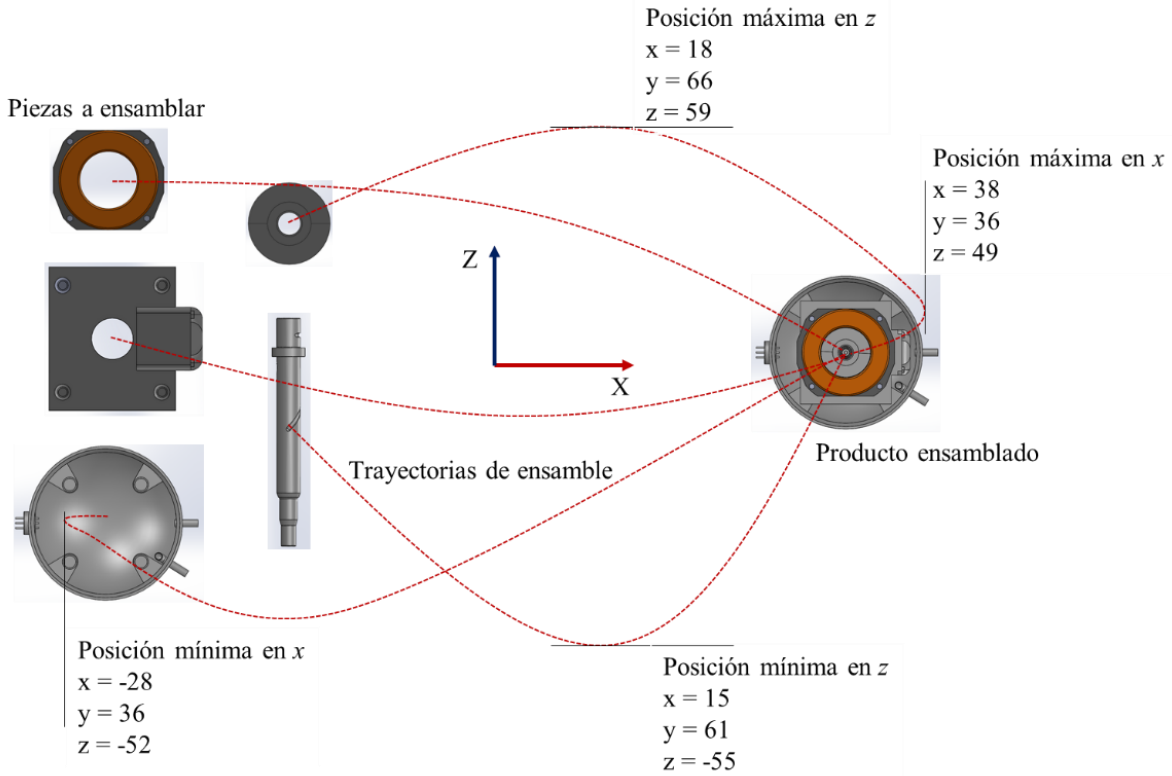


Figura 4.8. Representación del espacio de trabajo virtual.

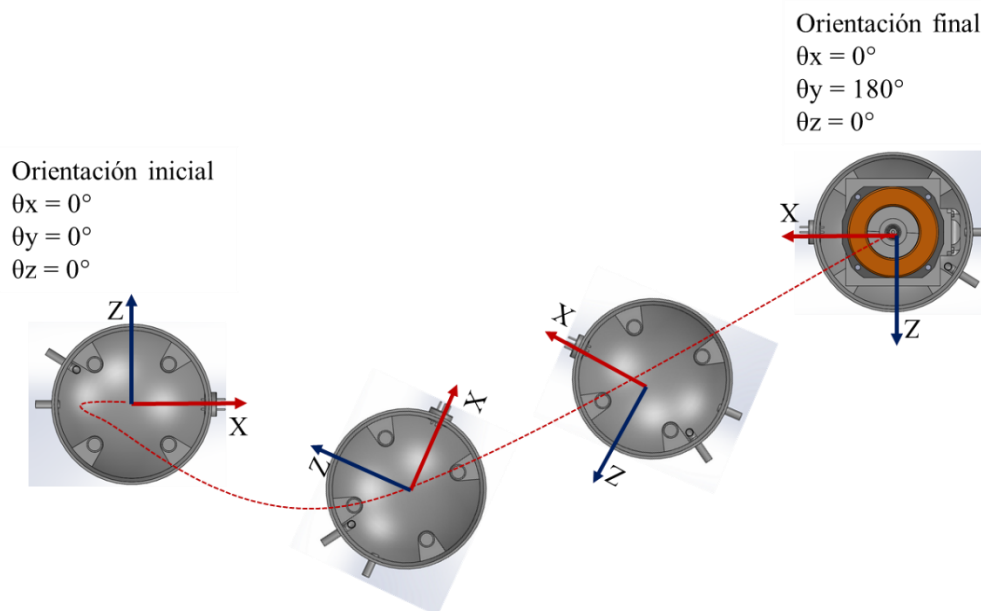


Figura 4.9. Representación del concepto de manipulación del ensamble.

- *Degree of freedom (DOF, Grados de libertad).* Registra los grados de libertad que se utilizaron para realizar el ensamble virtual. En el caso más completo se tendrían tres grados de libertad para los movimientos de traslado en x , y y z , y tres grados de libertad para los movimientos de rotación en θ_x , θ_y y θ_z , dando como resultado un máximo de seis grados de libertad. El número de DOF es necesario para seleccionar el robot encargado del ensamble o para conocer el grado de habilidad requerida en el operador para el caso de un ensamble manual. En el caso del compresor mostrado

en la Figura 4.8, las piezas se trasladan a su posición final en las tres direcciones y sólo la carcasa necesita ser rotada 180° en Y, por lo tanto, para realizar el ensamble completo del compresor son necesarios cuatro grados de libertad (tres de traslado y uno de rotación).

- *Total handling assembly (THA, manipulación total del ensamble)*. La métrica THA cuantifica el número total de veces que se manipularon las piezas involucradas en el ensamble virtual. Esta métrica THA también se puede ver como un índice sobre el grado de manipulación que necesitan las piezas para realizar el ensamble. Un ensamble con un THA mayor que el número de piezas involucradas, indica que dicho ensamble es complejo o que el ensamble es ineficiente al manipular las piezas más de lo necesario. El THA se define como:

$$THA = \sum_{i=1}^n HP \quad (4.15)$$

- *Handling efficiency (HE, Eficiencia de manipulación)*. Eficiencia de manipulación del ensamble virtual, es decir, la razón entre el número total de piezas (suponiendo que un ensamble eficiente debe de tomar sólo una vez cada pieza para ser ensamblada) entre el total de veces que se manipularon las piezas para realizar el ensamble virtual. Se define como:

$$\eta_{HE} = \text{número de piezas} / THA \quad (4.16)$$

Sección 5.- La quinta sección, llamada *ASSEMBLY PARAMETERS* (Parámetros del ensamble), está relacionada a los parámetros definidos por el usuario desde la interfaz del módulo de planeación antes de comenzar el ensamble. Los parámetros considerados son los siguientes:

- Factor (X, Y, Z). Estos tres factores de pérdida de fricción corresponden a (f_x, f_y, f_z) , los cuales se utilizan en la segunda sección para calcular la métrica *TE*.
- *Resolution (Resolución)*. Parámetro que determina la resolución visual de la trayectoria de una pieza al ser manipulada. Tiene como objetivo principal visualizar una trayectoria nítida y eliminar los movimientos imprecisos que el usuario realiza al acercar la pieza a su posición final.
- *Time-scale (Escala de tiempo)*. Parámetro para estimar el tiempo real del ensamble a partir del TCT virtual. Este parámetro tiene un valor de promedio de 17.7 ± 2 en el sistema HAMS. Así, el tiempo para completar la tarea real de ensamble se puede determinar como:

$$TCT \text{ real} = TCT \text{ virtual} / \text{Time - scale} \quad (4.17)$$

Sección 6.- La sexta sección, llamada *ABBREVIATIONS* (Abreviaciones), contiene el significado de cada abreviación encontrada en el reporte del plan de ensamble.

Sección 7.- La séptima y última sección lleva por nombre *COMMENTS* (Comentarios), y contiene las indicaciones de cómo y en qué orden se debe realizar la rotación de ángulos que conducen a la orientación final de cada pieza. La métrica FO muestra la orientación final de cada pieza en un formato $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$, los cuales indican que dicha pieza fue rotada θ_x alrededor del eje x , θ_y alrededor del eje y y θ_z alrededor del eje z para alcanzar su orientación final.

La interfaz del módulo de planeación se muestra en la Figura 4.10. En esta interfaz el usuario puede capturar y ajustar los parámetros necesarios para comenzar con el ensamble virtual.

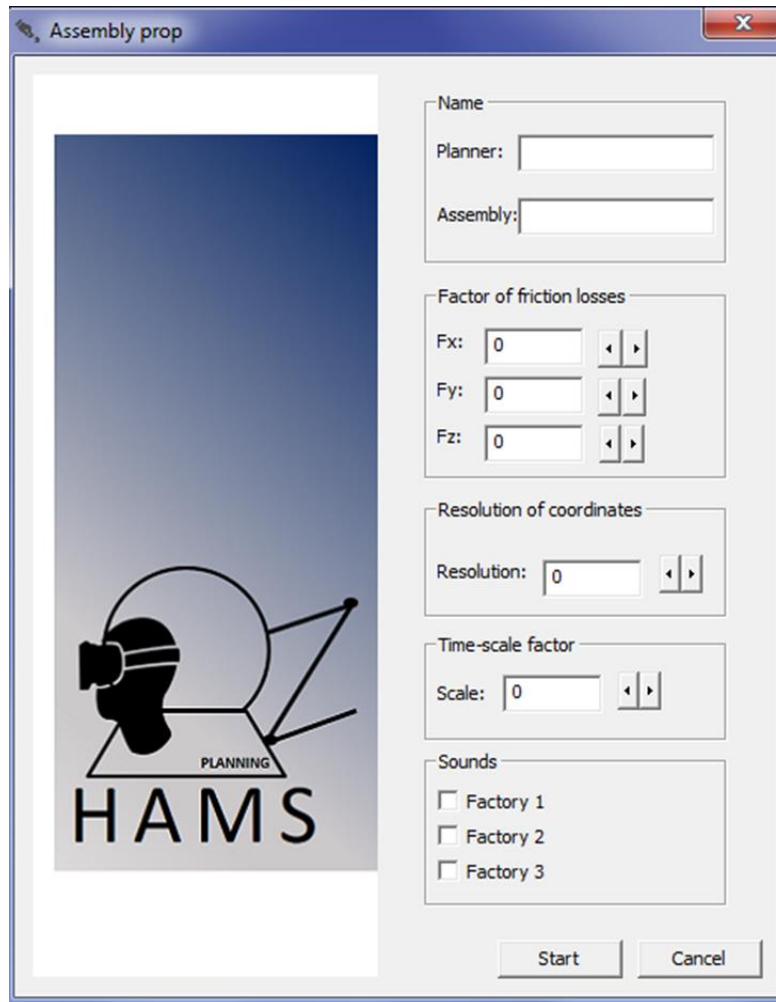


Figura 4.10. Interfaz del módulo de planeación.

La Figura 4.11 muestra las instrucciones del ensamble virtual, el cual contiene la información visual de cómo debe ensamblarse un producto paso a paso. Estas instrucciones son de gran importancia ya que pueden ser utilizadas como las instrucciones de ensamble de un producto para la línea de producción o para el cliente final, dependiendo del tipo de producto.

Como se puede observar, la generación del plan de ensamble (reporte, instrucciones y video) contiene toda la información del ensamble virtual realizado, permitiendo el análisis y evaluación del ensamble en las primeras etapas de un producto nuevo, desde el rediseño del mismo hasta el análisis de movimientos estratégicos y ergonómicos que permitan un ensamble eficaz, todo esto en un ambiente virtual – sin necesidad de construir prototipos físicos.

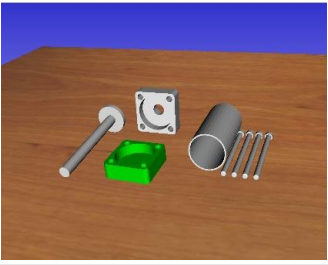
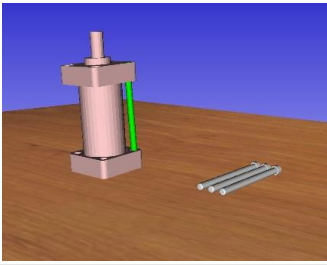
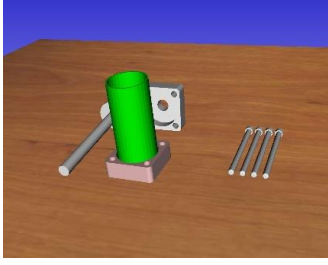

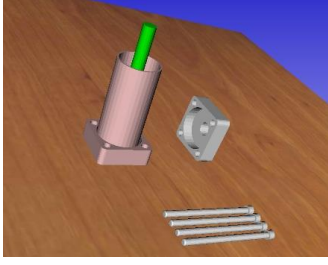


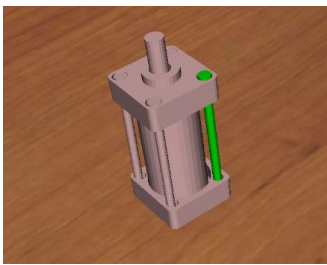
| Assembly instruction of: Actuator | | | | | |
|---|--|----------|---------------|--|------------------|
| | | Part No. | Name | Part No. | Name |
| Assembly operation: 10 | | 2 | Tapa inferior | Assembly operation: 50 | |
|  | | | |  | 5 Torinillo_1 |
| Assembly operation: 20 | | 4 | Cilindro | Assembly operation: 60 | |
|  | | | |  | 6 Torinillo_2 |
| Assembly operation: 30 | | 1 | Émbolo | Assembly operation: 70 | |
|  | | | |  | 7 Tornillo_3 |
| Assembly operation: 40 | | 3 | Tapa superior | Assembly operation: 80 | |
|  | | | |  | 8 Tornillo_4 |

Figura 4.11. Instrucciones y representación del plan de ensamble.

4.1.2. Evaluación del plan de ensamble

La evaluación del plan de ensamble comprende el análisis y la evaluación de varios planes (reportes) de ensamble generados para un mismo producto. Dicha evaluación permite identificar el mejor plan de ensamble con base a diversos criterios de ensamble y necesidades del diseñador. Los criterios para evaluar los planes de ensamble corresponden a las métricas generales de ensamble, las cuales están contenidas en la sección cuatro del plan de ensamble, *TASK ASSEMBLY INFORMATION*. En la evaluación de planes de ensamble se pueden analizar y evaluar tantos planes de ensamble como sean necesarios (del mismo producto). La interfaz para llevar a cabo la evaluación consta de seis apartados principales que se describen a continuación, Figura 4.12:

1. *Nombre.* Nombre del planeador.
2. *Criterios a evaluar.* Contiene la lista de los criterios de ensamble a evaluar y que corresponden a las métricas de ensamble. El diseñador selecciona el criterio de interés bajo el cual se analizarán los distintos planes de ensamble sometidos a evaluación, y de los cuales se obtendrá el mejor plan de ensamble de acuerdo al criterio seleccionado. Es importante mencionar que el diseñador puede seleccionar más de un criterio en orden de prioridad. Si por algún motivo los planes de ensamble tienen el mismo valor en el criterio seleccionado, automáticamente se considera el segundo criterio para seleccionar el mejor plan de ensamble, y así sucesivamente.
3. *Selección de los planes de ensamble.* Presionando el botón *select* se puede hacer una búsqueda de los planes de ensamble que se desean evaluar. Una vez que los planes de ensamble a evaluar se han seleccionado y cargado en la plataforma, se presiona el botón *Evaluate* para llevar a cabo el análisis y evaluación.
4. *Resumen.* Muestra los planes de ensamble que se seleccionaron para su evaluación. así como el nombre del criterio evaluado, nombre del archivo que contiene valor del mejor criterio analizado y el valor de dicho criterio. También se muestra un resumen, en formato de tabla, con todos los criterios para cada plan de ensamble seleccionado. Se resalta en amarillo la columna donde se encuentra el criterio de evaluación, y se presenta de manera ordenada los planes de ensamble, comenzando desde el mejor plan de ensamble y terminando con el peor plan de acuerdo al criterio de evaluación.
5. *Gráficas.* Se presenta una gráfica de barras que muestra el valor del criterio seleccionado para cada plan de ensamble, permitiendo realizar un análisis visual e inmediato.
6. *Información adicional.* Permite guardar la información generada durante la evaluación, tal como la gráfica y tabla que presenta el resumen.

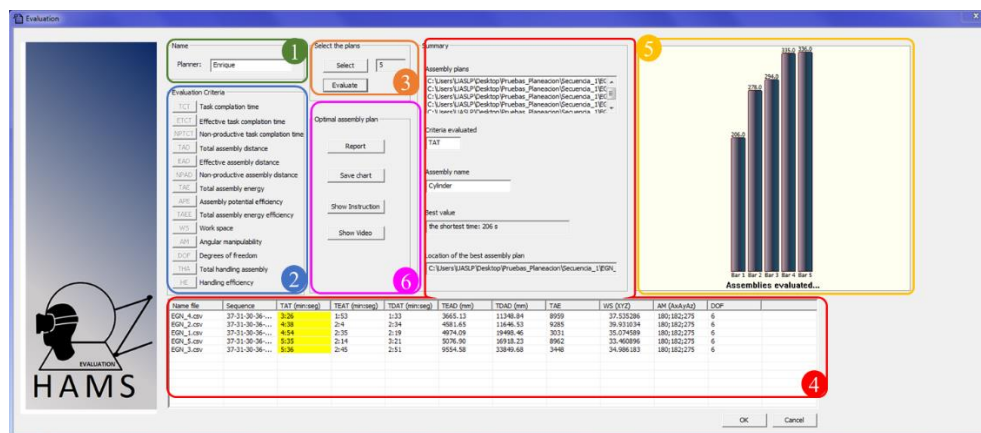


Figura 4.12. Interfaz para la evaluación de planes de ensamble.

4.2. Módulo de balanceo de línea

El módulo de balanceo de línea en HAMS, es una herramienta que permite el control de la producción, y hace posible la optimización de ciertas variables que afectan la productividad de un proceso, diseñando así una línea de ensamble equilibrada. La integración de este módulo dentro del sistema HAMS, permite analizar la línea de producción a partir de la transferencia de información de los ensambles virtuales que el usuario ejecuta para cada tarea de ensamble. Por lo que, toda la información necesaria para el balanceo de línea no viene del exterior, sino que, se genera dentro del sistema HAMS a partir de la simulación virtual de las tareas de ensamble. El objetivo principal de este módulo es igualar los tiempos de trabajo en todas las estaciones del proceso de producción o ensamble. La línea de ensamble está diseñada para juntar componentes y obtener una unidad mayor o

un producto final, y ésta debe de estar balanceada de tal manera que la frecuencia de salida de una estación de trabajo debe ser equivalente a la frecuencia de alimentación de la estación de trabajo que realiza la operación siguiente. Para llevar a cabo el balanceo de líneas, existen dos opciones, Figura 4.13: la primera consiste en repartir el trabajo entre las estaciones, es decir, que cada estación tenga el mismo tiempo de operación. La Figura 4.13a muestra que cada estación tarda 45 segundos en realizar su tarea de ensamble. La otra opción se basa en agregar más personal a las estaciones de trabajo que cuenten con un tiempo mayor, con el objetivo de que el tiempo de operación entre el número de operarios por estación sean iguales. La Figura 4.13b muestra que cada estación tiene 45 segundos/operario. De esta manera las dos opciones de balanceo de línea quedan equilibradas.

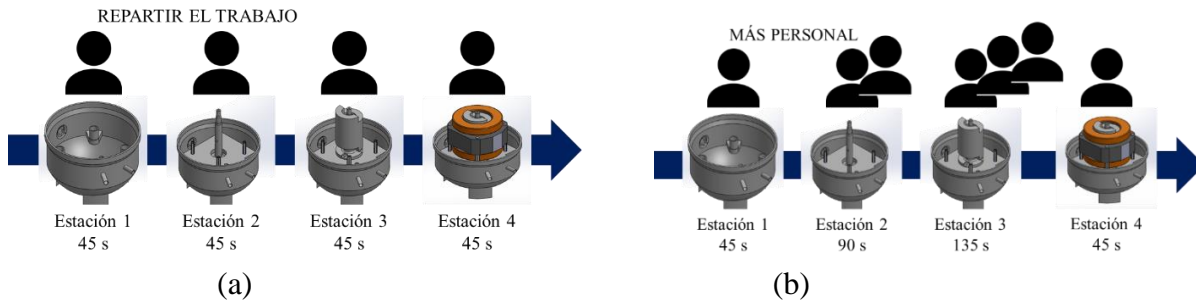


Figura 4.13. Técnicas de balanceo de línea: a) repartir el trabajo y b) agregar más personal.

La Figura 4.14 ilustra el diagrama de flujo del módulo de balanceo de línea. En este módulo, se pueden analizar tantas estaciones de ensamble como necesite la línea de producción. La interfaz para realizar este análisis consta de 6 apartados principales que se describen a continuación, Figura 4.15:

1. *Nombre.* Nombre del diseñador y nombre del producto.
2. *Información.* Costo de mano de obra por turno y las horas que tiene el turno.
3. *Estaciones de trabajo.* Contiene una tabla editable de cuatro columnas con n filas, cada fila representa una estación de ensamble que deberá contener información de la tarea, operación, tiempo (tiempo óptimo obtenidos del módulo de evaluación de ensamble), y número de operadores. La tabla tendrá tantas filas como estaciones de ensamble sean necesarias para fabricar el producto. Una vez que la tabla esté completa, se oprime un botón ubicado en el sexto apartado que permite realizar los cálculos y evaluar el balanceo de línea en términos de productividad, efectividad, etc. Los resultados de éstos cálculos se muestran en el cuarto y quinto apartado. Si esta primera evaluación no es satisfactoria para el diseñador, éste puede editar nuevamente la tabla (se pueden juntar estaciones de trabajo, o modificar el número de operadores por estación) y volver a realizar la evaluación, añadiendo los resultados a la sección cuatro y cinco. De esta manera se pueden probar diversas líneas de un mismo producto hasta alcanzar los resultados deseados. Los botones a la derecha de la tabla editable facilitan la manipulación de la información (borrar filas, mover filas, borrar todo) cuando se desea realizar un nuevo análisis.
4. *Resultados.* Los resultados se muestran en dos tablas no editables; una de ellas contiene la información de cada estación de trabajo y la otra muestra los resultados del balanceo de línea, tales como productividad, eficiencia, costos, número de personal, etc. Es importante mencionar que este apartado va creando un historial de los diferentes casos de balanceo de línea que el diseñador ha evaluado. Mediante dos colores alternos se van separando los diferentes casos de balanceo de línea con el fin de facilitar al diseñador la lectura y la búsqueda de esta información.

5. *Gráfica.* Muestra los resultados más relevantes de cada evaluación realizada por el diseñador mediante cuatro gráficas: productividad, eficiencia, unidades por turno y total de personal. También permite al diseñador comparar de manera visual los resultados de los diferentes casos de balanceo de línea.
6. *Funciones.* Muestra tres botones que permiten evaluar cada configuración de balanceo de línea, guardar toda la información del cuarto apartado y guardar las gráficas generadas.

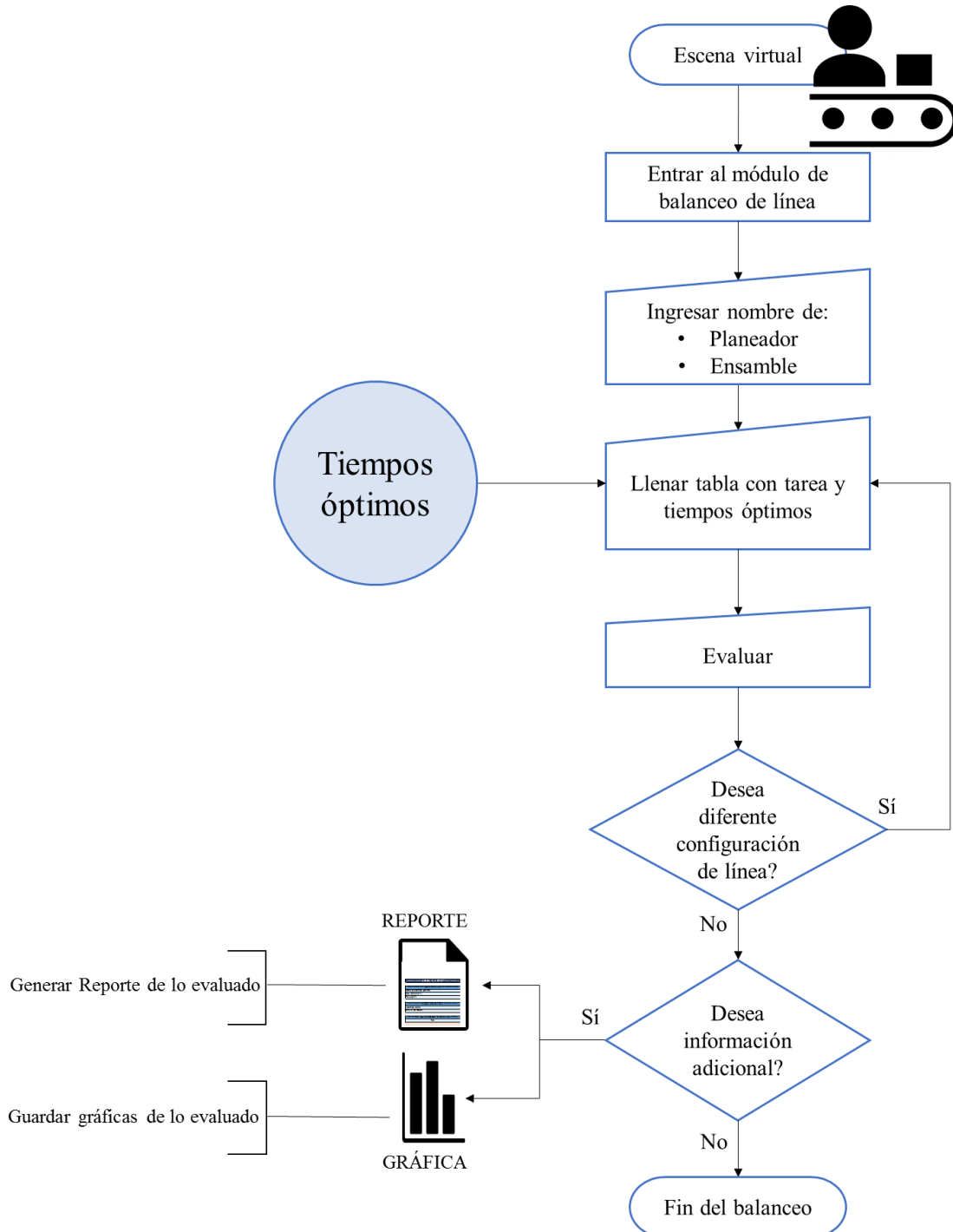


Figura 4.14. Diagrama de flujo del módulo de balanceo de línea.

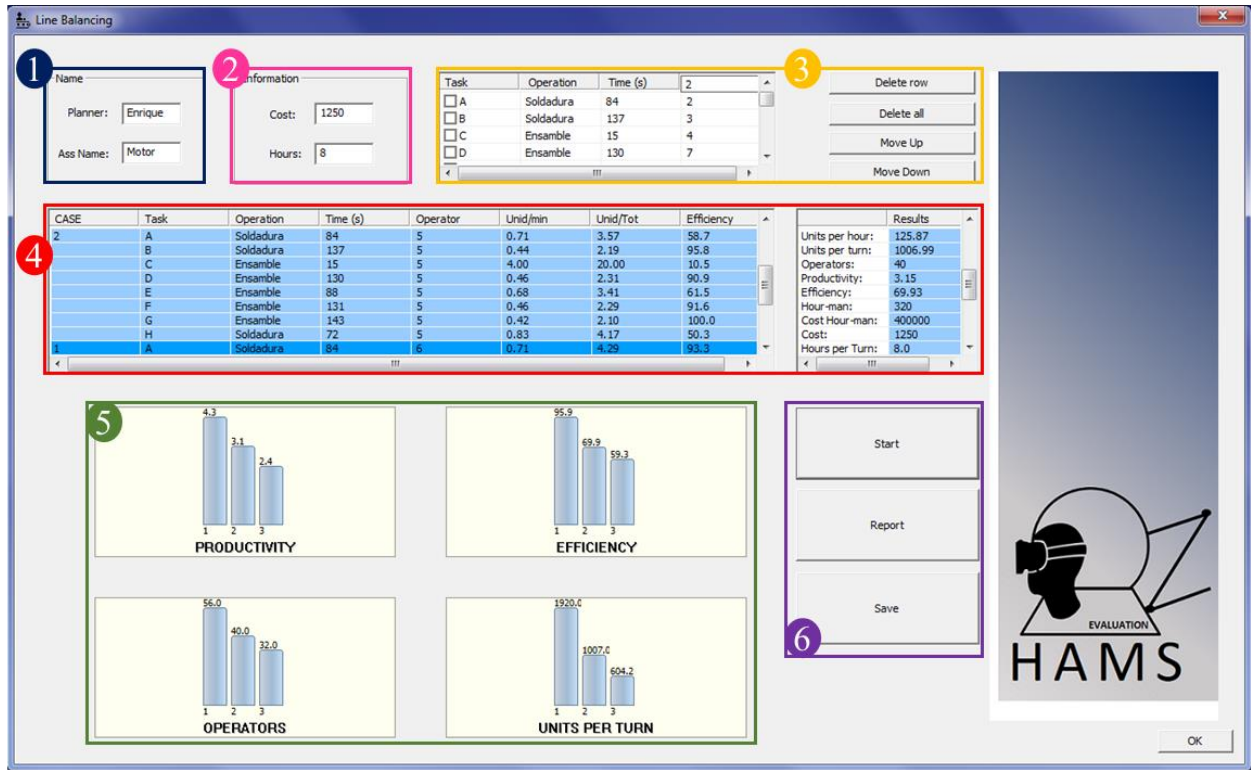


Figura 4.15. Interfaz del módulo de balanceo de línea.

Los resultados del balanceo de línea que aparece en el cuarto apartado de la Figura 4.15 son los siguientes:

- T_i es el tiempo de la estación i -ésima de trabajo.
- O_i es el número de operadores en la estación i -ésima de trabajo.
- m es el número de estaciones de trabajo.
- c es el tiempo de ciclo, definido como:

$$c = \frac{\text{Tiempo de producción por día}}{\text{Producción por día}} \tag{4.18}$$

- Las unidades por minuto se definen como:

$$\text{Unid}/\text{min} = 60/T_i \tag{4.19}$$

- Las unidades totales se definen como:

$$\text{Unid Totales} = (\text{Unid}/\text{min}) \cdot O_i \tag{4.20}$$

- E_m es la eficiencia por estación de trabajo, y se define como:

$$E_m = \frac{T_i/O_i}{c} \tag{4.21}$$

- Las unidades por hora corresponden a las unidades que salen de la estación más lenta:

$$Unidades/hora = \text{minimo}(Unid\ Totales) \cdot (60\ min/1\ hr) \quad (4.22)$$

- Las unidades por turno se definen como:

$$Unidades/turno = (Unidades/hora) \cdot (8\ hrs/1\ turno) \quad (4.23)$$

- El total de personas se define como todo el personal involucrado en la línea de ensamble.

- Las hora-hombre se definen como:

$$HH = (horas\ por\ turno) \cdot (total\ de\ personas) \quad (4.24)$$

- Costo de la producción por turno se define como:

$$Costo\ por\ turno = (costo\ hora - hombre) \cdot (HH) \quad (4.25)$$

Es importante mencionar que el costo hora-hombre que se define en el segundo apartado de la Figura 4.15 es propuesto por el diseñador.

- La productividad se define como:

$$Productividad = (Unidades/hora)/total\ de\ operadores \quad (4.26)$$

- E corresponde a la eficiencia total del balanceo de línea, y se define como:

$$E = \sum_{i=1}^n (T_i \cdot O_i) / (m \cdot c) \quad (4.27)$$

4.3. Módulo robótico

El módulo robótico de ensamble del sistema HAMS permite registrar, guardar y crear un archivo que contiene el código para que un robot genere el ensamble que el usuario realizó previamente de manera virtual en el sistema HAMS. La Figura 4.16 ilustra el diagrama de flujo del módulo robótico. En este módulo el diseñador realiza el ensamble virtual y al terminar se genera un código con las instrucciones para que un robot en particular realice el mismo ensamble, Figura 4.17. Es importante identificar perfectamente el robot al que va dirigido el código generado en HAMS, ya que se tienen que hacer ajustes y calibraciones para cada robot en particular.

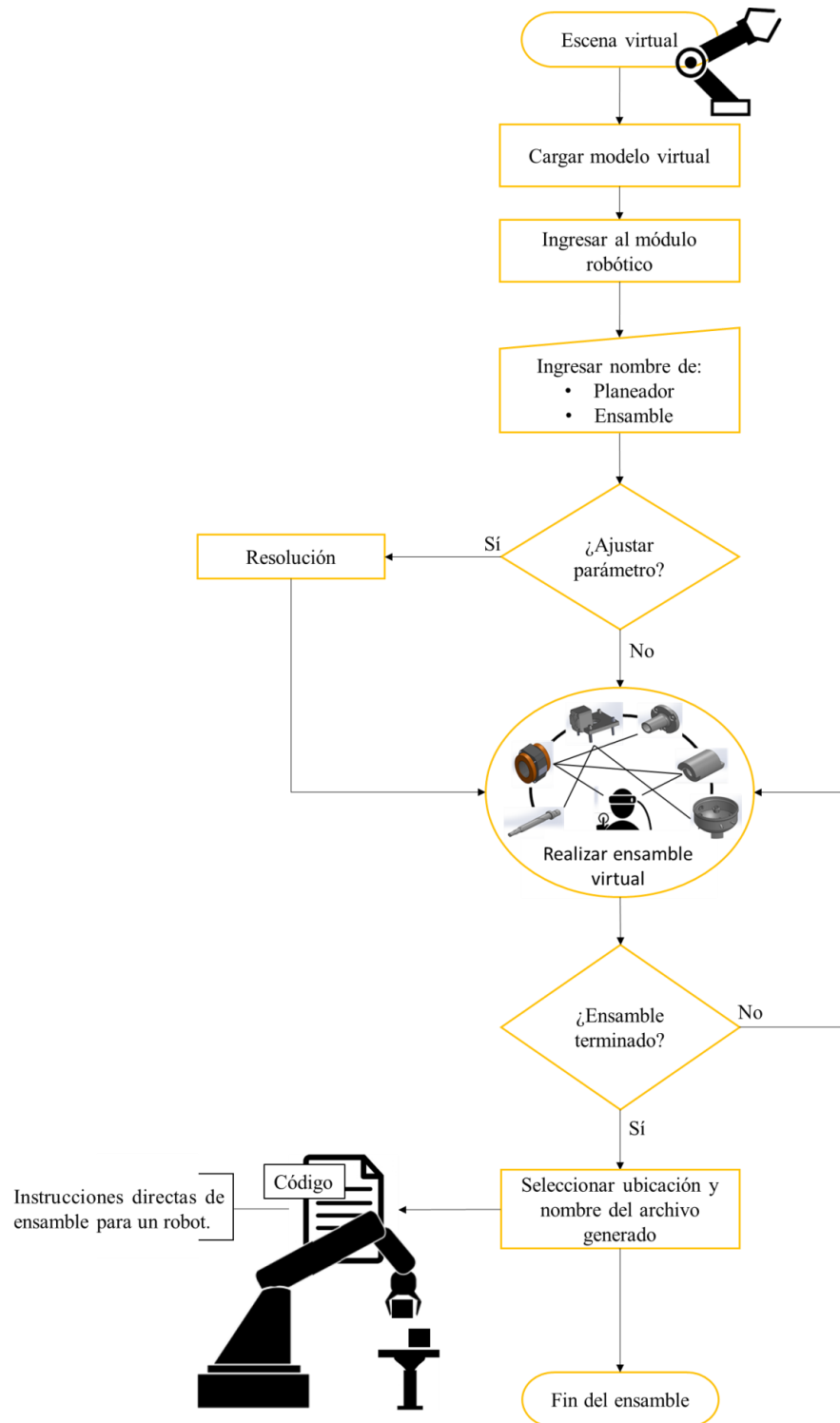


Figura 4.16. Diagrama de flujo del módulo robótico.

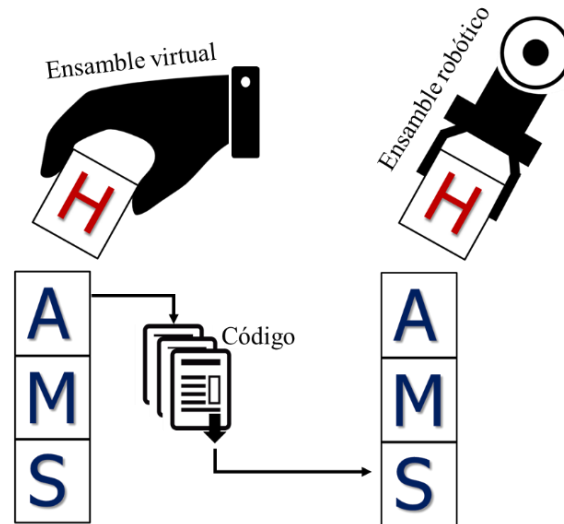


Figura 4.17. Ensamble robótico a partir del ensamble virtual-háptico en HAMS.

En el módulo robótico (Figura 4.18), el diseñador captura su nombre y ajusta la resolución con que desea se generen las coordenadas y trayectorias que seguirá el robot una vez concluida la tarea de ensamble virtual. La resolución de la trayectoria tiene dos objetivos, Figura 4.19: 1) visualizar una trayectoria más nítida, al mismo tiempo elimina movimientos imprecisos que el usuario realiza al acercar la pieza a su posición final; 2) al tener una trayectoria más nítida, se reduce el vector de coordenadas con las que se genera el código que será cargado en el robot, permitiendo que el robot también tenga una trayectoria sin tantos movimientos redundantes al acercar la pieza a su posición final.

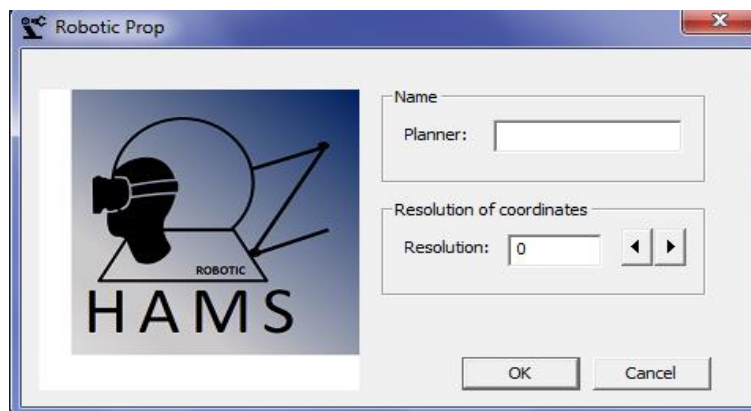


Figura 4.18. Interfaz del módulo robótico.

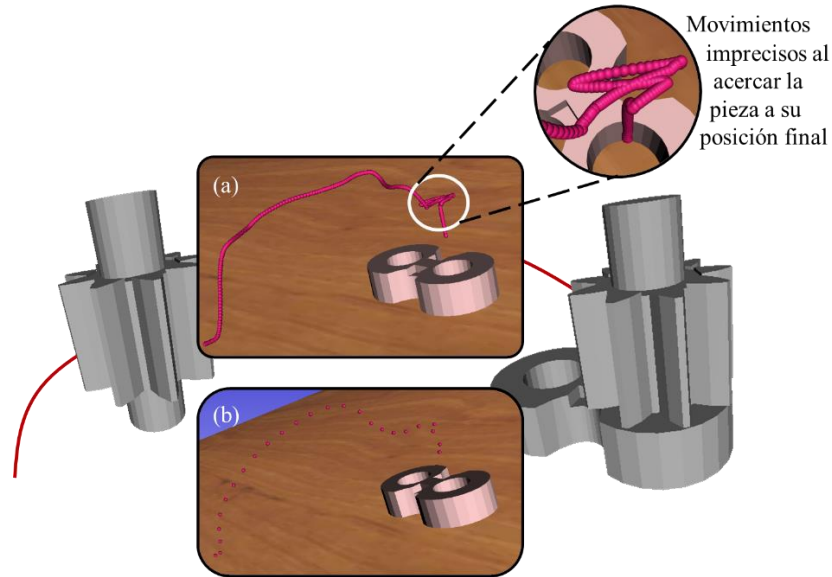


Figura 4.19. Resolución de la trayectoria de ensamblaje: a) trayectoria completa y b) trayectoria suavizada.

La Figura 4.20 muestra la metodología para suavizar las trayectorias de ensamblaje. El primer paso es definir la distancia que se desea entre cada punto coordinado de la trayectoria. Posteriormente se realiza la manipulación de las piezas, generando el vector completo de las coordenadas de la trayectoria, es decir, las coordenadas de este vector no han sido suavizadas. Después se va calculando la distancia entre cada punto de la trayectoria, por ejemplo, comienza por calcular la distancia entre el primer y segundo punto, si la distancia es menor a la definida por el usuario, se recalcula la distancia pero ahora desde el tercer punto hasta el primero, y así sucesivamente hasta que se cumple la distancia, suponiendo que la distancia se satisfizo desde el cuarto punto hasta el primero, estos valores de coordenadas se guardan en un nuevo vector de trayectorias. Ahora se comenzará a calcular la nueva distancia que hay desde el quinto hasta el cuarto punto, y se repite el ciclo. De esta manera se va generando la nueva trayectoria suavizada, la cual se puede visualizar dentro de la escena virtual. El código para el robot contiene el vector con la nueva trayectoria suavizada de ensamblaje.

