TESIS
IID 2000
J3
U.P

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA INDUSTRIAL

Aplicación de las Tecnologías CAD/CAE en el Ambito de la Ingeniería Concurrente: Caso de un Equipo Médico

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: Veinte (20) puntos. Mención publicación.

JURADO EXAMINADOR

Firma:	Firma:	Firma:
Nombre: Vicente Napolitano	Nombre: Hemming Bergold	Nombre:

REALIZADO POR

Jácome Velásquez, Orly

PROFESOR GUIA

Giunta Girón, Maximiliano

Ing. Vicente Napolitano

FECHA

Caracas 2 de Junio del 2000

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA INDUSTRIAL

Aplicación de las Tecnologías CAD/CAE en el Ambito de la Ingeniería Concurrente: Caso de un Equipo Médico

REALIZADO POR

Jácome Velásquez, Orly
Giunta Girón, Maximiliano

PROFESOR GUIA

Ing. Vicente Napolitano

FECHA

Caracas 2 de Junio del 2000

A "Dios"... porque él, a través de:

Mi Mamá; me enseñó la paciencia y la humildad.

Mi Papá; me inculcó la constancia y la integridad.

Mis Hermanas: Luisa, Janett y Adriana; me enseñó a compartir.

Max; me permitió conocer el amor.

La Sra. Nancy, Milagros y Gianfranco; me guió hacia el optimismo y la fe.

Yris, Yennys, Lenin, Angel, Julio, Carmy, Henry, Lismar, Lilian, Carmen Luisa, Alberto, Neyca y Claudia; me mostró lo que es la amistad.

Mis mascotas: "Bruno", "Hallowen" y "Tomy"; me ayudó a ser más humano.

...todos aquellos que me tendieron una mano; no me dejó caer...

O.C.J.V

A dios que me guía.

A mi madre y mi hermana que me apoyan incondicionalmente.

A mi pareja que me ha enseñado más de lo que nunca imaginé aprender.

A mis amigos que me alegran la existencia.

A los pájaros en el aire, que me recuerdan quién soy y hacia dónde voy.

mg

Agradecimientos

Queremos agradecer a todos aquellos que colaboraron de una u otra forma, con la realización del presente trabajo de grado.

Vicente Napolitano
Francisco Morera
Alicia Cabrices
Reynaldo Jácome
Guillermo Solís
Sr. de la Vega
Hennig Bergold
Lennin Medina
Mary Espinoza
Yennys Tovar
Nancy Girón
Irving(CAI)
Sr. Rivas
Kriss...

Indice General

INDICE GENERAL 1

SINOPSIS 1

INTRODUCCIÓN 2

CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO 3

I.1. MOTIVACIONES 3
I.2. OBJETIVOS 3
I.3. LIMITACIONES DEL ESTUDIO 3
I.4. ALCANCES 4
I.5. METODOLOGÍA 4
I.6. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 5
Herramientas CAD/CAE 5
Ingeniería Concurrente vs. Ingeniería Secuencial. 6
Perfil del Costo del Ciclo Vida de Sistemas 7
I.7. PROPUESTA CONCEPTUAL 8

CAPÍTULO II: SOFTWARE Y HARDWARE: CARACTERÍSTICAS Y POTENCIALIDADES 10

II.1. MODELADO PARAMÉTRICO DE SÓLIDOS 10
II.2. ANÁLISIS DINÁMICO 14
II.3. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS (FEA) 18
II.4. FOTORREALISMO Y ANIMACIÓN 22
II.5. EL HARDWARE 25

CAPÍTULO III: DESARROLLO DEL MODELO 26

III.1. DESARROLLO SECUENCIAL DEL MODELO 26
Modelado de Sólidos 26
Análisis Cinemático 30
Análisis de Elemento Finito 32
Fotorrealismo y Animación 37
Tiempo Secuencial de Desarrollo del Modelo. 38
III.2. DESARROLLO CONCURRENTE DEL MODELO 39
Prototipo - Modelado de Sólidos 39

Interacción Modelado de Sólidos – Análisis Estático (I) 41
Interacción Análisis Estático–Análisis de Elemento Finito (I) 42
Interacción Modelado de Sólidos – Análisis Dinámico (I) 42
Interacción Modelado de Sólidos – Fotorrealismo (I) 43
Interacción Modelado de Sólidos – Análisis Estático (II) 44
Interacción Análisis Estático–Análisis de Elemento Finito (II) 44
Interacción Modelado de Sólidos – Análisis Dinámico (II) 44
Interacción Modelado de Sólidos – Fotorrealismo (II) 44
Tiempo Concurrente del Desarrollo del Modelo 45
III.3. INDICES DE DESEMPEÑO 47
Indicadores de Comparación entre el DS y el DC 47
Análisis Cinemático y de Elemento Finito 49
Fotorrealismo 49
Desarrollo Secuencial vs. Desarrollo Concurrente 49

CAPÍTULO IV: COSTO DEL CICLO DE VIDA EN LA APLICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CAD/CAE 51

IV.1. DEFINICIÓN DEL MODELO 51
IV.2. DEFINICIÓN DE LOS RECURSOS DEL SISTEMA 52
El Hardware 52
Recurso Humano 55
IV.3. ESTRUCTURA RAMIFICADA DE COSTOS 56
IV.4. ESTIMACIÓN DE LOS COMPONENTES DE COSTO 57
Costos de Adquisición 57
Costos de Operación y Mantenimiento 59
Retirada de Servicio 61
IV.5. PERFIL DEL CICLO DE COSTO DE VIDA 62

CONCLUSIONES 65

BIBLIOGRAFÍA 66

ABREVIATURAS III

GLOSARIO V

Sinopsis

El presente estudio sobre la aplicación de las Herramientas CAD/CAE, se origina con la finalidad de establecer y comparar aspectos técnicos, humanos y económicos en el desarrollo de un producto bajo el ámbito de la Filosofía de Ingeniería Concurrente (IC), contra el proceso tradicional de diseño conocido como Ingeniería Secuencial (IS).

Con el objeto de establecer índices técnicos, humanos y económicos se desarrolla un modelo de silla para discapacitados, primero bajo la filosofía de Diseño Secuencial y luego bajo la filosofía de Diseño Concurrente, aplicando los siguientes programas para el desarrollo de productos: Modelado de Sólidos, Análisis Cinemático, Análisis de Elemento Finito y Fotorrealismo; y utilizando una computadora.

Para desarrollar el mismo modelo bajo IS e IC, se planificaron las actividades de diseño de forma tal que cumpliesen con los principios fundamentales de cada una de estas filosofías, lográndose conclusiones sobre la planificación y ejecución de las actividades de diseño que sólo se podrían obtener mediante la aplicación práctica de las herramientas CAD/CAE.

Al medirse los tiempos de ejecución de las actividades para cada filosofía se logró establecer que bajo IC el tiempo de desarrollo del modelo se redujo en un 34,5% en comparación con IS, aunque para lograr un solapamiento entre actividades en IC se incrementó la cantidad de trabajo en un 17,1% respecto al desarrollo Secuencial.

La experiencia adquirida en el desarrollo del modelo también sirvió para determinar las características de los equipos (Hardware) adecuados para un rendimiento satisfactorio de los programas (Software), así como los conocimientos y habilidades requeridas por el recurso humano para la aplicación efectiva de éstas herramientas.

Para concluir el estudio se determinó el costo del ciclo de vida de la aplicación de estas tecnologías para un equipo de diseño de tamaño promedio, bajo un ambiente de desarrollo concurrente de productos, estableciéndose que los principales componentes de costos están asociados al recurso humano y a la adquisición y servicio de las herramientas CAD/CAE.