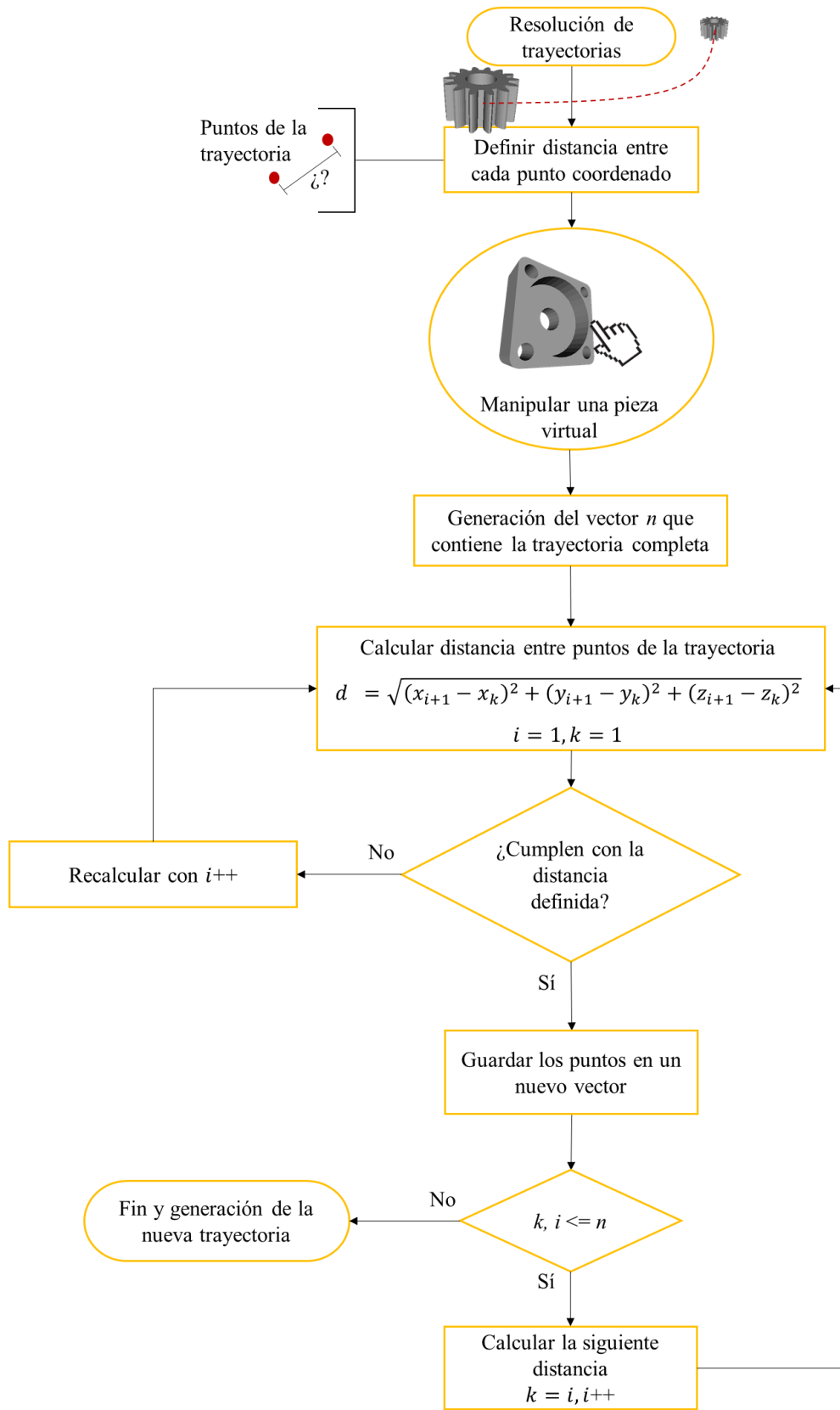


Figura 4.20. Resolución de la trayectoria de ensamble.

CAPÍTULO 5: EVALUACIÓN DEL ENTRENAMIENTO Y PLANEACIÓN VIRTUAL DE ENSAMBLES

En este capítulo se muestra la metodología utilizada para realizar la evaluación de cada módulo del sistema HAMS. Lo anterior con el objetivo de probar su funcionalidad y desempeño, así como evaluar su utilidad como una herramienta virtual de entrenamiento y planeación de procesos de ensamble.

5.1. Evaluación del entrenamiento virtual

Para evaluar la efectividad del módulo de entrenamiento de ensambles, se definió y utilizó el procedimiento descrito a continuación.

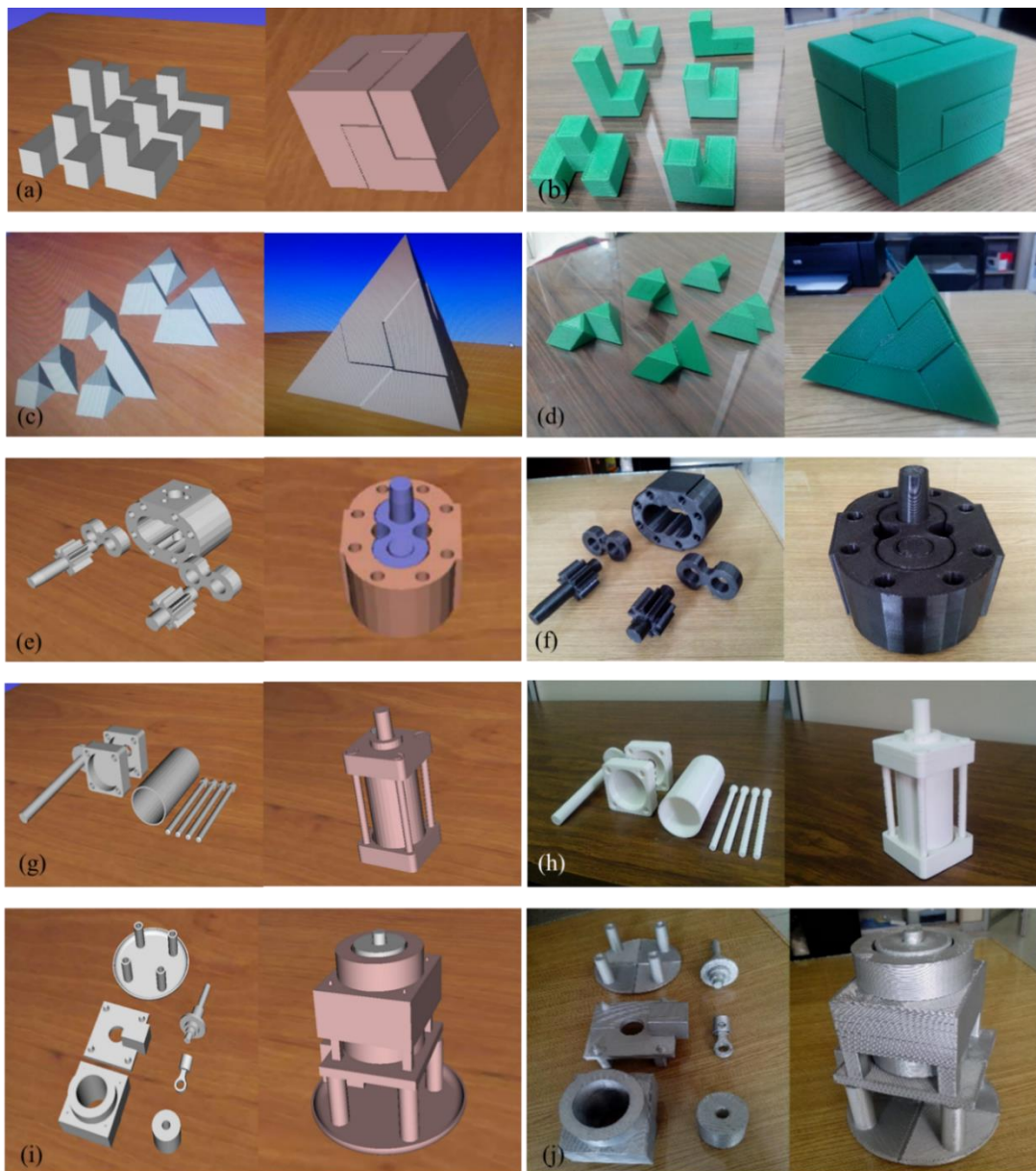


Figura 5.1. Modelos virtuales (izquierda) y reales (derecha): **a), b)** cubo rompecabezas; **c), d)** pirámide rompecabezas; **e), f)** bomba de aceite; **g), h)** actuador lineal; y **i), j)** compresor.

5.1.1. Tareas de ensamble

Cinco tareas de ensamble fueron seleccionadas: 1) rompecabezas cúbico, 2) rompecabezas piramidal, 3) bomba de aceite, 4) actuador lineal, y 5) compresor. Los modelos virtuales con sus correspondientes modelos reales utilizados en estas tareas de ensamble se muestran en la Figura 5.1. Los modelos virtuales fueron usados durante el entrenamiento virtual de ensambles, mientras que los modelos reales se utilizaron para evaluar el desempeño en el ensamble real. Los modelos reales se fabricaron a partir de sus modelos virtuales mediante técnicas de manufactura aditiva (impresión 3D). Las tareas de ensamble correspondientes a los rompecabezas *cubo* y *pirámide* están relacionadas directamente con los procesos cognitivos, es decir, procesos de información, pensamiento, memoria a corto plazo, memoria visual, etc. Por otro lado, las tareas de ensamble restantes, *la bomba de aceite*, *el actuador lineal* y *el compresor*, se eligieron debido a que corresponden a tareas reales de ensamble en la industria.

5.1.2. Modos de entrenamiento de ensambles virtuales

Tres modos de entrenamiento de ensamble fueron considerados:

1. *Entrenamiento virtual-háptico*. Los participantes llevan a cabo el entrenamiento virtual con ayuda del sistema háptico que provee una fuerza de retroalimentación hacia el usuario.
2. *Entrenamiento virtual*. Los participantes llevan a cabo el entrenamiento virtual con la asistencia del sistema háptico, pero sin retroalimentación de fuerza.
3. *Entrenamiento tradicional*. El entrenamiento se provee a los participantes a través de un video en donde se muestra el ensamble a realizar llevado a cabo por un experto. Después de observar el video, los participantes proceden a realizar el ensamble real.

5.1.3. Participantes

Howard Gardner analiza las inteligencias múltiples de los seres humanos, y propone una teoría que contiene ocho tipos de inteligencia [127]: lingüístico-verbal, lógica-matemática, visual-espacial, corporal-cinestésica, musical, interpersonal, naturalista y existencial. Esta teoría supone que los seres humanos son hábiles para algunas cosas e inhábiles para desarrollar otras. Para superar esta deficiencia de inteligencia inherente a la experimentación propuesta, los participantes fueron seleccionados de un programa de ingeniería mecánica (estudiantes de tercer y cuarto año). Un total de 15 participantes con edades de 19 a 30 años fueron seleccionados de manera aleatoria. Los participantes son hombres y mujeres estudiantes de ingeniería mecánica sin conocimientos previos de tareas de ensamble, ambientes de realidad virtual y sistemas hápticos.

Los participantes se dividieron aleatoriamente en tres equipos, de acuerdo a los modos de entrenamiento:

Grupo 1. Entrenamiento de ensamble virtual-háptico.

Grupo 2. Entrenamiento de ensamble virtual.

Grupo 3. Entrenamiento de ensamble tradicional.

5.1.4. Metodología experimental

La metodología experimental utilizada para llevar a cabo las pruebas del entrenamiento virtual se muestra en la Figura 5.2. Esta metodología se describe a continuación:

1. *Introducción.* En la primera etapa del experimento se informó a todos los participantes sobre los aspectos generales relacionados con la prueba, las condiciones en las que estarían trabajando cada grupo y lo relevante del procedimiento experimental.
2. *Familiarización con el sistema.* Los participantes pertenecientes al grupo 1 y 2 fueron introducidos al uso del sistema HAMS, incluyendo explicaciones acerca de la manipulación de la plataforma tales como – manipulación de las vistas, enfoque de las piezas virtuales, manipulación de las piezas virtuales mediante el dispositivo háptico, etc. También se les permitió hacer preguntas y recibir retroalimentación. Posteriormente, los participantes tuvieron la oportunidad de realizar una tarea de ensamble virtual (diferente a las tareas de ensamble de prueba), permitiéndoles familiarizarse con el sistema durante 30 minutos.
3. *Entrenamiento de ensamble.* Los participantes de los grupos 1 y 2 pasaron por un periodo de entrenamiento virtual para cada una de las cinco tareas de ensamble. Antes de iniciar el entrenamiento virtual, se les pidió que observaran cada tarea de ensamble virtual realizada por un experto, permitiéndoles comprender la secuencia del ensamble. Cada sesión de entrenamiento duró un máximo de 30 minutos por cada una de las cinco tareas a realizar, e incluyó una breve explicación sobre la tarea virtual en cuestión. El efecto de la gravedad y la detección de colisiones se habilitó en ambos grupos de entrenamiento virtual, sin embargo, la retroalimentación de la fuerza sólo se habilitó para los participantes del primer grupo. Es importante mencionar que el entrenamiento virtual se llevó a cabo con un solo dispositivo háptico con el objetivo de reducir la sincronización del sistema y los problemas de inestabilidad. Los participantes del tercer grupo realizaron un periodo de entrenamiento tradicional que consistía en observar a un experto realizando cada tarea de ensamble real una o dos veces según lo solicitara el participante.
4. *Ensamble real.* Después de que el participante de cada grupo fue sometido a su entrenamiento correspondiente, se pidió a cada participante de cada grupo realizar cada una de las tareas de ensamble pero en forma real. Las tareas de ensamble real se llevaron a cabo con una sola mano con el objetivo de ser coherentes con el entrenamiento virtual. Cada tarea de ensamble real se repitió cinco veces con un descanso de un minuto entre cada iteración.
5. *Desempeño del ensamble real.* Todos los participantes fueron observados durante la ejecución de la tarea real de ensamble. Para evaluar el desempeño del ensamble, el TCT se midió para cada participante y cada tarea del ensamble real. El módulo de entrenamiento virtual del sistema HAMS permitió generar un reporte que incluye el TCT de cada tarea de ensamble virtual realizada por cada participante.

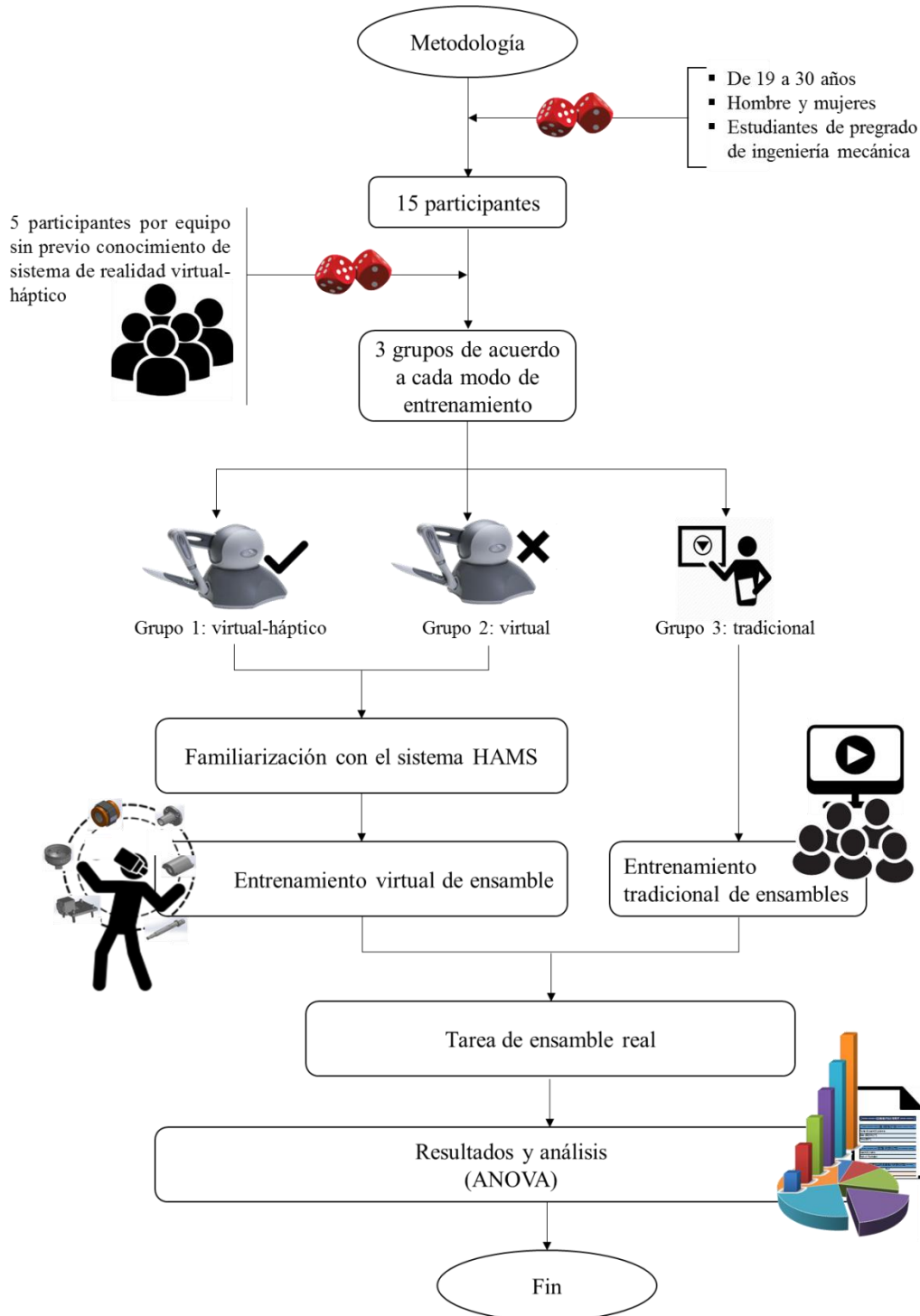


Figura 5.2. Metodología experimental del módulo de entrenamiento.

5.2. Evaluación de la planeación virtual de ensambles

La gran mayoría de los productos en la actualidad involucran el ensamble de varias partes o componentes. El proceso de ensamble varía de un producto a otro, y cada producto a su vez puede ser ensamblado de muchas maneras. Por esta razón no existe un procedimiento universal que permita obtener el mejor plan de ensamble siguiendo unos pasos ya establecidos. Hasta ahora, el mejor algoritmo para resolver problemas de ensamble sigue siendo la experiencia, intuición y habilidades del diseñador. Para evaluar el módulo de planeación de ensambles del sistema HAMS, se

seleccionaron dos casos de estudio correspondientes a componentes industriales. La metodología propuesta para evaluar la efectividad del módulo de planeación de ensambles se muestra en la Figura 5.3.

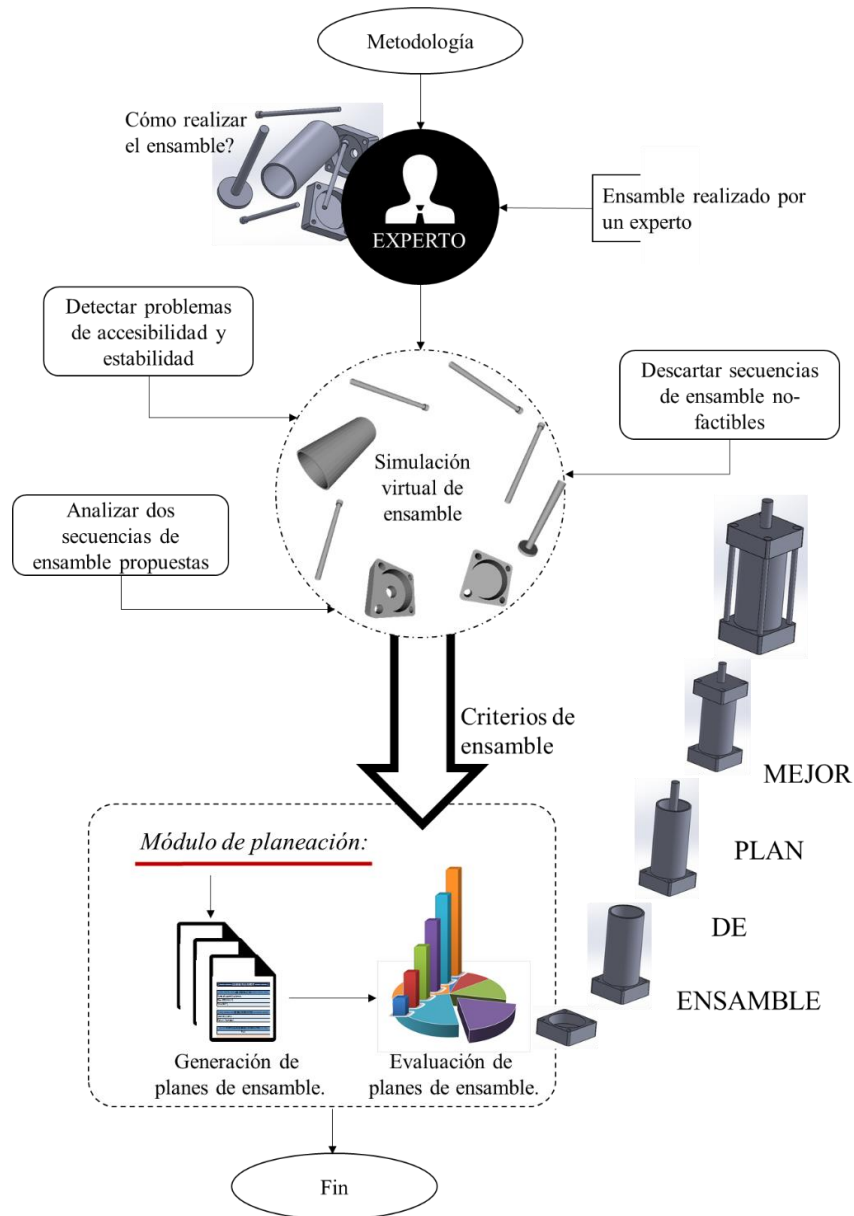


Figura 5.3. Metodología experimental del módulo de planeación.

5.2.1 Caso de estudio 1

El primer caso de estudio corresponde a un actuador lineal que tiene ocho componentes, con 40,320 posibilidades de ser ensamblado con las técnicas tradicionales y abstractas (CAD's, algoritmos genéticos, etc.). Con este gran número de opciones para ensamblar el cilindro, resulta complicado contestar las siguientes preguntas, ¿Cuál es el mejor plan de ensamble? y ¿A qué costo se obtiene?

Para comenzar el análisis del ensamble del cilindro en HAMS se cargan las piezas virtuales involucradas en la tarea de ensamble, Figura 5.4. El proceso virtual de ensamble en HAMS es libre, natural e intuitivo, y comprende los siguientes pasos:

1. *Tomar una pieza.* Seleccionar una pieza usando el cursor háptico para su manipulación.
2. *Manipulación de la pieza.* Mover la pieza con total libertad, interactuando dentro del ambiente virtual con los mismos grados de libertad que los objetos reales.
3. *Posición final de la pieza.* Colocar la pieza en su posición final. La detección de colisiones, estabilidad y accesibilidad se calculan de manera automática dentro del sistema.
4. *Repetir pasos del 1 al 3 hasta completar el ensamble.*

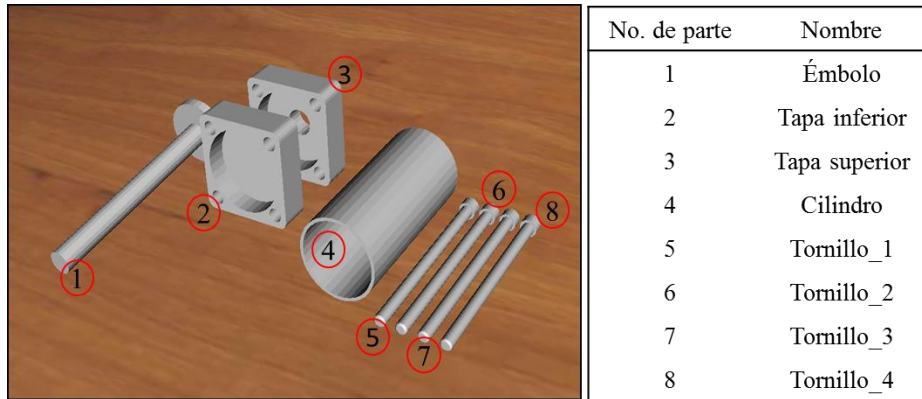


Figura 5.4. Actuador lineal.

5.2.1.1. Análisis de accesibilidad y estabilidad

Debido a la naturaleza de HAMS, todas las secuencias de ensamble no-factibles e ilógicas quedan descartadas por el hecho de no poder ser ensambladas en el ambiente virtual. HAMS sólo permite realizar secuencias de ensamble factibles y coherentes con la realidad, reduciendo considerablemente el número de posibilidades de ser ensamblado un producto. Añadiendo la experiencia, intuición y habilidades del planeador, se hace más eficiente la búsqueda del mejor plan de ensamble. La Figura 5.5 muestra dos secuencias de ensamble no-factibles, quedando descartado su análisis de manera inmediata. La Figura 5.5a muestra la inaccesibilidad del émbolo dentro del cilindro para ser ensamblado en su posición final debido a que la tapa superior ha sido ensamblada previamente. Para solucionar este problema es necesario des-ensamblar la tapa superior, posteriormente introducir el émbolo dentro del cilindro y por último volver a ensamblar la tapa superior. Es importante mencionar que este problema real de ensamble no se detecta con los métodos tradicionales, revelándose hasta que se tienen las piezas físicas, lo cual resulta en una planeación ineficiente del ensamble, afectando el tiempo y costo del desarrollo del producto.

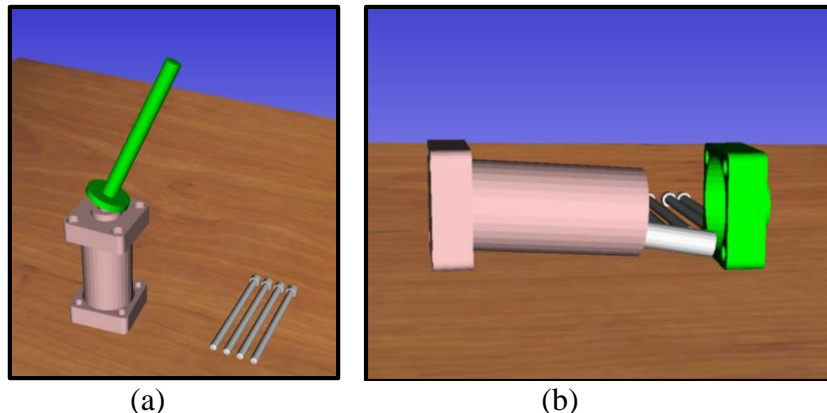


Figura 5.5. Secuencias de ensamble no-factibles con problemas de: a) accesibilidad y b) estabilidad.

La Figura 5.5b muestra problemas de estabilidad del ensamble. El émbolo ensamblado en su posición final está sujeto al efecto de la gravedad virtual, por lo que se encuentra inclinado y en contacto con la mesa, lo que hace imposible continuar con el ensamble. Así como estos dos ejemplos, HAMS permite detectar secuencias de ensamble no-factibles de una manera sencilla y eficaz.

5.2.1.2. Generación del plan de ensamble

Para este caso de estudio, dos secuencias de ensamble factibles fueron analizadas por un experto en análisis y evaluación de planes de ensamble:

- Secuencia de ensamble 1: {2 – 4 – 1 – 3 – 5 – 6 – 7 – 8}
- Secuencia de ensamble 2: {2 – 1 – 4 – 3 – 5 – 6 – 7 – 8}

Existen más de dos secuencias de ensamble factibles, tal como: {2 – 4 – 1 – 3 – 6 – 5 – 7 – 8}, {2 – 4 – 1 – 3 – 5 – 8 – 7 – 6}, etc. Sin embargo, a partir de la intuición, experiencia y habilidades del experto, aunado a la naturaleza virtual del sistema HAMS, se concluye que las dos secuencias de ensamble propuestas se acercan a la mejor secuencia de ensamble. Ambas secuencias de ensamble presentan diferentes niveles de dificultad.

Una vez que el experto realiza el ensamble virtual con ambas secuencias de ensamble, se genera automáticamente el reporte del plan de ensamble para cada secuencia de ensamble, Tabla 5.1 y 5.2. La Tabla 5.1 corresponde a la sección 3 del reponte del plan de ensamble, llamada PART ASSEMBLY INFORMATION, la cual contiene información detallada acerca de cada pieza manipulada. Estas métricas de ensamble corresponden a las principales variables y parámetros utilizados en el análisis y evaluación en el desempeño de tareas de ensamble. Es importante notar que la cantidad de filas generadas en la Tabla 5.1 corresponde al número de piezas involucradas en la tarea de ensamble, es decir, se generan tantas filas como piezas tenga el ensamble a realizar. Las instrucciones de la secuencia de ensamble 1, generadas durante el ensamble virtual, se muestran en la Figura 4.11 del capítulo anterior. La Tabla 5.2 corresponde a la sección 4 del plan de ensamble, llamada TASK ASSEMBLY INFORMATION, y contiene las métricas de toda la tarea virtual de ensamble. Estas métricas permiten al diseñador realizar la evaluación entre varias secuencias de ensamble y obtener el mejor plan de ensamble de acuerdo a las necesidades particulares.

Tabla 5.1. Información de las piezas de ensamble.

| Parte | Nombre | HP | EHT (s) | NPHT (s) | EHD (mm) | NPHD (mm) | SP (x, y, z) | FP (x, y, z) | FO ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) | PE (joules) | TE (joules) | EPE (joules) | TEE % | PEE % |
|-------------------------|---------------|----|---------|----------|----------|-----------|--------------|--------------|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------|-------|-------|
| Secuencia de ensamble 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Tapa inferior | 1 | 7 | 0 | 152.7 | 0 | 0, 34, 0 | 6, 11, 52 | -90, 0, 0 | 0.062 | 0.078 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | Cilindro | 1 | 19 | 3 | 527.1 | 342 | 114, 27, 0 | 6, 67, 50 | 0, -90, -90 | 0.252 | 0.283 | 0.134 | 47.4 | 53.2 |
| 1 | Émbolo | 3 | 18 | 28 | 470.3 | 2182.6 | -76, 16, 42 | 6, 89, 50 | 0, -90, -90 | 0.662 | 0.674 | 0.256 | 37.9 | 38.6 |
| 3 | Tapa superior | 3 | 39 | 29 | 416.2 | 1665.1 | 0, 34, -60 | 6, 125, 50 | 90, 0, 0 | 0.797 | 0.888 | 0.432 | 48.6 | 54.1 |
| 5 | Tornillo_1 | 3 | 16 | 37 | 452.4 | 386.3 | 140, 5, 4 | 32, 70, 75 | 0, -90, -90 | 0.112 | 0.114 | 0.036 | 31.4 | 31.9 |
| 6 | Tornillo_2 | 3 | 20 | 28 | 734.2 | 264.5 | 155, 5, 4 | 32, 70, 25 | 0, -90, -90 | 0.115 | 0.200 | 0.035 | 17.3 | 29.9 |
| 7 | Tornillo_3 | 1 | 5 | 17 | 637.2 | 373.2 | 170, 5, 4 | -18, 70, 0 | 0, -90, -90 | 0.120 | 0.126 | 0.036 | 28.5 | 29.7 |
| 8 | Tornillo_4 | 1 | 13 | 12 | 484.9 | 1920.8 | 185, 5, 4 | -18, 70, 0 | 0, 90, 90 | 0.117 | 0.122 | 0.034 | 27.8 | 29.3 |
| Secuencia de ensamble 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Tapa inferior | 1 | 8 | 0 | 120.1 | 0 | 0, 34, 0 | 4, 13, 44 | -90, 0, 0 | 0.068 | 0.080 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | Émbolo | 1 | 16 | 3 | 303.3 | 402.3 | -76, 16, 42 | 3, 90, 48 | 0, -90, -90 | 0.360 | 0.382 | 0.256 | 67.1 | 71.1 |
| 4 | Cilindro | 7 | 47 | 26 | 634.9 | 1923.3 | 114, 27, 0 | 5, 76, 47 | 0, -90, -90 | 0.720 | 0.775 | 0.161 | 20.8 | 22.4 |
| 3 | Tapa superior | 3 | 41 | 56 | 695.0 | 1615.3 | 0, 34, -60 | 4, 130, 50 | 90, 0, 0 | 0.839 | 1.854 | 0.481 | 25.9 | 57.3 |
| 5 | Tornillo_1 | 1 | 14 | 21 | 549.1 | 532.1 | 140, 5, 4 | 30, 78, 22 | 0, -90, -90 | 0.126 | 0.135 | 0.041 | 30.5 | 32.6 |
| 6 | Tornillo_2 | 3 | 11 | 19 | 503.2 | 451.3 | 155, 5, 4 | 30, 75, 75 | 0, -90, -90 | 0.120 | 0.130 | 0.041 | 31.7 | 34.3 |
| 7 | Tornillo_3 | 1 | 11 | 22 | 538.2 | 323.2 | 170, 5, 4 | -22, 75, 0 | 0, -90, -90 | 0.115 | 0.124 | 0.041 | 32.8 | 35.5 |
| 8 | Tornillo_4 | 3 | 32 | 17 | 623.1 | 2006.7 | 185, 5, 4 | -21, 78, 0 | 0, 90, 90 | 0.117 | 0.214 | 0.041 | 19.0 | 34.6 |

Tabla 5.2. Información de la tarea de ensamble.

| TCT (min:s) | ETCT (min:s) | NPTCT (min:s) | TAD (mm) | EAD (mm) | NPAD (mm) | TAE (joule) | APE % | TAAE % | WS (mm) | AM ° | DOF | THA | HE % |
|-------------------------|--------------|---------------|----------|----------|-----------|-------------|-------|--------|---------------------------|---------------------------|-----|-----|------|
| Secuencia de ensamble 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4:51 | 2:17 | 2:34 | 11009 | 3875 | 7134 | 2.485 | 43.04 | 38.75 | 277.6, 224.5, 206.5 | 180.0, 182.3, 184.5 | 6 | 16 | 50 |
| Secuencia de ensamble 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 5:44 | 3:00 | 2:44 | 11220 | 3966 | 7254 | 3.694 | 43.08 | 28.8 | 263.2, 221.5, 189.2 | 180.6, 178.6, 184.4 | 6 | 20 | 40 |

5.2.2. Caso de estudio 2

Con la finalidad de evaluar el módulo de planeación con un ensamble más complejo, se seleccionó el ensamble de un motor de aire. El motor de aire consta de 23 piezas, por lo que, la mejor secuencia de ensamble ya no resulta tan evidente, Figura 5.6. El ensamble virtual del motor de aire permitió analizar los alcances del módulo de planeación de ensamble y el módulo de balanceo de línea, así como poner a prueba el sistema HAMS debido la complejidad del producto y al número de piezas involucradas en el ensamble.

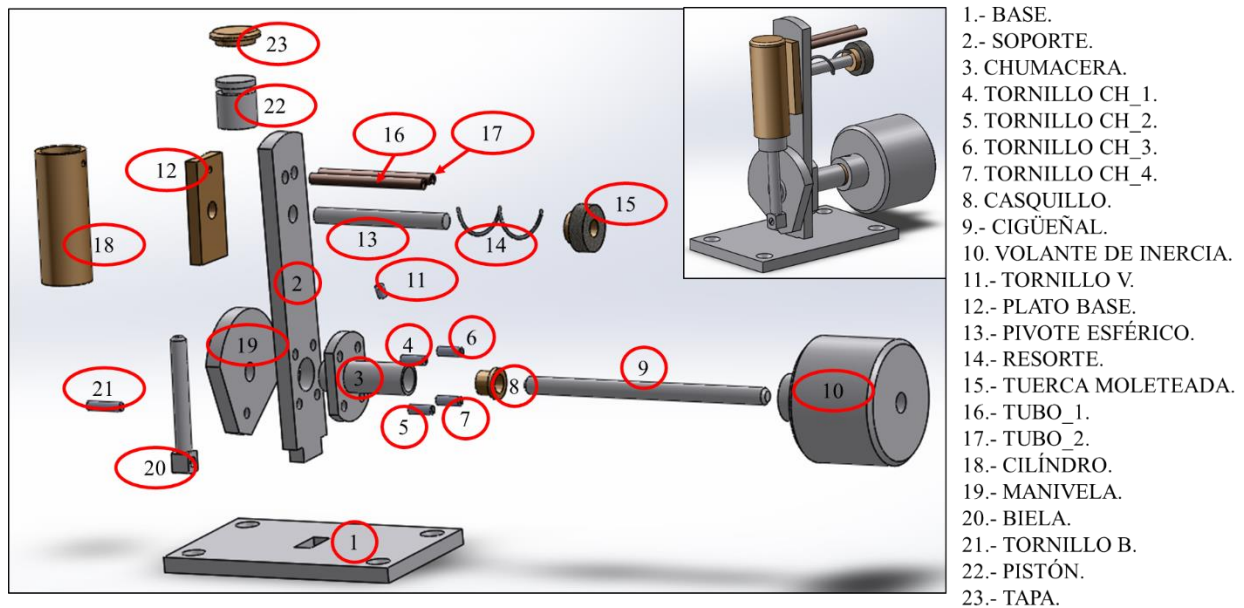


Figura 5.6. Motor de aire.

5.2.2.1. Importación del ensamble

Con el objetivo de reducir el costo computacional y mejorar el desempeño del ensamble del motor de aire, se simplificaron algunas piezas omitiendo su roscado, tales como: tornillos, pivote esférico, cigüeñal y biela. Así como reduciendo el paso del resorte. En la Figura 5.7 se puede observar el resorte y el pivote esférico en su forma original y simplificada. La simplificación realizada no representa un cambio considerable en el modelo que afecto su esencia.

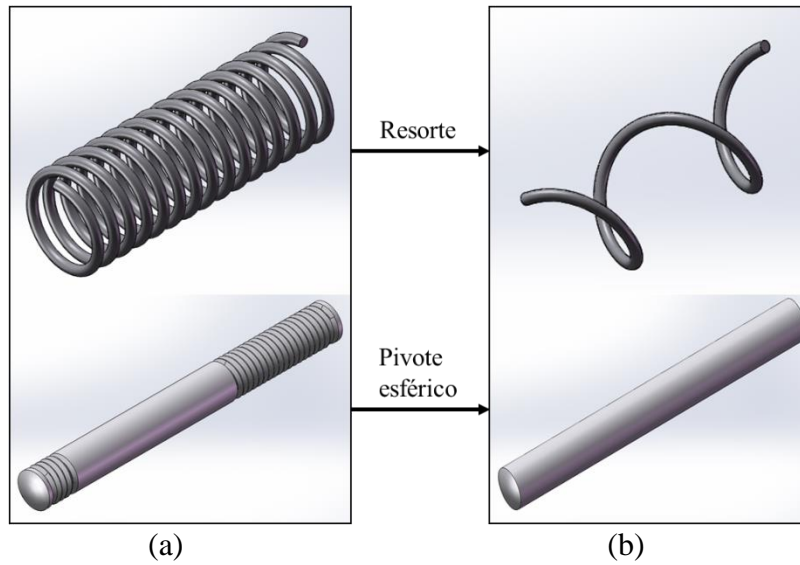


Figura 5.7. Piezas simplificadas del motor de aire: a) piezas originales y b) piezas simplificadas.

Una vez que se han simplificado las piezas que así lo requieran y con el propósito de importar en HAMS las 23 piezas que forman el motor de aire, se asigna previamente una posición y orientación a cada una de las piezas dentro del ambiente virtual. Posteriormente, las 23 piezas aparecen por primera vez en la escena virtual de una manera aleatoria y desordenada. Inmediatamente se observa que el soporte en esa orientación presenta inestabilidad, debido a que, el efecto de la gravedad virtual hace colapsarlo, Figura 5.8a. Así como el soporte, se corrigió la orientación de las piezas 3, 8, 10, 15, 18, 22 y 23 (Ver lista de piezas en la Figura 5.6). Después de corregir la orientación de las piezas, se muestra una configuración más ordenada, Figura 5.8b.

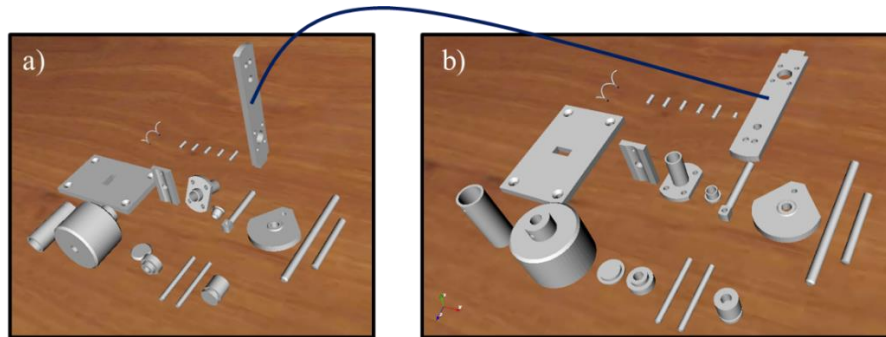


Figura 5.8. Evolución de las configuraciones iniciales del ensamble: a) y b) primera y segunda configuración, respectivamente.

5.2.2.2. Pruebas piloto de ensamble

A continuación se realizan pruebas piloto de ensamble con el fin de realizar un acomodo inicial más estratégico de las piezas, ya que las primeras configuraciones presentan desorden. Desde estas primeras pruebas comienza a jugar un papel muy importante la experiencia e intuición del experto. De esta manera se deriva una configuración de ensamble más ordenada y estratégica para comenzar a analizar el ensamble, ver Figura 5.9.