Introducción

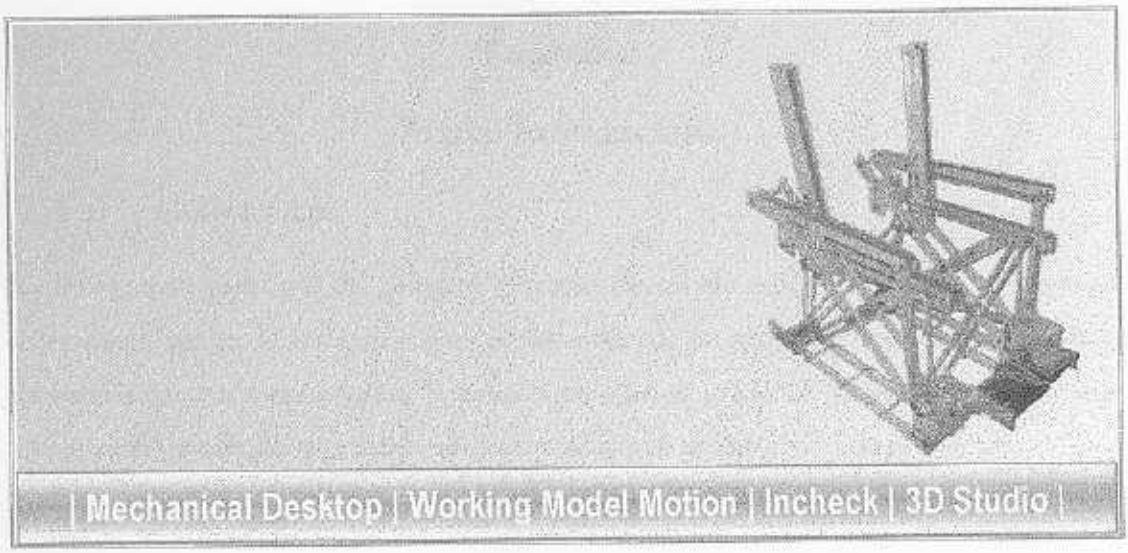
En el pasado el Desarrollo de Productos lo constituían largos y trabajosos procesos ejecutados en etapas secuenciales; extensos planos, maquetas y prototipos, ensayos y pruebas de ingeniería, eran varias de las tantas actividades en las que se incurrían, y aún modernamente con la intervención de la tecnología siguen siendo proyectos de gran magnitud.

Sin embargo, la necesidad de mejorar los procesos de diseño, generó un nuevo enfoque el cual profesa la integración de los recursos (humanos y técnicos), el continuo y sostenido intercambio de información, la concurrencia de actividades, así como responder a las expectativas de los clientes. Dicho enfoque se denomina Ingeniería Concurrente (IC).

Los avances en las bases de datos y la tecnología de red, trabajo en grupo, multimedia, interfaces gráficas y una caída estrepitosa en los costos de la computación, apuntan hacia la posibilidad de crear un verdadero ambiente de cooperación que trasciende las barreras de la distancia, tiempo, y heterogeneidad de los equipos de computación. Lo que ha permitido que la Ingeniería Concurrente ocupe un espacio en el desarrollo moderno de productos.

Las tecnologías CAD/CAE son en la actualidad herramientas habituales en el desarrollo de productos, por sus ventajas en automatización e integración de sistemas, flexibilidad en cuanto a actualizaciones y especificaciones y por el potencial para disminuir los tiempos de desarrollo.

Es así como en el presente Trabajo Especial de Grado, se aplicarán las herramientas CAD/CAE en un modelo conceptual bajo el enfoque de Ingeniería Concurrente, con el objetivo de establecer comparaciones contra el Enfoque Tradicional de Desarrollo de Productos.



Capítulo I

Motivaciones

Objetivos

Limitaciones Del Estudio

Alcances

Metodología

Fundamentos Teóricos

En éste Capítulo, el lector comprenderá los motivos que originaron éste estudio, además de las limitaciones en las que se realizó y conocerá los fundamentos teóricos que sustentaron el desarrollo del mismo.

Capítulo I

Marco Introductorio

I .1. Motivaciones

La motivación principal del presente Trabajo de Grado es la de evaluar las diversas tecnologías que se deben aplicar para el desarrollo de un producto bajo el enfoque de la Ingeniería Concurrente, e inferir conclusiones sobre el grado de utilidad, requerimientos y costos, al ser comparado con el enfoque tradicional de desarrollo de productos.

I .2. Objetivos

El objetivo fundamental del presente Trabajo Especial de Grado es el de aplicar las tecnologías asociadas a las áreas de Diseño e Ingeniería Asistidos por Computadora (CAE) en el ámbito del enfoque de la Ingeniería Concurrente para el desarrollo de productos. Para lograrlo se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Describir las características y potencialidades del Software.
- Identificar los requerimientos de Hardware para soportar el software necesario.
- Identificar las capacidades del Recurso Humano requerido para la implantación y operación de esta tecnología.
- Desarrollo Paramétrico del Modelo.
- Desarrollo del Análisis Cinemático del Modelo.
- Desarrollo del Análisis de Elemento Finito del Modelo.
- Desarrollo del Texturizado y Fotorrealismo del Modelo.
- Desarrollo de la Animación del Modelo.
- Establecer comparaciones entre el desarrollo de productos mediante el enfoque de la Ingeniería Concurrente y el enfoque Secuencial tradicional.
- Establecer y comparar índices de desempeño entre el Diseño Concurrente y el Diseño Secuencial.
- Identificar los componentes de costo a lo largo del ciclo de vida de aplicación de esta tecnología.

I .3. Limitaciones del Estudio

El presente Trabajo de Grado se realizó basándose en las siguientes premisas:

- El enfoque de Ingeniería Concurrente (IC) incluye la interacción concurrente de todos los ámbitos de la empresa, incluyendo las áreas financieras, mercadeo, administración, etc. En el presente trabajo no se considerarán dichas áreas, restringiéndose a la interacción concurrente de las diversas etapas de la ingeniería envueltas en el desarrollo de productos.
- El desarrollo del modelo se realizará a partir de una propuesta conceptual ya disponible, no considerándose la posible optimización como diseño mecánico de la misma. El presente trabajo se limitará a las etapas de diseño detallado y de análisis.
- El software a utilizar está predeterminado a las posibilidades del proveedor del mismo, que los entregará a manera de préstamo. Por lo tanto, la aplicación de las tecnologías CAD/CAE utilizadas en el desarrollo de productos se realizará únicamente para las herramientas: Mechanical Desktop (MD), Working Model Motion (WMM), Working Model FEA (WM FEA) y 3Dstudio (3DS).
- El Hardware estará limitado a los recursos de la UCAB.

I .4. Alcances

Para el presente estudio se pretende establecer índices de desempeño sobre los aspectos técnicos, económicos y humanos que intervienen en el Desarrollo de Productos utilizando las Herramientas CAD/CAE.

El Desarrollo del Modelo se realizará en el ámbito conceptual, sin llegar a construir un prototipo físico del mismo.

I .5. Metodología

Para la realización del presente trabajo se realizaron los siguientes pasos metodológicos:

- Estudio del Software CAD/CAE: Modelado de Sólidos (Mechanical Desktop), Simulación Dinámica (Working Model Motion), Análisis de Elementos Finitos (Working Model FEA) y Animación Fotorrealística (3Dstudio). Estableciendo sus

características y potencialidades, así como el concepto global del Desarrollo de Productos bajo estas herramientas particulares. Identificar la potencialidad del Hardware utilizado.