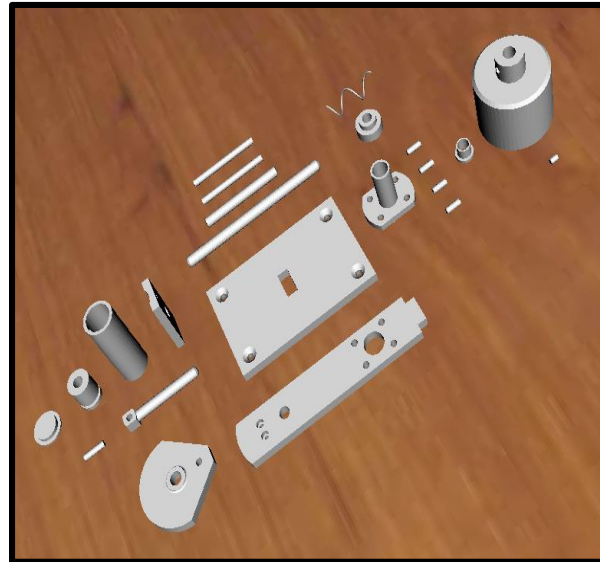


Figura 5.9. Tercera configuración inicial propuesta.

Posteriormente se realizan las primeras pruebas de ensamble con el objetivo de detectar movimientos redundantes o inútiles, así como piezas que se puedan reorientar o posicionar en lugares más estratégicos con el fin de mejorar el desempeño del ensamble. El primer cambio realizado se muestra en la Figura 5.10. La Figura 5.10a muestra la configuración actual de ensamble, en la cual la pieza 3 debe ser ensamblada en la pieza 2, sin embargo, la pieza 10 interrumpe la visibilidad de las piezas a ensamblar, debido a su tamaño y a su posición dentro del ambiente virtual, por lo que resulta complicado el ensamble. La Figura 5.10b muestra la nueva posición propuesta de la pieza 10, la cual permite una completa visualización de las piezas.

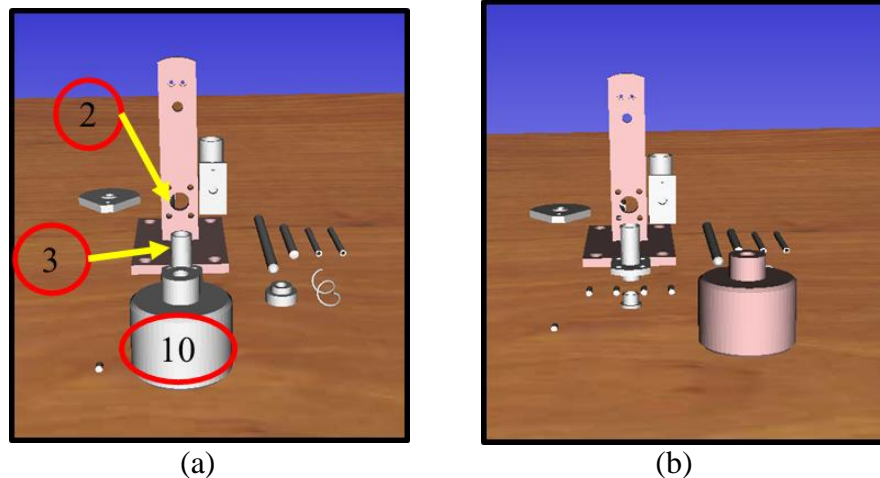


Figura 5.10. Cambios para mejorar el ensamble virtual: a) configuración anterior y b) configuración actual.

Continuando con el análisis preliminar del ensamble, se detecta que las piezas 2, 3, 8 y 10 deben ser ensambladas haciendo una rotación de 90° para ser colocadas en su posición final, Figura 5.11. Es evidente que la rotación de las piezas aumenta su manipulabilidad durante el ensamble, por lo que incrementa el trabajo y tiempo de ensamble requeridos. Por tanto se propone evitar esta rotación de las piezas, sin embargo es necesario realizar un análisis de estabilidad previo.

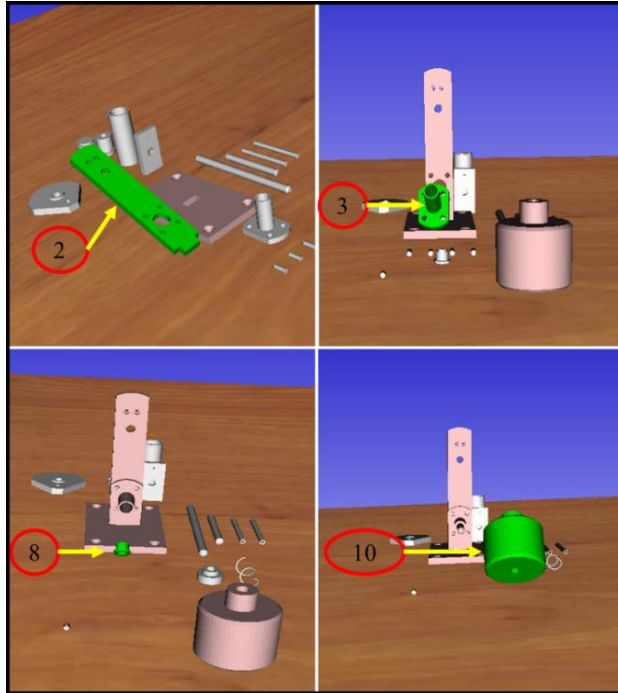


Figura 5.11. Rotación de las piezas 2, 3, 8 y 10 para mejorar el ensamble virtual.

Continuando con el análisis preliminar del ensamble, al ensamblar la pieza 10 en la pieza 9, surge otro detalle. La pieza 10 tiene un agujero donde se inserta la pieza 11 para fijar la pieza 10 en la pieza 9. Con la configuración actual dicho agujero queda ubicado de una manera poco ergonómica para que el usuario inserte la pieza 11, Figura 5.12a. Por lo tanto, el usuario deberá girar la pieza 10 un ángulo de 180° sobre la pieza 9, de tal manera que la ubicación del agujero resulta ergonómica para que la pieza 11 sea insertada, Figura 5.12b. Estos detalles que aparentan ser pequeños y sencillos, provocan un gran impacto negativo que se verá reflejado en el tiempo de ensamble y por ende, en el precio final del producto. Si se tuviera que realizar el ensamble miles de veces, se estaría cometiendo el error miles de veces. Los estudios de ergonomía en operaciones de ensamble son otra ventaja al utilizar ambientes virtuales asistidos por sistemas hápticos. Con los métodos tradicionales para el análisis de ensambles, resulta muy difícil detectar estos movimientos inútiles y redundantes. En la industria, estos detalles se hacen presentes hasta que se realiza el ensamble real. Es evidente que para corregir este error no es necesario un rediseño de las piezas, pero sí una advertencia para el diseño de la línea de producción o para el operador.

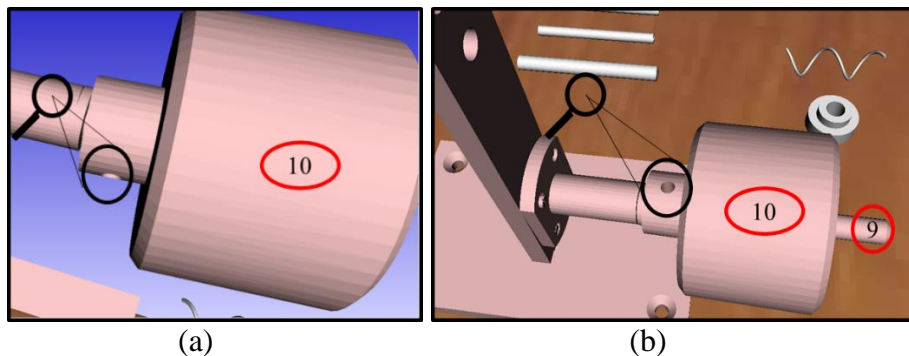


Figura 5.12. Cambios para mejorar el ensamble virtual: a) agujero mal ubicado para insertar una pieza y b) agujero en su posición correcta.

La Figura 5.13 muestra un problema similar al mencionado en la Figura 5.10. La Figura 5.13a muestra una vista donde se observan las piezas 18 y 12, sin embargo, una vista frontal oculta la pieza 12, complicando la tarea del ensamble, Figura 5.13b. Por tal motivo, se propone mover la pieza 18 para mejorar la visibilidad.

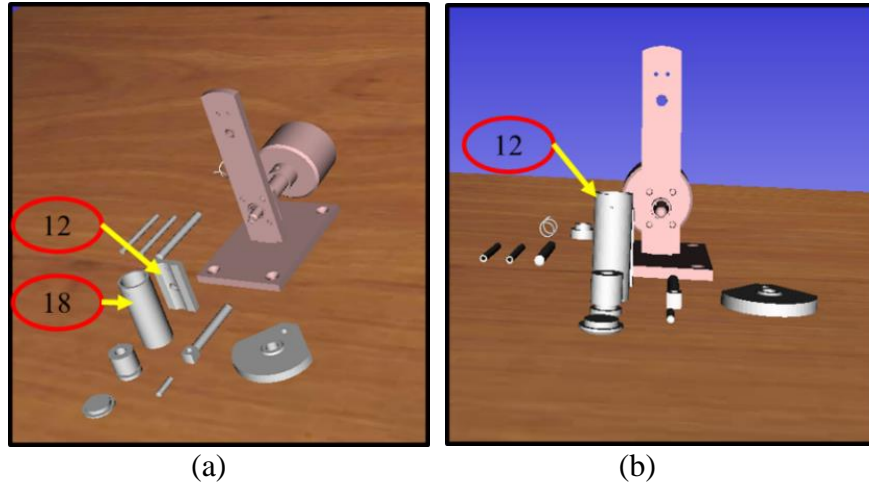


Figura 5.13. Cambios para mejorar el ensamble virtual: a) configuración anterior y b) configuración actual.

Continuando con las pruebas piloto, la Figura 5.14 muestra que las piezas 15, 19 y 20 deben ser rotadas 90°, mientras que las piezas 22 y 23 deben rotarse 180° para ser ensambladas en su posición final. Por lo que se sugiere un análisis de estabilidad con el propósito de orientar inicialmente estas piezas de acuerdo a su orientación final.

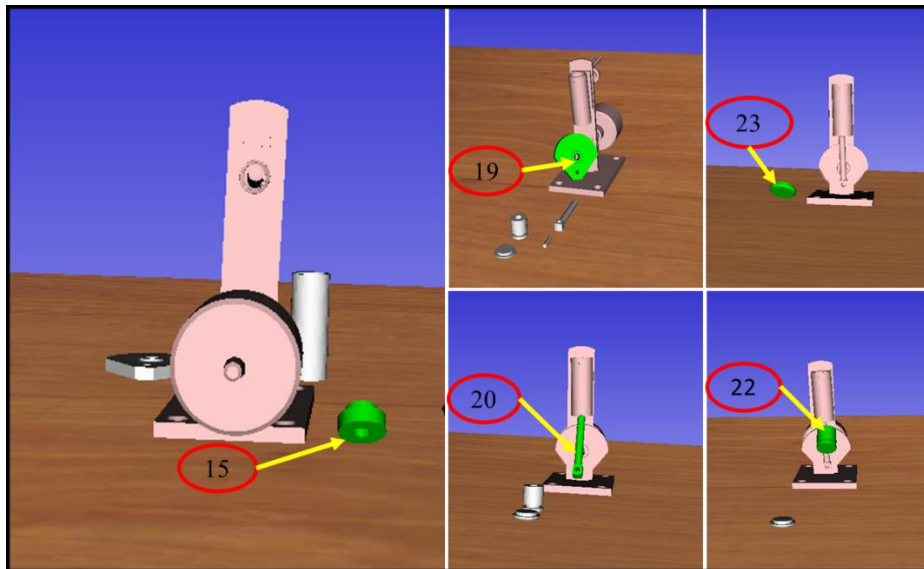
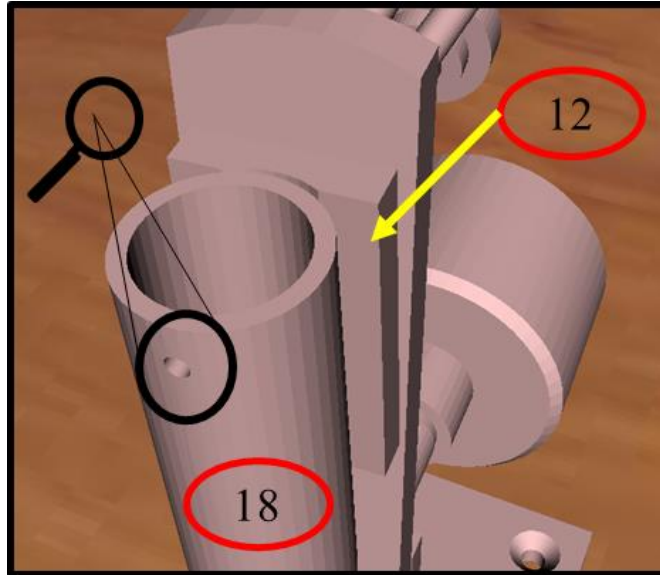


Figura 5.14. Rotación de las piezas 15, 19, 20, 22 y 23 para mejorar el ensamble virtual.

Por último, La Figura 5.15 muestra que una vez colocada la pieza 18 en la pieza 12, surge otro detalle similar al presentado en la Figura 5.12. La pieza 18 tiene un agujero en la parte superior como se muestra en la Figura 5.15. La pieza 12 también tiene el mismo agujero, de tal manera que estos tienen que alinearse ya que tienen como función la admisión y escape de aire. Por lo tanto, la pieza 18 se debe girar 180° para ubicarse en su orientación correcta.



5.15. Pieza mal ensamblada.

Todos estos “pequeños detalles” en la configuración inicial de las piezas y que resultan al momento de analizar un ensamble por primera vez, son muy difíciles de detectar mediante los métodos tradicionales de análisis de ensambles. Sin embargo, la interacción de los objetos virtuales con la experiencia e intuición del diseñador en el sistema HAMS, permiten detectar estos problemas en una etapa temprana del proceso de ensamble y realizar las correcciones y mejoras necesarias para lograr un mejor desempeño del ensamble en el mundo real.

5.2.2.3. Análisis de estabilidad

De las pruebas piloto de ensamble se observa que las piezas {2, 3, 8, 10, 15, 19, 20, 22 y 23} tienen que ser rotadas para poder ser ensambladas, esto provoca un aumento en la manipulación de las piezas, resultando en un mayor tiempo de ensamble. Por lo que se propone importar las piezas antes mencionadas de acuerdo con su orientación final. Sin embargo, es necesario realizar un análisis de estabilidad a estas piezas, ya que algunas piezas pueden presentar inestabilidad en su orientación final, y esto resultaría contraproducente para el desempeño del ensamble. La estabilidad virtual se define como el equilibrio inalterable que presentan las piezas con respecto al paso del tiempo, es decir, las piezas permanecen inmóviles al efecto de la gravedad virtual.

El análisis de estabilidad en HAMS permite visualizar el número de giros mínimos que una pieza puede tener antes de ser ensamblada desde una configuración inicial estable. Es decir, la pieza al ser tomada debe ser totalmente estable para que el usuario pueda sujetarla sin titubeos ni vacilaciones. La Figura 5.16 muestra el análisis de estabilidad para la pieza 2, en donde 2 y 2' representan la orientación inicial y final de la pieza respectivamente. En la Figura 5.16a se observa que la pieza 2' se coloca con su orientación final, sin embargo, si se observan las Figura 5.16 (b-c), se puede ver que la pieza 2' en esta orientación es altamente inestable, por lo tanto, la orientación propuesta se descarta y se mantiene la orientación anterior inicial.

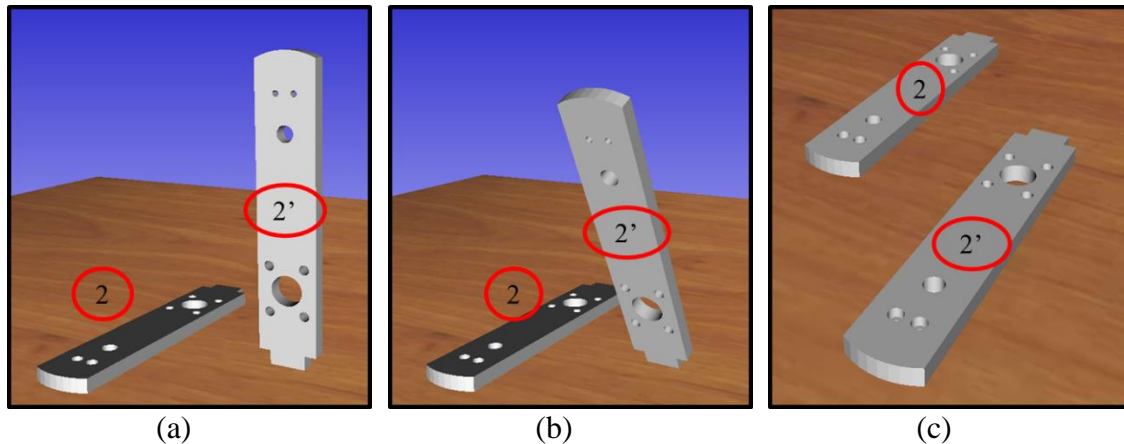


Figura 5.16. Análisis de estabilidad de la pieza 2: a) piezas ubicadas en su posición inicial, b) pieza 2' inestable y c) colapso de la pieza 2'.

La Figura 5.17 muestra el resultado del análisis de estabilidad de las piezas restantes, mostrando las piezas con la nueva orientación propuesta y estable. Las Figuras 5.17 (a, b y c) muestran las piezas 3', 8' y 10' respectivamente con su orientación correcta y ergonómica para el operador. Por otro lado, las Figuras 5.17 (e-f) muestran estabilidad virtual, sin embargo, son sensibles a salir del reposo si son perturbadas por otra pieza, es decir, las piezas 19' y 20' pueden caer si otra pieza entra en contacto con ellas, por lo que resulta importante observar las trayectorias de las piezas vecinas para decidir si es factible la nueva orientación.

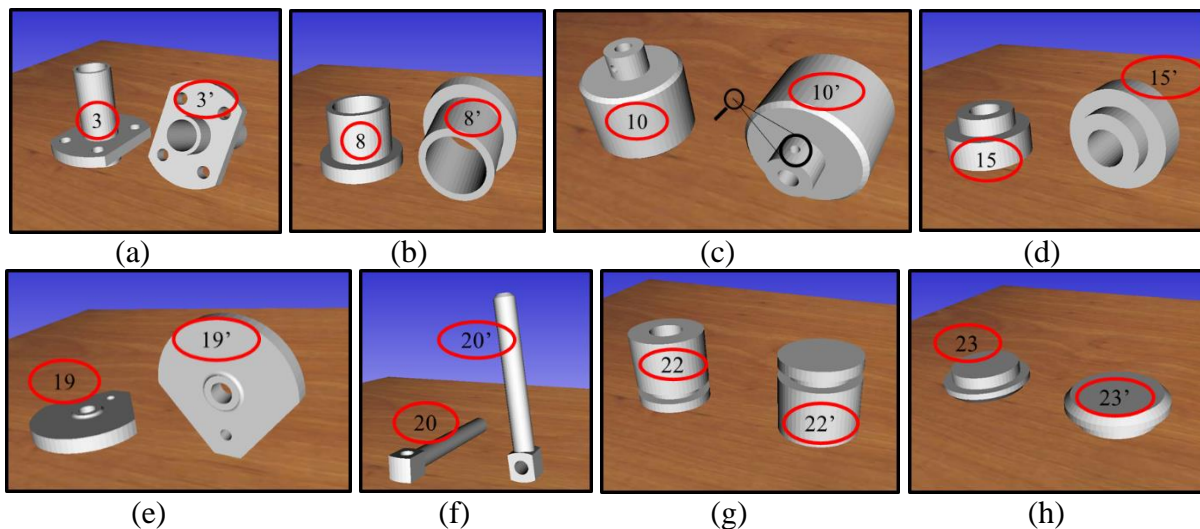


Figura 5.17. Análisis de estabilidad: a) pieza 3, b) pieza 8, c) pieza 10, d) pieza 15, e) pieza 19, f) pieza 20, g) pieza 22 y h) pieza 23.

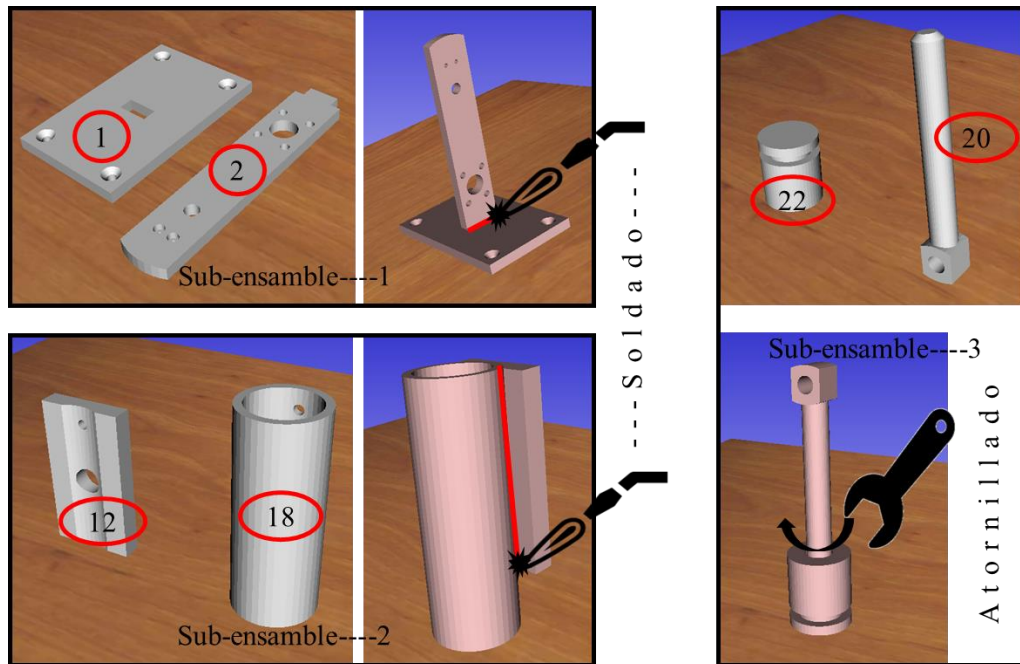


Figura 5.19. Sub-ensambles propuestos para un mejor realismo del ensamble virtual.

| Lista de partes | | | | | | |
|-----------------|---|-----------------|--|-----------|--|--------------------|
| No. pieza | Modelo | Nombre | | No. pieza | Modelo | Nombre |
| 1 |  | Base | | 11 |  | Tornillo Ch_1 |
| 2 |  | Biela | | 12 |  | Tornillo Ch_2 |
| 3 |  | Casquillo | | 13 |  | Tornillo Ch_3 |
| 4 |  | Cigüeñal | | 14 |  | Tornillo Ch_4 |
| 5 |  | Chumacera | | 15 |  | Tornillo B. |
| 6 |  | Manivela | | 16 |  | Tornillo V. |
| 7 |  | Pivote esférico | | 17 |  | Tubo |
| 8 |  | Plato | | 18 |  | Tubo |
| 9 |  | Resorte | | 19 |  | Tuerca moleteada |
| 10 |  | Tapa | | 20 |  | Volante de inercia |

Figura 5.20. Piezas del motor de aire, considerando los sub-ensambles propuestos.

La Figura 5.20 muestra las 20 piezas y subensambles (no. de pieza 1, 2 y 3) involucrados en el ensamble del motor. El nuevo acomodo inicial de las piezas en la escena virtual se muestra en la Figura 5.21, en donde se pueden observar los sub-ensambles ya conformados como piezas individuales. De aquí en adelante la referencia a las piezas se hará con la numeración de acuerdo a la Figura 5.20.

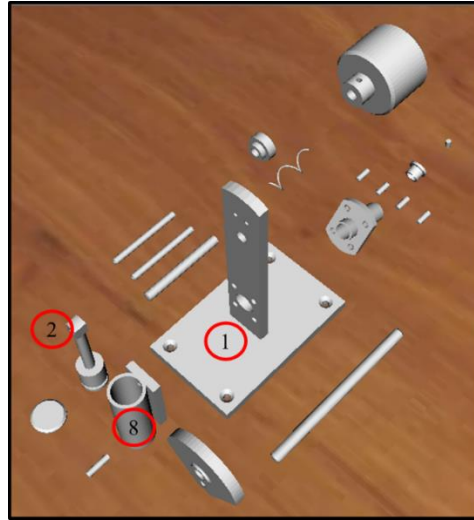


Figura 5.21. Nueva configuración de ensamble, considerando los sub-ensambles propuestos.

5.2.2.5. Análisis de interferencia

Una restricción de coplanaridad entre la pieza 4 y 6 es el ensamble correcto, Figura 22. Sin embargo, la pieza 4 actualmente carece de tope o señal que sirva como guía para su correcto ensamble. Por lo anterior resulta complicado lograr la coplanaridad de ambas piezas, provocando fácilmente un problema de interferencia.

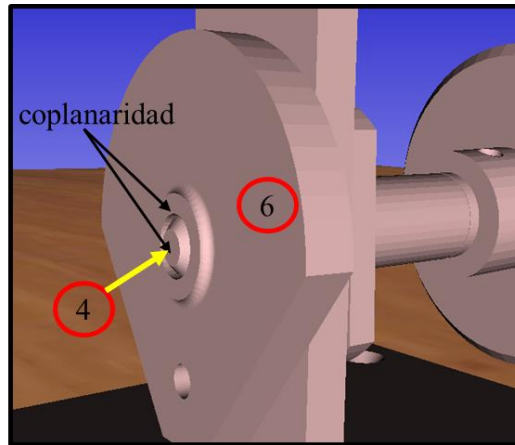


Figura 22. Coplanaridad entre la pieza 6 y 4.

La Figura 5.23 muestra el problema de interferencia entre la pieza 2 y 4, invisible para las técnicas tradicionales de ensamble. La pieza 4 es clave para concluir el ensamble del motor de aire, de la pieza 4 depende el ensamble preciso de la pieza 6 y por ende el resto de las piezas finales a ensamblar. Si la pieza 4 se ensambla con una pequeña imprecisión, como se muestra en la Figura 5.23a, ocasiona un mal ensamble en cadena, que puede resultar en no poder ensamblar correctamente la pieza 2. La Figura 5.23b muestra que la trayectoria de ensamble de la pieza 2, es obstaculizada por la pieza 4 que se ensambló ligeramente fuera de su posición correcta. Para corregir este error, se tiene que hacer un desensamble. Primero se desensambla la pieza 16 y posteriormente la pieza 20. Una vez realizado esto, se toma la pieza 4 para colocarla correctamente, para después volver a ensamblar las piezas 20 y 16, Figura 5.23c. Resulta obvio que estos movimientos tendrán un impacto negativo en el tiempo final del ensamble. Por lo tanto, la pieza 4 debe ser colocada correctamente desde un principio.

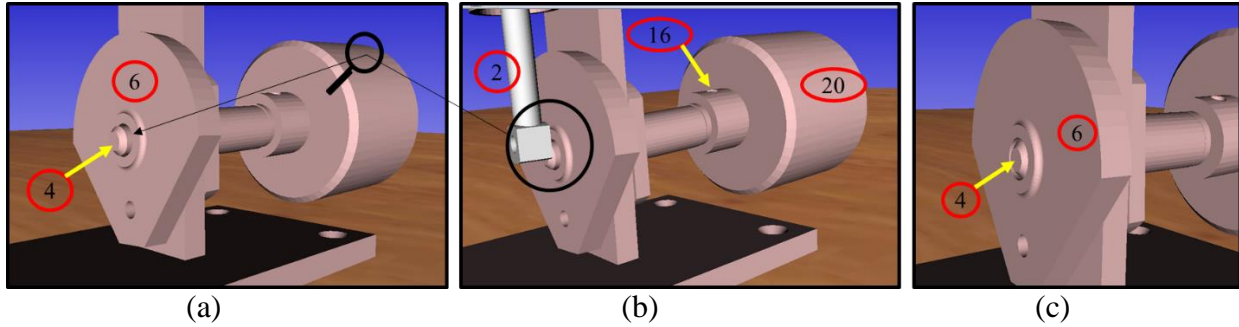


Figura 5.23. Análisis de interferencia: a) pieza 4 mal ensamblada y b) interferencia de la pieza 2 con la pieza 4 y c) ensamble correcto de la pieza 4 con la pieza 6.

Para corregir este potencial problema de ensamble y garantizar que la pieza 4 sea ensamblada de manera adecuada, se añade una muesca a la pieza 4 (Figura 5.24a), la cual deberá coincidir con el orificio de la pieza 20, logrando que la pieza 16 sea insertada correctamente para cerrar el ensamble entre la pieza 4 y 20. La Figura 5.24b muestra una vista de perfil del ensamble correcto entre la pieza 4 y 6, en donde la pieza 4 no se observa ya que es coincidente con la pieza 6.

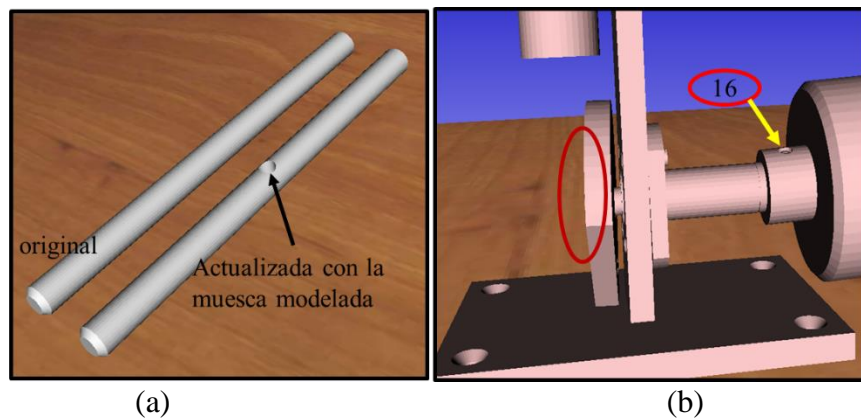


Figura 5.24. Corrección de interferencia: a) modelado de muesca para garantizar el ensamble y b) vista de perfil del ensamble correcto.

5.2.2.6. Análisis de trayectorias de ensamble

Al realizar el ensamble del motor de aire se observa que la pieza 2 puede alcanzar su posición final a través de dos trayectorias diferentes: la primera consiste en introducir la pieza 2 por la parte inferior de la pieza 8, ver Figura 5.25a; y en la segunda la pieza 2 se introduce por la parte superior de la pieza 8, ver Figura 5.25b. Ambas trayectorias son factibles de realizar, por lo que resulta necesario analizar cada una de estas trayectorias para identificar cual es la mejor con base a un criterio, tal como el costo energético.

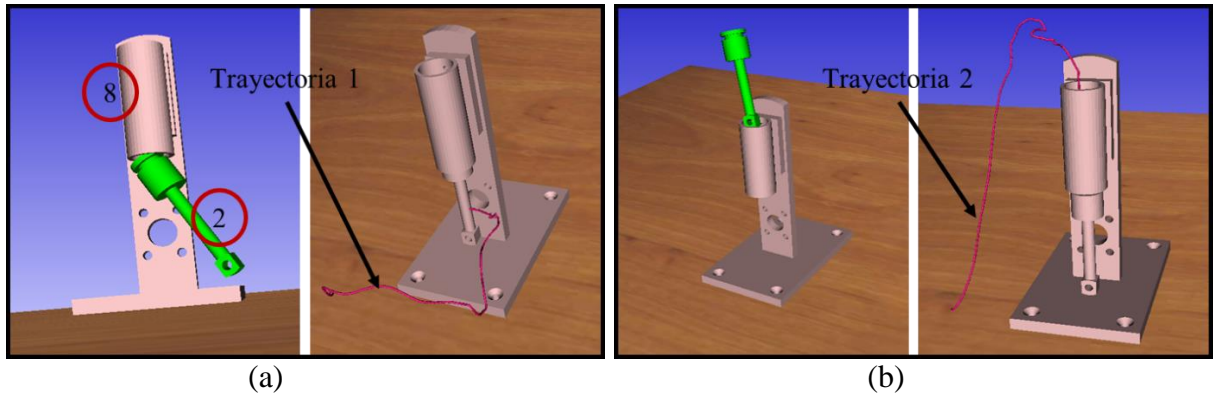


Figura 5.25. Análisis de energía: a) trayectoria de ensamble 1 y b) trayectoria de ensamble 2.

La Tabla 5.3 muestra un análisis de los principales criterios que se evaluaron en el ensamble de la pieza 2 con la pieza 8. La diferencia más importante entre las dos trayectorias es la energía potencial (PE) necesaria para llevar la pieza a su posición final. Se observa que la trayectoria 2 requiere una energía potencial de 1.57 (N-m) mientras que la trayectoria 1 requiere una energía potencial 80% menor (0.29 N-m). La eficiencia de la energía potencial (PEE) es de 58.59% para la trayectoria 2 y 93.1% para la trayectoria 1. Por lo anterior, la trayectoria 1 resulta más efectiva de acuerdo a costo energético. El tiempo total de ensamble (TCT) es muy similar en ambos casos, por lo tanto, en términos de tiempo, ambas trayectorias pueden ser utilizadas. La distancia efectiva (EAD) que recorre la pieza 2 es mayor en la trayectoria 2 que en la trayectoria 1. Por otro lado se observa que la eficiencia total (TEE) de la trayectoria 2 es más mayor que la trayectoria 1 con 52.82% y 32.97% respectivamente. Sin embargo, para este caso en particular se puede observar que la trayectoria 1 tiene un recorrido sinuoso provocado por el diseñador al manipular la pieza, lo cual ocasionó que la eficiencia total disminuyera.

Tabla 5.3. Criterios evaluados de ambas trayectorias de ensamble.

| Trayectoria | TCT | EAD | WS | PE | TE | EPE | TEE | PEE |
|-------------|-----|-----|------|------|------|------|-------|-------|
| 1 | 22 | 550 | 7.06 | 0.29 | 0.82 | 0.27 | 32.97 | 93.1 |
| 2 | 25 | 806 | 8.82 | 1.57 | 1.74 | 0.92 | 52.82 | 58.59 |

El espacio de trabajo (WS) para ambas trayectorias es muy similar, 7.06 cm³ y 8.82 cm³ para la trayectoria 1 y 2, respectivamente. Sin embargo, aunque son muy similares en volumen, su forma es diferente, como se muestra en la Figura 5.26. Por tal motivo, el espacio de trabajo se vuelve un criterio relevante cuando se tienen limitantes espaciales dentro de la planta.

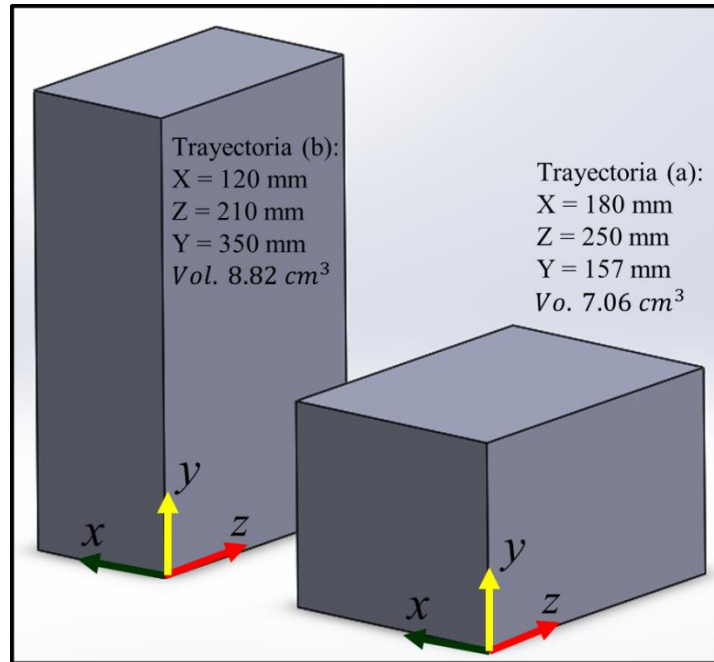


Figura 5.26. Espacio de trabajo de ambas trayectorias de ensamble.

Por lo anterior se determina que en el ensamble completo del motor de aire la pieza 2 deberá realizarse con la trayectoria 1, la cual fue la que obtuvo los mejores resultados en la mayoría de los criterios o métricas de ensamble. Para llegar a esta conclusión, también se consideró que el ensamble de la pieza 2 en la 8 corresponde a las últimas operaciones de ensamble para completar la tarea del motor de aire, por lo que el espacio de trabajo ya está despejado para seguir la trayectoria 1. Si por el contrario, esta parte del ensamble se llevara a cabo en las primeras operaciones, se podría considerar la trayectoria 2 debido al gran número de piezas que se tendrían en la mesa de trabajo, dificultando utilizar la trayectoria 1. Adicionalmente es importante mencionar que el módulo de planeación provee mucha información del ensamble para su análisis, evaluación y optimización por parte del diseñador o analista.

5.2.2.7. Secuencias de ensamble

El total de secuencias de ensamble del motor de aire se pueden calcular mediante permutaciones sin repetición, ya que después de elegir una pieza, no puede elegirse otra vez. Así que las posibilidades de ensamblar el motor de aire resultan ser 20 factorial (más de 2.4×10^{18}), entre secuencias factibles y no-factibles. Los algoritmos genéticos son capaces de buscar secuencias factibles de ensamble; sin embargo, resulta un método muy abstracto, exhaustivo y de alto costo computacional debido a que se debe analizar una por una las secuencias de ensamble. La Tabla 5.4 muestra el número de secuencias de ensamble que tendría un producto con 20 hasta 24 piezas. Se observa que conforme aumenta el número de piezas, el número de secuencias aumenta exponencialmente.

Tabla 5.4. Secuencias de ensamble.

| # piezas | # secuencias de ensamble | # Incrementos (con respecto a 20 piezas) |
|----------|---------------------------------|--|
| 20 | 2,432,902,008,176,640,000 | 1 |
| 21 | 51,090,942,171,709,400,000 | 21 |
| 22 | 1,124,000,727,777,600,000,000 | 462 |
| 23 | 25,852,016,738,884,900,000,000 | 10,626 |
| 24 | 620,448,401,733,239,000,000,000 | 255,024 |

Si se tuviera que utilizar un método tradicional para analizar las secuencias factibles de ensamble del motor de aire con 20 piezas a ensamblar, sería un caos el detectarlas por la cantidad de líneas que se cruzan. La Figura 5.27 muestra el método tradicional llamado diagrama de enlace, el cual permite conectar por medio de nodos las relaciones que guardan las piezas entre sí. Por ejemplo, la pieza 3 no puede ser ensamblada antes que la pieza 5, o la pieza 9 no puede ser ensamblada antes que las piezas 1, 7 y 19.

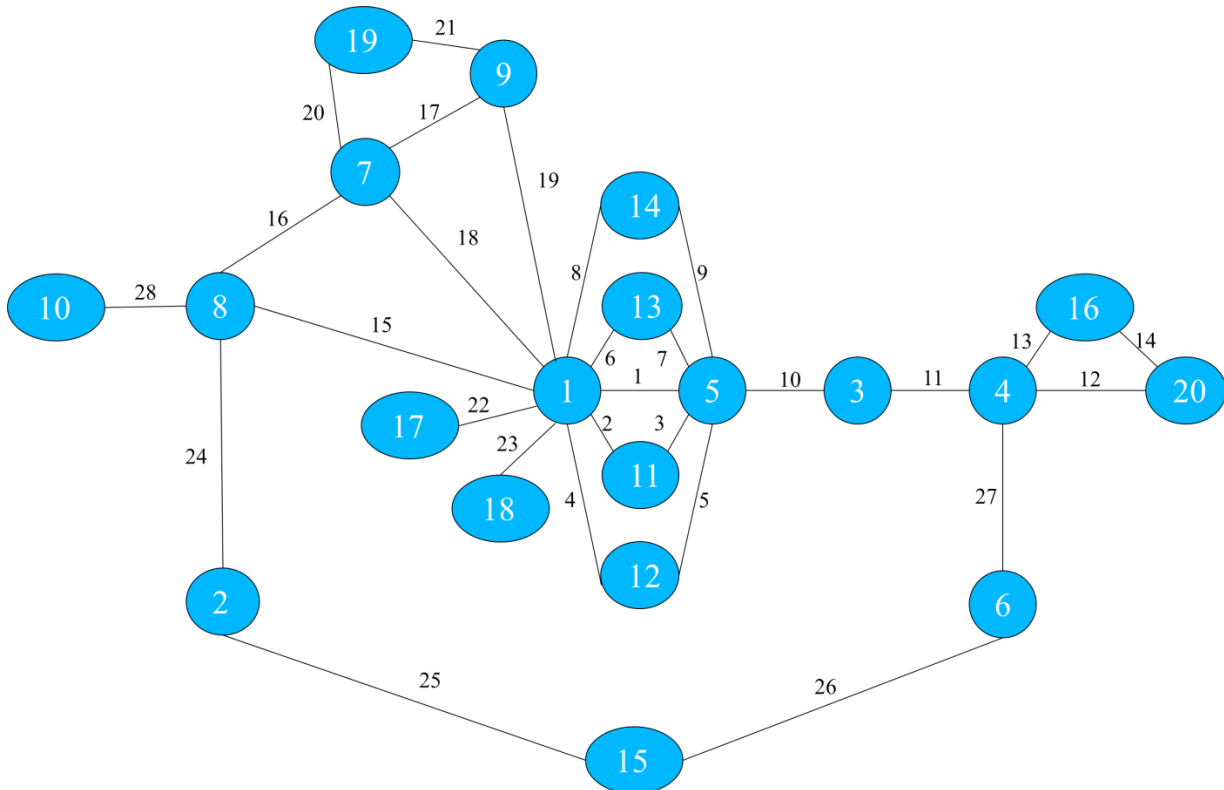


Figura 5.27. Diagrama de enlaces.

A partir del diagrama de enlaces, se crea una matriz con el número de enlaces. Para el motor de aire el número de enlaces corresponde a 28. La Figura 5.28 muestra el inicio del análisis de las secuencias factibles de ensamble para el motor de aire. Este análisis comienza con una matriz vacía que contiene las 28 relaciones entre las piezas del motor de aire, extraídas del diagrama de enlace. Posteriormente se va llenando la matriz a partir de dichas relaciones. Como se puede observar, el diagrama se va complicando conforme se va generando el ensamble, a tal grado de ser muy confuso para el analista o diseñador. Estos diagramas son obsoletos para ensambles con un número considerable de piezas, por lo que sólo se aplican a ensambles de 4 a 5 piezas.

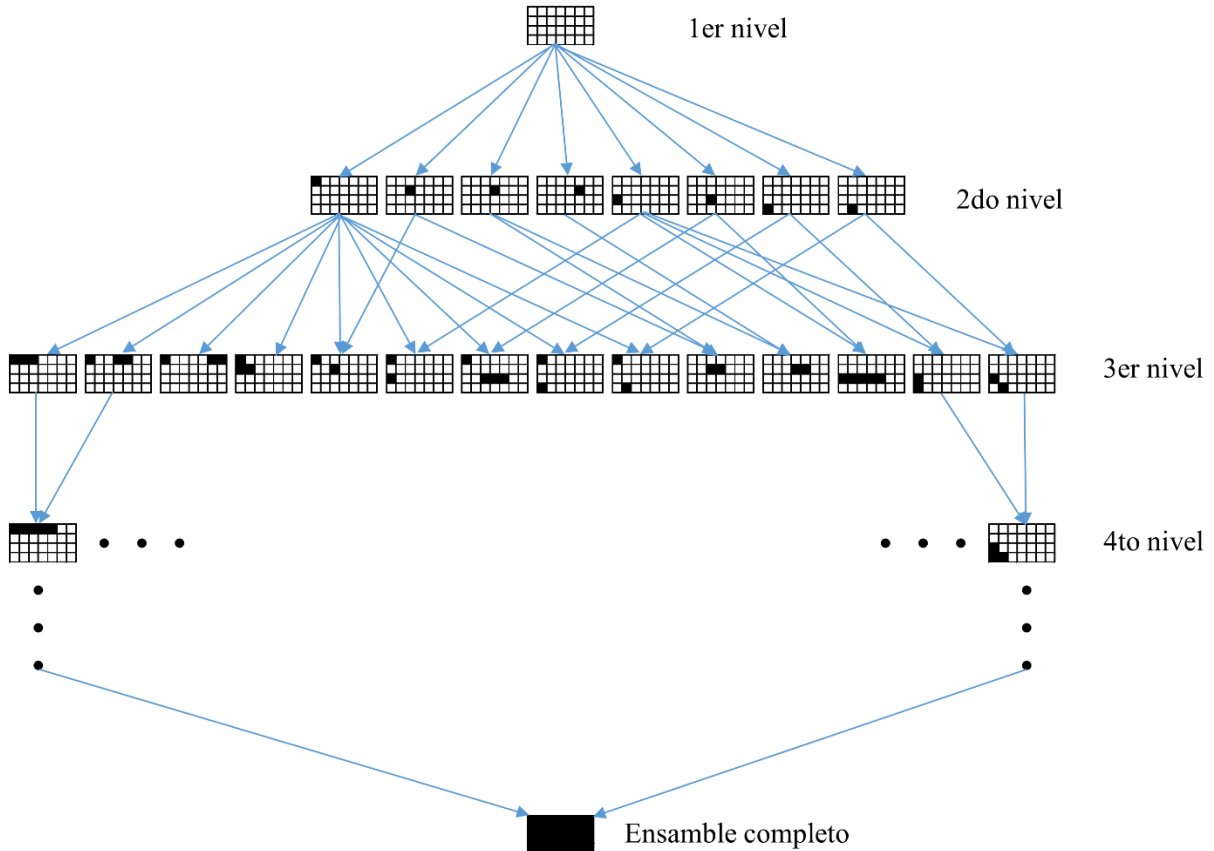


Figura 5.28. Representación gráfica de todas las secuencias validas de ensamble.

En general, los métodos tradicionales resultan claros para ensambles con un número pequeño de piezas, sin embargo se complican conforme el número de piezas aumenta, llegando a ser imprácticos e ineficientes.

5.2.2.8. Secuencias de ensamble factible y no-factible

Las secuencias factibles de ensamble son aquellas que se pueden llevar a cabo físicamente con los componentes reales; por lo tanto las secuencias no-factibles son secuencias ilógicas, incoherentes o físicamente imposibles de realizar. La Figura 5.29a muestra una secuencia de ensamble factible, en cambio La Figura 5.29b muestra una secuencia de ensamble no-factible, ya que la pieza 9 no se puede ensamblar si la pieza 19 ya ha sido ensamblada.

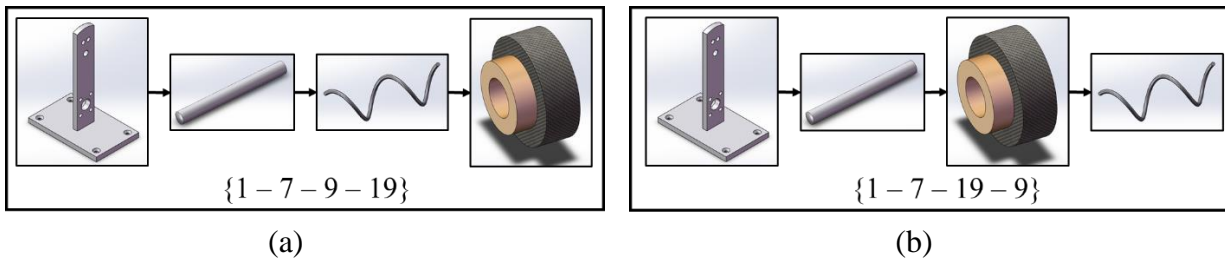


Figura 5.29. Secuencia de ensamble: a) factible y b) no-factible.

Algunas secuencias de ensamble no-factibles resultan evidentes y fáciles de detectar, en cambio, otras secuencias de ensamble no-factibles sólo pueden ser detectadas al momento de llevar a cabo el ensamble de manera física. Mediante el uso del sistema HAMS las secuencias de ensamble no-

factibles pueden ser detectadas de manera virtual por parte del diseñador o especialista, evitando así analizar secuencias de ensamble que en el mundo real son imposibles de realizar. A continuación se muestra una serie de condiciones que se deben cumplir para tener secuencias factibles en el ensamble virtual del motor de aire, las cuales fueron identificadas después de realizar las pruebas piloto del ensamble:

1. La pieza 1 siempre debe de ir primero, por ejemplo $\{1 - \dots\}$, de lo contrario, será una secuencia de ensamble no-factible.
2. La pieza 5 y por lo menos una de las piezas 11, 12, 13 o 14 deben ser ensambladas consecutivamente, por ejemplo $\{1 - \dots - 5 - 11 - \dots\}$, de lo contrario, será una secuencia no-factible.
3. La pieza 5 siempre debe preceder a la pieza 3, la pieza 3 debe preceder a la pieza 4, la pieza 4 debe preceder a la pieza 20 y la pieza 20 debe preceder a la pieza 16, por ejemplo $\{1 - \dots - 5 - \dots - 3 - \dots - 4 - \dots - 20 - \dots - 16 - \dots\}$, de lo contrario, será una secuencia no-factible.
4. Las piezas 8 y 7 deben ser ensambladas consecutivamente, por ejemplo $\{1 - \dots - 8 - 7 - \dots\}$, de lo contrario, será una secuencia no-factible.
5. La pieza 7 debe preceder a la pieza 9 y la pieza 9 debe preceder a la pieza 19, por ejemplo $\{1 - \dots - 7 - \dots - 9 - \dots - 19 - \dots\}$, de lo contrario, será una secuencia no-factible.
6. La pieza 4 debe preceder a la pieza 6, la pieza 8 debe preceder a la pieza 2 y a la pieza 10, por ejemplo $\{1 - \dots - 4 - \dots - 6 - \dots - 8 - \dots - 2 - \dots - 10 - \dots\}$, de lo contrario, será una secuencia no-factible.
7. La pieza 6 debe preceder a la pieza 2, la pieza 2 debe preceder a la pieza 15, por ejemplo $\{1 - \dots - 6 - \dots - 2 - \dots - 15 - \dots\}$, de lo contrario, será una secuencia no-factible.

Una de las grandes ventajas del módulo de planeación en HAMS es que simula el comportamiento físico de los objetos virtuales, por lo que los objetos se comportan como si fueran reales y cualquier secuencia de ensamble no factible no podrá realizarse. Si el planeador por error intenta analizar una secuencia de ensamble no-factible, por ejemplo $\{1 - 8 - 7 - 19 - 9\}$, después de haber ensamblado la pieza 7, el planeador tomará la pieza 19 y la ensamblará, posteriormente tomará la pieza 9 y tratará de ensamblarla, sin embargo físicamente no se puede ensamblar la pieza 9, por lo que tendrá que remover la pieza 19 de su lugar para poder introducir primero la pieza 9. Una vez ensamblada la pieza 9, el planeador tomará nuevamente la pieza 19 y la ensamblará. Una vez terminado el ensamble el planeador tendrá de manera automática un reporte del ensamble realizado. HAMS dará como resultado la secuencia de ensamble correcta en la sección de *PARTICULAR ASSEMBLY INFORMATION* del reporte o plan de ensamble, es decir, el orden de las piezas en esta sección será $\{1 - 8 - 7 - 9 - 19\}$. De esta manera, no importa con que secuencia inicie el planeador (secuencia factible o no-factible), si logra hacer el ensamble completo, HAMS siempre dará como resultado la secuencia factible del ensamble realizado.

Después del análisis para lograr un mejor ensamble del motor de aire, así como la detección y eliminación de las secuencias no-factibles de ensamble, se obtuvieron 4 secuencias factibles de ensamble dentro del módulo de planeación de HAMS. Estas secuencias de ensamble factibles son:

1. $\{1 - 8 - 7 - 9 - 19 - 17 - 18 - 5 - 11 - 12 - 13 - 14 - 3 - 4 - 20 - 16 - 6 - 2 - 15 - 10\}$.
2. $\{1 - 5 - 11 - 12 - 13 - 14 - 3 - 4 - 20 - 16 - 8 - 7 - 9 - 19 - 17 - 18 - 6 - 2 - 15 - 10\}$.
3. $\{1 - 17 - 18 - 8 - 7 - 9 - 19 - 5 - 11 - 12 - 13 - 14 - 3 - 4 - 20 - 16 - 6 - 2 - 15 - 10\}$.
4. $\{1 - 5 - 11 - 12 - 13 - 14 - 8 - 7 - 3 - 2 - 17 - 9 - 4 - 6 - 19 - 15 - 20 - 16 - 10 - 18\}$.

5.3. Balanceo de línea de fabricación

La producción en serie fue un proceso revolucionario en la producción industrial cuya base es la línea de ensamble en donde las partes son añadidas conforme a sub-ensambles que se mueve de una estación de trabajo a otra hasta que se produce el ensamble final. Las líneas de ensamble son el método más común para ensamblar casi cualquier producto, desde automóviles, electrónicos, electrodomésticos hasta juguetes.

5.3.1. Definición de las estaciones de trabajo

Debido a que el motor de aire cuenta con 20 piezas y en la industria los productos no son ensamblados por una sola persona, se realizó un análisis del ensamble del motor de aire considerando estaciones de ensamble con el objetivo de diseñar la línea de producción. El ensamble total del motor se dividió en ocho tareas, las cuales se muestran en la Figura 5.30. Cada tarea se analizó en el módulo de planeación de HAMS con el objetivo de obtener el mejor plan de ensamble para cada estación, así como su TCT, el cual se considera como el tiempo de la tarea para el análisis del balanceo de línea. Las tareas definidas son:

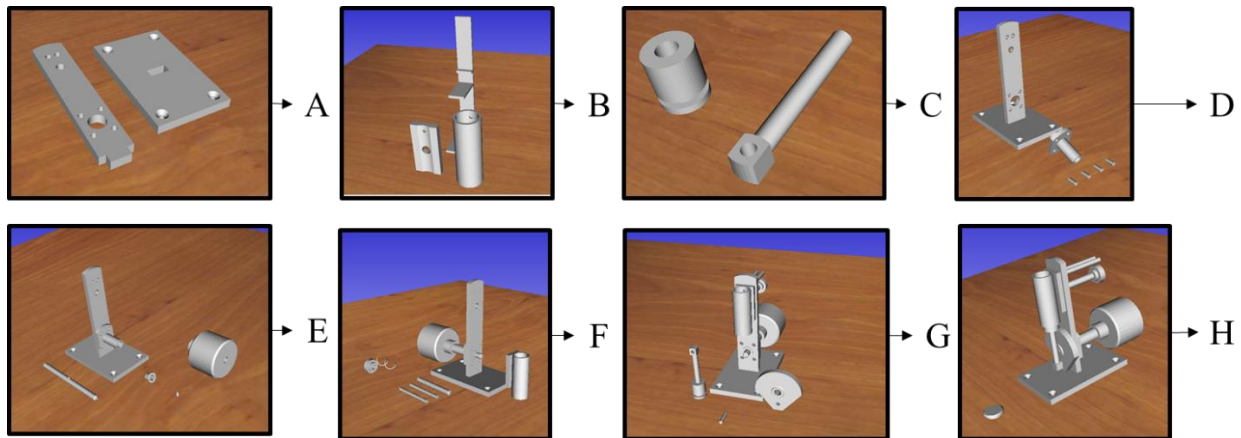


Figura 5.30. Estaciones de ensamble.

- *Tarea A.* Consiste en unir la base y el soporte por medio de soldadura para crear el sub-ensamble que será la base de todo el ensamble y pasará por todas las estaciones para que el resto de las piezas sean agregadas hasta completar el ensamble. Para esta tarea se analizó una sola secuencia de ensamble que es {base, soporte}; esto debido a que la intuición y experiencia del planeador afirman que la secuencia {soporte, base} carece de mucho sentido en el mundo real. Las instrucciones de ensamble generadas para esta tarea se muestran en la Figura 5.31.

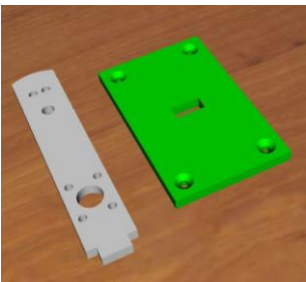
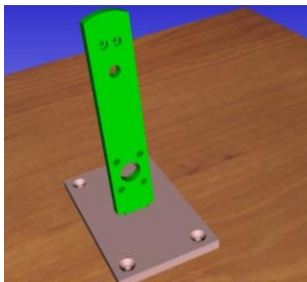
| Assembly instruction of: Estación_A | | | | | |
|---|---|------|--|---|---------|
| Part No. | | Name | Part No. | | Name |
| Assembly operation: 10 | | | Assembly operation: 20 | | |
|  | 1 | Base |  | 2 | Soporte |

Figura 5.31. Instrucciones de ensamble de la tarea A.

- Tarea B.* Consiste en unir el plato y el cilindro por medio de soldadura para crear el sub-ensamble que será utilizado como una sola pieza dentro de la tarea F. Para esta tarea, se analizó una sola secuencia de ensamble que es {plato, cilindro}. Las instrucciones de ensamble generadas para esta tarea se muestran en la Figura 5.32. Es importante mencionar que HAMS permite agregar piezas ajenas al ensamble para mejorar la visualización y el realismo de la tarea virtual de ensamble. En la Figura 5.32 se puede observar un herramental de sujeción, el cual permite colocar el plato y el cilindro en posición para ser soldada, sin esta pieza el ensamble virtual se puede llevar a cabo pero carecería de realismo debido a que el plato quedaría flotando al momento de unirlos.

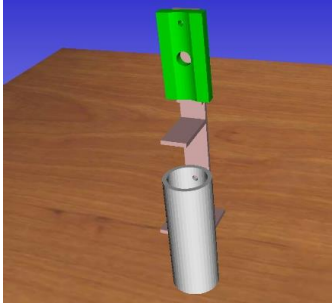
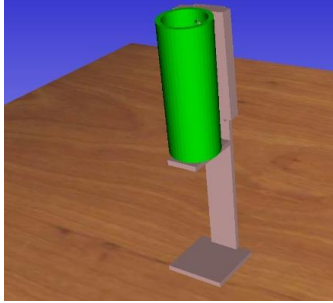
| Assembly instruction of: Estación_B | | | | | |
|--|---|------------|---|---|----------|
| Part No. | | Name | Part No. | | Name |
| Assembly operation: 10 | | | Assembly operation: 20 | | |
|  | 1 | Plato base |  | 2 | Cilindro |

Figura 5.32. Instrucciones de ensamble de la tarea B.

- Tarea C.* Consiste en unir la biela con el pistón para crear el sub-ensamble que será utilizado como una sola pieza dentro de la tarea G. Para esta tarea se analizó una sola secuencia de ensamble que es {pistón, biela}, debido a que la secuencia {biela, pistón} carece de sentido en el mundo real. Las instrucciones de ensamble generadas para esta tarea se muestran en la Figura 5.33.

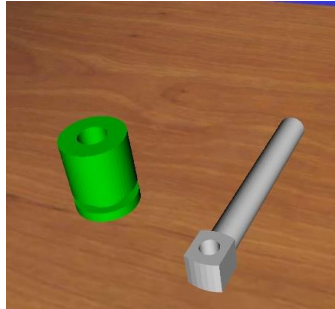
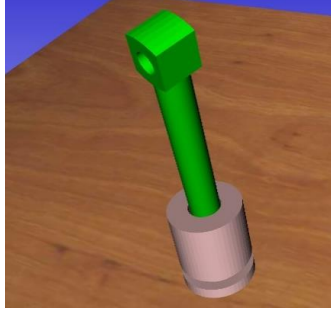
| Assembly instruction of: Estación_C | | | | | |
|---|---|--------|--|---|-------|
| Part No. | | Name | Part No. | | Name |
| Assembly operation: 10 | | | Assembly operation: 20 | | |
|  | 1 | Pistón |  | 2 | Biela |

Figura 5.33. Instrucciones de ensamble de la tarea C.

- *Tarea D.* Consiste en añadir la chumacera y los tornillos a la base del ensamble. Para esta tarea de ensamble se analizaron 4 secuencias diferentes de ensamble:
 - {Tarea A, chumacera, tornillo ch_1, tornillo ch_2, tornillo ch_3, tornillo_ch_4}
 - { Tarea A, chumacera, tornillo ch_2, tornillo ch_1, tornillo ch_3, tornillo_ch_4}
 - { Tarea A, chumacera, tornillo ch_1, tornillo ch_2, tornillo ch_4, tornillo_ch_3}
 - { Tarea A, chumacera, tornillo ch_3, tornillo ch_4, tornillo ch_1, tornillo_ch_2}

De cada secuencia se realizaron 5 repeticiones de ensamble dentro del módulo de planeación. Posteriormente los 20 planes de ensamble generados fueron evaluados y analizados con el objetivo de obtener el mejor plan de ensamble. Para este ensamble en particular, los tornillos ya tienen una posición definida en la chumacera, es decir, el tornillo ch_1 sólo podrá ser ensamblado en la posición 1, el tornillo ch_2 en la posición 2, y así sucesivamente, Figura 5.34. Permitir que el tornillo pueda ser ensamblado en cualquier posición aumentaría considerablemente el número de secuencias analizadas. Por ejemplo, se tendría que analizar el tornillo ch_1 en la posición 1, el mismo tornillo en la posición 2 y así sucesivamente, generando cuatro reportes para una misma secuencia de ensamble. Las instrucciones y secuencia del mejor plan de ensamble con base al criterio de mínimo TCT (130 segundos), se muestran en la Figura 5.35.

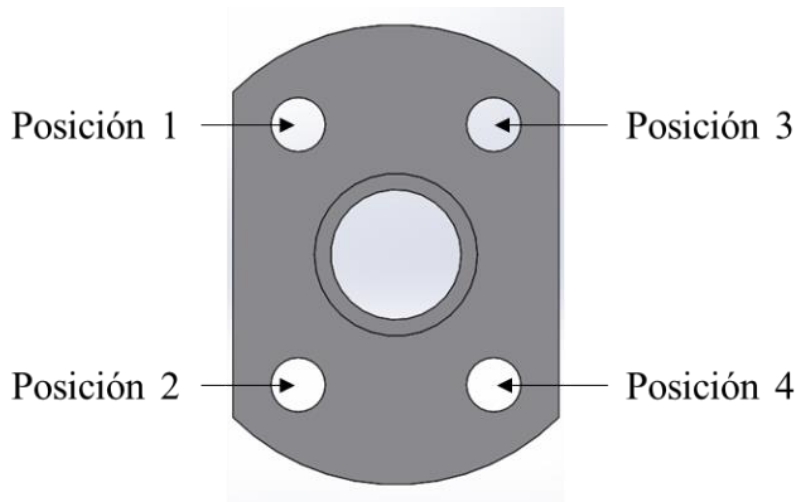


Figura 5.34. Ubicación de los tornillos.

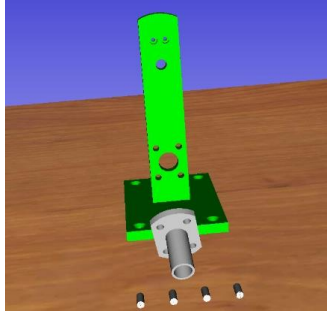
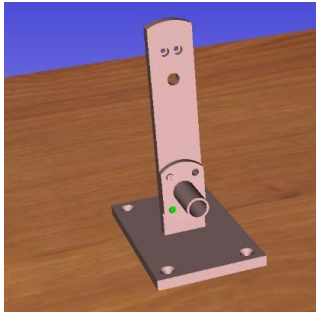
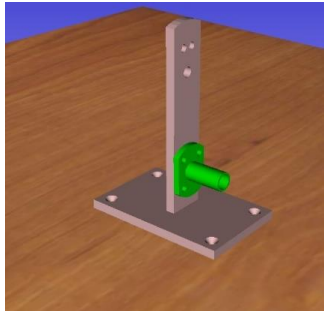
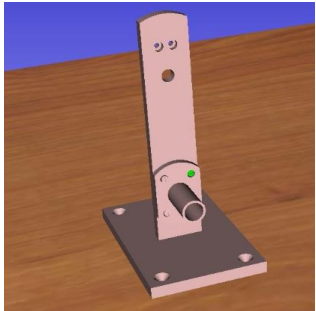
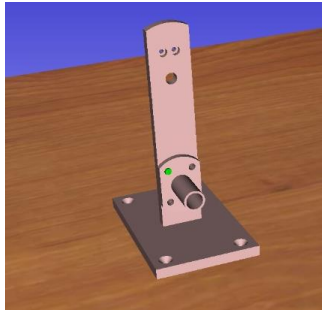
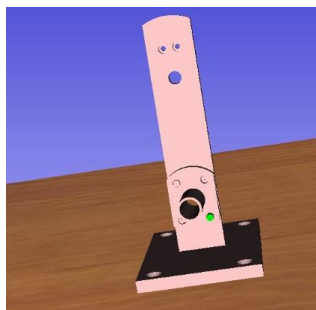
| Assembly instruction of: Estación_D | | | | | |
|---|---|------------|--|---|------------|
| Part No. | | Name | Part No. | | Name |
| Assembly operation: 10 | | | Assembly operation: 40 | | |
|  | 1 | Estación_A |  | 4 | Tornillo_2 |
| Assembly operation: 20 | | | Assembly operation: 50 | | |
|  | 2 | Chumacera |  | 5 | Tornillo_3 |
| Assembly operation: 30 | | | Assembly operation: 60 | | |
|  | 3 | Tornillo_1 |  | 6 | Tornillo_4 |

Figura 5.35. Instrucciones de ensamble de la tarea D.

- *Tarea E.* Consiste en continuar con el ensamble añadiendo el casquillo, cigüeñal, volante de inercia y tornillo. Se propusieron varias secuencias de ensamble para ser analizadas, sin embargo, se determinó que sólo existe una secuencia de ensamble factible que es {Tarea D, casquillo, cigüeñal, volante de inercia, tornillo V.}, cualquier otra secuencia de ensamble resulta ser no-factible. Las instrucciones de ensamble generadas para esta tarea se muestran en la Figura 5.36.

| Assembly instruction of: Estacion_E | | | |
|-------------------------------------|--------------|------------------------|--------------|
| Part No. Name | | Part No. Name | |
| Assembly operation: 10 | 1 Estación_D | Assembly operation: 40 | 4 Volante |
| Assembly operation: 20 | 2 Casquillo | Assembly operation: 50 | 5 Tornillo_V |
| Assembly operation: 30 | 3 Cigüeñal | | |

Figura 5.36. Instrucciones de ensamble de la tarea E.

- Tarea F. Consiste en continuar con el ensamble añadiendo el plato, pivote, resorte, tornillo moleteado y tubos. Para esta tarea de ensamble se propusieron 4 secuencias de ensamble factibles y no redundantes:
 - {Tarea E, tubo_1, tubo_2, plato, pivote, resorte, tornillo moleteado}
 - {Tarea E, tubo_1, plato, pivote, resorte, tornillo moleteado, tubo_2}
 - {Tarea E, plato, pivote, resorte, tornillo moleteado, tubo_1, tubo_2}
 - {Tarea E, pivote, plato, resorte, tubo_2, tornillo moleteado, tubo_1}

De cada secuencia se realizaron 5 repeticiones de ensamble dentro del módulo de planeación. Posteriormente los 20 planes de ensamble generados fueron evaluados y analizados en el módulo de evaluación de HAMS con el objetivo de obtener el mejor plan de ensamble con base en el criterio de mínimo TCT. Para esta tarea se consideró que el tubo_1 sólo podría ser ensamblado en la posición 1 y el tubo_2 en la posición 2, Figura 5.37. Las instrucciones y secuencia del mejor plan de ensamble, con un TCT de 131 segundos, se muestran en la Figura 5.38.

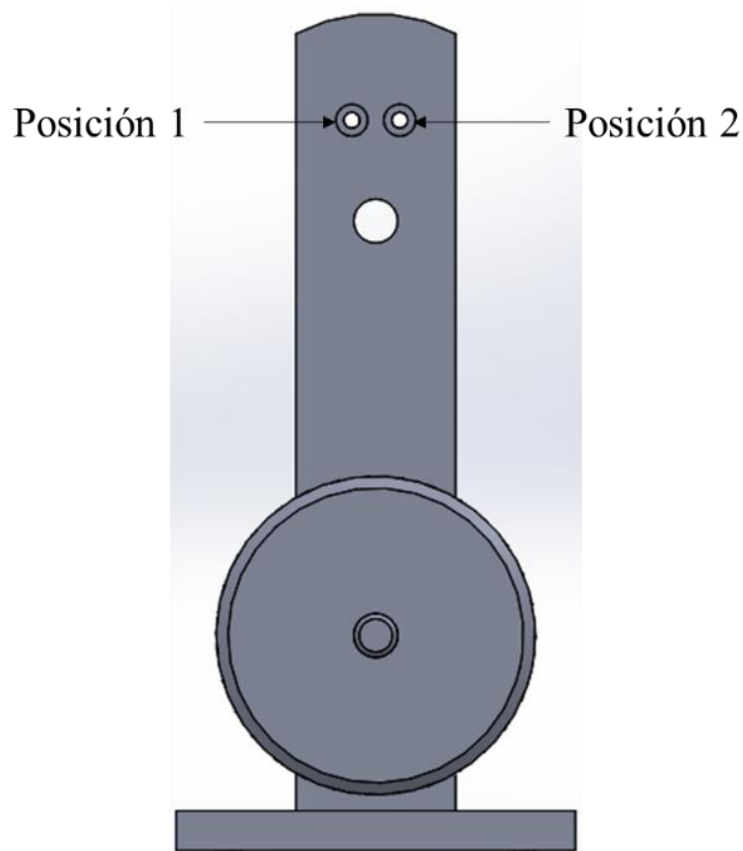


Figura 5.37. Ubicación de los tubos.

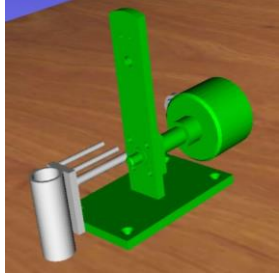
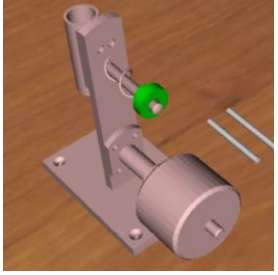
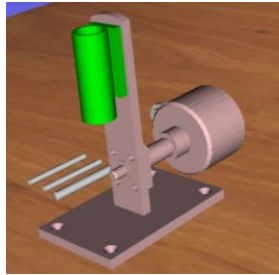
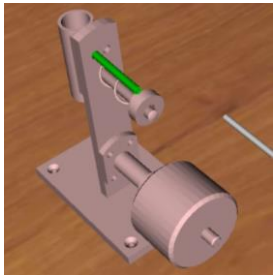
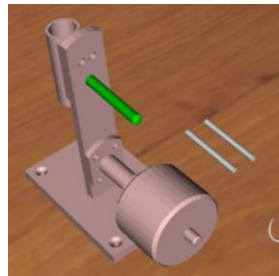

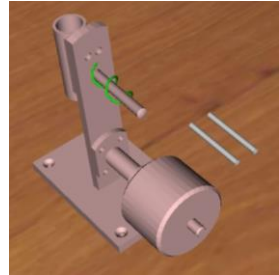
| Assembly instruction of: Estacion_F | | | |
|---|----------|------------|---|
| | Part No. | Name | Part No. Name |
| Assembly operation: 10  | 1 | Estación_E | Assembly operation: 50  |
| Assembly operation: 20  | 2 | Chumacera | Assembly operation: 60  |
| Assembly operation: 30  | 3 | Pivote | Assembly operation: 70  |
| Assembly operation: 40  | 4 | Resorte | |

Figura 5.38. Instrucciones de ensamble de la tarea F.

- Tarea G. Consiste en continuar con el ensamble añadiendo la manivela, pistón y tornillo. Se propusieron varias secuencias de ensamble para ser analizadas, sin embargo se determinó que sólo tiene una secuencia de ensamble factible que es {Tarea F, manivela, pistón, tornillo_B}, cualquier otra secuencia de ensamble resulta ser no-factible. Las instrucciones de ensamble generadas para esta tarea se muestran en la Figura 5.39.

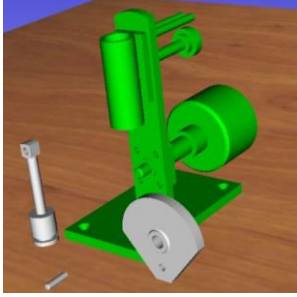
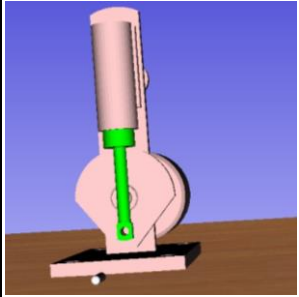
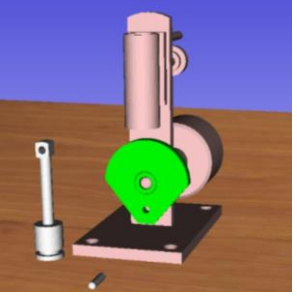
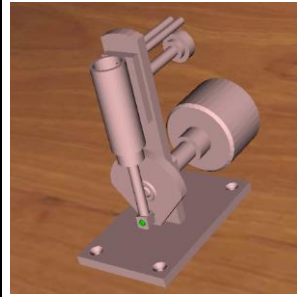
| Assembly instruction of: Estacion_G | | | |
|---|------------|--|------------|
| Part No. Name | | Part No. Name | |
| Assembly operation: 10  | | Assembly operation: 30  | |
| Assembly operation: 20  | | Assembly operation: 40  | |
| 1 | Estación_F | 3 | Tornillo_2 |
| 2 | Manivela | 4 | Tornillo_B |

Figura 5.39. Instrucciones de ensamble de la tarea G.

- Tarea H. Consiste en unir la tapa al plato por medio de soldadura y así finalizar con el ensamble del motor de aire, Figura 5.40. La secuencia de ensamble para esta tarea es {Tarea G, tapa}.

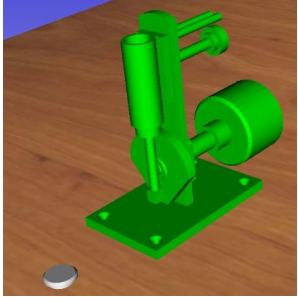
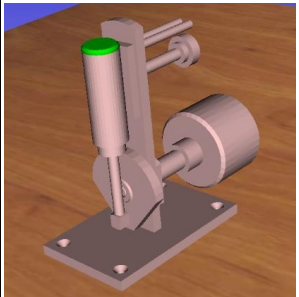
| Assembly instruction of: Estacion_H | | | |
|---|------------|--|------|
| Part No. Name | | Part No. Name | |
| Assembly operation: 10  | | Assembly operation: 20  | |
| 1 | Estación_G | 2 | Tapa |

Figura 5.40. Instrucciones de ensamble de la tarea H.

5.3.2. Análisis de la línea de producción

Una vez analizada y evaluada cada tarea de ensamble en el módulo de planeación de HAMS, se extrajo el valor TCT de cada tarea con el objetivo de diseñar la línea de producción. La Tabla 5.5 muestra los valores TCT para cada una de las tareas definidas y analizadas.

Tabla 5.5. Tiempos totales para cada estación de ensamble.

| Tarea/Estación | Operación | Tiempo total (s) |
|----------------|-----------|------------------|
| A | Soldadura | 84 |
| B | Soldadura | 99 |
| C | Ensamble | 15 |
| D | Ensamble | 130 |
| E | Ensamble | 88 |
| F | Ensamble | 131 |
| G | Ensamble | 143 |
| H | Soldadura | 72 |

A partir de los tiempos de ensamble de cada tarea se generó la ruta crítica de fabricación con el propósito de calcular los tiempos y facilitar la planificación del ensamble del motor de aire, Figura 5.41. La ruta crítica se elaboró analizando la precedencia de las tareas. Primero se coloca la tarea A, ya que esta tarea contiene la base donde comenzará a ensamblarse el motor de aire y no hay una actividad que preceda a A. Posteriormente se coloca la tarea D y se une a A mediante una flecha, indicando que la tarea D no puede iniciar hasta que la tarea A sea terminada y así sucesivamente hasta terminar con la tarea H. De esta manera se va construyendo la ruta crítico. Para establecer un cronograma de actividades se consideró la gráfica de Gantt de la Figura 5.42. El tiempo total del ensamble del motor de aire es de 648 segundos (10:48 min:s) que corresponden a los tiempos de la tarea desde la A hasta la H, excluyendo a las tarea B y C, ya que estas tareas quedan fuera de la ruta crítica porque muestran una holgura de tiempo de 203 y 418 segundos respectivamente. Mientas que las tareas que están dentro de la ruta crítica, su holgura de tiempo es de 0.

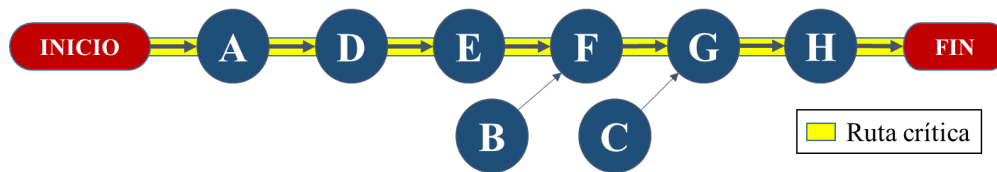


Figura 5.41. Ruta crítica para las estaciones de ensamble del motor de aire.

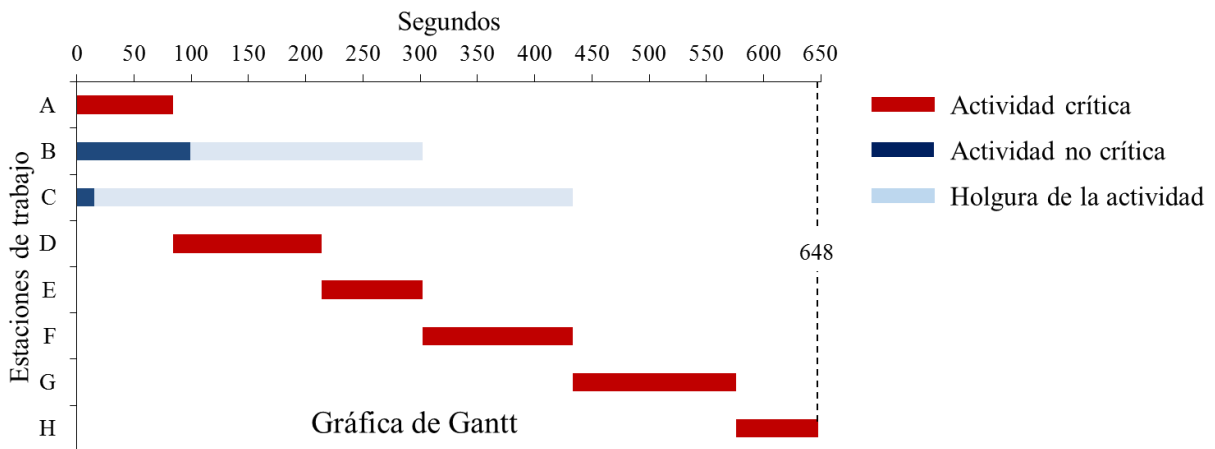


Figura 5.42. Gráfica de Gantt para las estaciones del motor de aire.

5.4. Ensamble robótico

Para probar y evaluar la efectividad del módulo robótico de HAMS, se realizó un ensamble virtual en sistema HAMS. La Figura 5.43 muestra el ensamble virtual utilizado con el propósito de generar el código para que el mismo ensamble sea realizado por un robot. El ensamble se carga dentro de la escena virtual, posteriormente se abre el módulo robótico que permite generar automáticamente las trayectorias de ensamble a partir del ensamble virtual que realice el usuario experto. Es importante mencionar que para probar este módulo se utilizó un robot puma virtual por motivos prácticos; sin embargo, el código puede generarse para cualquier robot real, previa calibración y transformación de coordenadas para garantizar la compatibilidad del ensamble virtual con el ensamble real ejecutado por un robot.

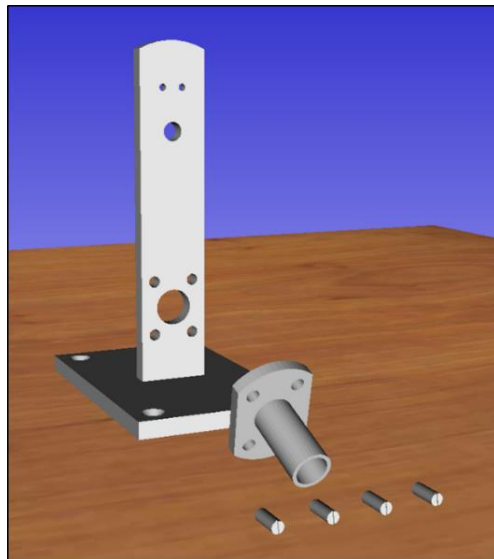


Figura 5.43. Ensamble virtual.

La Figura 5.44a muestra las trayectorias realizadas por el usuario al ensamblar el producto en el sistema HAMS. A partir de estas trayectorias el sistema genera el código para que el robot puma realice el mismo ensamble utilizando las mismas trayectorias de ensamble, Figura 5.44b. Este módulo permite al diseñador analizar y evaluar si el ensamble puede ser realizado por medio de un robot en términos de su espacio de trabajo, movilidad y manipulabilidad. Considerando que se trata de un ensamble con piezas virtuales de dimensiones reales, puede resultar que dicho plan de ensamble este fuera del espacio de trabajo del robot seleccionado. De ser así, se puede considerar otro plan de ensamble con menor espacio de trabajo, o considerar un robot con un espacio de trabajo mayor. De esta manera el personal puede analizar y evaluar el ensamble robótico de un nuevo producto de una manera objetiva y eficiente, sin necesidad de contar con las piezas físicas, y así tomar decisiones en las primeras etapas de diseño.