- Entrevistar a la persona que realizó el Diseño Conceptual de la silla para discapacitados, con la finalidad de comprender cuales son sus requerimientos de diseño.
- Desarrollar el diseño conceptual de la silla, en los programas aprendidos bajo dos filosofías: Ingeniería Concurrente e Ingeniería Secuencial, con la finalidad de establecer índices de desempeño.
- Establecer comparaciones e índices de desempeño entre Ingeniería Concurrente e Ingeniería Secuencial.
- Establecer los costos del ciclo de vida para la aplicación de esta tecnología, considerando los requerimientos de recurso humano y de hardware.

I .6. Fundamentos Teóricos

Para el desarrollo de todo producto es necesario utilizar herramientas que faciliten la realización de las actividades involucradas. Al mismo tiempo, la planificación y ejecución de estas actividades dependerá de la filosofía aplicada en el proceso de diseño, que repercutirá en la calidad y costo del producto diseñado.

Dependiendo de la filosofía seguida y de las herramientas elegidas para desarrollar un producto, existirán unos costos asociados que deberá asumir la organización involucrada.

Herramientas CAD/CAE

Las computadoras son utilizadas por los ingenieros en casi todas las fases de diseño, desde la identificación de las necesidades hasta las etapas de producción y manufactura.

Por Diseño Asistido por Computadora (CAD) se denomina al uso de computadoras para diseño en ingeniería e implica el uso típico de herramientas de dibujo 2D, modelado 3D y aplicaciones relacionadas.

El campo de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) fue definido inicialmente como el uso de computadoras para analizar la función (estructural, cinemática, térmica, etc.) de un sistema mecánico, eléctrico o electromecánico. En la actualidad CAE es definido de manera mucho más amplia, siendo interpretado como el uso de

computadoras por parte de Ingenieros para realizar las funciones a las que normalmente están enfrentados.

Basándose en éstos dos conceptos, las tecnologías CAD/CAE comúnmente utilizadas para el desarrollo de productos pueden resumirse en las siguientes categorías generales: Diseño Mecánico, Análisis y Simulación, Manufactura Asistida por Computadora (CAM), Gerencia de la Información del Producto (PDM), Planificación de la Producción Asistida por Computadora (CAPP), y Visualización Hiperrealística del producto.

Ingeniería Concurrente vs. Ingeniería Secuencial.

La visión de la Ingeniería Tradicional enfocada hacia el Desarrollo de productos –también conocida como Ingeniería en Serie– ha sido, por naturaleza, profundamente secuencial: cada disciplina desempeña sus propias funciones individuales, pasando los resultados hacia la siguiente disciplina en la cadena, por lo que existe muy poca o casi ninguna interacción entre las distintas etapas. En términos de calidad de diseño del producto, el énfasis está más centrado en la corrección que en la prevención, y los errores en el diseño son detectados principalmente en las etapas finales de desarrollo (como manufactura), en vez de ser identificados durante las etapas iniciales (v. Figura 1.1).

Una alternativa al proceso secuencial de diseño, es la filosofía de Ingeniería Concurrente:

> *"La Ingeniería Concurrente es definida como un esfuerzo sistemático para un diseño integrado, concurrente de productos y sus procesos relacionados, incluyendo manufactura y servicio. Pretende que los diseñadores, desde un principio, consideren todos los elementos del ciclo de vida del producto, desde el diseño conceptual hasta su desecho, incluyendo calidad, costo y requerimientos de los usuarios"*[1].

[1] Institute for Defense Analisis (IDA), Reporte R-338, 1988.

La IC promueve el trabajo de equipos multidisciplinarios en paralelo, con el objetivo de identificar problemas en las etapas iniciales de diseño, y no cuando la adopción de cambios es más difícil y costosa (v. Figura 1.1).

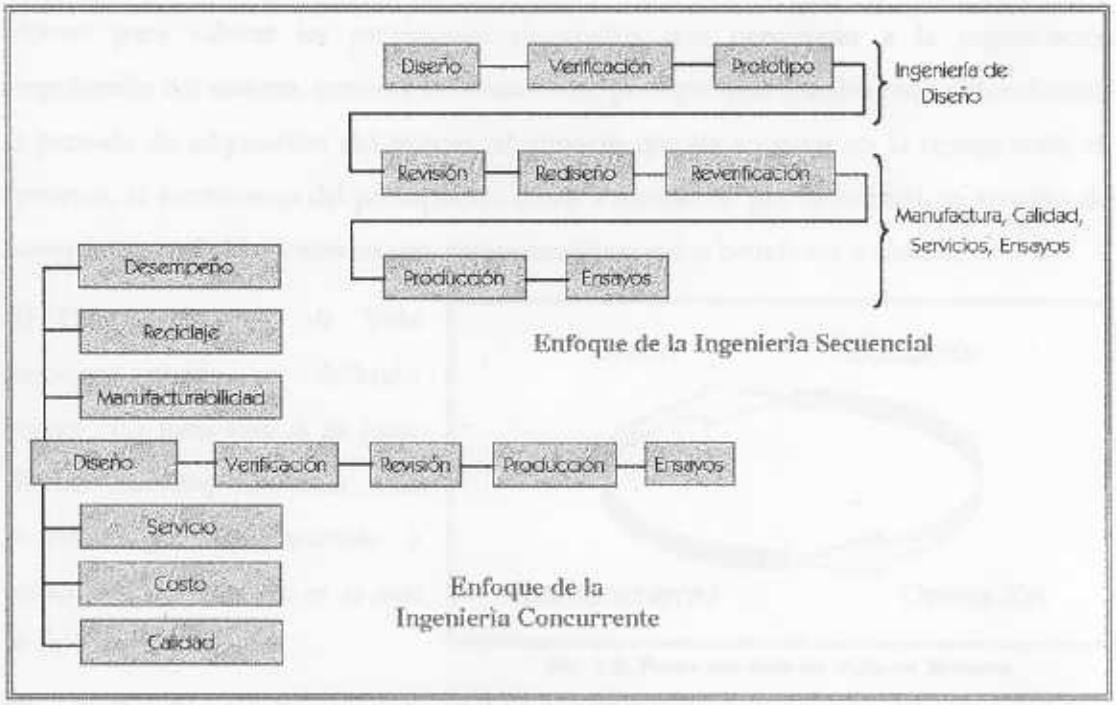


Fig. 1.1: Esquemas de los enfoques Secuencial y Concurrente.

Los objetivos de la Ingeniería Concurrente han sido claramente definidos:

- Incrementar las ventas y las ganancias de nuevos productos.
- Reducir el tiempo de salida de los productos en el mercado.
- Reducir los costos de mano de obra y capital.
- Incrementar la calidad de los productos.
- Apalancar los conocimientos y la experticia en el desarrollo de productos.

Perfil del Costo del Ciclo Vida de Sistemas

Por sistema se entiende al conjunto de objetos organizados para un fin específico. Todo sistema a ser adquirido tiene como propósito fundamental el satisfacer determinadas necesidades y/o cumplir con ciertos objetivos que han sido previamente identificados. La entrada de un nuevo sistema en una organización, normalmente causa un impacto

tanto en el aspecto organizacional, como en el de los recursos que, por lo general, puede ser traducido en costos que la organización deberá asumir.

El cálculo y análisis del Costo del Ciclo de Vida (LCC) de sistemas es el método más idóneo para valorar las previsiones de costos que permitirán a la organización responsable del sistema, conocer la demanda de presupuestos anuales requeridos durante el periodo de adquisición del mismo, el impacto que va a causar en la reasignación de recursos, el incremento del presupuesto anual a demandar por la entrada en servicio del nuevo sistema y si los mismos son compensados con los beneficios a obtener.

El Costo de Ciclo de Vida entonces puede ser definido como: *"La suma total de los costos directos, indirectos, recurrentes y no recurrentes, ya sean incurridos o estimados, que intervienen en la vida de un sistema"*[2].

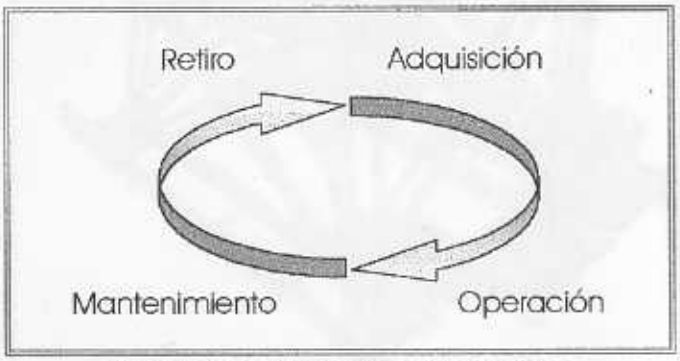


Fig. 1.2: Fases del ciclo de Vida un Sistema.

El ciclo de vida del sistema se ha dividido históricamente en las fases mostradas en la Figura 1.2.

I .7. Propuesta Conceptual

Para evaluar las tecnologías CAD/CAE se utilizará el diseño conceptual de una silla para discapacitados, desarrollado por una persona que ha ideado un modelo innovador en su búsqueda de una mejor calidad de vida (Figura 1.3). Este modelo no ha sido sometido a alguna prueba o análisis de ingeniería, las piezas no están estandarizadas o especificadas y no existe metodología documentada; por lo que puede decirse que el prototipo está fabricado de manera artesanal, empleando máquinas y herramientas de propósito general.

[2] García G., Isidoro, Costos Logísticos, 1999.

El diseño conceptual o prototipo difiere de las sillas de ruedas tradicionales, por las siguientes características:

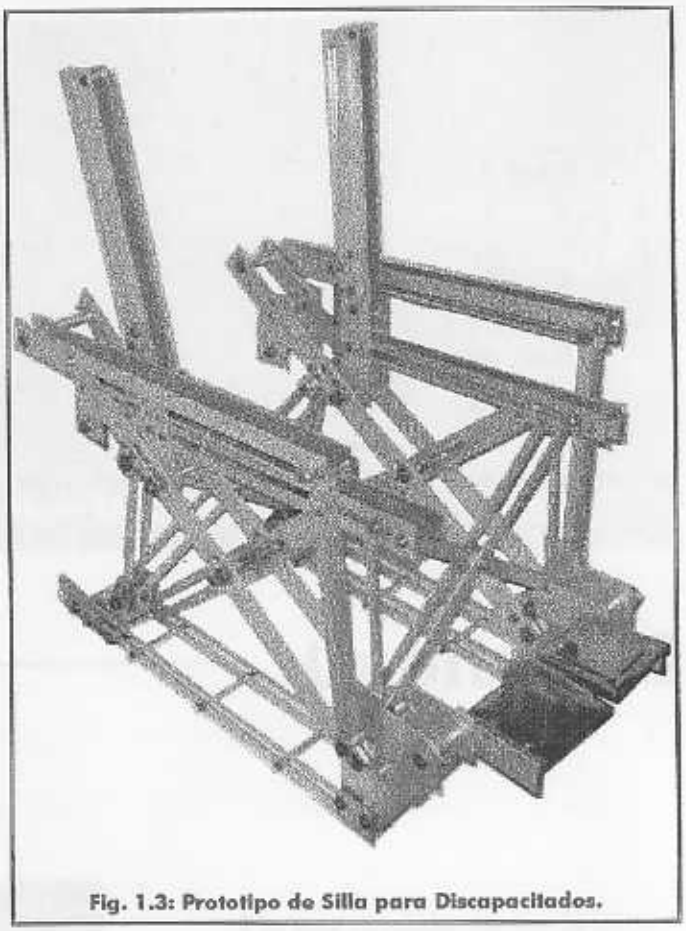
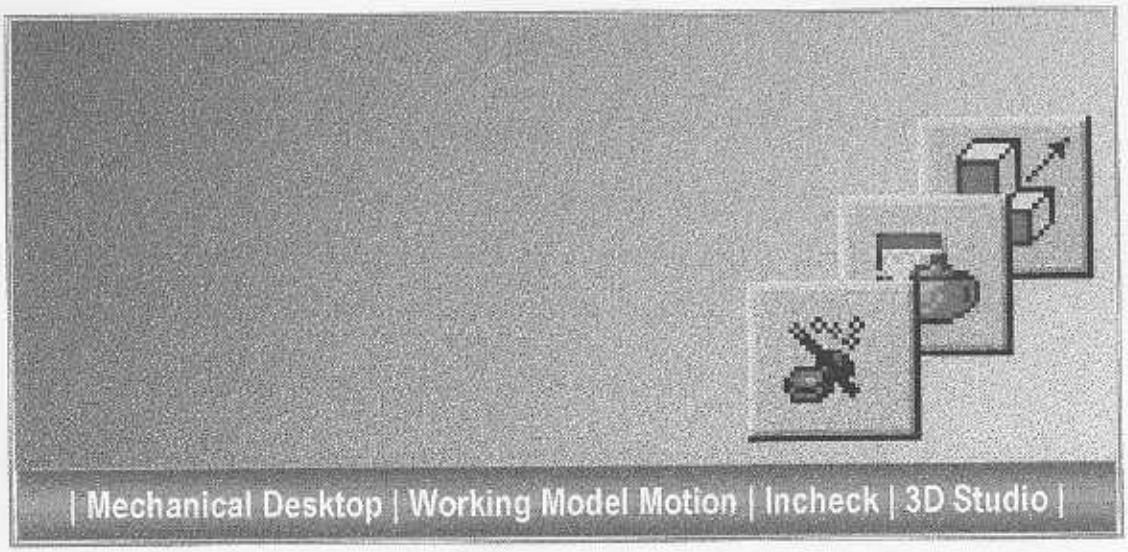


Fig. 1.3: Prototipo de Silla para Discapacitados.

- ✧ Diseñada con el propósito de que sea portátil, por lo que el modelo se pliega sobre sí mismo (las sillas tradicionales se pliegan una vez a lo ancho, el prototipo se pliega dos veces: a lo ancho y a lo alto).
- ✧ La silla se desplazaría por un mecanismo de oruga, controlado por un motor eléctrico[3], evitándole al usuario la tracción manual para su movilización.
- ✧ Está estructurada por múltiples piezas articuladas entre sí, para permitir el plegado de la misma y a fin de poder reemplazar fácilmente las piezas en caso de falla o desgaste.
- ✧ Está manufacturada, con materiales sencillos y fáciles de conseguir en el mercado como: láminas y tubos de aluminio de diferentes tamaños, madera, plástico, así como tornillos y arandelas de diversos diámetros.

[3] Tanto el motor eléctrico como el mecanismo de oruga, no están incluidos en el prototipo; sin embargo el diseño conceptual está realizado con el objetivo de adaptar estas características.



Capítulo II

Modelado Paramétrico de Sólidos

Análisis Cinemático

Análisis de Elemento Finivo

Fotorrealismo y Animación

Hardware

En este capítulo, tendrá la oportunidad de conocer las potencialidades de cada uno de los softwares asociados al Desarrollo de Productos. Además, conocerá las prestaciones del hardware utilizado para el presente trabajo.