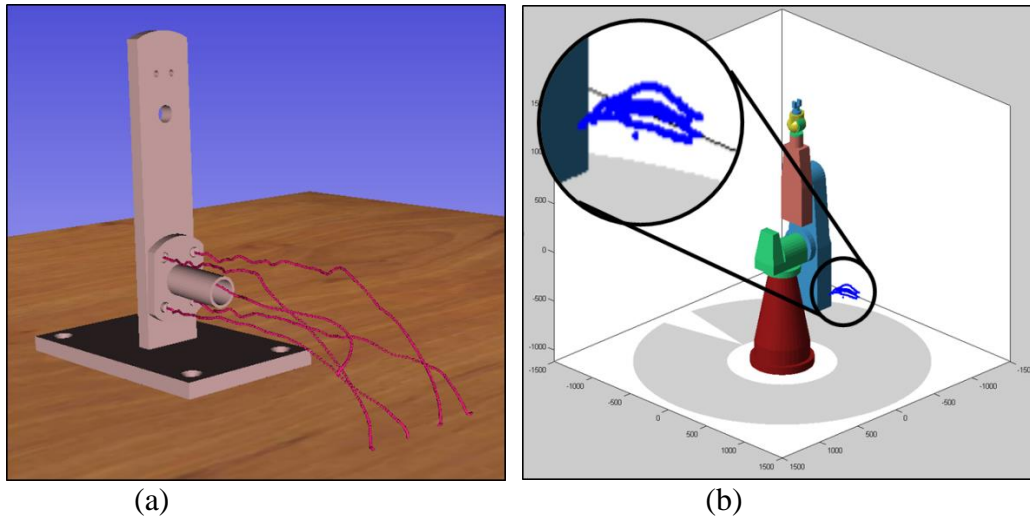
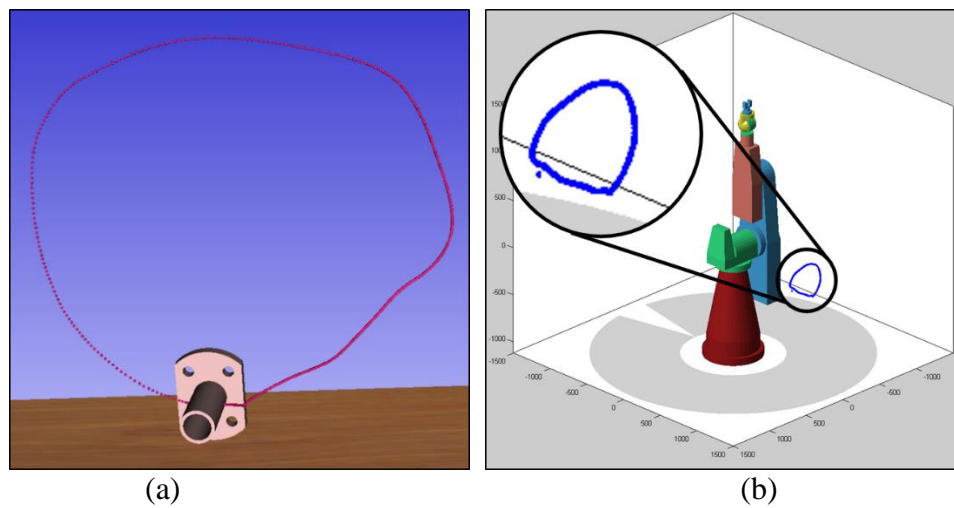


Figura 5.44. Trayectorias de ensamble: a) virtual y b) robótica.

La posibilidad de definir la resolución de las trayectorias de ensamble en el sistema HAMS, permite generar trayectorias más suaves al momento de colocar la pieza en su posición final, logrando de esta manera eliminar todos los movimientos imprecisos del usuario durante la etapa final de la trayectoria de ensamble (ver Figura 4.19 del capítulo anterior). En la Figura 5.45 se puede observar que el ensamble robótico reproduce perfectamente las mismas trayectorias del ensamble virtual. La Figura 5.45a muestra una trayectoria completa de ensamble, es decir, sin ser depurada. La Figura 5.45b muestra una trayectoria de ensamble más suavizada y eficiente, ya que permite que el robot realice el mismo ensamble en menos tiempo.



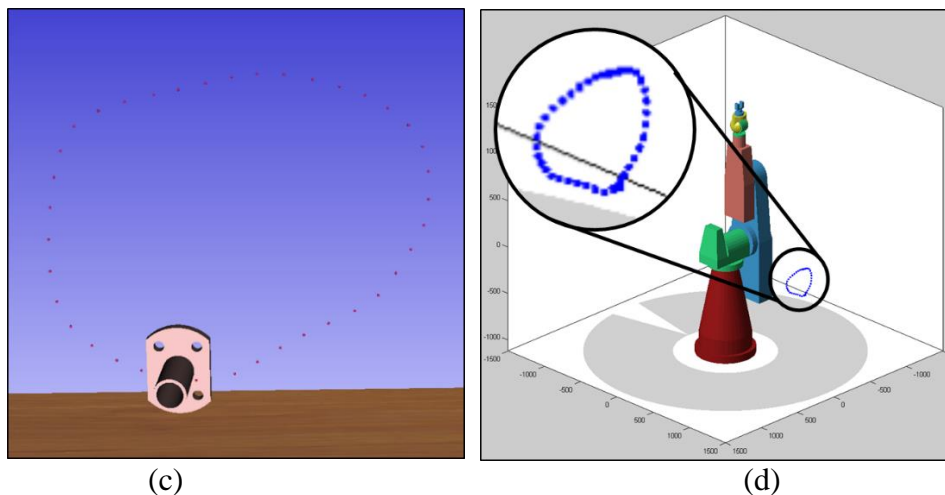


Figura 5.45. Trayectorias de ensamble virtual (derecha) y robótica (izquierda): **a), b)** trayectoria de ensamble completa; **c), d)** trayectoria de ensamble suavizada.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos de la evaluación de los módulos de entrenamiento, planeación, balanceo de línea y robótico del sistema HAMS desarrollado. Estos módulos facilitan el desarrollo de estrategias de ensamble que permiten reducir los tiempos y mejorar la productividad y eficiencia de una línea de producción, reduciendo el costo total del producto final sin el apoyo de ningún prototipo físico. Así mismo permiten la capacitación y entrenamiento de nuevo personal en los procesos de ensamble.

6.1. Entrenamiento virtual de ensambles

Los resultados de la evaluación del entrenamiento virtual de ensambles en el sistema HAMS se resumen en la Tabla 6.1. En esta tabla se presentan los valores promedio del tiempo para completar la tarea de ensamble (TCT) y el valor de la desviación estándar (DS) correspondiente a cada tarea real de ensamble y a cada grupo de participantes analizados. Estos resultados incluyen los valores de TCTs y DSs para cada iteración realizada por cada grupo de participantes y cada tarea de ensamble. LA Figura 6.1a muestra un participante durante el entrenamiento virtual de ensamble dentro del sistema HAMS, mientras que la Figura 6.1b muestra otro participante llevando a cabo la correspondiente tarea de ensamble real.

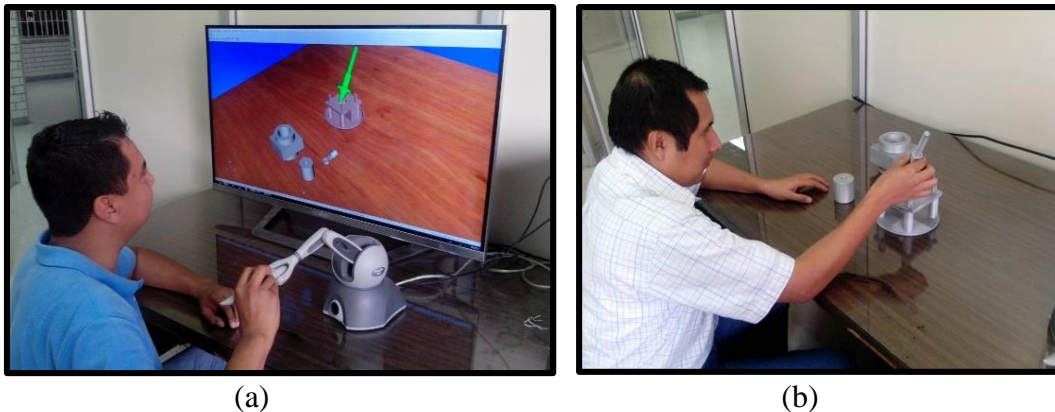


Figura 6.1. Participantes durante la ejecución de una tarea de ensamble: a) virtual en el sistema HAMS y b) real.

Todos los participantes de los tres grupos realizaron y concluyeron satisfactoriamente la tarea del ensamble real. Sin embargo, los resultados de la Tabla 6.1 muestran que el valor TCT y DS del ensamble real perteneciente a los participantes que realizaron el entrenamiento virtual de ensamble (grupo 1 y 2) es menor que los valores correspondientes de los participantes que entrenaron utilizando el método tradicional (grupo 3). Los participantes del grupo 1 y grupo 2 completaron la tarea de ensamble real más rápido y con menos variación que los participantes del grupo 3. Por otra parte, el entrenamiento de ensamble virtual-háptico (grupo 1) produjo un mayor nivel de eficiencia en el ensamble real que el entrenamiento de ensamble virtual (grupo 2).

Tabla 6.1. Promedio del TCT y DS de las tarea real de ensamble.

| Tarea de ensamble | Grupo | TCT (s) | Iteración | | | | | |
|------------------------|------------------------|---------|-----------|--------|-------|-------|-------|------|
| | | | DS (s) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Cubo | 1 | TCT | 49.20 | 22.06 | 17.94 | 16.42 | 17.28 | |
| | | DS | 13.39 | 6.08 | 0.77 | 1.44 | 1.55 | |
| | 2 | TCT | 73.80 | 28.98 | 18.58 | 18.16 | 16.08 | |
| | | DS | 45.47 | 11.89 | 1.25 | 0.77 | 0.90 | |
| | 3 | TCT | 197.00 | 61.64 | 19.30 | 18.46 | 16.50 | |
| | | DS | 71.79 | 35.59 | 1.61 | 0.89 | 1.30 | |
| Pirámide | 1 | TCT | 66.60 | 30.28 | 21.42 | 22.10 | 20.93 | |
| | | DS | 41.11 | 14.64 | 1.33 | 1.90 | 1.23 | |
| | 2 | TCT | 135.80 | 40.38 | 23.22 | 23.96 | 22.52 | |
| | | DS | 107.56 | 21.29 | 1.00 | 2.89 | 1.83 | |
| | 3 | TCT | 531.40 | 372.00 | 40.08 | 23.40 | 22.72 | |
| | | DS | 348.00 | 252.09 | 19.30 | 2.72 | 1.57 | |
| | Bomba de aceite | 1 | TCT | 10.74 | 10.02 | 9.62 | 9.62 | 9.16 |
| | | | DS | 0.60 | 0.41 | 0.33 | 0.33 | 0.71 |
| | | 2 | TCT | 11.26 | 10.56 | 10.22 | 9.68 | 9.52 |
| DS | | | 0.60 | 0.59 | 0.44 | 0.65 | 0.48 | |
| 3 | | TCT | 13.22 | 10.94 | 10.06 | 9.58 | 9.44 | |
| | | DS | 2.29 | 1.25 | 0.27 | 0.58 | 0.38 | |
| Actuador lineal | 1 | TCT | 52.46 | 34.22 | 34.18 | 31.94 | 28.52 | |
| | | DS | 7.36 | 4.82 | 4.04 | 4.36 | 1.51 | |
| | 2 | TCT | 63.12 | 35.44 | 29.32 | 32.82 | 30.76 | |
| | | DS | 16.00 | 5.39 | 0.51 | 1.58 | 2.83 | |
| | 3 | TCT | 115.20 | 55.30 | 33.18 | 29.84 | 31.48 | |
| | | DS | 34.78 | 21.24 | 3.16 | 1.65 | 1.72 | |
| Compresor | 1 | TCT | 69.69 | 57.87 | 52.21 | 46.83 | 40.94 | |
| | | DS | 14.91 | 9.67 | 11.31 | 5.32 | 4.90 | |
| | 2 | TCT | 112.65 | 66.88 | 51.93 | 49.50 | 44.85 | |
| | | DS | 34.32 | 11.72 | 4.73 | 10.08 | 6.55 | |
| | 3 | TCT | 262.80 | 125.07 | 68.13 | 54.69 | 47.75 | |
| | | DS | 101.24 | 40.50 | 9.58 | 5.01 | 4.08 | |

6.1.1. Análisis ANOVA

Un análisis más profundo de los resultados obtenidos en la Tabla 6.1 se llevó a cabo mediante la consideración de un análisis de varianza (ANOVA) para un modelo de un solo factor. El modelo que describe las observaciones es el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6.1)$$

donde y_{ij} es el TCT de la tarea real de ensamble para el i -ésimo modo de entrenamiento de ensamble ($i = 1, 2$ o 3) y la j -ésima observación (participantes, $j = 1, 2, 3, 4$ y 5); μ es un parámetro común a todos los modos de entrenamiento al que se le llama la medida global; τ_i es un parámetro único del i -ésimo modo de entrenamiento al que se le llama el efecto del tratamiento i -ésimo; y ϵ_{ij} es un componente del

error aleatorio que incorpora todas las demás fuentes de varianza del experimento, incluyendo las mediciones, la variabilidad que surge de factores no controlados (factores humanos naturales), las diferencias entre las unidades experimentales (TCT) a las que se aplican los modos de entrenamiento, y el ruido de fondo general en el proceso. Es importante mencionar que todos los participantes eran voluntarios. Factores naturales humanos tales como la fatiga, estrés, hambre, etc. pudieron haber estado presentes durante las pruebas experimentales. Sin embargo, quedan fuera del alcance de esta investigación.

Con el propósito de confirmar los supuestos del ANOVA, se realizó la evaluación de los residuales normalizados de las observaciones para verificar que éstos presentan una distribución normal e independiente con media cero. La Figura 6.2 muestra los residuales normalizados, definidos como:

$$\varepsilon_{nij} = (y_{ij} - \bar{y}_i) / \bar{y}_i \tag{6.2}$$

donde \bar{y}_i es el promedio del tratamiento correspondiente. De esta figura se observa que los residuales para cada grupo de entrenamiento no contienen patrones obvios (sin estructura) y se observa una distribución normal. Por lo tanto los resultados del ANOVA serán confiables para este experimento.

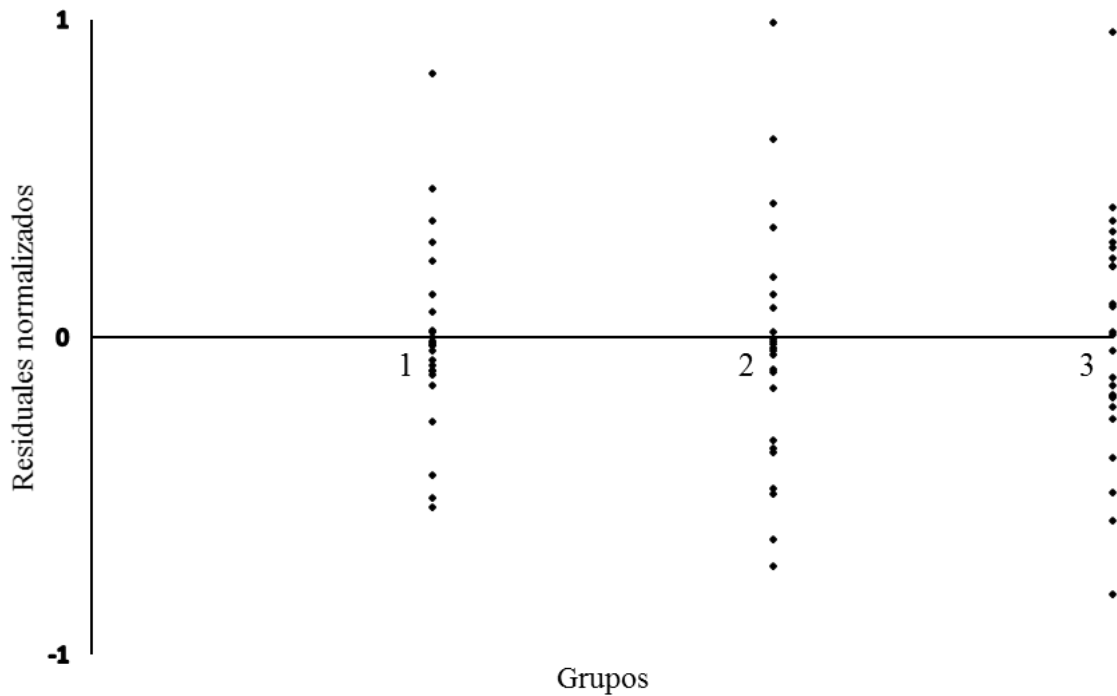


Figura 6.2. Gráfica de residuos normalizados.

La hipótesis apropiada debe establecer la relación o igualdad entre los tres modos de entrenamiento:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \\ H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ para al menos un par } (i, j) \end{aligned} \tag{6.3}$$

La hipótesis NULA (H_0) establece que el efecto de los tres modos de entrenamiento es idéntico. La hipótesis fue evaluada con un 5% de nivel de significancia, $\alpha = 0.05$. El análisis ANOVA se llevó a cabo mediante la herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel©. Los resultados del ANOVA se resumen en la Tabla 6.2, los cuales consideran las cinco iteraciones realizadas por los participantes. Los resultados de cada iteración se trataron como experimentos independientes y se compararon en cada etapa iterativa. La relación F ($F_0 = \text{entre-tratamientos/errores}$) es comparado con un punto porcentual apropiado de la cola superior de la distribución $F_{2,12}$. El punto porcentual de la distribución F es $F_{0.05,2,12} = 3.89$. Puesto que $F_0 > F$, entonces H_0 se rechaza y por lo tanto los valores TCTs para los grupos de entrenamiento son diferentes.

De los resultados de la Tabla 6.2 se observa que el entrenamiento virtual de ensambles tiene un efecto significativo en el rendimiento del ensamble real hasta las primeras dos o tres iteraciones, dependiendo de la complejidad del ensamble. Después de esto el efecto no es significativo, lo que demuestra que el aprendizaje se lleva a cabo durante el entrenamiento virtual de ensamble. La Tabla 6.2 también muestra el nivel de complejidad de las tareas de ensamble, el cual ha sido determinado considerando el número de iteraciones en las que $F_0 > F$ se satisfacen. Las tareas de ensamble con un nivel alto de complejidad son la pirámide y el compresor porque la condición $F_0 > F$ se satisface en la primera, segunda y tercera iteración. En el caso de la tarea de ensamble para el cubo y el actuador lineal, el nivel de complejidad es mediano, debido a que la condición $F_0 > F$ se satisface en la primera y segunda repetición. La tarea de ensamble con el nivel de complejidad más bajo es la bomba de aceite, ya que la condición $F_0 > F$ sólo se satisface en la primera repetición.

Tabla 6.2. Resultados del ANOVA para todas las tareas de ensamble real.

| Tarea real de ensamble | F_0 | | | | | Nivel de complejidad de la tarea |
|------------------------|-----------|-------|------|------|---|----------------------------------|
| | Iteración | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Cubo | 12.71 | 4.63 | 1.46 | - | - | Medio |
| Pirámide | 7.02 | 8.83 | 4.23 | 0.70 | - | Alto |
| Bomba de aire | 4.23 | 1.43 | - | - | - | Bajo |
| Actuador lineal | 11.12 | 4.17 | 3.72 | - | - | Medio |
| Compresor | 13.23 | 10.66 | 5.32 | 1.54 | - | Alto |

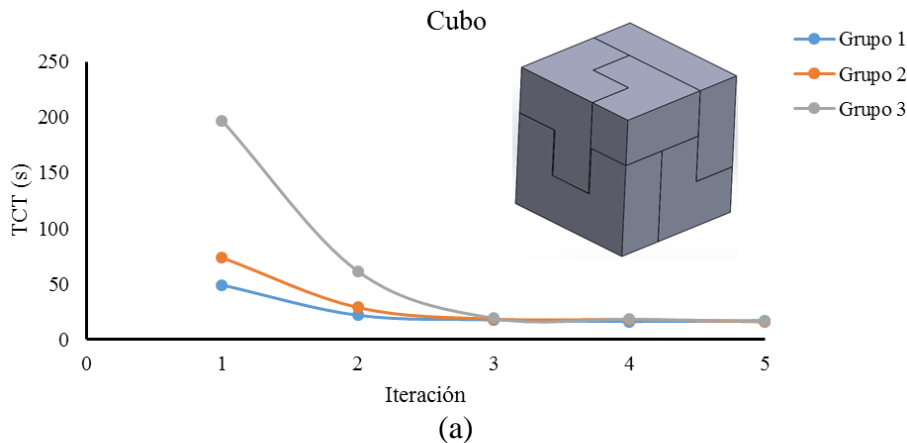
6.1.2. Efectividad del entrenamiento virtual de ensamble

La efectividad del entrenamiento virtual de ensamble puede ser cuantificada como la reducción del TCT real después del entrenamiento virtual, en comparación con el TCT real cuando se usa el entrenamiento tradicional. La Tabla 6.3 muestra el porcentaje de efectividad del entrenamiento virtual de ensamble para los grupos 1 y 2 en relación con el grupo 3. En general, se observa que el entrenamiento virtual de ensamble resultó en una mejora significativa en el desempeño real de la tarea de ensamble. Los valores TCT de los ensambles reales disminuyeron después de que los participantes se sometieron al entrenamiento virtual.

Tabla 6.3. Efectividad del entrenamiento virtual de ensamble.

| Tarea de ensamble | Nivel de complejidad de la tarea | Grupo | Efectividad (%) | | | | |
|-------------------|----------------------------------|-------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | Iteración | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Cubo | Medio | 1 | 75.03 | 64.21 | 7.05 | 11.05 | -4.73 |
| | | 2 | 62.54 | 52.99 | 3.73 | 1.63 | 2.55 |
| | | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pirámide | Alto | 1 | 87.47 | 91.86 | 46.56 | 5.56 | 7.87 |
| | | 2 | 74.44 | 89.15 | 42.07 | -2.39 | 0.88 |
| | | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bomba de aceite | Bajo | 1 | 18.76 | 8.41 | 4.37 | -0.42 | 2.97 |
| | | 2 | 14.83 | 3.47 | -1.59 | -1.04 | -0.85 |
| | | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Actuador lineal | Medio | 1 | 54.46 | 38.12 | -3.01 | -7.04 | 9.40 |
| | | 2 | 45.21 | 35.91 | 11.63 | -9.99 | 2.29 |
| | | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compresor | Alto | 1 | 73.48 | 53.73 | 23.36 | 14.38 | 14.26 |
| | | 2 | 57.13 | 46.52 | 23.77 | 9.50 | 6.07 |
| | | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

La Figura 6.2 presenta los resultados experimentales correspondientes a cada tarea de ensamble real. Los valores promedios TCT para cada grupo se grafican como una función del número de iteración. De estos resultados se observa que para todas las tareas de ensamble, los participantes que se capacitaron virtualmente (grupo 1 y 2) lograron mejores valores TCTs en la primera iteración de la tarea real de ensamble que los participantes que se capacitaron tradicionalmente (grupo 3). En otras palabras, los participantes que pasaron por una sesión de entrenamiento virtual en HAMS mejoraron su desempeño en el ensamble real. El rendimiento máximo se produjo en la primera iteración, y fue disminuyendo conforme aumentaban las iteraciones. Esta disminución se debe al fenómeno de aprendizaje natural que tiene lugar durante los sucesivos ensayos del ensamble, que es evidente en las curvas de aprendizaje de la Figura 6.3. En el caso de las tareas altamente complejas tales como el compresor y la pirámide, el efecto del entrenamiento virtual de ensamble sobre el rendimiento real permaneció hasta la tercera repetición del ensamble. Después de esta repetición el rendimiento de todos los participantes fue muy similar.



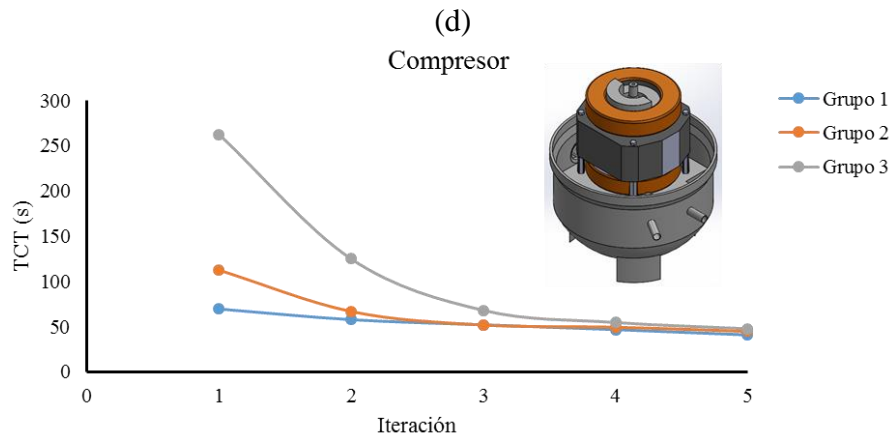
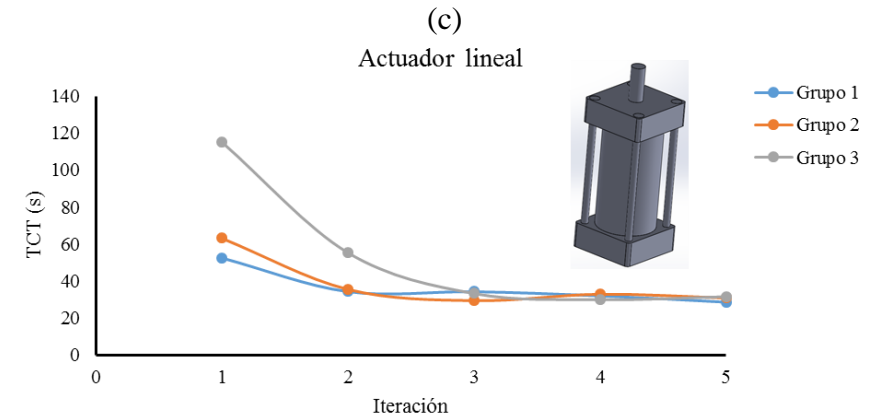
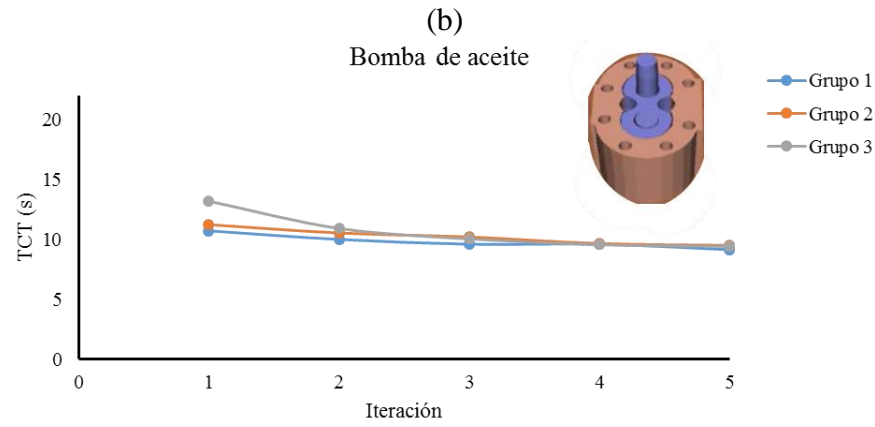
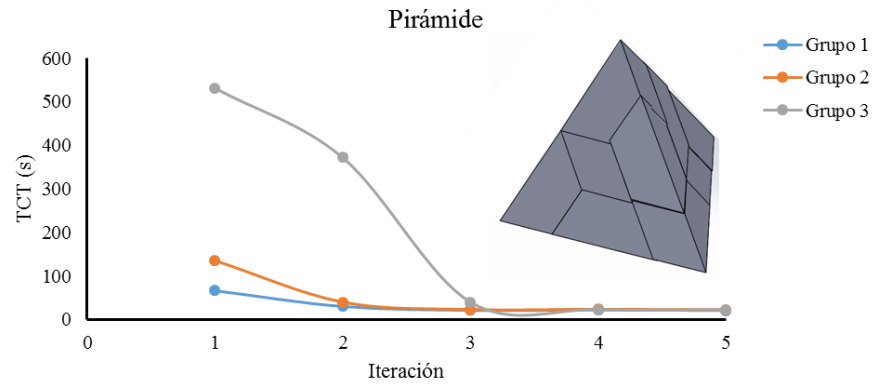


Figura 6.3. Promedio real de TCTs para las tareas de ensamble: a) cubo, b) pirámide, c) bomba de aceite, d) actuador lineal, y e) compresor.

La Figura 6.4 presenta los valores de efectividad del entrenamiento virtual de ensamble en la primera iteración como una función de la complejidad de la tarea de ensamble y los modos de entrenamiento. De esta figura se observa que la efectividad depende del modo de entrenamiento virtual de ensamble y de la complejidad de la tarea de ensamble. El entrenamiento virtual-háptico condujo a mayores niveles de eficiencia que el entrenamiento puramente virtual. Los participantes que se capacitaron con retroalimentación háptica (Grupo 1) lograron un mejor desempeño en el ensamble real que los participantes que entrenaron sin retroalimentación háptica (Grupo 2).

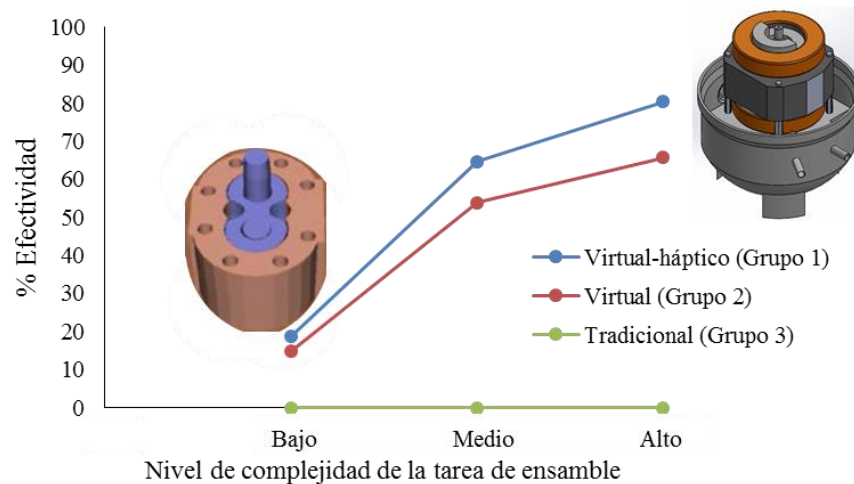


Figura 6.4. Efectividad del entrenamiento virtual de ensamble vs complejidad del ensamble.

La Figura 6.4 también muestra que las personas del grupo 1 mejoraron el TCT del ensamble real en un 80% para las tareas de alta complejidad, 65% para las tareas de mediana complejidad y 18% para las de baja complejidad, en comparación con los participantes del grupo 3. Mientras que las personas del grupo 2 mejoraron el TCT del ensamble real en un 65%, 54% y 15%, respectivamente para las mismas tareas, en comparación también con el tercer grupo. Estos valores corresponden a la primera iteración del ensamble real, ya que los tiempos del ensamble real disminuyen conforme las personas aumentan el número de repeticiones, esto debido a la curva natural de aprendizaje. Estos resultados sugieren la importancia y efecto de utilizar la retroalimentación de fuerza dentro del entrenamiento virtual. Es posible obtener un mejor rendimiento en el ensamble real cuando se usa retroalimentación háptica en el entrenamiento virtual que cuando se utiliza un entrenamiento virtual sin retroalimentación háptica. En otras palabras, el entrenamiento virtual habilitado con retroalimentación háptica resulta más efectivo que el entrenamiento virtual sin retroalimentación de fuerza.

La Figura 6.4 también indica que a medida que aumenta el nivel de complejidad de la tarea de ensamble, aumentan los beneficios del entrenamiento virtual de ensamble. El efecto del entrenamiento virtual de ensamble es mucho mayor para tareas de ensamble altamente complejas que para tareas de ensamble con baja complejidad. Por ejemplo, el grupo 3 completó la pirámide, que tiene un alto nivel de complejidad, en 531.4 s, mientras que el grupo 1 completó la misma tarea real en 66.6 s, lo cual representa una mejora del 87.5%. Además, el grupo 3 completó la bomba de aceite, que tiene un bajo nivel de complejidad, en 13.2 s, mientras que el grupo 1 completó esta misma tarea en 10.7 s, lo que supone una mejora de 18.9%. Considerando el entrenamiento de ensamble virtual-háptico y virtual, las tareas con alta complejidad tienen una mejora promedio del 73%, mientras que las tareas de complejidad media tiene una mejora del 59% y las tareas de bajo nivel de complejidad tuvieron una mejora del 17%. Es importante mencionar que el nivel de mejora se reduce conforme el número de iteraciones aumenta, como se muestra en la Tabla 6.3.

6.1.3. Desempeño del ensamble virtual vs real

Para comparar el rendimiento del ensamble de las tareas de ensamble real y virtual, se realizó otro conjunto de experimentos con cinco nuevos participantes, quienes fueron entrenados con las mismas condiciones del grupo 1, i.e. entrenamiento virtual-háptico con retroalimentación de fuerza. Debido a que la muñeca de la mano del usuario se fatiga después de utilizar el dispositivo háptico durante un tiempo prolongado, este nuevo conjunto de experimentos se llevó a cabo con nuevos participantes. A cada participante se le asignó una tarea de ensamble de las cinco analizadas (cubo, pirámide, bomba de aceite, actuador lineal y compresor), y se le pidió realizar la tarea 10 veces en el ambiente virtual y 10 veces en el mundo real. La Figura 6.5 resume los resultados en términos del TCT para las tareas de ensamble real y virtual. Estos resultados muestran que después de algunas pruebas de ensamble, el TCT para cada tarea de ensamble tiende a converger a un valor constante debido al fenómeno natural de aprendizaje. En el ensamble virtual los valores TCT convergieron después de la séptima iteración, mientras que en la tarea de ensamble real los valores TCT convergieron después de la cuarta iteración. También se observa una variación más amplia y una oscilación natural de las curvas de aprendizaje para el ensamble virtual en comparación con el aprendizaje rápido y uniforme del TCT asociado al ensamble real. Estos resultados sugieren que el aprendizaje y la percepción de la realidad son más rápidos en la vida real que en ambientes de realidad virtual.

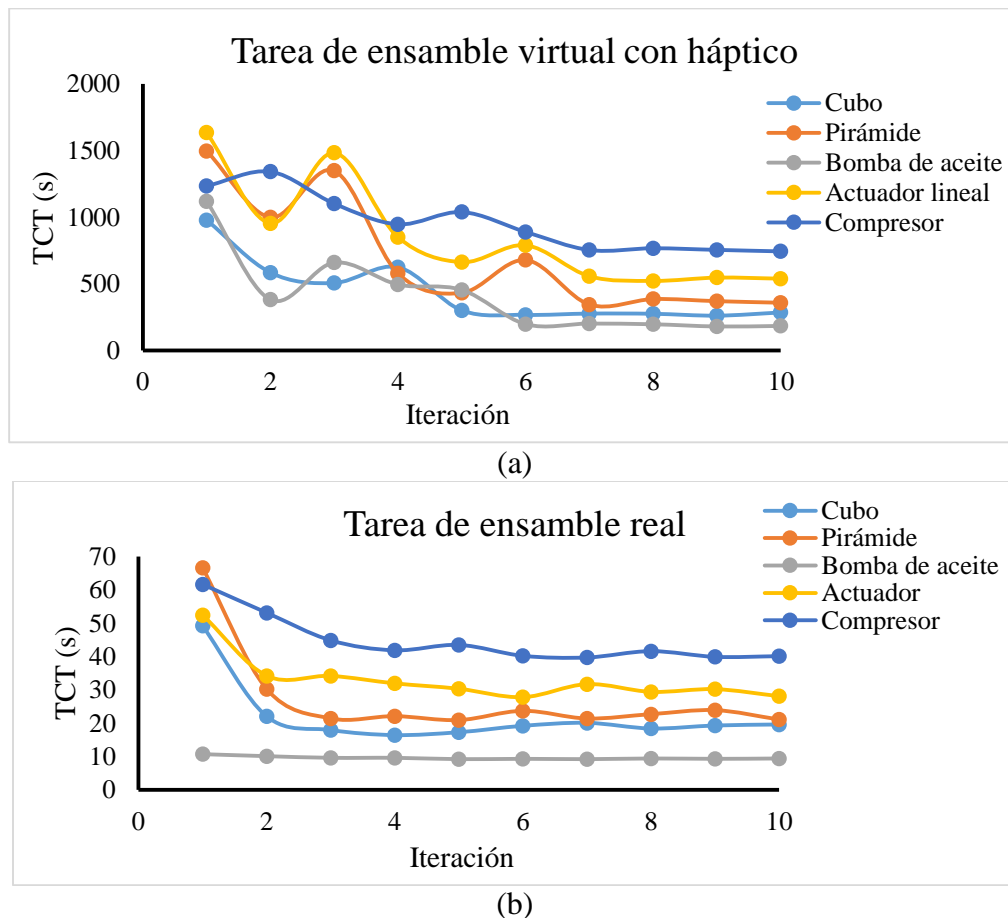


Figura 6.5. Valores TCTs para: a) ensamble virtual, b) ensamble real.

Por otro lado, los resultados también muestran que la convergencia del valor TCT depende de la complejidad de la tarea de ensamble y del modo de ensamble (real y virtual). Las tareas de ensamble más complejas requieren valores TCT más grandes que las tareas de ensamble menos complejas; esto tanto para ensamblajes virtuales y reales. También se observa que independientemente de cuánto tiempo

tarda un participante en realizar la primera iteración de una tarea en particular, las últimas iteraciones siempre convergen a un valor del TCT constante. Además, los valores TCT para el ensamble real son más pequeños que los valores TCT correspondientes al ensamble virtual, lo que confirma que las tareas de ensamble real se llevan a cabo más rápido que las tareas de ensamblajes virtuales. Sin embargo, se puede estimar un valor de escalamiento al comparar el valor de TCT correspondiente a tareas de ensamble virtual y ensamble real para la décima iteración. De esta manera se obtiene un valor de escalamiento promedio de 17.7 ± 2.05 entre los TCT de las tareas de ensamble real y ensamble virtual. Este valor significa que el tiempo necesario para ensamblar una tarea virtual-háptica en HAMS es 17.7 veces mayor que el tiempo de ensamble real. Es importante mencionar que este factor de escalamiento de TCT depende también del rendimiento del sistema de ensamblajes virtuales, el cual está determinado por las tasas de renderizado háptico, representaciones gráficas y representaciones físicas, así como la capacidad de la computadora en general. En consecuencia, el valor del factor de escalamiento puede mejorarse con el uso de computadoras y equipo más potentes, los cuales son cada vez más accesibles. Sin embargo, la ventaja del entrenamiento virtual sobre el entrenamiento tradicional de ensamble no se enfoca en el desempeño virtual del TCT, sino en el efecto que tiene en el rendimiento del ensamble real, en la transferencia de conocimiento hacia el usuario, y en la mayor flexibilidad para evaluar la ensamblabilidad antes de construir un prototipo físico.

6.1.4. Discusión

Los resultados anteriores han demostrado que el entrenamiento virtual de ensamble es una herramienta eficaz para mejorar las habilidades de ensamble de los aprendices, esto debido a que se observó que los participantes que se capacitaron en un entorno virtual realizaron el ensamble real en menor tiempo. Sin embargo, la efectividad del entrenamiento virtual de ensamble depende de las capacidades del sistema de entrenamiento, particularmente en la capacidad del sistema para proporcionar al usuario retroalimentación de fuerza. Se ha observado que cuando se utiliza la retroalimentación de fuerza durante el entrenamiento virtual de ensamble, la efectividad del entrenamiento es superior que cuando no se proporciona retroalimentación de fuerza. Este incremento en el desempeño está asociado al hecho de que el renderizado háptico incrementa el nivel de realismo y percepción del ambiente virtual, reduciendo la carga cognitiva en comparación con el ensamble virtual sin retroalimentación háptica. Como una consecuencia, el entrenamiento virtual-háptico tiene un gran efecto en el rendimiento de los usuarios. Por lo tanto, es importante considerar el renderizado háptico durante la definición, selección y construcción de un sistema de entrenamiento para ensamblajes virtuales. El efecto del entrenamiento virtual de ensamble en el desempeño de los participantes también depende del nivel de complejidad de la tarea a realizar. El entrenamiento virtual de ensamble de tareas altamente complejas permite una mejora más significativa en el desempeño del ensamble real que el entrenamiento virtual de tareas con bajo nivel de complejidad. El valor más alto de efectividad del entrenamiento virtual es máximo en la primera iteración, y se va reduciendo gradualmente a medida que aumentan las repeticiones. Se observó que después de la tercera iteración no hay un efecto significativo del entrenamiento virtual en el rendimiento del ensamble real en comparación con el método tradicional. Estos resultados están relacionados con el proceso de aprendizaje natural de todos los participantes durante la repetición de las tareas de ensamble en el mundo real.

Es importante mencionar que la mayoría de las tareas de ensamble manual requieren movimientos finos de manos y dedos, lo cual es complicado replicar mediante los dispositivos hápticos utilizados, los cuales se basan en un solo punto de manipulación. Sin embargo, el objetivo del entrenamiento virtual no es reproducir exactamente los tiempos, movimientos, fuerzas, texturas, etc., de los objetos reales dentro de un ambiente virtual, sino utilizarlo como una herramienta para practicar y aprender estrategias y procedimientos con el objetivo de mejorar el rendimiento de los trabajadores en el ensamble real. En

cualquier situación de entrenamiento, la tarea debe descomponerse en sus componentes cognitiva, perceptiva y motora, los cuales deben ser satisfechos durante el proceso de entrenamiento [128]. En las pruebas experimentales conducidas en este trabajo, los participantes primero intentan construir el modelo dentro de su mente. Posteriormente, el entrenamiento gradual permite identificar la localización de las partes en su posición final de ensamble y desarrollar una estrategia que mejore el desempeño del ensamble. Después del entrenamiento virtual, los participantes ganan experiencia en términos de manipulación y localización de las partes, conduciendo a menos errores y valores TCT pequeños en el ensamble real, como se evidencia en los resultados experimentales.

El entrenamiento tradicional de ensamble requiere entrenadores e instalaciones tales como una planta, una línea de producción y los componentes físicos del producto. Por otro lado, el entrenamiento virtual no requiere instalaciones especiales ni componentes físicos. Los operadores pueden entrenar dentro de un entorno virtual, las tareas de ensamble pueden ser ilimitadas y la producción no se ve afectada por las actividades de la capacitación del personal. Sin embargo, una desventaja importante del entrenamiento virtual es que los valores TCT son mayores que los valores TCT del ensamble real correspondiente. Como consecuencia, el entrenamiento virtual requiere más tiempo que el entrenamiento tradicional. No obstante, dado que el ensamble virtual se puede realizar en cualquier momento sin los componentes físicos y sin afectar la producción, el tiempo mayor requerido para el entrenamiento virtual puede no representar un costo adicional o excesivo para las empresas en comparación con el entrenamiento tradicional.