Capítulo II

Software y Hardware: Características y Potencialidades

En este capítulo se determinarán las potencialidades de cada uno de los softwares asociados al diseño de productos. Además, se establecerán las prestaciones del hardware utilizado para el desarrollo de la silla para discapacitados.

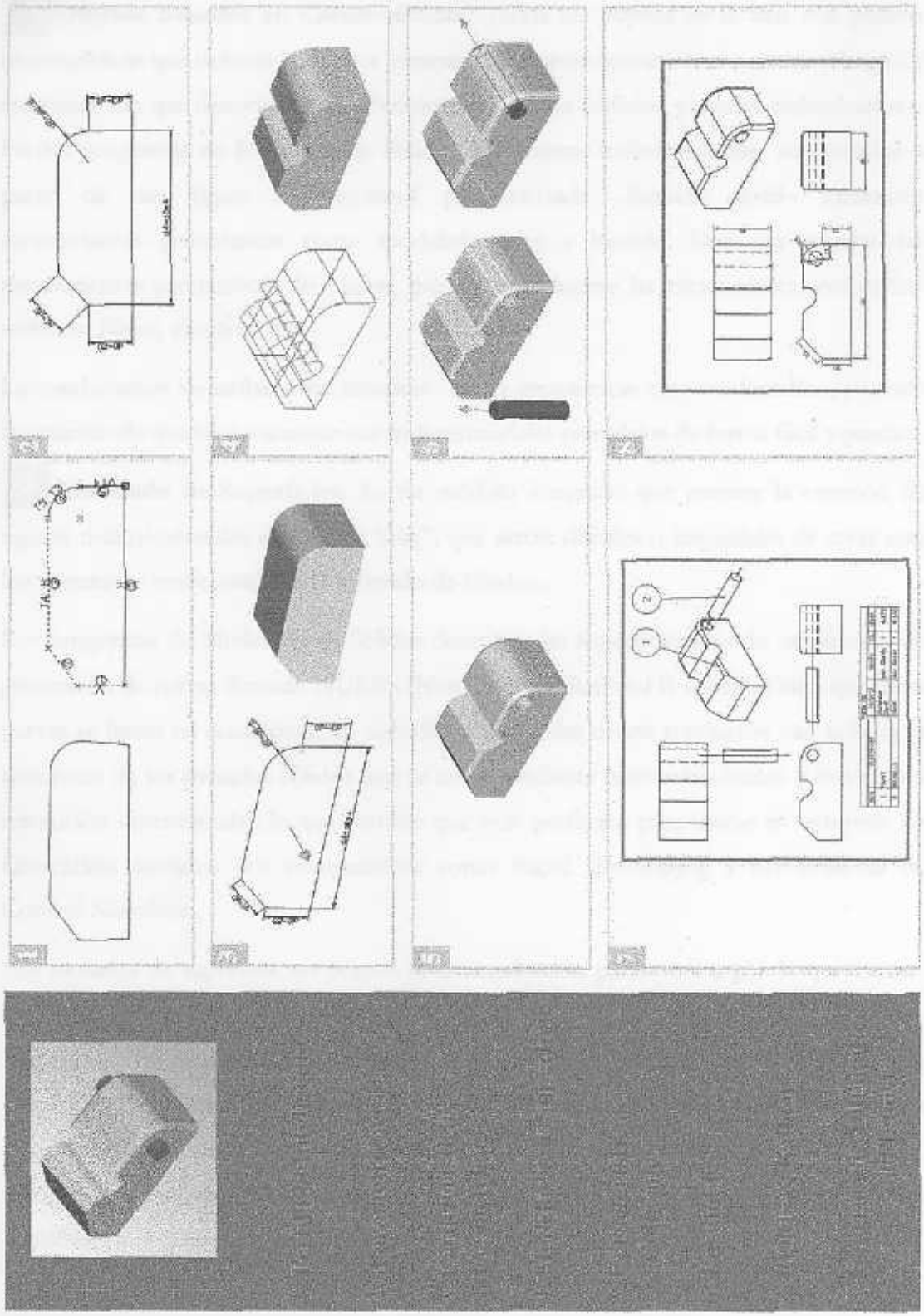
II .1. Modelado Paramétrico de Sólidos

El Modelado de Sólidos juega un papel fundamental dentro de las herramientas utilizadas en el desarrollo moderno de productos. La creación de modelos sólidos beneficia el diseño en su totalidad al permitirle a todos los miembros involucrados, visualizar y manipular piezas complejas en tres dimensiones mientras todavía es un diseño en computadora. El Esquema 2.1, muestra el orden lógico secuencial en que son utilizadas las características de los programas de Modelado de Sólidos.

Para mayor comprensión, se describirán las características y potencialidades de forma más detallada:

Perfilado Inteligente: Es una característica del módulo de dibujo bidimensional integrado a los programas de Modelado de Sólidos. Convierte un boceto (líneas y arcos creados de forma poco precisa) en un perfil (dibujo 2D parametrizable), gracias a la aplicación automática de restricciones geométricas lógicas (como tangencia, perpendicularidad, etc.) a las líneas y arcos que lo componen.

Parametrización: Significa que las variables dimensionales del objeto (como ancho, largo, diámetro, etc.) están relacionadas unas con otras, de forma tal que cuando una de ellas es modificada la razón de su relación es automáticamente actualizada. El diseño paramétrico es una forma de administración de restricciones, que define la relación entre dimensiones, entidades geométricas, y otras variables, en un esfuerzo por simplificar la construcción y edición de modelos. Cualquier dimensión puede ser una variable y la misma se puede combinar para crear expresiones matemáticas o se pueden basar en tablas de parámetros globales.



Esquema. 2.1: Secuencia de pasos a seguir para crear un Modelo Sólido Paramétrico.

Objetos Basados en Características: Todos los objetos en la vida real poseen características que definen su forma: características geométricas –como ancho y largo– y características que denominaremos "colocadas" –como orificios y bordes redondeados–. En los programas de Modelado de Sólidos, los objetos tridimensionales son creados a partir de una figura bidimensional parametrizada –llamada perfil– utilizando características geométricas como modelado, giro y barrido. Una vez creadas las características geométricas del objeto, pueden introducirse las características colocadas: orificios, filetes, cáscaras, etc.

La combinación de ambas características –tanto geométricas como colocadas–, permite la creación de modelos paramétricos tridimensionales complejos de forma fácil y precisa.

Modelado de Superficies: Es un módulo integrado que permite la creación de figuras tridimensionales de "forma libre", que serían difíciles o imposibles de crear con los comandos tradicionales de Modelado de Sólidos.

Los programas de Modelado de Sólidos describen las superficies usando un sistema de generación de curvas llamado NURBS (Non Uniform Rational B-spline). Dado que estas curvas se basan en ecuaciones, las superficies generadas tienen resolución casi infinita (a diferencia de los modelos sólidos que se crean mediante rutinas booleanas y tienen una resolución determinada), lo que permite que sean perfectos para usarse en entornos de fabricación asistidos por computadora como Rapid Prototipyng y herramientas de Control Numérico.

Los modelos de superficie no poseen la caracterización paramétrica, por lo que existen una serie de comandos (unión, intersección, sustracción, etc.) que son utilizados para integrarlas a los modelos sólidos y así obtener resultados mixtos: diseño paramétrico con superficies complejas. El Modelado de Sólidos provee métodos para ajustar las curvas a información ya existente o importarlas desde otras aplicaciones, como por ejemplo, recoger un conjunto de puntos 3D de un modelo físico a escala mediante un digitalizador, y que es parte fundamental de la Ingeniería Inversa.

Modelado de Ensambles: Es el proceso de combinar varias partes o subensambles en un solo modelo, gracias a la aplicación de restricciones de ensamble (las cuales definen las relaciones existentes entre dos o más cuerpos rígidos) comprometiendo los grados de libertad de las piezas. Los modelos de ensambles son dinámicos, pues poseen la capacidad de actualizar automáticamente el ensamble al ocurrir cambios en uno o varios de sus componentes, respetando las restricciones previamente aplicadas.

Los componentes a ensamblar pueden ser internos (se localizan en el mismo archivo del ensamble) o externos (se localizan en un archivo diferente) o combinaciones de subensambles compuestos por partes locales y/o externas combinadas en un ensamble final (maestro). Esto es de gran utilidad en la integración de diferentes equipos –indistintamente donde residan físicamente– en la realización de un mismo diseño.

Documentación de Ensambles: Con esta herramienta se pueden generar planos o vistas esquemáticas de las escenas de ensamble (separación o ajuste de los componentes), incluso, si se cambia y actualiza el modelo todas las escenas creadas reflejan en forma automática la nueva versión. En lo que se refiere a documentación, existe la herramienta BOM o lista de materiales, que es una tabla que contiene información acerca de las piezas del ensamble. Esta información incluye detalles, cantidades, nombres, costos, fabricantes y cualquier otra información necesaria para el seguimiento de las actividades posteriores de planificación y manufactura del modelo. Dicha información se puede representar sobre el ensamble como anotaciones formato "globo"(Balloon), asociativas a la lista de materiales.

Herramientas de Visualización: Automatiza la generación de planos mediante la creación de vistas –isométricas, ortogonales, auxiliares, de secciones, de detalles- de una parte, ensamble o superficie tridimensional, para ser utilizada en procesos de manufactura.

Su principal característica es la capacidad de asociación bidireccional, esto es, asegurar que las dimensiones del plano bidimensional y del modelo sólido tridimensional

documenten el mismo conjunto de características. En otras palabras, al modificar el modelo, el dibujo refleja automáticamente los cambios realizados y viceversa.

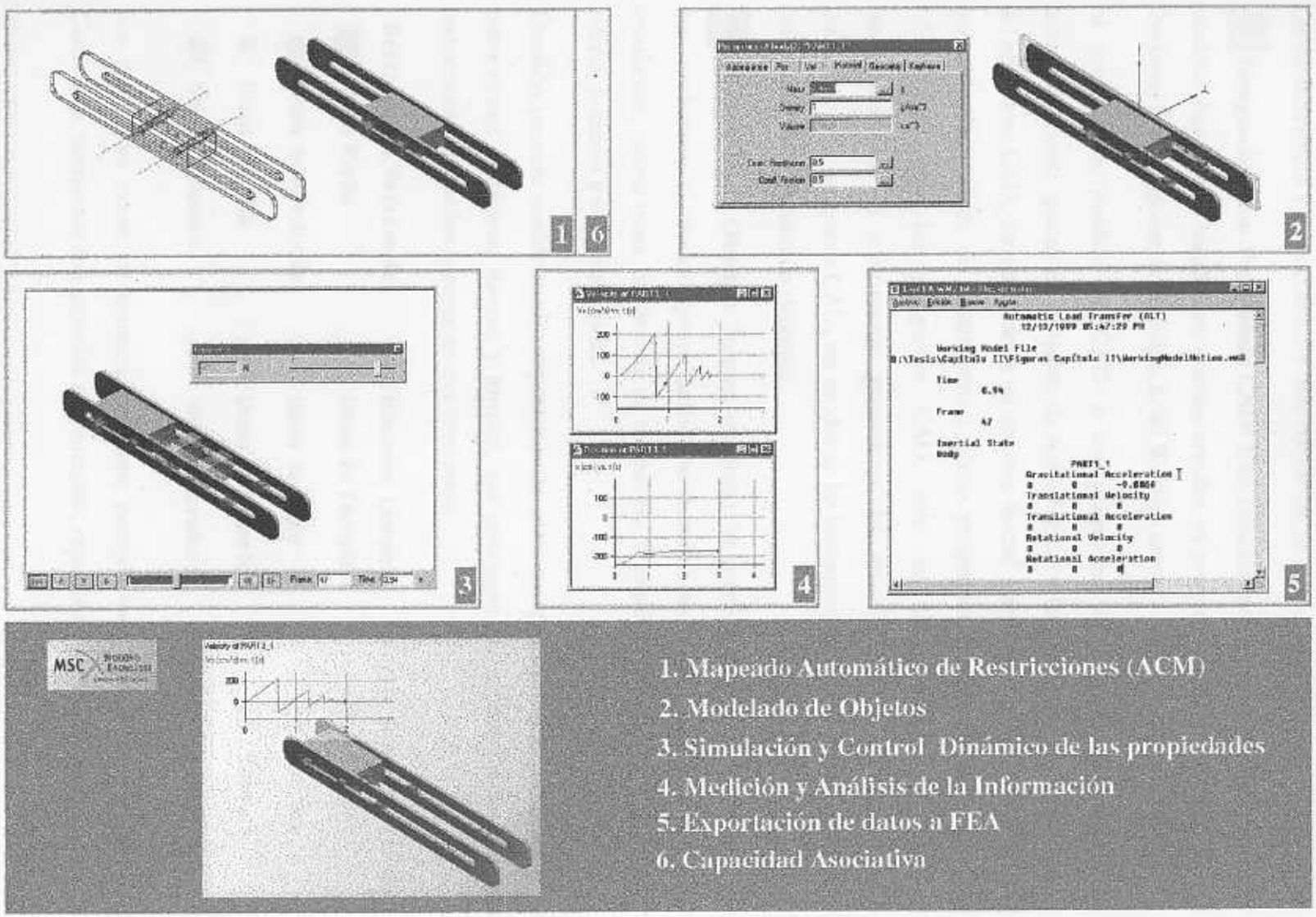
Este módulo también permite agregar anotaciones paramétricas, como notas de orificio y líneas de centro, agregar dimensiones de referencia y editar textos, colores y líneas para destacar valores y especificaciones relevantes.

II .2. Análisis Dinámico

El Análisis Dinámico –llamado también prototipado virtual– es la tecnología que le da "vida" a los diseños, colocando en movimiento las partes y ensambles de forma tal que los ingenieros y diseñadores puedan observar como se comportará el modelo una vez construido. Después de desarrollar un modelo sólido, deben realizarse análisis de ingeniería que incluya: interferencia entre objetos, colisiones, análisis inerciales, movimientos, etc. de manera que el equipo de trabajo o diseño verifique la viabilidad y características operativas del diseño, establezca las especificaciones del producto necesarias para su manufactura y pueda prevenir errores de programación, como por ejemplo colisiones e intentos de mecanizar en sitios inaccesibles.

Los programas de Análisis Dinámico son herramientas de prototipado virtual que permite simular el comportamiento dinámico de modelos gráficos, al someterlos a la influencia de *Mecánica Newtoniana* (fuerzas, velocidades, aceleraciones, etc.) similar a la del mundo real.

A continuación, en el Esquema 2.2 se detallan los pasos a seguir en la aplicación del *análisis dinámico*.



Esquema. 2.2: Procedimiento a seguir para el Análisis Dinámico de Modelos Sólidos.

Las características y potencialidades más relevantes de estos programas son:

Integración con Programas CAD: Esta característica permite la construcción de modelos funcionales basados en diseños creados en programas CAD como Mechanical Desktop, Pro/Engineer, Solid Edge, Solid Works y otros.