6.2. Planeación virtual de ensambles

Los resultados de la evaluación del módulo de planeación de ensamble para el actuador lineal y el motor de aire se muestran a continuación.

6.2.1. Caso de estudio 1

En este caso de estudio se analizó el ensamble de un actuador lineal dentro del módulo de planeación. Dos secuencias factibles de ensamble para el actuador lineal se propusieron y realizaron por parte de un experto (véase sección 5.2.1.2). La Tabla 6.4 muestra los resultados de la evaluación y métricas de ensamble obtenidos para ambas secuencias de ensamble. De esta figura se puede observar que, en general, la secuencia de ensamble 1 es la mejor debido a que en más del 80% de las métricas de ensamble sus valores son mejores que la secuencia 2. Sin embargo, es importante mencionar que el diseñador o planeador siempre tiene la última decisión en cuanto al plan de ensamble a elegir de acuerdo a sus criterios y necesidades particulares. Por ejemplo, si los intereses del diseñador corresponden al mínimo espacio de trabajo, entonces la secuencia 2 resulta más atractiva al requerir un espacio de trabajo menor, todo esto a pesar de su menor desempeño en las demás métricas. De esta manera, el sistema HAMS asiste al diseñador o planeador en su toma de decisiones al mostrar un panorama completo de las diferentes estrategias de ensamble y su información técnica correspondiente.

Tabla 6.4. Métricas de ensamble para las secuencias del actuador lineal.

| Métricas de ensamble | Secuencia de ensamble 1 | Secuencia de ensamble 2 |
|----------------------|--|--|
| TCT | 291 s | 344 s |
| ETCT | 137 s | 180 s |
| NPTCT | 154 s | 164 s |
| TAD | 11009 mm | 11220 mm |
| EAD | 3875 mm | 3966 mm |
| NPAD | 7134 mm | 7254 mm |
| APE | 43.04 % | 43.08 % |
| TAEE | 38.75 % | 28.8 % |
| HE | 50 % | 40 % |
| TAE | 2.485 joules | 3.694 joules |
| WS | 12869.3 cm ³ | 11030.1 cm ³ |
| AM | $\theta_x=180^\circ, \theta_y=180^\circ, \theta_z=180^\circ$ | $\theta_x=180^\circ, \theta_y=180^\circ, \theta_z=180^\circ$ |
| THA | 16 | 20 |
| DOF | 6 | 6 |

6.2.1.1. Tiempo

La Tabla 6.4 muestra los resultados experimentales correspondientes a las métricas de tiempo para ambas secuencias de ensamble. De estos resultados se observa que todas las métricas de tiempo (TCT, ETCT y NPTCT) favorecen a la secuencia 1; por lo tanto, con respecto al tiempo se puede decir que la secuencia 1 es la mejor. Como se muestra en la Tabla 6.5, el valor TCT es igual a la suma del tiempo efectivo de ensamble (ETCT) más el tiempo no productivo de ensamble (NPTCT). El valor ETCT y NPTCT aporta cada uno aproximadamente el 50% en ambas secuencias, esto significa que podría darse un ahorro considerable disminuyendo el tiempo no productivo de ensamble.

Tabla 6.5. TCT en porcentajes del ETCT y NPTCT.

| Secuencia de ensamble | TCT = ETCT + NPTCT |
|-----------------------|---|
| 1 | 291 s = 137 s + 154 s 100% = 47% + 53% |
| 2 | 344 s = 180 s + 164 s 100% = 52% + 48% |

Se ha reportado en la literatura que la realización de una tarea de ensamble real requiere menos tiempo que su correspondiente tarea de ensamble virtual [129]. En este mismo trabajo se propuso un factor de escalamiento de 17.7 ± 2.05 entre estos dos tiempos. Por lo anterior, el valor TCT del ensamble real sería 16.4 s para la secuencia 1 y 19.4 s para la secuencia 2.

6.2.1.2. Distancia

La Tabla 6.4 también muestra los resultados experimentales correspondientes a las métricas de distancia para ambas secuencias de ensamble. La diferencia entre una misma métrica de distancia para ambas secuencias de ensamble es aproximadamente el 2%. Como se muestra en la Tabla 6.6, la distancia total de ensamble (TAD) es igual a la suma de la distancia efectiva de ensamble (EAD) más la distancia no productiva de ensamble (NPAD). Se observa que la distancia no productiva representa hasta un 64% de la distancia total, por lo que se puede lograr un ahorro significativo reduciendo este criterio.

Tabla 6.6. TAD en porcentajes del EAD y NPAD.

| Secuencia de ensamble | TAD = EAD + NPAD |
|-----------------------|--|
| 1 | 11009 mm = 3875 mm + 7134 mm 100% = 35.2% + 64.8% |
| 2 | 11220 mm = 3966 mm + 7254 mm 100% = 35.3% + 64.7% |

El sistema HAMS permite la visualización de las trayectorias de ensamble, las cuales se generan cuando el usuario manipula una pieza mediante el sistema háptico. La Figura 6.6a muestra las trayectorias de ensamble para ensamblar el cilindro en su posición final. La Figura 6.6b muestra el total de las trayectorias de ensamble necesarias para completar el ensamble del actuador lineal mediante la secuencia de ensamble 1.

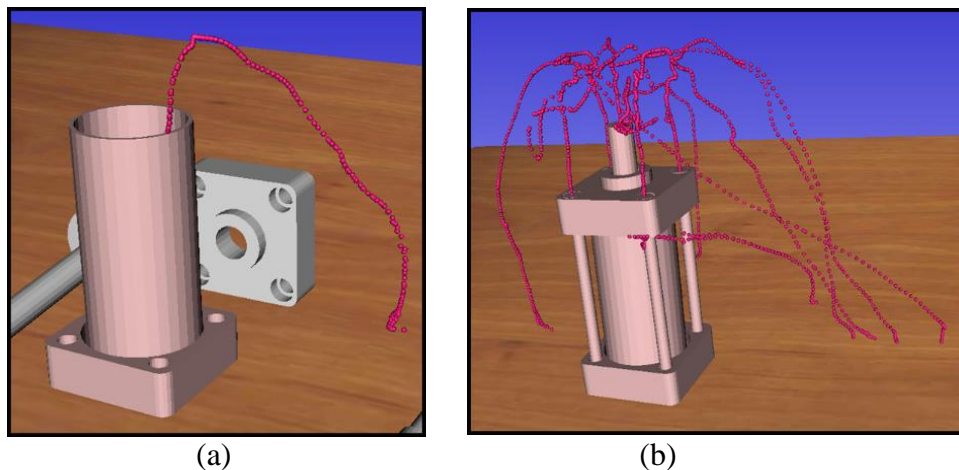


Figure 6.6. Visualización de las trayectorias de ensamble: a) cilindro y b) todas las piezas.

6.2.1.3. Energía

La Tabla 6.4 muestra también los resultados experimentales correspondientes a la métrica de energía TAE, la cual resultó en valores de 2.485 y 3.694 joules para las secuencias 1 y 2, respectivamente. En estos valores se observa que realizar el ensamble usando la secuencia 1 cuesta menos trabajo que realizar la secuencia 2. La Figura 6.7 ilustra el motivo principal de esta diferencia en el trabajo de ensamble realizado. La Figura 6.7a muestra el ensamble de la secuencia 1, la ventaja de esta secuencia es que una vez que el cilindro se ensambla dentro de la tapa inferior, existe automáticamente concetricidad entre ambas piezas, permitiendo introducir el émbolo dentro del cilindro y colocarlo en su posición final sin titubeos. La Figura 6.7b muestra el ensamble de la secuencia 2, esta secuencia es poco efectiva y ocasiona el aumento en el trabajo debido a que primero se ensambla el émbolo dentro de la tapa inferior, el ensamble del émbolo puede presentar excentricidad con la tapa inferior, ocasionando que el ensamble del cilindro no se pueda colocar en su posición final. Para corregir este problema, el usuario debe soltar el cilindro y volver a manipular el émbolo, con el objetivo de intentar colocarlo justo en el centro de la tapa inferior, para posteriormente volver a tomar el cilindro y ensamblarlo en su posición correcta.

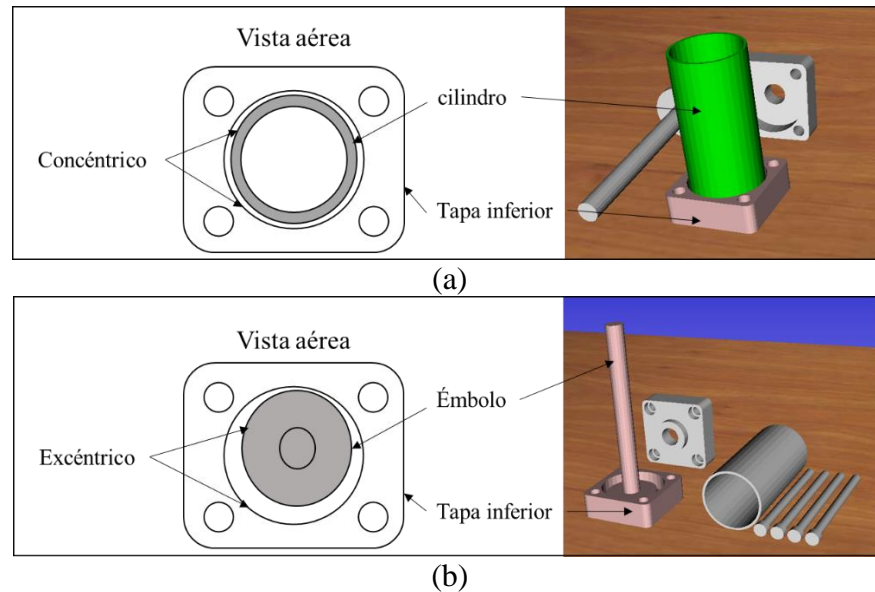


Figura 6.7. Diferencia entre ambas secuencias de ensamble: a) secuencia 1 y b) secuencia 2.

6.2.1.4. Eficiencia

La Tabla 6.4 muestra los resultados experimentales correspondientes a las métricas de eficiencia para ambas secuencias de ensamble. Las métricas de ensamble TAEE y HE indican que es más eficiente la secuencia de ensamble 1, con valores de 38% y 50% respectivamente, en comparación con la secuencia de ensamble 2 cuyos valores son 28% y 40% respectivamente. Esta mejora en la eficiencia de la secuencia de ensamble 1 corresponde a que el cilindro sirve como guía para posicionar correctamente el ensamble del émbolo dentro del cilindro, Figura 6.6a. Por otro lado, la ineficiencia de la secuencia 2 corresponde a que el émbolo al ser ensamblado dentro de la tapa inferior dificulta el posterior ensamble del cilindro, esto debido a que el émbolo interfiere en la trayectoria del cilindro para su correcta posición final dentro del ensamble, Figura 6.6b. La diferencia en cuanto a eficiencia de ambas trayectorias de ensamble, también se puede explicar observando la franja naranja de la Tabla 5.1, en la cual se puede ver que las métricas HP y EHT del cilindro para la secuencia dos son de 7 y 47, respectivamente, mientras que para la secuencia uno son 1 y 19, respectivamente. Esto indica que el ensamble del cilindro dentro de la secuencia 2 se complicó debido a la interferencia del émbolo, es decir, el manejo (HP) y el tiempo efectivo (EHT) del cilindro aumenta considerablemente en la secuencia 2, afectando directamente el desempeño general del ensamble. Por otro lado, la eficiencia potencial del ensamble (APE) es de 43% para ambas secuencias, esto debido a que la métrica APE se basa solo en las alturas máximas y alturas finales de las piezas involucradas en el ensamble.

6.2.1.5. Espacio de trabajo

La Tabla 6.4 muestra el espacio de trabajo utilizado por cada secuencia de ensamble, en donde se puede observar que la secuencia 1 ocupa un mayor espacio de trabajo (12869.3 cm^3) que la secuencia 2 (11030.1 cm^3). La Figura 6.8 muestra el espacio de trabajo utilizado por las dos secuencias de ensamble para realizar el ensamble virtual del actuador lineal. Para este ensamble en particular, el volumen es muy similar ya que el ensamble del émbolo y el cilindro siempre es por la parte superior. Sin embargo, en algunos ensambles como el mostrado en la figura 5.26 del capítulo anterior, se observa que a pesar de que el valor del volumen es muy similar, existe una gran diferencia en su forma. Lo anterior permite al diseñador tener una visión más amplia del espacio de trabajo necesario para el ensamble de tal producto, por lo que se puede aprovechar y mejorar la distribución del espacio total de la planta y de las celdas de trabajo que conforman una línea de producción tanto para ensambles manuales como

robóticos. También permite conocer el espacio de trabajo que el robot necesita para llevar a cabo un ensamble, así como la concepción del tipo de robot necesario en caso de no contar con uno.

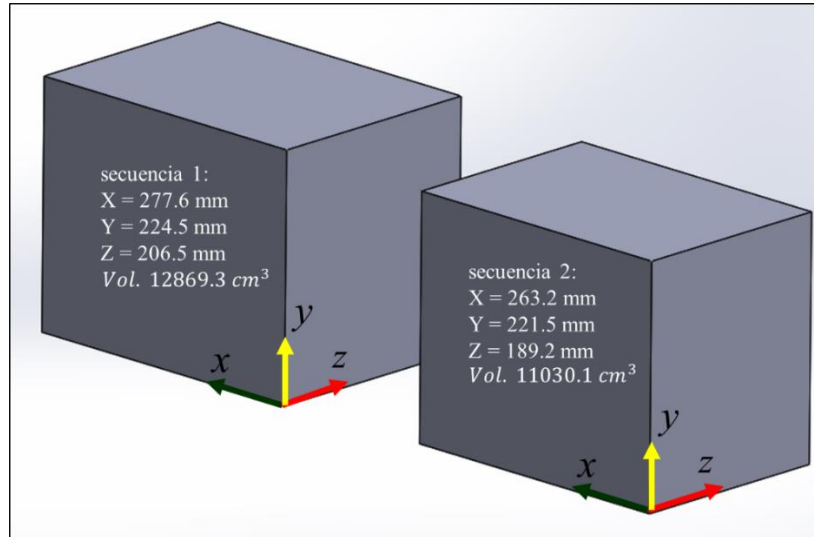


Figura 6.8. Espacio de trabajo para ambas secuencias de ensamble del actuador lineal.

6.2.1.6. Ángulos de manipulación

La Tabla 6.4 muestra que la manipulabilidad del ensamble (AM) es de 180° para cada eje de rotación y para ambas secuencias de ensamble. Esto implica que para poder realizar la tarea de ensamble es necesario que quien ejecuta el ensamble (usuario o robot) tenga la capacidad de poder rotar por lo menos 180° en cada eje coordenado, Figura 6.9. Por lo anterior se puede decir que para realizar el ensamble del actuador lineal a través de la secuencia 1 o la secuencia 2, se necesitan tres grados de libertad correspondientes a la orientación.

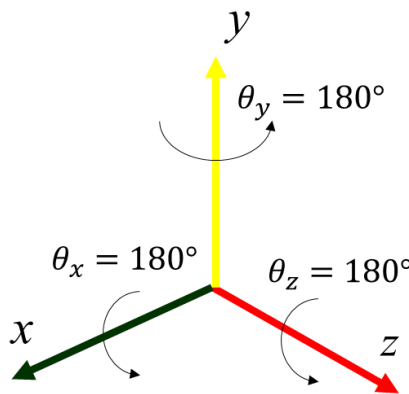


Figura 6.9. Ángulos de manipulación para ambas secuencias de ensamble del actuador lineal.

6.2.1.7. Manipulación total de las piezas

En teoría cada pieza del ensamble debe ser manipulada una sola vez durante la operación de ensamble, por lo que la métrica THA debe ser igual al número total de piezas. Sin embargo, el valor de la métrica THA aumenta conforme aumenta la complejidad del ensamble, ya que algunas piezas pueden necesitar ser manipuladas más de una vez para alcanzar su posición final. La Tabla 6.4 también muestra el total de veces que las piezas fueron manipuladas para realizar el ensamble completo, observándose que la secuencia 1 sólo manipuló las piezas en 16 ocasiones, mientras en la secuencia 2 se manipularon en 20

ocasiones las piezas. Lo anterior se debe a que en la secuencia 2 el cilindro se manipuló 4 veces más que en la secuencia 1, ya que el ensamble del émbolo en la secuencia 2 complicaba colocar el cilindro en su posición final, Figura 6.6b. Por lo tanto, la evaluación de THA permite conocer la complejidad del ensamble, así como monitorear si un ensamble se está realizando con exceso de manipulación de sus piezas, afectando directamente el tiempo y costo de producción.

6.2.1.8. Grados de libertad

Por último, la Tabla 6.4 también muestra el número de grados de libertad involucrados en el ensamble. De estos resultados se observa que ambas secuencias requirieron 6 grados de libertad para llevar a cabo la tarea de ensamble. En otras palabras, para lograr el ensamble del actuador lineal es necesario mover las piezas en las direcciones (x , y y z), así como orientarlas con respecto a los ejes (x , y y z). Si se considera realizar el ensamble del actuador lineal por medio de un robot manipulador, esta métrica (DOF) facilita la selección o concepción correcta del tipo de robot necesario para ejecutar la tarea. Cabe mencionar que esta métrica es más relevante en caso de que la tarea de ensamble se piense realizar a través de un robot y no por medio de una persona. Sin embargo, independientemente de quién ejecutará la tarea de ensamble (robot o persona), un DOF menor representa un ensamble menos complejo de realizar.

6.2.2. Caso de estudio 2

En el capítulo 5 se presentó el análisis completo del caso de estudio 2 correspondiente a un motor de aire, desde que el experto importa las piezas dentro de la escena virtual por primera vez hasta que ya tiene las secuencias a analizar dentro del módulo de planeación. Las pruebas piloto del ensamble virtual del motor de aire permitieron depurar movimientos innecesarios; detectar posiciones ergonómicas que resultan en un mejor tiempo de ensamble y por ende una reducción del costo total del producto; realizar análisis de estabilidad, energía e interferencia, así como determinar y definir sub-ensambles; detectar secuencias de ensamble factibles y relevantes para ser analizadas; y adquirir experiencia y conocimientos por parte del experto al ejecutar el ensamble virtual. De esta manera, se identificaron y seleccionaron únicamente 4 secuencias de ensamble para ser analizadas dentro del módulo de planeación. Posiblemente estas cuatro secuencias de ensamble estén dentro de las mejores; sin embargo, los métodos tradicionales y abstractos de análisis de ensamble tendrían que analizar cientos de miles de combinaciones para obtener la mejor secuencia de ensamble, y sin ningún aprovechamiento de la experiencia al experto.

Las cuatro secuencias de ensamble del motor de aire se analizaron dentro del módulo de planeación de HAMS con el objetivo de seleccionar la mejor secuencia de ensamble. La siguiente Tabla 6.7 muestran los resultados de las secuencias de ensamble propuestas. El reporte completo y las instrucciones de ensamble para la secuencia dos se muestran en el apéndice A y B respectivamente. Es importante mencionar que estos reportes se generaron de manera automática al terminar la ejecución del ensamble virtual por el experto.

Tabla 6.7. Métricas de ensamble para las secuencias del motor de aire.

| Métricas de ensamble | Secuencias de ensamble | | | |
|----------------------|--|--|--|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| TCT | 525 s | 488 s | 557 s | 575 s |
| ETCT | 231 s | 213 s | 226 s | 204 s |
| NPTCT | 294 s | 275 s | 331 s | 371 s |
| TAD | 57.09 m | 54.08 m | 55.2 m | 54.66 m |
| EAD | 11.9 m | 10.1 m | 10.37 m | 10.47 m |
| NPAD | 45.19 m | 43.98 m | 44.82 m | 44.18 m |
| APE | 63 % | 62 % | 64 % | 68 % |
| TAEE | 53 % | 49 % | 59 % | 56 % |
| HE | 62 % | 87 % | 67 % | 71 % |
| TAE | 12.38 joules | 13.31 joules | 10.51 joules | 12.29 joules |
| WS | 142153 cm ³ | 98788 cm ³ | 105261 cm ³ | 119573 cm ³ |
| AM | $\theta_x=0^\circ$ $\theta_y=0^\circ$ $\theta_z=180^\circ$ | $\theta_x=0^\circ$ $\theta_y=0^\circ$ $\theta_z=180^\circ$ | $\theta_x=0^\circ$ $\theta_y=0^\circ$ $\theta_z=180^\circ$ | $\theta_x=0^\circ$ $\theta_y=0^\circ$ $\theta_z=180^\circ$ |
| THA | 32 | 23 | 30 | 28 |
| DOF | 4 | 4 | 4 | 4 |

6.2.2.1. Tiempo

La Tabla 6.7 muestra los resultados de las métricas de tiempo, en donde se puede observar que la secuencia 2 tiene el menor tiempo TCT y NPTCT, 488 y 275 segundos, respectivamente. La secuencia 4 a pesar de que tiene el menor ETCT, con 204 segundos, también presenta el mayor TCT y NPTCT con 575 y 371 segundos, respectivamente. La secuencia 1 presenta el mayor ETCT con 231 segundos. Por otro lado, los tiempos de la secuencia 3 no presentan ningún extremo con respecto a esta métrica. Por lo anterior se puede concluir que la secuencia 2 es la óptima. Es importante mencionar que en las cuatro secuencias de ensamble analizadas, los tiempos que no son productivos (NPTCT) resultan ser mayores que los productivos (ETCT), por lo que un ahorro en el tiempo total (TCT) podría comenzar disminuyendo el tiempo no productivo (NPTCT) mediante la reducción de trayectorias o movimientos innecesarios.

6.2.2.2. Distancia

La Tabla 6.7 muestra los resultados de las métricas de distancia, en donde se observa que la secuencia 2 tiene los valores menores de EAD y NPAD, 10.10 m y 43.98 m respectivamente. Por otro lado, la secuencia 1 muestra el mayor valor EAD y NPAD con 11.9 y 45.19 m respectivamente. Por tanto, la secuencia 2 es la mejor secuencia con respecto a esta métrica de ensamble.

6.2.2.3. Energía

La tabla 6.7 también muestra los valores de las métricas de energía (TAE), en donde se observa que el consumo de energía para realizar el ensamble del motor de aire es menor utilizando la tercera secuencia de ensamble, con un valor de 10.51 joules, poco menos del 20% que la secuencia número 2, es decir, la secuencia de ensamble que requiere menos energía para realizar el ensamble es la tres. Sin embargo, para ejecutar el ensamble manual del motor de aire, el cual contiene 20 piezas pequeñas y ligeras, la métrica de energía muestra la confianza con que el usuario realizó el ensamble, es decir, el usuario puede manipular las piezas libremente sin más restricciones que las colisiones entre piezas, por lo que trayectorias sinusoidales de las piezas aumentan la energía total del ensamble. Es importante mencionar que es muy fácil caer en este tipo de trayectorias sinuosas o zigzagueantes, sobre todo cuando se tienen muchas piezas a ensamblar, ya que se requiere mucha concentración y pericia por parte del usuario para manipular los objetos virtuales. Aunado a lo anterior, un ensamble virtual prolongado, tiende a

cansar la muñeca de la mano con que se está ejecutando el ensamble, por lo que la fatiga en la muñeca de la mano conduce a realizar trayectorias de ensamble poco rectas.

6.2.2.4. Eficiencia

En relación a las métricas de eficiencia, la secuencia 3 presenta el mayor valor de TAEE, 59%, y la secuencia 4 el mayor valor APE, 68%, mientras que la secuencia 2 muestra los menores valores TAEE y APE, 49% y 62%, respectivamente. Es importante mencionar que para el caso de ensambles pequeños y ligeros como el motor de aire, el efecto de la energía no tiene un gran impacto en la decisión del mejor ensamble, sobre todo si su ensamble será manual en el proceso real; esto debido a que no existe una diferencia significativa entre los valores TAEE y APE de las 4 secuencias propuestas. Las diferencias observadas entre los valores TAEE y APE para estas secuencias se deben a la estabilidad (confianza) con que el usuario llevó cada pieza a su posición final, por lo tanto, se puede decir que el usuario fue menos estable en la secuencia 2. La Tabla 6.7 también muestra que la secuencia 2 tiene el mayor valor HE de 87%, aproximadamente un 20% mejor con respecto a las otras secuencias propuestas, por lo tanto la secuencia 2 resulta ser la mejor respecto al criterio HE. Esto indica que la secuencia 2 permite realizar el ensamble del motor de aire con menos movimientos de las piezas involucradas. Mientras que la secuencia 3 tiene el más bajo HE de 67%, indicando que bajo esta secuencia, se requiere una mayor manipulación de las piezas involucradas para concluir el ensamble.

6.2.2.5. Espacio de trabajo

De la Tabla 6.7 se observa que el menor espacio de trabajo (WS) corresponde a la secuencia 2, con un valor de $98,788 \text{ cm}^3$, mientras que el mayor espacio de trabajo corresponde a la secuencia 1, con un valor de $142,153 \text{ cm}^3$. Por lo tanto, la secuencia 2 es la mejor con base en el criterio del espacio de trabajo. En la Figura 6.10 se observa la forma que tiene cada espacio de trabajo para cada secuencia de ensamble analizada del motor de aire.

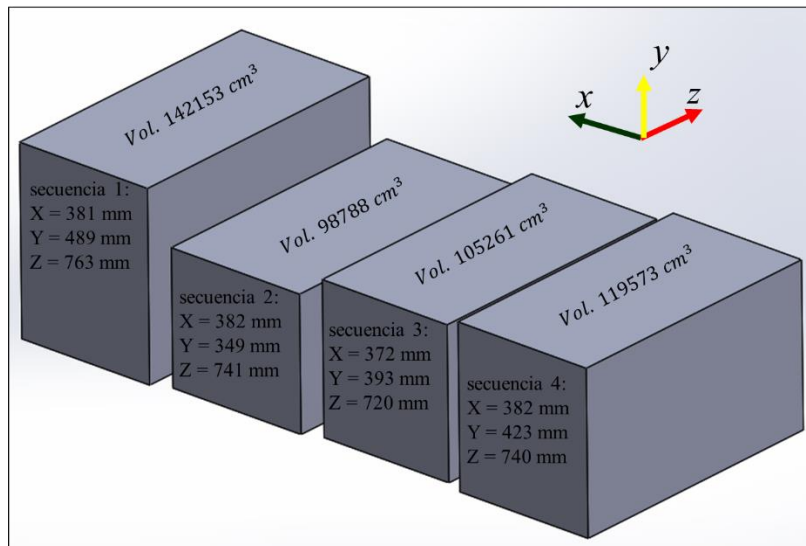


Figura 6.10. Espacio de trabajo para las cuatro secuencias de ensamble del motor de aire.

6.2.2.6. Ángulos de manipulación

De acuerdo a la Tabla 6.7 el valor de la métrica AM resultó ser igual para las 4 secuencias analizadas, las cuales solo requirieron una manipulación máxima de 180° con respecto al eje Z. Estos resultados se deben a que en la configuración inicial del motor de aire ya se tienen todas las piezas orientadas

correctamente, excepto el pistón. La Figura 6.11 muestra el giro de 180° del pistón alrededor del eje Z para ensamblarlo con su orientación correcta dentro del cilindro.

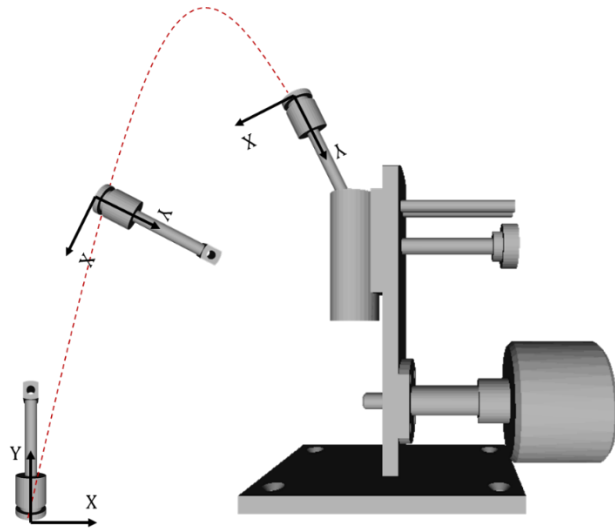


Figura 6.11. Giro de 180° del pistón para colocarlo en su posición final.

6.2.2.7. Manipulación total de las piezas

La Tabla 6.7 muestra la cantidad de veces que se tomaron las piezas del motor de aire (TAH). El ensamble completo cuenta con 20 piezas, por lo que 20 deberían de ser los movimientos realizados para completar el motor de aire. Sin embargo, la secuencia que menos movimientos utilizó resultó ser la 2 con un valor de 23, mientras que la secuencia 3 utilizó un mayor número de movimientos, 30. En general, todas las piezas se colocaron en su posición final con la primera manipulación, a excepción de la chumacera, el cigüeñal y la biela que ocuparon ser manipuladas más de una vez debido a su complejidad para ser ensamblada. Estas manipulaciones adicionales dentro del proceso real de ensamble revelan la complejidad de ensamble de algunas piezas. Sin embargo, en algunas ocasiones permite identificar si alguna pieza está siendo manipulada en exceso.

6.2.2.8. Grados de libertad

Por último, la Tabla 6.7 muestra el número de grados de libertad involucrados en el ensamble del motor de aire. Se observa que para las cuatro secuencias de ensamble analizadas es necesario utilizar por lo menos 4 grados de libertad. Tres grados de libertad corresponden a la traslación de las piezas en las direcciones (x , y y z), y un grado de libertad a la rotación de la biela. De esta manera, es posible la selección del robot necesario para realizar el ensamble del motor de aire. Por otro lado, en ensambles manuales los grados de libertad indican el nivel de destreza necesario por parte de la persona que ejecutará el ensamble.

6.2.2.9. Relación de secuencias de ensamble vs conjuntos

Una vez realizadas las pruebas anteriores y después de la experiencia ganada por el planeador al llevar a cabo estas tareas de ensamble en un ambiente virtual con retroalimentación háptica, se observa que el ensamble completo del motor de aire se puede reducir a 4 conjuntos básicos {1-2-3-4}, como se muestra en la Figura 6.12. Cada conjunto representa un sub-ensamble completo y ordenado dentro del ensamble total del motor de aire. De estos cuatro sub-ensambles, el conjunto 1 debe ser el primero en ser ensamblado, ya que representa la espina dorsal del motor de aire y es la base para ensamblar el resto de las piezas. El conjunto 4 contiene las piezas finales del ensamble, por lo que este conjunto debe ser el último en ser ensamblado, esto debido a que para llevar a cabo el ensamble de este conjunto, las

piezas 4 y 8 del conjunto 2 y 3 respectivamente ya deben de estar ensambladas. Por lo tanto, el conjunto 4 no puede ser ensamblado antes que el conjunto 2 y 3; por lo que se puede decir que todo el ensamble se reduce a dos secuencias factibles de ensamble: {1-2-3-4} y {1-3-2-4}.

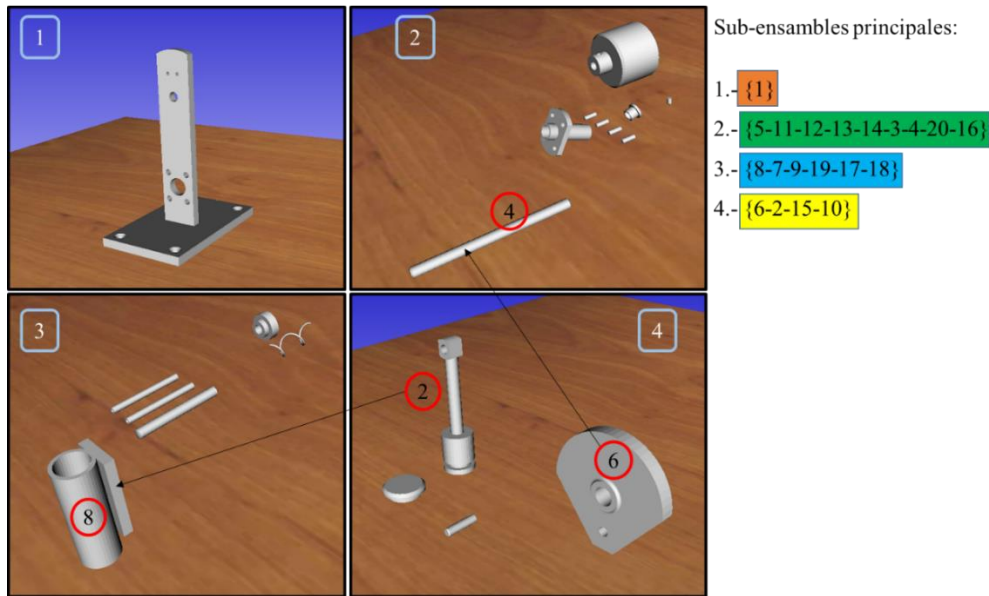


Figura 6.12. Sub-ensambles propuestos.

A partir de esta analogía entre las secuencias de ensamble y los subconjuntos, se puede visualizar en qué subconjunto se encontraba cada pieza de las 4 secuencias realizadas. La Figura 6.13 muestra las 4 secuencias realizadas. Los colores representan a los conjuntos que pertenece cada pieza. De estos resultados es evidente que la secuencia 2, que corresponde a los conjuntos {1-2-3-4}, resultó en la mejor secuencia de ensamble debido a que implica un mejor orden para ensamblar el motor de aire; es decir, primero se coloca la base, a continuación se ensambla el conjunto 2 que contiene todas las piezas posteriores del ensamble, después se realiza el ensamble del conjunto 3 con las piezas superiores, y por último se ensambla el conjunto 4 con las piezas frontales del ensamble.

1. {1-8-7-9-19-17-18-5-11-12-13-14-3-4-20-16-6-2-15-10}.
2. {1-5-11-12-13-14-3-4-20-16-8-7-9-19-17-18-6-2-15-10}.
3. {1-17-18-8-7-9-19-5-11-12-13-14-3-4-20-16-6-2-15-10}.
4. {1-5-11-12-13-14-8-7-3-2-17-9-4-6-19-15-20-16-10-18}.

Figura 6.13. Relación de secuencias de ensamble y conjuntos.

Por otro lado, la secuencia de ensamble 1 y 3 de la Figura 6.13 corresponden con la secuencia de conjuntos {1-3-2-4}. Aunque en teoría, las secuencias 1 y 3 deberían tener un tiempo de ensamble similar a la secuencia 2, estas secuencias representan un ensamble de arriba hacia abajo, quitando visibilidad y obstaculizando el ensamble de las piezas colocadas en la parte inferior. Por otro lado, la secuencia 4 presentó el mayor tiempo de ensamble TCT y NPTCT debido a que representa la secuencia con mayor desorden de ensamble; es decir, la secuencia de ensamble se mueve de un conjunto a otro como se muestra en la Figura 6.13. Es importante mencionar que la secuencia 4 resulta ser *no-factible*, sin embargo, una vez terminado el ensamble dentro del sistema HAMS, el reporte del plan de ensamble

contiene la secuencia factible. La secuencia de ensamble 4 (no-factible) pasa a ser la secuencia de ensamble 4' (factible), ver Figura 6.14, la cual es corregida y generada automáticamente por HAMS.

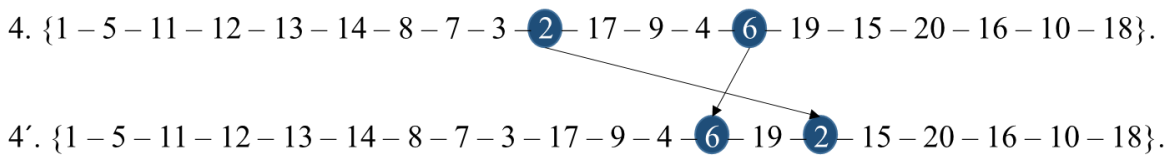


Figura 6.14. Corrección de secuencias de ensamble mediante el sistema HAMS.

Las plataformas de ensambles virtuales aprovechan la experiencia, intuición y capacidades del ser humano para proveer soluciones a los problemas de planeación de ensambles. Basta con que una persona lleve a cabo la tarea de ensamble en el ambiente virtual para que pueda obtener resultados de acuerdo a su experiencia. Por tal motivo, cada persona puede obtener diferentes resultados de acuerdo a sus conocimientos, capacidades y experiencia.

6.2.3. Discusión

Los resultados han demostrado que el módulo de planeación de ensambles virtuales dentro del sistema HAMS es una herramienta efectiva en la búsqueda del mejor plan de ensamble para un producto determinado. La plataforma HAMS incorpora la experiencia del planeador dentro del ciclo de ejecución, permitiendo la interacción del usuario con los modelos virtuales dentro de un ambiente intuitivo y dinámico.

El valor TCT para ensambles reales es menor al correspondiente TCT para ensambles virtuales, lo cual confirma que la tarea real de ensamble se realiza en menos tiempo que el ensamble virtual. Sin embargo, la gran ventaja de la planeación virtual de ensamble es la flexibilidad de realizar el ensamble las veces que sea necesario y obtener de estas pruebas, información importante de métricas y criterios de ensamble, mientras que en el proceso real de ensamble sólo se evalúa un solo criterio. El proceso de ensamble virtual, permite analizar y evaluar tantas métricas y criterios como sean necesarios, y presentarlos de manera ordenada y coherente para que el diseñador tome la mejor decisión.

La Figura 6.15 muestra una amplia gama de criterios de ensamble que pueden ser calculados y analizados automáticamente dentro del sistema virtual al momento de realizar un ensamble virtual, sin embargo el tiempo para completar la tarea de ensamble es alto. Por otro lado, el tiempo para ejecutar el ensamble real es mucho más pequeño que en el ensamble virtual, pero por lo general el único criterio analizado en el ensamble real es el tiempo para completar la tarea, dejando a un lado el resto de las métricas que pudieran ser en algunos casos más importantes que el tiempo.

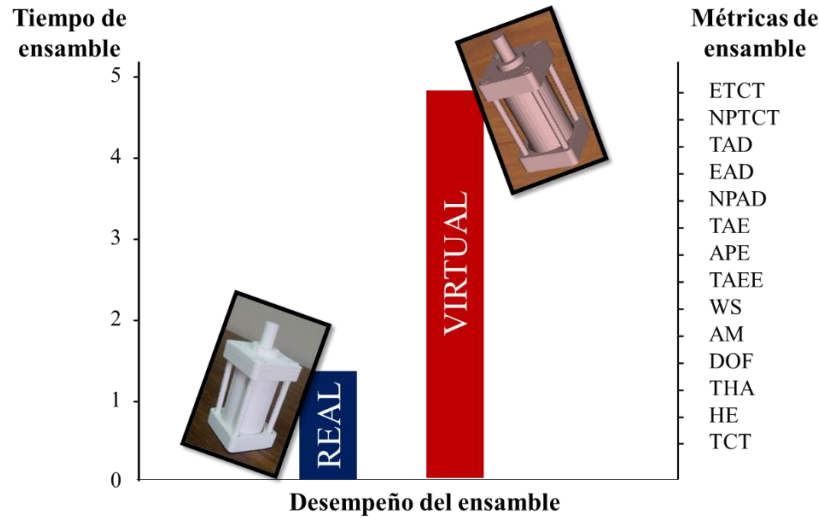


Figura 6.15. Tarea de ensamble real vs virtual.

Los métodos tradicionales para la planeación de ensambles llevan a cabo búsquedas exhaustivas con el propósito de encontrar el mejor plan de ensamble. Con estos métodos es necesario analizar todas las secuencias de ensamble, factibles y no-factibles, una por una, perdiendo tiempo valioso dentro de la zona de secuencias no-factibles de ensamble y con posibilidades de que el algoritmo arroje como secuencia óptima una secuencia no factible de realizar en el mundo real. Los ensambles virtuales asistidos por sistemas hápticos tienen la peculiaridad de analizar únicamente secuencias factibles de ensamble. Si el diseñador por error intenta llevar a cabo una secuencia no-factible de ensamble dentro del sistema HAMS, y logra completar el ensamble, el sistema automáticamente mostrará al usuario la secuencia factible con que se pudo realizar el ensamble. Es imposible realizar un ensamble con una secuencia no-factible dentro de HAMS, por lo que sí se puede realizar el ensamble, éste siempre estará soportado por una secuencia factible y lógica de realizar en el mundo real. Si el sistema HAMS es utilizado por un experto, se reduce aún más la búsqueda de la mejor secuencia de ensamble debido a que la experiencia e intuición del experto permiten ubicar perfectamente pocas secuencias de ensamble que se acercan al mejor plan de ensamble, sin necesidad de realizar una búsqueda exhaustiva de todas las secuencias de ensamble factibles, Figura 6.16.

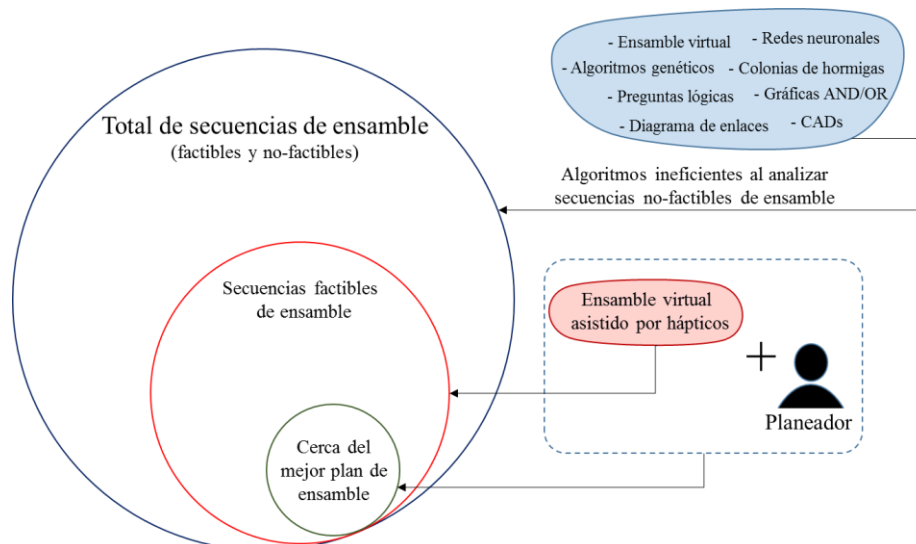


Figura 6.16. Planeación de ensambles virtuales, diferentes técnicas.