Al integrar un modelo de CAD a los programas de análisis dinámico, éstos automáticamente aplican un conjunto de reglas lógicas a las restricciones de ensamblaje del programa CAD, convirtiéndolas en uniones físicas[1] (característica denominada como Mapeado Automático de Restricciones). Estos programas también poseen capacidad "Asociativa" con los programas CAD, esto es, la capacidad de actualizar automáticamente la información geométrica del modelo, basado en los cambios realizados en el programa CAD, sin modificar las herramientas de análisis creadas para la realización de la simulación dinámica.

Modelado de Objetos: Permite establecer las propiedades físicas de los cuerpos que conforman el modelo; propiedades que definirán su comportamiento durante la simulación, como: masa, coeficiente de restitución, coeficiente de fricción, momento de inercia, posición y velocidad inicial.

También permite establecer el comportamiento entre cuerpos mediante la aplicación de restricciones mecánicas, fuerzas y torques, que restringen sus grados de libertad. Las restricciones se pueden agrupar en tres conjuntos:

Restricciones Rotacionales	Restricciones Lineales	Restricciones de Aplicación
Unión Rígida	Unión de Corredera	Motores
Unión de Revolución	Unión de Cable	Fuerzas
Unión Esférica	Unión de Resorte	Torques
Unión de Ranura	Unión Separadora	Actuadores

Los programas crean las restricciones entre cuerpos mediante el uso de *Puntos de Coordenadas*, elementos con posición y orientación, representados por un conjunto de tres

[1] v. Anexo A : Tabla de Mapeado Automático de Restricciones (ACM).

ejes cartesianos. Los Puntos de Coordenadas van unidos a los objetos y su orientación juega un papel fundamental en la definición del tipo de restricción aplicada.

Simulación Dinámica: Característica que poseen los programas de calcular el movimiento de mecanismos complejos bajo una gran variedad de restricciones, además de simular la interacción entre múltiples objetos, como colisiones, gravedad y cargas externas aplicadas.

Se puede elegir entre dos formas de integración de la simulación basándose en la precisión de los resultados que se deseen obtener, y que a la vez inciden en el tiempo necesario para la realización de los cálculos de la simulación: Euler y Kutta-Merson[2].

Control de las Propiedades de Simulación: Ésta característica permite modificar una gran variedad de propiedades físicas del modelo[3] (p. ej. velocidad) una vez que la simulación ha comenzado. La modificación de los parámetros puede realizarse de forma interactiva, mediante el uso de "deslizadores" de entrada de datos, o de forma predefinida mediante el uso de tablas de datos.

Superficies de Velocidad: Ésta característica permite modelar bandas transportadoras y objetos con propiedades similares. Cuando un objeto entra en contacto con un cuerpo que posee velocidad en su superficie, su momento es alterado de acuerdo a las propiedades de la superficie de velocidad (magnitud de la velocidad y dirección de rotación). Los programas incluyen dentro de la geometría predefinida una banda transportadora lineal, y soporta superficies de velocidad para casi toda la geometría existente (Cilindros, Polígonos Extruidos, etc.).

Medición y Análisis de la Información: Permite medir, mostrar y evaluar casi cualquier propiedad física en una simulación[4], e incluso da la opción de crear expresiones aritméticas y matemáticas para personalizar el análisis de los datos gracias a su propio lenguaje de fórmulas.

---

[2] v. "Soluciones Numéricas para Ecuaciones Diferenciales Ordinarias y Parciales", L. Fox, Addison-Wesley, 1962, p.24-25.

[3] v. Anexo B: Tabla de Propiedades Modificables durante la Simulación para Objetos Seleccionados de WM Motion.

[4] v. Anexo C: Tabla de Parámetros Desplegables para Objetos Seleccionados de WM Motion.

Los programas de análisis dinámico simulan y miden las variables de simulación en distintos sistemas métricos: SI, Inglés, CGS [5] o en combinaciones personalizadas de los anteriores sistemas. También pueden exportar datos de cargas aplicadas e inercia de objetos, que son utilizados por programas de Análisis de Elementos Finitos (FEA).

II .3. Análisis de Elementos Finitos (FEA)

El Análisis de Elementos Finitos es una técnica de análisis en Ingeniería utilizada para simular el comportamiento de estructuras complejas, con la finalidad de evaluar su confiabilidad y desempeño bajo ciertas condiciones mecánicas como pueden ser: esfuerzo, vibración, pandeo y transferencia de calor.

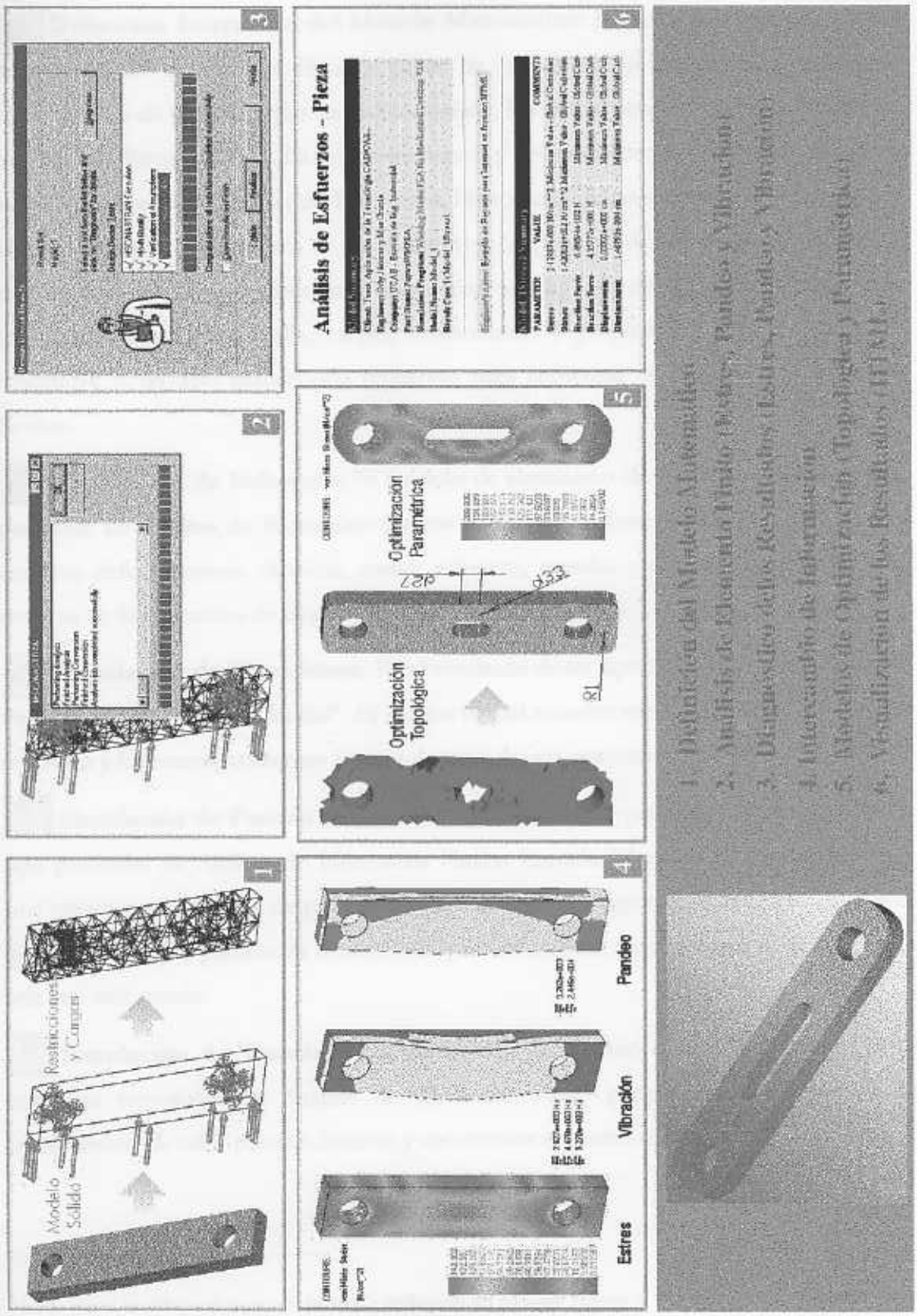
La premisa básica del Análisis de Elementos Finitos es la división de un problema complejo en subconjuntos más pequeños y manejables, a los cuales se les puede encontrar solución, para luego asumir que el comportamiento de la complejidad del todo puede ser aproximado a la suma del comportamiento de sus partes, ensamblando los resultados individuales de los elementos separados en una solución única para el problema.