6.3. Módulo de balanceo de línea

Una vez que los tiempos para cada estación de ensamble del motor de aire se han definido, se introducen los tiempos TCT en el módulo de balanceo de línea de HAMS. La Tabla 6.8 muestra el primer intento de balanceo de línea, para lo cual el usuario introduce el nombre de la tarea, operación, tiempos y operador. Posteriormente, se realiza el cálculo automático de cada uno de los parámetros de la tabla conforme a lo descrito en la sección 4.3. Es importante mencionar que en un inicio no se define un número específico de productos que necesitan ser ensamblados en la línea de producción.

Los valores de unidades por tiempo, unidades totales y eficiencia para las tareas de la Tabla 6.8, se calculan con las ecuaciones (4.19), (4.20) y (4.21), respectivamente. Por ejemplo, para los valores de la tarea A, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$Unid/min = 60/84 = 0.71 \text{ unidades por minuto} \quad (6.4)$$

$$Unid_{tot} = (0.71) * 1 = 0.71 \text{ unidades totales} \quad (6.5)$$

$$Eficiencia (tarea A) = \{[(84/1) * (201.4)]/28800\} * 100 = 59 \% \quad (6.6)$$

El cálculo del resto de los parámetros de la Tabla 6.8 se realiza conforme a las ecuaciones (4.22) a (4.27). Primero se define el número de horas por turno, en este caso 8. Después se define el costo hora-hombre, para estos ejemplos el valor es de \$10.005 pesos por hora, ya que en San Luis Potosí el salario mínimo actual es de \$80.04 pesos por turno. Posteriormente se realizan los cálculos numéricos:

$$Unidades/hora = (0.42) * 60 = 25.2 \text{ unidades por hora} \quad (6.7)$$

$$Unidades/turno = (25.2) * 8 = 201.6 \text{ unidades por turno} \quad (6.8)$$

$$Total \text{ de personas} = 8 \text{ personas en la línea de producción} \quad (6.9)$$

$$(horas \text{ por turno})(total \text{ de personas}) = (8) * (8) = 64 \text{ horas_hombre} \quad (6.10)$$

$$Costo \text{ por turno} = (10.005) * (64) = \$640.32 \quad (6.11)$$

$$Productividad = 25.2/8 = 3.15 \quad (6.12)$$

$$Efectividad = [(800 * 201.4)/(8 * 28800)] * 100 = 70 \% \quad (6.13)$$

En la Tabla 6.8 se puede observar que la línea de producción es muy ineficiente (70%) debido a que las tareas individuales de ensamble son muy irregulares en eficiencia, mientras que la tarea G está trabajando al 100%, la tarea C opera con sólo el 10% de eficiencia. Una opción para mejorar la línea de producción consiste en variar el número de operadores por estación con el objetivo de igualar las unidades totales que se generan por cada estación. Los resultados de esta alternativa de solución se muestran en la Tabla 6.9, logrando una línea de producción con una eficiencia del 96%. En la Tabla 6.9 se observa que la eficiencia entre cada estación es muy homogéneo, siendo la más ineficiente la estación B con un 91%. A diferencia del primer balanceo de línea de la Tabla 6.8, el segundo balanceo (Tabla 6.9) tiene una mejor productividad (definida como la relación entre la cantidad de productos obtenidos entre los recursos utilizados para obtener dicha producción, unidades/(hora-hombre)), pero con un aumento considerable en el número de productos por turno y el costo por turno al contar con 56 operadores.

Tabla 6.8. Resultados del primer balanceo de línea.

| CASO | Tarea | Operación | Tiempo | Operador | Unid/min | Unid_tot | Eficiencia |
|--------------|--------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|------------|
| 1 | A | Soldadura | 84 | 1 | 0.71 | 0.71 | 59 |
| | B | Soldadura | 137 | 1 | 0.44 | 0.44 | 96 |
| | C | Ensamble | 15 | 1 | 4.0 | 4.0 | 10 |
| | D | Ensamble | 130 | 1 | 0.46 | 0.46 | 91 |
| | E | Ensamble | 88 | 1 | 0.68 | 0.68 | 62 |
| | F | Ensamble | 131 | 1 | 0.46 | 0.46 | 92 |
| | G | Ensamble | 143 | 1 | 0.42 | 0.42 | 100 |
| | H | Soldadura | 72 | 1 | 0.83 | 0.83 | 50 |
| 1 | Unidades/Turno: | | 201.6 | | | | |
| | Unidades/Hora: | | 25.2 | | | | |
| | Horas/Turno: | | 8 | | | | |
| | Total de personas: | | 8 | | | | |
| | Productividad: | | 3.15 | | | | |
| | Eficiencia: | | 70% | | | | |
| | Hora/Hombre: | | 64 | | | | |
| | Costo Hora/Hombre: | | \$ 10.005 | | | | |
| Costo/Turno: | | \$ 640.32 | | | | | |

Valores insertados por el usuario
Resultados del balanceo de línea

Tabla 6.9. Resultados del balance de línea con alta eficiencia basado en el número de operadores por estación de ensamble.

| CASO | Tarea | Operación | Tiempo | Operador | Unid/min | Unid_tot | Eficiencia |
|--------------|--------------------|------------|-----------|----------|----------|----------|------------|
| 1.1 | A | Soldadura | 84 | 6 | 0.71 | 4.29 | 93 |
| | B | Soldadura | 137 | 10 | 0.44 | 4.38 | 91 |
| | C | Ensamble | 15 | 1 | 4.0 | 4.00 | 100 |
| | D | Ensamble | 130 | 9 | 0.46 | 4.15 | 96 |
| | E | Ensamble | 88 | 6 | 0.68 | 4.09 | 98 |
| | F | Ensamble | 131 | 9 | 0.46 | 4.12 | 97 |
| | G | Ensamble | 143 | 10 | 0.42 | 4.20 | 95 |
| | H | Soldadura | 72 | 5 | 0.83 | 4.17 | 96 |
| 1.1 | Unidades/Turno: | | 1920 | | | | |
| | Unidades/Hora: | | 240 | | | | |
| | Horas/Turno: | | 8 | | | | |
| | Total de personas: | | 56 | | | | |
| | Productividad: | | 4.29 | | | | |
| | Eficiencia: | | 96% | | | | |
| | Hora/Hombre: | | 448 | | | | |
| | Costo Hora/Hombre: | | \$ 10.005 | | | | |
| Costo/Turno: | | \$ 4482.24 | | | | | |

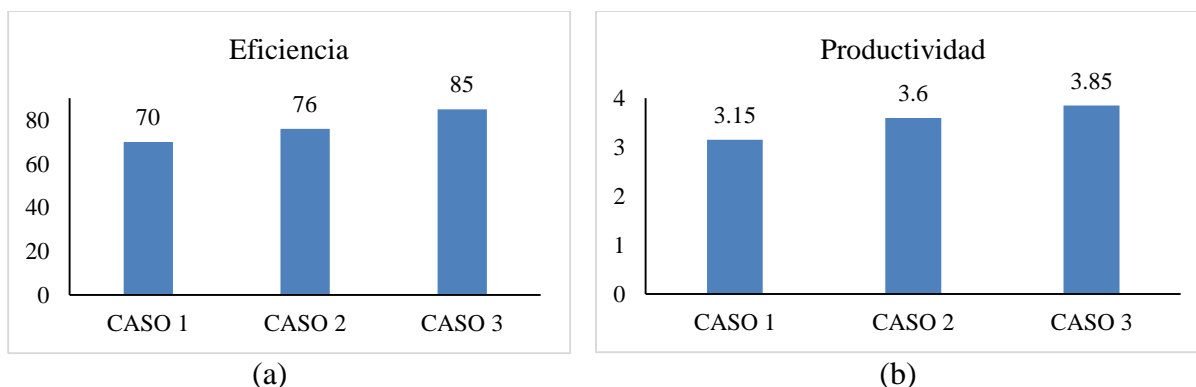
Como una segunda alternativa se propone hacer un balanceo de línea manteniendo una persona por estación. Para ello se plantea juntar tareas de ensamble en una misma estación para igualar los tiempos de cada tarea. La Tabla 6.10 muestra tres casos de balanceo de línea, donde el caso 1 corresponde a la Tabla 6.8; en el caso 2 se juntaron las tareas E y C en una sola estación; y en el caso 3 se juntaron las tareas A y H en una estación, y las tareas E y C en otra estación. Por lo que, en el caso 1 hay 8 estaciones de trabajo, en el caso 2 hay 7 estaciones de trabajo, y en el caso 3 hay 6 estaciones de trabajo. Sin definir la producción por turno se puede observar en la Tabla 6.10 que el caso 1 y 2 tienen la misma producción de 201.4 unidades por turno; sin embargo, el caso 2 presenta una mejor productividad y eficiencia, 3.6 y 76% respectivamente. La baja eficiencia del caso 1 se debe a una estación de trabajo

y un operador más en la línea de producción. La eficiencia del caso 2 ayuda a ahorrar \$ 80.04 pesos por turno, repercutiendo directamente en el precio final del producto. El caso 3 presenta la mejor productividad y eficiencia con 3.85 y 85% respectivamente, sin embargo, las unidades por turno caen a 184.08, es decir, 17.32 unidades menos por turno que los dos casos anteriores. La ventaja es que el caso 3 sólo opera con 6 estaciones de trabajo y 6 operadores, generando un costo de tan solo \$ 480.24 pesos por turno. La selección del balanceo de línea dependerá de las necesidades particulares de la empresa. Si se necesita ensamblar 200 unidades por turno, inevitablemente se tendrá que seleccionar el caso 2. El Costo Hora/Hombre va a depender de la región o país donde se instalará la línea de producción. Para este estudio se utilizó de referencia el salario mínimo establecido por la Comisión Nacional de los Salarios Mínimos publicado en el Diario Oficial de la Federación el 19 de diciembre de 2016, vigente a partir del 1 de enero de 2017 en los Estados Unidos Mexicanos [130], y con un valor de \$80.04 pesos por día laboral. Para obtener el salario por hora, este valor se dividió entre 8 horas, resultando en \$10.005 pesos por hora.

Tabla 6.10. Diferentes casos de balanceo de línea del motor de aire.

| Resultados de balanceo | Caso 1 | Caso 2 | Caso 3 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Unidades/Turno: | 201.4 | 201.4 | 184.08 |
| Unidades/Hora: | 25.17 | 25.17 | 23.08 |
| Horas/Turno: | 8 | 8 | 8 |
| Total de personas: | 8 | 7 | 6 |
| Productividad: | 3.15 | 3.60 | 3.85 |
| Eficiencia: | 70% | 76% | 85% |
| Hora/Hombre: | 64 | 56 | 48 |
| Costo Hora/Hombre: | \$ 10.005 | \$ 10.005 | \$ 10.005 |
| Costo/Turno: | \$ 640.32 | \$ 560.28 | \$ 480.24 |

Cabe mencionar que para este análisis no se consideró la producción por turno como dato de entrada a satisfacer para resolver el problema de balanceo. Sin embargo, para problemas específicos la configuración de la línea de producción puede obtenerse con base a este valor, ya que es necesario cumplir con la producción esperada con la máxima productividad y eficiencia, y con el menor número de recursos humanos. El módulo de balanceo de línea de HAMS compara gráficamente los cuatro criterios más relevantes de cada caso: eficiencia, productividad, unidades por turno y total de personas, como se puede observar en la Figura 6.17. Esta comparación gráfica se actualiza de manera automática al agregar un nuevo caso de estudio.



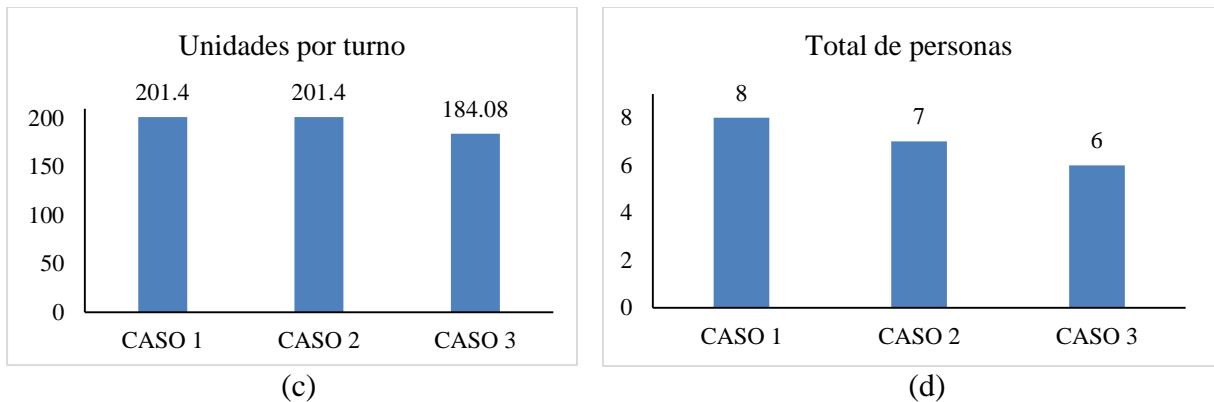


Figura 6.17. Gráfica comparativa del balanceo de línea: a) eficiencia, b) productividad, c) unidades por turno y d) total de personas.

6.3.1. Diseño de la línea de producción

Una vez que se ha realizado el balanceo de la línea y suponiendo que la producción mínima requerida es de 200 unidades por turno, se selecciona el caso 2, que es la configuración que resulto con mejor eficiencia para satisfacer la producción requerida del motor de aire. La Figura 6.18 muestra el diseño propuesto de la línea de ensamble con una configuración en línea recta. Las estaciones de ensamble A, B y H requieren operaciones de soldadura. Con esta configuración en línea recta, estas tres tareas requieren instalaciones y equipo especial, por lo que resultaría más eficiente concentrar el proceso de soldadura en una sola ubicación y no en tres diferentes como es el caso de la Figura 6.18. Aprovechando que la primera y última estación requiere operaciones de soldadura, se propone realizar un diseño en U donde la tarea B se ubique en la parte interna. La Figura 6.19 muestra el diseño propuesto en U de la línea de producción. En esta configuración se concentran los procesos de soldadura en un lado (A, B y H) y los procesos de ensamble en otro (D, E, C, F, G). Por lo que la instalación del equipo de soldadura se aprovecha para realizar las tres tareas arriba mencionadas.

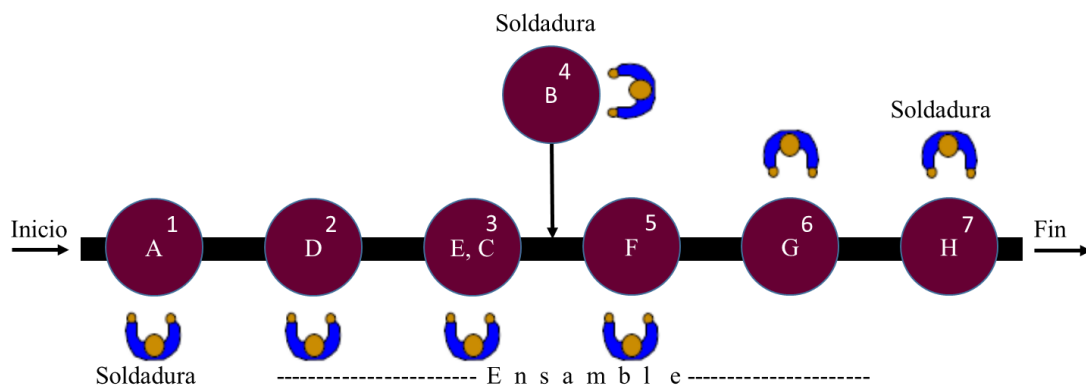


Figura 6.18. Diseño de la línea de producción en línea recta del motor de aire.

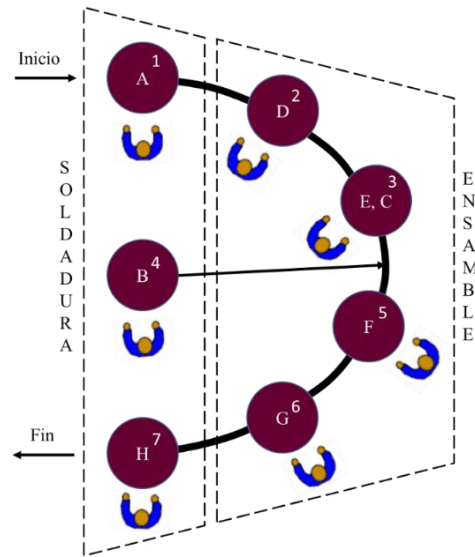


Figura 6.19. Diseño de la línea de producción en U del motor de aire.

6.4. Módulo robótico

La vinculación del ensamble manual dentro de HAMS a un ensamble robótico resulta muy interesante debido a que el uso de los robots en aplicaciones industriales ha ido en aumento. Como se describió en el capítulo anterior, la trayectoria de ensamble que sigue el robot es exactamente la misma que realizó el usuario o experto de manera virtual. La generación del código de ensamble para un robot también permite al usuario visualizar el espacio de trabajo necesario para desarrollar dicho ensamble.

Para realizar el ensamble de la tarea D mediante un robot (ver Figuras 5.43 y 5.44 del capítulo 5), se generó un código con más de 5000 coordenadas que el robot debe seguir a partir del movimiento realizado por el experto. Un extracto de este código robótico generado se muestra en la Figura 6.20. Sin embargo, al realizar la operación de suavizado de las trayectorias del robot, el ensamble se reduce a menos de 90 coordenadas, permitiendo una ejecución más rápida (apéndice C). La Figura 6.21a muestra la trayectoria de ensamble completa, mientras que la Figura 6.21b muestra la trayectoria de ensamble suavizada.

real, simplemente se tendría que realizar un proceso de transformación de coordenada para pasar del sistema de referencia dentro de HAMS al sistema de referencia del robot real. Otra opción de compatibilidad es adecuar el sistema de referencia de HAMS al de un robot en particular, en caso de ya tener un robot designado para las tareas de ensamble.

La depuración de la trayectoria del ensamble virtual realizado por el usuario permite al robot alcanzar las posiciones finales de las piezas en un tiempo más corto, ya que se reduce considerablemente el número de coordenadas que hay que seguir. Sin embargo, al depurar las trayectorias se puede tener problemas de precisión al intentar ensamblar las piezas; esto debido a que el último punto en la trayectoria suavizada podría quedar ubicado antes de llegar a su posición final. También es importante mencionar que las trayectorias de manipulación generadas por el sistema HAMS son con respecto al centro geométrico de cada pieza, esto implica que un robot real no pueda alcanzar estas posiciones, ya sea para la sujeción o manipulación de las piezas. Esta limitación corresponde a que el sistema HAMS utiliza dispositivos hápticos con un solo punto de contacto dentro de la escena virtual. Sin embargo, un dispositivo háptico con más puntos de contacto, por ejemplo, un guante háptico, podría simular perfectamente un gripper de un robot, permitiendo generar un código más real y factible para ser ejecutado por un robot. Adicionalmente se puede decir que las métricas de tiempo, distancia y energía, obtenidas en el ensamble virtual realizado por el usuario, pueden ser distintas con respecto al ensamble robótico, ya que estas métricas corresponden a ensambles manuales. Por otro lado, las métricas de espacio de trabajo, grados de libertad y manipulación total del ensamble se transfieren directamente del ensamble virtual al ensamble robótico.

Finalmente se puede decir que el sistema HAMS permite analizar un ensamble manual y robótico, proveyendo información técnica importante para el diseño de las celdas o líneas de producción. Las celdas de ensamble pueden ser diseñadas tomando en cuenta las métricas de ensamble del espacio de trabajo (WS) y grados de libertad (DOF).

Con el propósito de analizar y evaluar las técnicas de realidad virtual y sistemas hápticos como una herramienta para mejorar los métodos tradicionales de planeación y entrenamiento de ensambles, en el presente trabajo de tesis se desarrolló un sistema de realidad virtual para llevar a cabo tareas de planeación y entrenamiento de ensambles. El sistema desarrollado, llamado HAMS, consta de los siguientes módulos: entrenamiento, planeación, balance de línea y robótico. Los resultados de la evaluación del entrenamiento virtual de ensambles, mostraron una mejora significativa de hasta un 80% en el desarrollo del ensamble real para el personal que se entrenó a través de sistemas HAMS, comparado con el personal entrenado de manera tradicional. Los resultados obtenidos en la planeación de ensamble demostraron que el sistema HAMS es una herramienta efectiva en la búsqueda del mejor plan de ensamble, ya que integra la experiencia, intuición y destreza humana, los cuales no son tomados en cuenta por los métodos tradicionales. La principal ventaja de la planeación de ensambles dentro del sistema HAMS es la extracción y el cálculo de las métricas de ensamble a partir de la ejecución del ensamble virtual y su posterior evaluación para así lograr obtener el mejor plan de ensamble de acuerdo a las necesidades del planeador.

Contribuciones de la investigación

Las principales contribuciones científicas y tecnológicas del trabajo desarrollado son:

- **Sistema HAMS**

Se desarrolló el sistema HAMS como una plataforma computacional para llevar a cabo tareas de entrenamiento, planeación y evaluación de ensambles virtuales con asistencia de dispositivos hápticos, así como el análisis de ensambles manual-robótico y líneas de producción.

Las características principales y sobresalientes del sistema de planeación y entrenamiento de ensambles desarrollado son:

- La interacción con el usuario es de manera libre e intuitiva.
- Integra la noción de accesibilidad y estabilidad del ensamble.
- Proporciona al usuario el sentido del tacto y cinestésico por medio del dispositivo háptico.
- Utiliza un enfoque híbrido para la simulación del ensamble – modelado basado en la física y modelado basado en restricciones.
- Las geometrías importadas dentro del sistema HAMS utilizan formatos STL, OBJ o VTK.
- Permite la capacitación y entrenamiento virtual de tareas de ensamble mecánico.
- Proporciona información al supervisor sobre el progreso de cada participante.
- Facilita el análisis del diseño y configuración de productos, así como su influencia en el desempeño del proceso de ensamble.
- Genera automáticamente el plan de ensamble a partir de la información obtenida del proceso de ensamble virtual-háptico realizado por el usuario.
- Obtiene el mejor plan de ensamble, con respecto a las métricas evaluadas por el planeador.
- Permite el diseño y balanceo de una línea de producción a partir de la ejecución del ensamble virtual correspondiente a cada estación de trabajo.
- Genera un código a partir de la ejecución del ensamble virtual para que un robot reproduzca el mismo ensamble.

Dentro del sistema HAMS, un producto puede ser analizado y evaluado desde sus primeras etapas en el proceso de la planeación de ensamble, hasta el diseño de su línea de producción (Figura C1). Durante todo este proceso de análisis y evaluación del ensamble, el sistema HAMS va proporcionando experiencia al usuario en la realización de dicho ensamble; experiencia que puede ser aplicada directamente al proceso del ensamble real del mismo producto. Por otro lado, el sistema HAMS permite la capacitación y entrenamiento a los usuarios en la realización de una tarea de ensamble en un ambiente de realidad virtual.

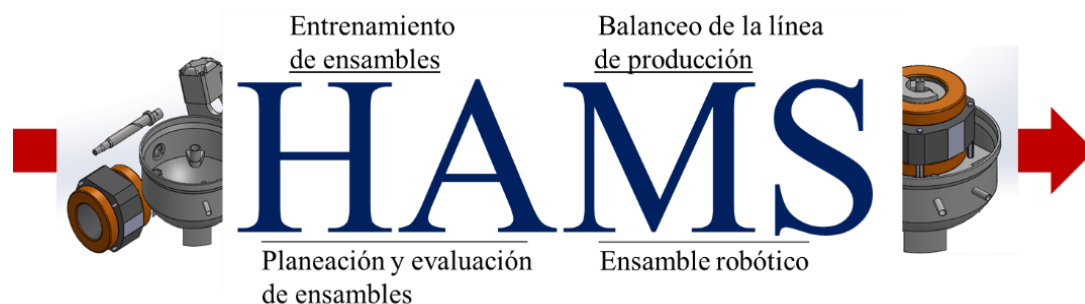


Figura C1. Análisis de un ensamble a través de HAMS.

La Tabla C1 muestra las plataformas virtual-háptico más completas para el entrenamiento virtual de ensambles, y se comparan con el sistema HAMS desarrollado en este trabajo. Se observa que la plataforma HAMS cuenta con tres modos de entrenamiento y la ejecución virtual-háptico de ensambles complejos, llevando a cabo el ensamble de manera libre o con el uso de restricciones y finalmente evaluar la eficiencia del entrenamiento virtual de ensamble, permitiendo así el monitoreo del progreso del participante. El resto de las plataformas desarrolladas sólo utilizan un modo de entrenamiento, con tareas semi-complejas, y sin llegar a la evaluación de la eficiencia del entrenamiento virtual.

Tabla C1. Principales plataformas para el entrenamiento virtual de ensamble.

| Entrenamiento virtual de ensambles (Autores) | Modo de entrenamiento | | | Tareas de ensamble | | | Manipulación de las piezas | | Evaluación del ensamble | | Evaluación de la eficiencia del entrenamiento virtual de ensambles |
|--|-----------------------|---------|--------|--------------------|---------------------|-------------|----------------------------|----------------------|-------------------------|-------|--|
| | Virtual - háptico | Virtual | Visual | No. de tareas | No. partes/ensamble | Complejidad | Libre | Uso de restricciones | TCT | ANOVA | |
| Oren et al. [84] | X | | | 1 | 6 | SC | X | | X | | X |
| Bordegoni et al. [87] | X | | | 1 | 2 | SC | X | | | | X |
| Adams et al. [68] | X | X | | 1 | 37 | SC | X | | X | X | X |
| HAMS | X | X | X | 5 | 6 | C | X | X | X | X | X |

S- simple, SC- semi-complejo, C- complejo

La Tabla C2 muestra las plataformas virtual-háptico más importantes en la evaluación de planes de ensamble, y se comparan con el sistema HAMS desarrollado en este trabajo. En la tabla se observa que el sistema HAMS es el único en obtener la generación de la secuencia de ensamble, así como obtener la representación y generación del plan de ensamble con el objetivo de evaluar los diferentes planes de ensamble y obtener el mejor plan de ensamble. También se observa que las métricas más analizadas por las diversas plataformas sólo se limitan a cuatro, siendo el TCT la métrica más evaluada, sin embargo, dentro del sistema HAMS pueden ser calculados automáticamente una amplia gama de criterios y métricas de ensamble que pudieran ser en algunas ocasiones más importantes que el TCT.

Tabla C2. Principales plataformas en la evaluación de planes de ensamble.

| Evaluación de planes de ensamble (Autores) | Evaluación del sistema | Generación de secuencias | Métricas del ensamble analizadas | | | | Plan de ensamble | | |
|--|------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----|-------------|---------------|------------------|----------------|------------|
| | | | TCT | DOF | Estabilidad | Accesibilidad | Representación | Generación | Evaluación |
| Yoon [93] | X | | X | X | X | | | X ¹ | |
| Seth [94] | X | | X | | X | | | X ² | |
| Hassan [97] | X | | | | X | | | X ³ | |
| HAMS | X | X | X | X | X | X | X | X | |

¹ Ambiente virtual en 2D
² Únicamente mencionado
³ En colaboración con algoritmo *Ant colony*

El sistema HAMS desarrollado surge como una herramienta para mejorar las técnicas de entrenamiento y planeación de procesos de ensamble y fabricación. Esta mejora es en términos de tiempo de planeación, precisión de la planeación y reducción de errores mediante las simulaciones virtuales respectivas. Sin embargo, la plataforma HAMS aún esta limitada a la ejecución de ensambles semi-complejos y a no permitir deformaciones entre las piezas involucradas, por lo que un resorte es considerado como una pieza rígida sin almacenar ni ceder energía. La simulación del ensamble de un tornillo como tal, también queda fuera del alcance de este trabajo, debido al costo computacional que representa por los múltiples contactos que se generan entre la rosca del tornillo y el orificio roscado. Es importante mencionar que estas limitantes se pueden observar en todas las plataformas de ensambles virtual-háptico.

• Entrenamiento virtual de procesos de ensamble

La efectividad del entrenamiento virtual de ensambles se evaluó en términos del porcentaje de mejora del tiempo para completar la tarea real, en comparación con el enfoque tradicional del entrenamiento de ensamble. Los resultados demostraron que el ensamble virtual es una herramienta eficaz para mejorar las habilidades de ensamble del usuario, esto debido a que las personas que se capacitaron dentro de un entorno virtual tuvieron un desempeño en el ensamble real superior a las personas entrenadas de una manera tradicional. Los resultados también evidencian que la efectividad del entrenamiento virtual depende del modo de entrenamiento y de la complejidad de la tarea de ensamble. Esta dependencia radica principalmente en la capacidad del sistema para proporcionar al usuario retroalimentación de fuerza. El modo de entrenamiento con mayor efecto resultó ser el virtual-háptico, mejorando el TCT del ensamble real hasta en un 80% para las tareas de alta complejidad, 65% para las tareas de mediana complejidad y 18% para las de baja complejidad, en comparación con personas que

entrenaron tradicionalmente. Por otro lado, entre más compleja la tarea de ensamble, mayor será el efecto del entrenamiento virtual en el desempeño del ensamble real. Por tanto, la máxima efectividad del entrenamiento virtual de ensamble se obtuvo con el modo de entrenamiento virtual-háptico y tareas de ensamble con alta complejidad. Más aún, el entrenamiento de ensamblajes virtuales con retroalimentación háptica resultó ser más realista, interactivo, intuitivo y efectivo que el entrenamiento virtual sin renderizado háptico.

Los resultados también evidencian que el proceso de aprendizaje en sistemas de ensamble virtuales ocurre más lento que en el proceso natural de aprendizaje con ensamblajes reales. Lo anterior puede estar relacionado al hecho de que la percepción de la realidad es más lenta en un ambiente virtual que en la vida real. Los resultados también sugieren un factor de escalamiento promedio de 17.7 entre el valor TCT del ensamble virtual y el TCT del ensamble real. Sin embargo, este factor puede llegar a depender significativamente del rendimiento computacional del sistema de ensamble virtual.

- **Planeación y evaluación virtual de procesos de ensamble**

Se presentó el desarrollo de un nuevo método para la generación y evaluación automática de planes de ensamble basado en la realidad virtual y los dispositivos hápticos. A diferencia de las plataformas de realidad virtual existentes, el sistema propuesto permite obtener información relevante del ensamble ejecutado por el usuario, analizando y calculando una amplia gama de métricas y criterios de ensamble, permitiendo de esta manera no solo simular tareas de ensamble, si no también analizar y seleccionar el mejor plan de ensamble. Los métodos tradicionales para la planeación de ensamblajes, en particular los algoritmos genéticos, llevan a cabo búsquedas exhaustivas con el propósito de encontrar el mejor plan de ensamble. Mientras que el sistema HAMS aprovecha la experiencia e intuición del experto para reducir la búsqueda y análisis a únicamente secuencias factibles de ensamble. La combinación del sistema HAMS propuesto con un experto en procesos de ensamble, reduce aún más la búsqueda del mejor plan de ensamble debido a que la pericia del experto le permite ubicar inmediatamente secuencias de ensamble que se acercan al mejor plan de ensamble, sin necesidad de realizar una búsqueda exhaustiva de todas las secuencias factibles de ensamble. Cabe mencionar que por cada ejecución del ensamble virtual, HAMS transfiere conocimiento al experto, por lo que la mejora en el proceso de un ensamble virtual es continuo; por ejemplo, diez repeticiones de un ensamble virtual pueden revelar mejoras en el proceso de ensamble, mientras que en cinco repeticiones no se hubieran podido detectar. Todo esto permite que al realizar el ensamble real, el experto ya posee un gran conocimiento de todos los pros y contras que pudieran surgir de dicho ensamble, así como también contar con un reporte que indica la mejor secuencia para realizar dicho ensamble.

La importancia y utilidad del sistema HAMS es que mejora las técnicas de planeación de ensamble existentes, ya que no se limita a la simple ejecución virtual del ensamble como en las plataformas hasta ahora existentes, sino que aprovecha el uso potencial de la realidad virtual y los sistemas hápticos, obteniendo información técnica y relevante que ayuda a diseñar un proceso real de ensamble, tales como tiempos, distancia recorrida, consumo de energía, espacio de trabajo requerido, etc. Por otro lado, las limitaciones dentro del sistema HAMS siguen siendo un tiempo alto en la realización del ensamble virtual comparado con la ejecución del ensamble real, así como la utilización de dispositivos hápticos con un solo punto de contacto dentro de la escena virtual, perdiendo un poco el realismo en el proceso de manipulación de las piezas.

- **Balanceo de línea de ensamble**

Los resultados han demostrado que el balanceo virtual de líneas de ensamble y producción es una herramienta efectiva que permite analizar un producto desde sus primeras etapas de ensamble, hasta el diseño de la línea de producción, todo esto sin necesidad de la construcción física del producto ni

espacio dentro de la planta. En el caso particular del sistema HAMS, el módulo de balanceo virtual de líneas de ensamble permitió planificar y diseñar las estaciones de trabajo, equilibrando la frecuencia de salida de una estación y la frecuencia de alimentación de la estación de trabajo que realiza la siguiente operación. Para llevar a cabo el análisis y diseño del balanceo virtual de línea, se analiza previamente el ensamble virtual de cada estación de trabajo y se obtienen sus métricas correspondientes. Posteriormente se transfiere directamente la información de cada tarea de ensamble al módulo de balanceo para llevar a cabo el balanceo virtual de línea. De este modo, el balanceo virtual de la línea de ensamble se analiza con el TCT del mejor plan de ensamble para cada estación de trabajo.

La mayoría de las técnicas tradicionales para el análisis del balanceo de línea, se enfocan en algoritmos heurísticos. Sin embargo, este tipo de algoritmos usualmente son expresados en términos matemáticos, por lo que sólo pueden ser entendidos por expertos, y no por el personal encargado del departamento de producción. La simulación virtual de las tareas de ensamble y el módulo de balanceo de línea, permiten al usuario interactuar con el sistema HAMS de un modo más natural e intuitivo, donde se lleva a cabo el balanceo de línea sin el conocimiento detallado del algoritmo que lo simula y calcula. Dentro del sistema HAMS, el usuario puede definir fácilmente la información de las tareas, operaciones, tiempos y operadores. Para posteriormente, diseñar la línea de producción.

- **Ensamble robótico**

Aun cuando los robots industriales han sido ampliamente utilizados en aplicaciones de ensambles industriales desde hace ya varias décadas, por lo que general su programación se basa en la definición y detallado de la tarea de ensamble real. Sin embargo, la programación del robot por medio de ambientes virtuales evita la necesidad de infraestructura física, permite programar y evaluar fácilmente nuevas tareas de ensamble, así como reprogramar una tarea en particular. Dentro de HAMS se logró implementar un algoritmo que genera un código para que un robot en particular reproduzca el mismo ensamble, permitiendo pasar de manera directa del ensamble virtual al ensamble real realizado por un robot. De esta manera se pueden analizar, evaluar y depurar trayectorias de ensamble y espacios de trabajo que el robot necesite para llevar a cabo un ensamble, así como la concepción del tipo de robot necesario en caso de no contar con uno.

Trabajo futuro

Con el propósito de continuar con el trabajo de investigación presentado en esta tesis, se identifican las siguientes actividades como trabajo futuro:

1. Desarrollar algoritmos que mejoren el desempeño de la detección de colisiones de figuras complejas dentro del sistema HAMS; esto debido a que se ha observado que la detección de colisiones representa un gran costo computacional.
2. Lograr el enlace directo entre el sistema HAMS y los sistemas CAD, esto con el objetivo de importar las piezas con datos relacionados al ensamble, tales como restricciones, ubicaciones, tipo de material, etc.
3. Incluir dentro del sistema HAMS una base de datos con modelos virtuales de componentes estándar tales como, pernos, tornillos, tuercas, remaches, engranes, poleas, resortes, etc., prediseñados y listos para ser cargados dentro del ambiente virtual.
4. Analizar el efecto de los diferentes niveles de inmersión en tareas de entrenamiento y planeación virtual de ensambles.
5. Analizar el efecto del uso de sistemas hápticos con múltiples puntos de contactos, por ejemplo los guantes hápticos, en tareas de entrenamiento y planeación virtual de ensambles.

6. Analizar los ensambles de manera colaborativa, trabajando con otros usuarios en diferentes ubicaciones geográficas, con el objetivo de que los ensambles sean evaluados y probados por otros expertos.
7. Generar la visualización virtual de la línea de producción seleccionada, con el objetivo de analizar el espacio de trabajo a ocupar dentro de la planta y el tipo de línea deseada.

-
- [1] Ham I. and Lu S.C.Y. (1988), "Computer-aided process planning: the present and the future", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 37 No. 2, pp. 591-601.
 - [2] Massie T.H. and Salisbury K. (1994), "The phantom haptic interface: a device for probing virtual objects", *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division. DSC-Vol. 55-1*.
 - [3] Burdea G.C. (1999), "Invited review: the synergy between virtual reality and robotics", *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 15 No. 3, pp. 400-410.
 - [4] Van Erp J.B.F., Kyung K.U., Kassner S., Carter J., Brewster S., Weber G. and Andrew I. (2010), "Setting the standards for haptic and tactile interactions: ISO's work", *EuroHaptics 2010: Haptics: generating and perceiving tangible sensations*, pp. 353-358.
 - [5] Boothroyd G. (1992), "Assembly automation and product design", Marcel Dekker, New York.
 - [6] Whitney D.E., Mantripragada R., Adams J.D. and Rhee S.J. (1999), "Designing assemblies", *Research in Engineering Design*, Vol. 11 No. 4, pp. 229-253.
 - [7] Lin Y.J. and Farahati R. (2003), "CAD-Based virtual assembly prototyping – A case study", *Int J Adv Manuf Technol*. Vol. 21 No. 4, pp. 263-274.
 - [8] Gupta S.K., Paredis J.J., Sinha R. and Brown P.F. (2001), "Intelligent assembly modeling and simulation", *Assembly Automation*, Vol. 21 No. 3, pp. 215-235.
 - [9] Homem de Mello L.S. and Sanderson A.C. (1988), "Automatic generation of mechanical assembly sequences", *Technical Report, CMU-RI-TR-88-19*, The Robotics Inst., Carnegie-Mellon Univ.
 - [10] Wilson R.H. (1992), "On geometric assembly planning", PhD thesis, Stanford University, California.
 - [11] Wolter J.D. (1988), "On the automatic generation of plans for mechanical assembly", PhD thesis, University of Michigan, Michigan.
 - [12] Wilson R.H. and Rit J.F. (1991), "Maintaining geometric dependencies in assembly planning", *Computer-Aided mechanical assembly planning*, Vol. 148 No. 1, pp. 217-241.
 - [13] Wolter J.D. (1989), "On the automatic generation of assembly plans", *Robotic and automation, Proceeding. IEEE International Conference on*.
 - [14] Jiménez P. (2013), "Survey on assembly sequencing: a combinatorial and geometrical perspective", *J Intell Manuf*, Vol. 24 No. 2, pp. 235-250.
 - [15] Homem de Mello L.S. and Sanderson A.C. (1991), "A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequence" *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7 No. 2, pp. 228-240.
 - [16] Wang H., Xiand D., Rong Y and Zhang L. (2013), "Intelligent disassembly planning: its fundamental methodology", *Assembly Automation*, Vol. 33 No. 1, pp. 78-85.
 - [17] Sanderson A.C., Homem de Mello L.S. and Zhang H. (1990), "Assembly sequence planning", *AI Magazine*, Vol. 11 No. 1, pp. 62-81.
 - [18] Krogh B.H. and Sanderson A.C. (1985), "Modeling and control of assembly task and systems", *Technical Report CMU-RI-TR-86-1*, Robotics Institute, Carnegie-Mellon University.
 - [19] Homem de Mello L.S. and Sanderson A.C. (1990), "And/or graph representation of assembly plans", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 6 No. 2, pp. 188-199.
 - [20] Lui M.M. (1988), "Generation and evaluation of mechanical assembly sequence using the liaison-sequence method", Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Also published as Report CSDL-T-990, The Charles Stark Draper Laboratory.

- [21] Baldwin D.F., Abell E.A., Lui M. M., De Fazio T.L. and Whitney D.E. (1991), "An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical products", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7 No. 1, pp. 78-94.
- [22] Romney B., Godard C., Goldwasser M. and Ramkumar G. (1995), "An efficient system for geometric assembly sequence generation and evaluation", Proc. ASME. Int. Computers in Engineering Conf., pp. 699-712.
- [23] De Fazio T. L. and Whitney D.E. (1987), "Simplified generation of all mechanical assembly sequence", IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. 3 No. 6, pp. 640-658.
- [24] Homem de Mello L.S. and Sukhan L. (1991), "Computer-Aided mechanical assembly planning", foreword by George A. Beker, Kluwer, Kluwer Academic Publishers.
- [25] Bonneville F., Perrard C and Henrioud J.M. (1995), "A genetic algorithm to generate and evaluate assembly plans", Emerging Technologies and Factory Automation. ETFA, Proceedings, INRIA/IEEE Symposium on.
- [26] Lazzarini B. and Marcelloni F. (2000), "A genetic algorithm for generating optimal assembly plans", Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 14 No. 4, pp. 316-329.
- [27] Smith S.S. (2004), "Using multiple genetic operators to reduce premature convergence in genetic assembly planning", Computers in Industry, Vol. 54 No. 1, pp. 35-49.
- [28] Marian R.M., Luong L.H.S. and Abhary K. (2006), "A genetic algorithm for the optimisation of assembly sequences", Computers and Industrial Engineering, Vol. 50 No. 4, pp. 503-527.
- [29] Yolmeh A. and Kianfar F. (2012), "An efficient hybrid genetic algorithm to solve assembly line balancing problem with sequence-dependent setup times", Computers and Industrial Engineering, Vol. 62 No. 4, pp. 936-945.
- [30] Motavalli S. and Islam A-UL (1997), "Multi-criteria assembly sequencing", Computers and Industrial Engineering, Vol. 32 No. 4, pp. 743-751.
- [31] Lee H-R. and Gemmill D.D. (2001), "Improved methods of assembly sequence determination for automatic assembly systems", European Journal of Operational Research, Vol. 131 No. 3, pp. 611-621.
- [32] Hui W., Dong X. and Guanghong D. (2006), "A new heuristic method for assembly planning", Computational Engineering in Systems Applications, IMACS Multiconference on.
- [33] Wang J.F., Liu J.H. and Zhong Y.F. (2005), "A novel ant colony algorithm for assembly sequence planning", Int J Adv Manuf Technol. Vol. 25 No. 11, pp. 1137-1143.
- [34] Akpınar S., Bayhan G.M. and Baykasoglu A. (2013), "Hybridizing ant colony optimization via genetic algorithms for mixed-model assembly line balancing problem with sequence dependent setup times between tasks", Applied Soft Computing, Vol. 13 No. 1, pp. 574-589.
- [35] Wang H., Rong Y. and Xiang D. (2014), "Mechanical assembly planning using ant colony optimization", Computer-Aided Design, Vol. 47 No. 1, pp. 59-71.
- [36] Lv H. and Lu C. (2010), "An assembly sequence planning approach with a discrete particle swarm optimization algorithm", Int J Adv Manuf Technol. Vol. 50 No. 5, pp.761-770.
- [37] Wang Y. and Liu J.H. (2010), "Chaotic particle swarm optimization for assembly sequence planning", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 26 No. 2, pp. 212-222.
- [38] Li M., Wu B., Hu Y., Jin C. and Shi T. (2013), "A hybrid assembly sequence planning approach based on discrete particle swarm optimization and evolutionary direction operation", Int J Adv Manuf Technol. Vol. 68 No. 1, pp. 617-630.
- [39] Raju M.V.A., Biswal B.B. and Deepak B.B.V.L. (2016), "Optimal robotic assembly sequence generation using particle swarm optimization", Journal of Automation and Control Engineering, Vol. 4 No. 2, pp. 89-95.
- [40] Hao H. and Huang T. (2000), "Disassembly sequence generation using a neural network approach", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 19 No. 2, pp. 73-82.

- [41] Sinanoglu C. and Borklu H.R. (2005), "An assembly sequence-planning system for mechanical parts using neutral network", *Assembly Automation*, Vol. 25 No. 1, pp. 38-52.
- [42] Chen W., Hsu Y., Hsieh L. and Tai P. (2010), "A systematic optimization approach for assembly sequence planning using Taguchi method, DOE, and BPNN", *Expert Systems with Applications*, Vol. 37 No. 1, pp. 716-726.
- [43] Abrantes M.J. and Hill S.D. (1996), "Computer-aided planning of mechanical assembly sequence", Technical Report 95-7, Robotics and Digital Technology, Monash University, Clayton Australia.
- [44] Jones R.E. and Wilson R.H. (1996), "A survey of constraints in automated assembly planning", *Robotics and Automation. Proceeding. IEEE International Conference on*.
- [45] Goldwasser M., Latombe J. and Motwani R. (1999), "Complexity measures for assembly sequences", *International Journal of Computational Geometry and Applications*, Vol. 9 No. 4-5, pp. 371-417.
- [46] Jayaram S. Connacher H.I. and Lyons K.W. (1997), "Virtual assembly using virtual reality techniques", *Computer-Aided Design*, Vol. 29 No. 8, pp. 575-584.
- [47] Sutherland I.E. (1965), "The ultimate display", *Proceeding of IFIPS Congress*, Vol. 2, New York, NY, USA, pp. 506-508.
- [48] González-Badillo G. (2014), "Análisis y evaluación del desempeño de tareas de ensamble en ambiente virtual asistido por sistemas hápticos", Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P.
- [49] Medellín-Castillo H.I., Gallegos-Nieto E., Espinosa-Castañeda R. and Rodríguez-Obregón D. (2015), "Desarrollo de un sistema de realidad virtual asistido por dispositivos hápticos para la enseñanza-aprendizaje del sistema Braille", *Revista de Tecnología e Innovación*.
- [50] Raffin R., Gesquiere G., Remy E. and Thon S. (2004), "VirSculpt: a virtual sculpting environment", *International Conference Graphicon*, Moscow, Russia.
- [51] Arbabtafti M., Moghaddam M., Nahvi A., Mahvash M. Richardson B. and Shirinzadeh B. (2011), "Physics-Based haptic simulation of bone machining", *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 4 No. 1, pp. 39-50.
- [52] Medellín-Castillo H.I., González-Badillo G., Govea E., Espinosa-Castañeda R. and Gallegos E. (2015), "Development of haptic-enabled virtual reality applications for engineering, medicine and art", *Proceedings of the ASME 2015, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2015*, November 13-19, Houston, Texas.
- [53] Prasolova-Forland E., Fominykh M., Darisiro R. and Morch A.I. (2013), "Training cultural awareness in military operations in a virtual afghan village: A methodology for scenario development", *46th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- [54] Chen Y.H., Wang Y.Z. and Yang Z.Y. (2004), "Towards a haptic virtual coordinate measuring machine", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44 No. 10, pp. 1009-1017.
- [55] Fletcher C., Ritchie J., Lim T. and Sung R. (2013), "The development of an integrated haptic VR machining environment for the automatic generation of process plans", *Computers in Industry*, Vol. 64 No. 8, pp. 1045-1060.
- [56] Pérez-Acal A. and Sanz-Lobera A. (2007), "Virtual reality simulation applied to a numerical control milling machine", *Int J Interact Des Manuf*. Vol. 1 No. 3, pp. 143-154.
- [57] Seth A., Vance J.M. and Oliver J.H. (2011), "Virtual reality for assembly methods prototyping: a review", *Virtual Reality*, Vol. 15 No. 1, pp. 5-20.
- [58] Xia P., Lopes A.M. and Restivo M.T. (2013), "A review of virtual reality and haptics for product assembly (part 1): rigid parts", *Assembly Automation*, Vol. 33 No. 1, pp. 68 -77.

- [59] Gao W., Shao X. and Liu H. (2014), "Virtual assembly planning and assembly-oriented quantitative evaluation of product assemblability", *Int J Adv Manuf Technol.* Vol. 71 No. 1, pp. 483-496.
- [60] Jayaram S., Jayaram U., Wang Y., Tirumali H., Lyons K. and Hart P. (1999), "VADE: a virtual assembly design environment", *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 19 No. 6, pp. 44-50.
- [61] Lim T., Ritchie J.M., Dewar R.G., Corney J.R., Wilkinson P., Calis M., Desmulliez M. and Fang J.J. (2007), "Factors affecting user performance in haptic assembly", *Virtual Reality*, Vol. 11 No. 4, pp. 241-252.
- [62] Zhu H., Wu D. and Fan X. (2010), "Assembly semantics modeling for assembling process planning in virtual environment", *Assembly Automation*, Vol. 30 No. 3, pp. 257-267.
- [63] Gupta R., Whitney D. and Zeltzer D. (1997), "Prototyping and design for assembly analysis using multimodal virtual environments", *Computer-Aided Design*, Vol. 29 No. 8, pp. 585-597.
- [64] Simmons J.E.L., Dewar R., Ritchie M. and Ng F. M. (1998), "The application of virtual reality to tasks in manufacturing and assembly engineering", *KSME International Journal*, Vol. 12 No. 1, pp. 1-11.
- [65] Yuan X. and Yang S.X. (2004), "Interactive assembly planning with automatic path generation", *Intelligent Robots and Systems. Proceedings International Conference on.*
- [66] Brough J.E., Schwartz M., Gupta S.K., Anand D.K., Kavetzky R. and Pettersen R. (2007), "Towards the development of a virtual environment-based training system for mechanical assembly operation", *Virtual Real*, Vol. 11 No. 4, pp. 189-206.
- [67] Xiao H., Li Y., Yu J.F. and Cheng H. (2014), "Dynamic assembly simplification for virtual assembly process of complex product", *Assembly Automation*, Vol. 34 No. 1, pp. 1-15.
- [68] Adams, R.J., Klowden, D. and Hannaford, B. (2001), "Virtual training for a manual assembly task", *Haptics-e*, Vol. 2 No. 2, pp. 1-7.
- [69] Howard B.M. and Vance J.M. (2007), "Desktop haptic virtual assembly using physically based modelling", *Virtual Reality*, Vol. 11 No. 4, pp. 207-215.
- [70] Kashiwa K.I., Mitani T., Tezuka T. and Yoshikawa H. (1995), "Development of machine-maintenance training system in virtual environment", *Robot and Human Communication, Proceeding, 4th IEEE International Workshop on.*
- [71] Holt P.O., Ritchie J.M., Day P.N., Simmons J.E.L., Ribinson G., Russell G.T. and Ng F.M. (2004), "Immersive virtual reality in cable and pipe routing: Design metaphors and cognitive ergonomics", *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* Vol. 4 No. 3, pp. 161-170.
- [72] Johnson T.C. and Vance J.M. (2001), "The use of Coxmap pointshell method of collision detection in virtual assembly methods planning", *Mechanical Engineering Conference Presentations, Papers, and Proceeding. Paper 27.*
- [73] Wan H., Gao S., Peng Q., Dai G. and Zhang F. (2004), "MIVAS: A multi-modal immersive virtual assembly system", *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Vol. 4, pp. 113-122.
- [74] Fernandez K.J., Raja V.H. and Eyre J. (2003), "Immersive learning system for manufacturing industries", *Computers in Industry*, Vol. 51 No. 1, pp. 31-40.
- [75] Xia P., Lopes A.M., Restivo M.T. and Yao Y. (2012), "A new type haptics-based virtual environment system for assembly training of complex products", *Int J Adv Manuf Technol.* Vol. 58 No. 1, pp. 379-396.
- [76] Lin F., Ye L., Duffy V.G. and Su C.J. (2002), "Developing virtual environments for industrial training", *Information sciences*, Vol. 140 No. 1-2, pp. 153-170.

- [77] Ong S.K. and Mannan M.A. (2004), "Virtual reality simulations and animations in a web-based interactive manufacturing engineering module", *Computer & education*, Vol. 43 No. 4, pp. 361-382.
- [78] Arjona-López M.A., Hernández-Flores C. and Gleason-García E. (2003), "An intelligent tutoring system for turbine startup training of electrical power plant operations", *Expert system with applications*, Vol. 24 No. 1, pp. 95-101.
- [79] Vora J., Nair S., Gramopadhye A.K., Duchowski A.T., Melloy B.J. and Kanki B. (2002), "Using virtual reality technology for aircraft visual inspection training: presence and comparison studies", *Applied ergonomics*, Vol. 33 No. 6, pp. 559-570.
- [80] Basdogan C., Ho C.H. and Srinivasan M.A. (2001), "Virtual environments for medical training: graphical and haptic simulation of laparoscopic common bile duct exploration", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 6 No. 4, pp. 269 – 285.
- [81] Wang J. and Lu W.F. (2012), "A training system for virtual surgical incision with haptic playback", *Virtual and Physical Prototyping*, Vol.7 No. 4, pp. 231-242.
- [82] Illiano S., Chimienti V. and Dini G. (2012), "Training by augmented reality in industrial environments: A case study", *Proceeding of 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and System*, Ann Arbor, USA.
- [83] Webel S., Bockholt U., Engelke T., Gavish N., Olbrich M. and Preusche C. (2013), "An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61 No. 4, pp. 398 – 403.
- [84] Oren M., Carlson P., Gilbert S. and Vance J.M. (2012), "Puzzle assembly training: real world vs virtual environment", *Virtual Reality Short Papers and Posters (VRW)*, 2012 IEEE, pp. 27-30.
- [85] Xia P., Lopes A.M. and Restivo M.T. (2011), "Design and implementation of a haptic-based virtual assembly system", *Assembly Automation*, Vol. 31 No. 4, pp. 369-384.
- [86] Tching L., Dumont G. and Perret J. (2010), "Interactive simulation of CAD models assemblies using virtual constraint guidance", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 4 No. 2, pp. 95-102.
- [87] Bordegoni M., Cugini U., Belluco P. and Aliverti M. (2009), "Evaluation of a Haptic-Based interaction system for virtual manual assembly", *Virtual and Mixed Reality*, Vol. 5622, pp. 303-312.
- [88] Vo D.M., Vance J.M. and Marasinghe M.G. (2009), "Assessment of haptics-bases interaction for assembly tasks in virtual reality", *Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systeem*, Salt Lake City, UT, USA, pp. 494-499.
- [89] Garbaya S. and Zaldivar-Colado U. (2007), "The effect of contact force sensations on user performance in virtual assembly tasks", *Virtual Reality*, Vol. 11 No. 4, pp. 287-299.
- [90] Jayaram S., Jarayam U., Kim Y.J., DeChenne C., Lyons K.W., Palmer C. and Mitsui T. (2007), "Industry case studies in the use of immersive virtual assembly", *Virtual Assembly*, Vol. 11 No. 4, pp. 217-228.
- [91] Boud A.C., Baber C. and Steiner S.J. (2000), "Virtual reality: A tool for assembly?", *Presence*, Vol. 9 No. 5, pp. 486-496.
- [92] Ghandi S. and Masehian E. (2015), "Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches", *Computer-Aided design*, Vol. 67-68. pp. 58-86.
- [93] Yoo C.J. (2011), "Assembly simulations in virtual environments with optimized haptic path and sequence", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 27 No. 2, pp.306-317.

- [94] Seth A., Su H. and Vance J.M. (2006), "SHARP: A system for haptic assembly and realistic prototyping", ASME International Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference.
- [95] Jia D., Bhatti A. and Nahavandi S. (2009), "Design and evaluation of a haptically enable virtual environment for object assembly training", Haptic Audio Visual Environments and Games. IEEE International Workshop on.
- [96] Ladeveze N., Fourquet J. and Puel B. (2010), "Interactive path planning for haptic assistance in assembly tasks", Computers and Graphics, Vol. 34 No. 1, pp. 17-25.
- [97] Hassan S. and Yoo J. (2010), "Haptic guided optimized aircraft maintenance assembly disassembly path planning scheme", Control Automation and Systems (ICCAS), International Conference on.
- [98] Aleotti J. and Caselli S. (2011), "Physics-based virtual reality for task learning and intelligent disassembly planning", Virtual Reality, Vol. 15 No. 1, pp. 41-54.
- [99] Erel E. and Sarin S.C. (1998), "A survey of the assembly line balancing procedures", Production Planning and Control, Vol. 9 No. 5, pp. 414-434.
- [100] Arcus A.L. (1965), "A computer method of sequencing operations for assembly lines", International Journal of Production Research, Vol. 4 No. 4, pp. 259-277.
- [101] Amen M. (2000), "Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey", International Journal of Production Economics, Vol. 68 No. 1, pp. 1-14.
- [102] Amen M. (2000), "An exact method for cost-oriented assembly line balancing", International Journal of Production Economics, Vol. 64 No. 1, pp. 187-195.
- [103] Thangavelu S.R. and Shetty C.M. (1971), "Assembly line balancing by zero-one integer programming", AIIE Transactions, Vol. 3 No. 1, pp. 61-68.
- [104] Deckro R.F. and Rangachari S. (1990), "A goal approach to assembly line balancing", Computers & operations research, Vol. 17 No. 5, pp. 509-521.
- [105] Ozcan U. and Toklu B. (2009), "Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models", Computers & operations research, Vol. 36 No. 6, pp. 1955-1965.
- [106] Kilincci O. and Bayhan G.M. (2006), "A petri net approach for simple assembly line balancing problems", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 30 No. 11, pp. 1165-1173.
- [107] Kilincci O. (2010), "A petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 46 No. 1, pp. 329-338.
- [108] Kim Y.K., Kim Y.J. and Kim Y. (1996), "Genetic algorithms for assembly line balancing with various objectives", Computers & industrial engineering, Vol. 30 No. 3, pp. 397-409.
- [109] Sabuncuoglu I., Erel E. and Tanyer M. (2000), "Assembly line balancing using genetic algorithms", Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 11 No. 3, pp. 295-310.
- [110] Yu J. and Yin Y. (2010), "Assembly line balancing based on an adaptive genetic algorithm", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 48 No. 1, pp. 347-354.
- [111] Seyed-Alagheband S.A., Ghomi S.M.T.F. and Zandieh M. (2011), "A simulated annealing algorithms for balancing the assembly line type II problem with sequence-dependent setup times between task", Int J of Production research, Vol. 49 No. 3, pp. 805-825.
- [112] Roshani A., Fattahi P., Roshani A., Salehi M. and Roshani A. (2012), "Cost-oriented two-sides assembly line balancing problem: A simulated annealing approach", Int J of Computer integrated manufacturing, Vol. 25 No. 8, pp. 680-715.
- [113] Ozcan U. and Toklu B. (2009), "A tabu search algorithm for two-sided assembly line balancing", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 43 No. 1, pp. 822-829.
- [114] Baykasoglu A. and Dereli T. (2008), "Two-sided assembly line balancing using an ant-colony-based heuristic", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 36 No. 5, pp. 582-588.

- [115] Fattahi P., Roshani A. and Roshani A. (2011), “A mathematical model and ant colony algorithm for multi-manned assembly line balancing problem” *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 53 No. 1, pp. 363-378.
- [116] Ozbakir L., Baykasoglu A., Gorkemli B. and Gorkemli L. (2011), “Multiple-colony ant algorithm for parallel assembly line balancing problem”, *Journal applied soft computing*, Vol. 11 No. 3, pp. 3186-3198.
- [117] Kao H.H., Yeh D.H., Wang Y.H. and Hung J.C. (2010), “An optimal algorithm for type-I assembly line balancing problem with resource constraint”, *Journal of Business management*, Vol. 4 No. 10, pp. 2051-2058.
- [118] Chica M., Cordon O., Damas S. and Bautista J. (2012), “Multiobjective memetic algorithms for time and space assembly line balancing”, *Engineering application of artificial intelligence*, Vol. 25 No. 1, pp. 254-273.
- [119] Tapkan p., Ozbakir L. and Baykasoglu A. (2012), “Modeling and solving constrained two-sided assembly line balancing problem via bee algorithms”, *Applied soft computing*, Vol. 12 No. 11, pp. 3343-3355.
- [120] Jianxin J., Kumar A. and Martin W. (2006), “A Web-based interactive advisor for assembly line balancing”, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 27 No. 11, pp. 1192-1201.
- [121] Becker C. and Scholl A. (2006), “A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168 No. 3, pp. 694-715.
- [122] Aase G. R., Olson J.R. and Schniederjans M.J. (2004), “U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 156 No. 3, pp. 698-711.
- [123] Visualization Toolkit, *VTK*, consultado en: <http://www.vtk.org/>.
- [124] Real Time Physics Simulation, *Bullet Physics Library*, consultado en: <http://bulletphysics.org/wordpress/>.
- [125] Nvidia Developer Zone, *PhysX SDK*, consultado en: <http://developer.nvidia.com/physx/>.
- [126] Geomagic OpenHaptics, *OpenHaptics Toolkit v3.0*, consultado en: <http://geomagic.com/en/products/open-haptics/overview/>.
- [127] Garner H. (1983), “Frame of mind: the theory of multiple intelligences”. Basic Book, New York.
- [128] Philbin, D.A., Ribarsky, W., Walker, Neff and Hubbard, C.E. (1998), “Training in virtual environments: Analysis of task appropriateness”, *Proceedings of the IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium*.
- [129] Gallegos-Nieto E., Medellín-Castillo H.I., González-Badillo G., Lim T. and Ritchie J. (2017), “The analysis and evaluation of the influence of haptic-enabled virtual assembly training on real assembly performance”, *Int J Adv Manuf Technol*. Vol. 89 No. 1, pp. 581-598.
- [130] http://www.sat.gob.mx/informacion_fiscal/tablas_indicadores/Paginas/salarios_minimos.aspx

Reporte completo del ensamble virtual del motor de aire, Figura A1.

----- JOB INFORMATION -----
 Name of assembly planner: Enrique
 Date: 28/4/2017 (DD/MM/YY)
 Time: 11:41:54 (GMT)

ASSEMBLY PLAN REPORT

----- MODEL INFORMATION -----
 Assembly name: Motor de aire
 Parts in the model: 20

| ----- PART ASSEMBLY INFORMATION ----- | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|----|---------|----------|----------|-----------|----------------------|---------------------|-------------------|----------|----------|-----------|-------|-------|
| Part | Name | HP | EHT (s) | NPHT (s) | EHD (mm) | NPHD (mm) | SP (XYZ) | FP (XYZ) | FO* | PE (N-m) | TE (N-m) | EPE (N-m) | TEE % | PEE % |
| 1 | Base | 1 | 1 | 0 | 0.2 | 0 | (-0.5;157.4;-1.8) | (-0.5;157.4;-1.7) | (0.0;-0.1;0.0) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 100 | 100 |
| 5 | Chumacera | 1 | 17 | 15 | 353.1 | 2377.7 | (5.2;32.0;-231.4) | (-1.0;82.1;-38.9) | (0.0;0.7;-0.9) | 0.45 | 0.53 | 0.24 | 44.35 | 52.16 |
| 11 | Tornillo ch_1 | 1 | 7 | 15 | 436.4 | 2668.9 | (60.8;4.5;-319.4) | (17.6;105.0;-11.3) | (0.0;-2.6;-10.6) | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 71.78 | 76.11 |
| 12 | Tornillo ch_2 | 1 | 9 | 4 | 404.9 | 594.1 | (20.8;4.5;-319.4) | (16.6;57.1;-10.8) | (0.0;-1.4;-13.0) | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 36.02 | 59.37 |
| 13 | Tornillo ch_3 | 1 | 17 | 6 | 507.9 | 981.1 | (-19.1;4.5;-319.4) | (-18.5;105.4;-15.1) | (0.0;1.3;-19.0) | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 58.29 | 62.66 |
| 14 | Tornillo ch_4 | 1 | 9 | 14 | 366 | 1861.5 | (-59.1;4.6;-319.4) | (-19.3;57.3;-21.4) | (0.0;-0.2;-11.0) | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 39.25 | 44.47 |
| 3 | Casquillo | 1 | 12 | 13 | 463.9 | 1338.6 | (0.7;13.4;-373.6) | (-1.5;83.3;-78.0) | (0.0;0.9;-7.0) | 0.04 | 0.07 | 0.02 | 34.43 | 60.98 |
| 4 | Cigüeñal | 3 | 17 | 31 | 613.3 | 4840.2 | (159.6;8.9;-8.2) | (-1.3;82.8;-103.0) | (0.0;-0.5;5.0) | 0.43 | 0.59 | 0.32 | 55.41 | 75.13 |
| 20 | Volante de inercia | 1 | 7 | 11 | 483.2 | 2508.9 | (-145.3;60.6;-453.8) | (-1.2;82.4;-148.5) | (0.0;-1.4;-11.9) | 3.49 | 4.6 | 2.26 | 49.05 | 64.61 |
| 16 | Tornillo V | 1 | 11 | 14 | 740.7 | 2725.1 | (-0.0;6.5;-460.0) | (0.5;97.0;-103.7) | (0.0;3.6;-8.8) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 44.64 | 56.28 |
| 8 | Plato | 2 | 8 | 15 | 276.2 | 4516.9 | (-0.2;63.1;207.1) | (-1.5;232.3;35.3) | (0.0;-1.8;0.2) | 1.65 | 1.66 | 1.64 | 98.93 | 99.71 |
| 7 | Pivote esférico | 1 | 15 | 18 | 707.1 | 5026 | (-137.9;8.1;-5.0) | (0.2;242.1;-78.3) | (0.0;1.2;-18.8) | 0.51 | 0.53 | 0.45 | 83.72 | 87.25 |
| 9 | Resorte | 1 | 7 | 31 | 579.6 | 1711.3 | (-142.2;15.3;-240.0) | (-3.6;238.0;-55.6) | (0.0;-1.1;10.0) | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 82.64 | 95.1 |
| 19 | Tuerca moleteada | 1 | 10 | 12 | 679.6 | 1674.2 | (-202.9;22.5;-238.5) | (-0.0;245.7;-112.6) | (0.0;-1.6;3.4) | 0.48 | 0.6 | 0.44 | 73.73 | 91.9 |
| 17 | Tubo_1 | 1 | 8 | 16 | 705.5 | 1623.1 | (-182.9;5.6;-4.4) | (11.9;277.2;-53.6) | (0.0;-2.5;31.5) | 0.17 | 0.17 | 0.15 | 85.44 | 87.79 |
| 18 | Tubo_2 | 1 | 11 | 4 | 663.8 | 1905.4 | (-223.0;5.6;-4.4) | (-7.5;276.1;-52.9) | (0.0;-0.1;33.4) | 0.16 | 0.19 | 0.15 | 78.06 | 95.4 |
| 6 | Manivela | 1 | 12 | 9 | 315.9 | 2578.5 | (120.0;59.3;201.3) | (-2.0;84.0;16.8) | (0.0;-0.4;0.5) | 0.41 | 0.99 | 0.25 | 25.71 | 61.92 |
| 2 | Bicla | 1 | 21 | 27 | 676.2 | 1807 | (-101.7;77.9;199.4) | (-0.9;102.6;42.9) | (0.0;-7.8;-179.8) | 2.16 | 2.75 | 0.16 | 5.85 | 7.46 |
| 15 | Tornillo B | 1 | 7 | 10 | 332.9 | 1496.1 | (-2.8;4.8;280.5) | (-1.3;35.1;38.8) | (0.0;0.2;37.3) | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 45.04 | 59.06 |
| 10 | Tapa | 1 | 7 | 10 | 791.2 | 1749.5 | (-100.0;6.0;280.0) | (-1.7;295.6;39.6) | (0.0;-6.9;-1.1) | 0.42 | 0.49 | 0.37 | 74.85 | 87.55 |

----- TASK ASSEMBLY INFORMATION -----
 Task completion time (min:seg) 8:8
 Effective task completion time (min:seg) 3:33
 Non-productive task completion time (min:seg) 4:35
 Total assembly distance (mm) 54081.65
 Effective assembly distance (mm) 10097.67
 Non-productive assembly distance (mm) 43983.98
 Total assembly energy 13.31
 Total assembly energy efficiency 45.362629
 Assembly potential energy 50.268211
 Work space (XYZ) 382.74; 349.72 ; 741.58
 Anguler manipulability (THETAx THETAy THETAz) 0.0; 0.0 ; 182.4
 Degree of freedom 4
 Total handling assembly 23
 Handling efficiency 86.9

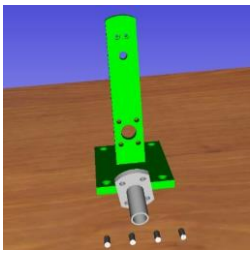
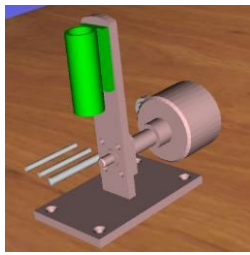
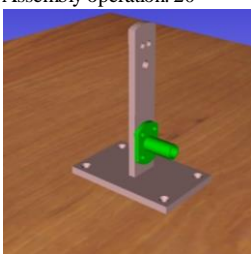
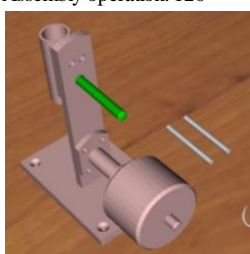
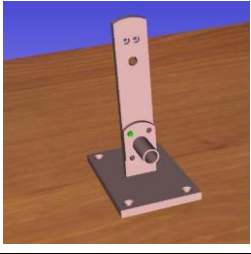
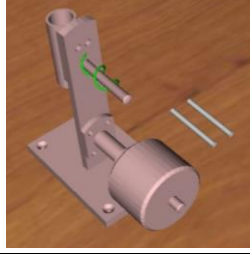
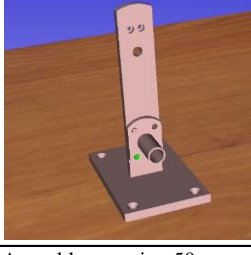
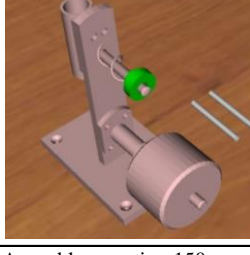

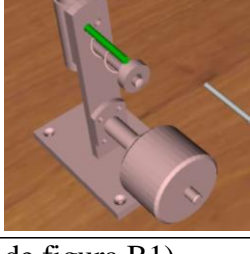
----- ABBREVIATIONS -----
 (HP) Handling part
 (EHT) Effective handling time
 (NPHT) Non-productive handling time
 (EHD) Effective handling distance
 (NPHD) Non-productive handling distance
 (SP) Start point
 (FP) Final point
 (FO) Final orientation
 (PE) Potential energy
 (TE) Total energy
 (EPE) Effective potential energy
 (TEE) Total energy efficiency
 (PEE) Potential energy efficiency
 (TCT) Task completion time
 (ETCT) Effective task completion time
 (NPTCT) Non-productive task completion time
 (TAD) Total assembly distance
 (EAD) Effective assembly distance
 (NPAD) Non-productive assembly distance
 (TAE) Total assembly energy
 (APE) Assembly potential efficiency
 (TAEE) Total assembly energy efficiency
 (WS) Work space
 (AM) Anguler manipulability
 (DOF) Degree of freedom
 (THA) Total handling assembly
 (HE) Handling efficiency

----- ASSEMBLY PARAMETERS -----
 Factor X -0.00
 Factor Y -0.00
 Factor Z -0.00
 Resolution -0.00
 Time-scale -0.00

----- COMMENTS (*) -----
 The final orientation is a vector X Y and Z rotation.
 The ordering in which these rotations must be done
 to generate the same matrix is:
 RotateX RotateY and finally RotateZ in extrinsic rotations

Figura A1. Reporte del plan de ensamble para el motor de aire.

Instrucciones para el ensamble virtual del motor de aire, Figura B1.

| Assembly instruction of: Motor de aire | | | | |
|---|----------|---------------|---|------------------------|
| | Part No. | Name | Part No. | Name |
| Assembly operation: 10  | 1 | Base | Assembly operation: 110  | 8 Plato |
| Assembly operation: 20  | 5 | Chumacera | Assembly operation: 120  | 7 Pivote esférico |
| Assembly operation: 30  | 11 | Tornillo Ch_1 | Assembly operation: 130  | 9 Resorte |
| Assembly operation: 40  | 12 | Tornillo Ch_2 | Assembly operation: 140  | 19 Tuerca moleteada |
| Assembly operation: 50  | 13 | Tornillo Ch_3 | Assembly operation: 150  | 17 Tubo_1 |

(Continuación de figura B1).

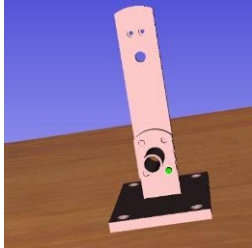

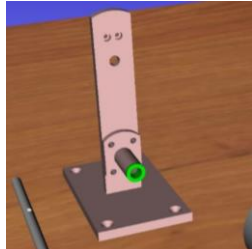
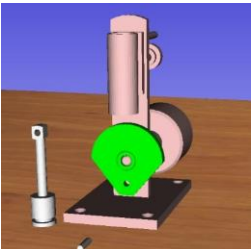
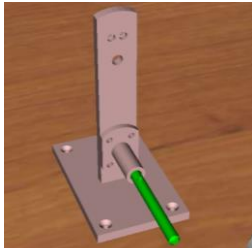
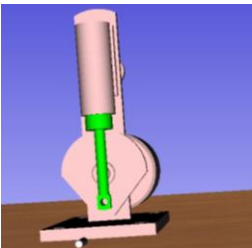
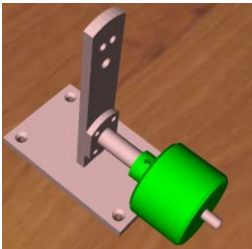
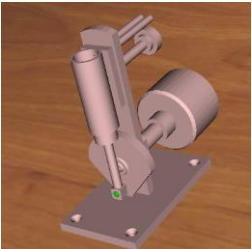

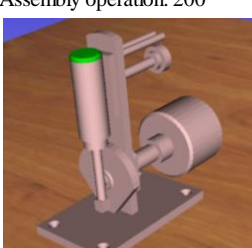
| | | | |
|--|------------------------------|---|----------------------|
| <p>Assembly operation: 60</p>  | <p>14 Tornillo Ch_4</p> | <p>Assembly operation: 160</p>  | <p>18 Tubo_2</p> |
| <p>Assembly operation: 70</p>  | <p>3 Casquillo</p> | <p>Assembly operation: 170</p>  | <p>6 Manivela</p> |
| <p>Assembly operation: 80</p>  | <p>4 Cigñal</p> | <p>Assembly operation: 180</p>  | <p>2 Biela</p> |
| <p>Assembly operation: 90</p>  | <p>20 Volante de inercia</p> | <p>Assembly operation: 190</p>  | <p>15 Tornillo B</p> |
| <p>Assembly operation: 100</p>  | <p>16 Tornillo_V</p> | <p>Assembly operation: 200</p>  | <p>10 Tapa</p> |

Figura B1. Instrucciones y representación del plan de ensamble para el motor de aire.

Código para robot, generado por el sistema HAMS a partir de la ejecución del ensamble virtual.

/----- ROBOTIC PROGRAM -----/

/----- JOB INFORMATION -----/

Name of assembly planner: Enrique

Date: 3/7/2017 (DD/MM/YY)

Time: 9:34:32 (GMT)

Assembly name:

class program {

program () {

| | | |
|-------|--------|-------|
| -5.09 | 568.5 | 31.96 |
| -5.09 | 568.5 | 31.96 |
| 0.44 | 546.05 | 43.62 |
| -1.68 | 543.57 | 70.1 |
| -1.6 | 567.49 | 84.03 |
| -0.16 | 594.48 | 84.88 |
| 2.83 | 621.99 | 80.85 |
| 4.51 | 648.88 | 79.08 |
| 2.92 | 674.75 | 80.25 |
| -1.52 | 701.46 | 79.33 |
| -2.15 | 726.72 | 78.58 |
| 0.67 | 752.01 | 78.89 |
| -0.02 | 764.48 | 79.19 |
| -0.01 | 764.44 | 79.18 |
| -0.01 | 764.44 | 79.18 |
| -0.01 | 764.44 | 79.18 |
| -0.01 | 764.42 | 79.18 |
| -0.01 | 764.42 | 79.18 |
| -0.01 | 764.42 | 79.18 |
| -0.01 | 764.39 | 79.17 |
| -0.01 | 764.39 | 79.17 |
| -0.01 | 764.39 | 79.17 |
| -0.01 | 764.36 | 79.16 |
| -0.01 | 764.36 | 79.16 |
| -0.01 | 764.36 | 79.16 |
| 0 | 764.33 | 79.15 |
| 0 | 764.33 | 79.15 |
| 0 | 764.33 | 79.15 |

| | | |
|--------|--------|--------|
| 0.01 | 764.28 | 79.13 |
| 0.01 | 764.28 | 79.13 |
| 0.01 | 764.2 | 79.13 |
| 0.01 | 764.19 | 79.15 |
| 0.01 | 764.19 | 79.15 |
| 0.02 | 764.6 | 79.33 |
| -0.02 | 764.78 | 79.37 |
| -0.02 | 764.78 | 79.37 |
| -0.19 | 764.83 | 79.92 |
| -60.54 | 480.54 | 4.48 |
| -60.54 | 480.54 | 4.48 |
| -57.96 | 487.56 | 29.56 |
| -58.03 | 496.93 | 55.52 |
| -59.15 | 510.39 | 78.84 |
| -56.88 | 534.45 | 89.26 |
| -51.51 | 559.59 | 100.38 |
| -49.5 | 585.37 | 107.98 |
| -45.43 | 609.97 | 112.12 |
| -41.7 | 636.66 | 111.4 |
| -36.41 | 661.15 | 109.69 |
| -32.51 | 686.28 | 108.53 |
| -27.95 | 710.72 | 105.9 |
| -25.11 | 736.32 | 105.03 |
| -20.69 | 761.33 | 101.88 |
| -18.82 | 786.55 | 104.45 |
| -18.61 | 797.86 | 104.68 |
| -20.61 | 480.54 | 4.53 |
| -20.61 | 480.54 | 4.53 |
| -31.33 | 487.55 | 27.3 |
| -40.52 | 503.79 | 45.06 |
| -46.4 | 525.73 | 56.25 |
| -45.81 | 554.35 | 62.61 |
| -47.61 | 582.22 | 68.06 |
| -47.52 | 608.58 | 72.87 |
| -47.47 | 634.61 | 72.2 |
| -39.09 | 658.06 | 68.28 |
| -34.33 | 681.95 | 62.23 |
| -30.01 | 706.58 | 57.58 |
| -25.85 | 730.93 | 61.67 |
| -20.43 | 754.42 | 54.52 |
| -17.36 | 779.24 | 56.12 |
| -18.1 | 789.5 | 56.66 |
| 19.29 | 480.55 | 4.57 |
| 19.29 | 480.55 | 4.57 |

| | | |
|-------|--------|--------|
| 12.37 | 483.79 | 28.75 |
| 6.49 | 496.97 | 52.93 |
| 3.44 | 515.63 | 72.68 |
| 2.75 | 539.5 | 83.99 |
| 5.95 | 564.3 | 91.58 |
| 6.7 | 591.02 | 97.42 |
| 5.23 | 616 | 102.44 |
| 6.07 | 644.12 | 106.39 |
| 6.16 | 669.31 | 107.33 |
| 6.65 | 695.14 | 108.34 |
| 10.38 | 721.87 | 107.02 |
| 12.96 | 746.91 | 99.8 |
| 18.2 | 770.97 | 104.75 |
| 17.19 | 793.97 | 105.08 |
| 59.16 | 480.56 | 4.62 |
| 59.16 | 480.56 | 4.62 |
| 56.87 | 487.99 | 30.26 |
| 53.22 | 500.45 | 53.94 |
| 51.56 | 525.28 | 63.99 |
| 50.18 | 551.66 | 70.45 |
| 47.83 | 578.26 | 74.52 |
| 47.46 | 603.24 | 72.76 |
| 44.8 | 629.18 | 70.73 |
| 39.52 | 655.29 | 69.02 |
| 35.27 | 680.58 | 65.67 |
| 31 | 705.99 | 62.78 |
| 23.2 | 730.96 | 62.55 |
| 17.28 | 755.13 | 56.67 |
| 17.83 | 780.21 | 56.47 |
| 17.94 | 797.2 | 57.13 |

}

El código arriba presentado se generó a partir de la ejecución del ensamble virtual mostrado en la Figura C1a, posteriormente, el código se cargó en un robot que reproduce el mismo ensamble virtual, Figura C1b.

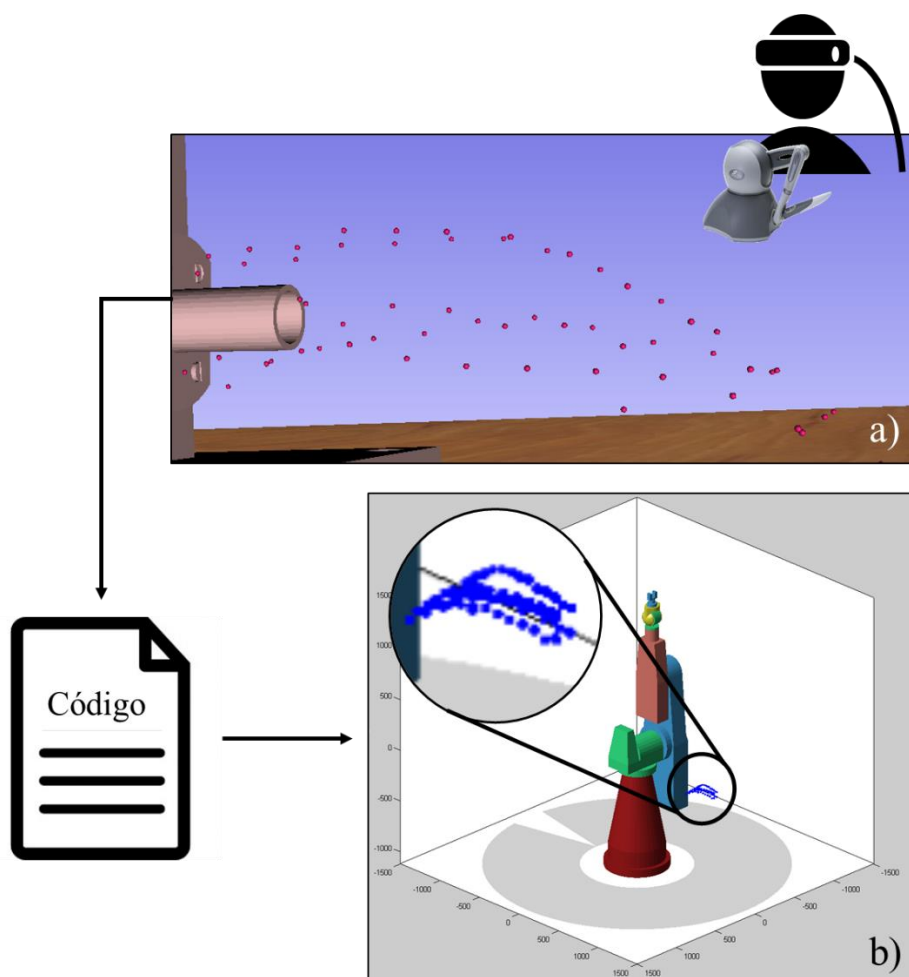


Figura C1. Ensamble realizado por: a) sistema HAMS y b) robot.