Los programas de Elemento Finito constan de diversos módulos de análisis, dentro de los que se pueden mencionar: Esfuerzo, Vibración, Pandeo y Transferencia de Calor; y módulos especiales de optimización como: Topología y Parametrización. Debido a que los módulos de simulación ejecutan sólo uno de los tipos de procesos de simulación a la vez, estos son básicamente independientes unos de otros. Por otro lado, los módulos de optimización dependen de algún tipo de análisis estructural, por lo que tienen que ser utilizados en conjunción con los módulos de simulación de esfuerzo, vibración y pandeo.

En la siguiente página se puede observar un esquema referencial de la aplicación de las herramientas de Análisis de Elemento Finito (Esquema 2.3), contenidas en el software FEA:

---

[5] v. Anexo D: Tabla de Sistemas de Unidades Definidas de WM Motion



Esquema 2.3: Procedimiento a seguir para el Cálculo de Elemento Finito de un Sólido.

Definición Interactiva del Modelo Matemático: El programa crea un modelo matemático de un modelo físico a partir de la generación de un subconjunto de componentes de forma regular llamados *elementos*, los cuales poseen puntos especiales en sus esquinas llamados *nodos*. La red de elementos y nodos conforman lo que se denomina *malla*. El proceso de Análisis de Elementos Finitos calcula respuestas específicas en los nodos utilizando la geometría de los elementos, las propiedades de los materiales, y los efectos de las cargas y restricciones que actúan sobre el objeto. La definición de estos parámetros (geometría, malla, cargas, restricciones y propiedades de los materiales) constituye el modelo matemático requerido para comenzar el Análisis de Elementos Finitos.

Simulación de Esfuerzos: El módulo de simulación de esfuerzo ejecuta un tipo particular de Análisis de Elementos Finitos llamado "Análisis Estático Lineal", el cual resuelve deformaciones elásticas, como: esfuerzo, tensión y fuerzas de reacción que resultan de la aplicación de cargas y restricciones a un objeto.

Simulación de Vibraciones: Es el resultado de un tipo de Análisis de Elementos Finitos llamado "Análisis Modal". El análisis modal resuelve vibraciones para frecuencias naturales y las correspondientes formas de tono de una estructura.

Simulación de Pandeo (Flexión): La simulación de pandeo es el proceso de un tipo particular de Análisis de Elementos Finitos llamado "Análisis de Pandeo Lineal". Los objetivos del análisis de pandeo son, determinar la magnitud de las cargas a aplicar que puedan causar pandeo en la estructura y mostrar como sería la forma de la estructura una vez deformada.

Simulación de Transferencia de Calor[6]: El módulo de transferencia de calor utiliza la tecnología de Análisis de Elemento Finito para simular los efectos de transferencia de calor por conducción y convección en partes mecánicas.

[6] Dado que el modelo a ser manejado durante la realización del presente Trabajo es una silla para discapacitados, no se utilizará el módulo de transferencia de calor de WM FEA.

Los efectos térmicos producen deformaciones por expansión que incrementan las cargas estructurales de partes y piezas. Los programas FEA pueden aplicar los resultados obtenidos en el análisis de transferencia de calor, como cargas estructurales en simulaciones de esfuerzo y pandeo.

Optimización Topológica: Es un proceso de optimización que realiza el programa a través del Módulo Conceptual, y su finalidad es ayudar a ampliar conceptos e ideas de diseño. La Optimización Topológica consiste en reducir el volumen de una envoltura o sólido general (llamado espacio de diseño) de donde emergerá el concepto o idea, en función de las cargas y restricciones aplicadas a la pieza y de sus características mecánicas (p. ej. : ductilidad).

Optimización Paramétrica: Es un proceso de optimización que realiza el programa a través del Módulo de Forma, y su finalidad es la de explorar diferentes opciones de diseño al unir los conceptos de Análisis de Elementos Finitos y construcción de geometría paramétrica. La Optimización Paramétrica permite variar ciertos parámetros (p. ej. : longitud) mientras se observa cierto criterio (p. ej. : esfuerzo máximo permisible), hasta lograr la mejor y más económica solución.

Diagnostico Automático de Resultados: Después de realizar un Análisis de Elementos Finitos es necesario evaluar ciertos aspectos del resultado del análisis: ejecución del programa, calidad de la Malla, verificación de asunciones y diseño conceptual. Los programas FEA poseen un instrumento de diagnóstico que realiza un conjunto de tests y compara los resultados obtenidos con ciertos criterios preestablecidos. Si éste encuentra que el análisis ha fallado, puede realizar ciertos ajustes de manera automática o puede recomendar acciones específicas para corregir la situación.

Análisis de Ensambles: El programa puede realizar análisis de simulaciones (esfuerzo, vibración, pandeo y de transferencia de calor) tanto para partes individuales como para ensambles sencillos, donde los diversos componentes pueden tener asignadas diferentes cargas, restricciones y materiales.

Visualización de los Resultados de Simulación: Permite examinar con animaciones en *tiempo real*, cómo se forman y propagan los resultados de las simulaciones a lo largo del modelo estudiado, en función de las cargas y restricciones aplicadas. Los resultados pueden expresarse en función de mapas de códigos de colores, deformación de la geometría, o mediante el despliegue de símbolos (estos dos últimos en función de factores de escala).

Los resultados de las simulaciones también pueden ser exportados al formato VRML, por lo que pueden ser visualizados como objetos tridimensionales en programas Web (como Netscape Navigator o Microsoft). También es posible generar resúmenes automáticos de los resultados de proyectos en formato VRML para ser publicados en la WWW.

II .4. Fotorrealismo y Animación

Los programas de fotorrealismo y animación permiten mostrar como serán las características visuales (formas, colores, interacción con su entorno, etc.) de un diseño una vez manufacturado, mientras todavía es un modelo de computadora. Entre las principales características y potencialidades de los programas de fotorrealismo, podemos mencionar:

Importación y Modelado de Objetos de Malla (Wireframe): Permiten crear fácilmente primitivas tridimensionales (como esferas conos y cilindros), así como modelar objetos complejos mediante la extrusión de figuras basadas en splines bidimensionales. También posee la capacidad de importar geometría tridimensional de programas CAD con formato DXF (Data Exchange Format).

Creación de Luces y Cámaras: Los programas de Fotorealismo y Animación permiten añadir diversos tipos de luces, cámaras y efectos especiales (p. ej.: niebla), que crean el ambiente necesario para mejorar el aspecto de los modelos de malla.

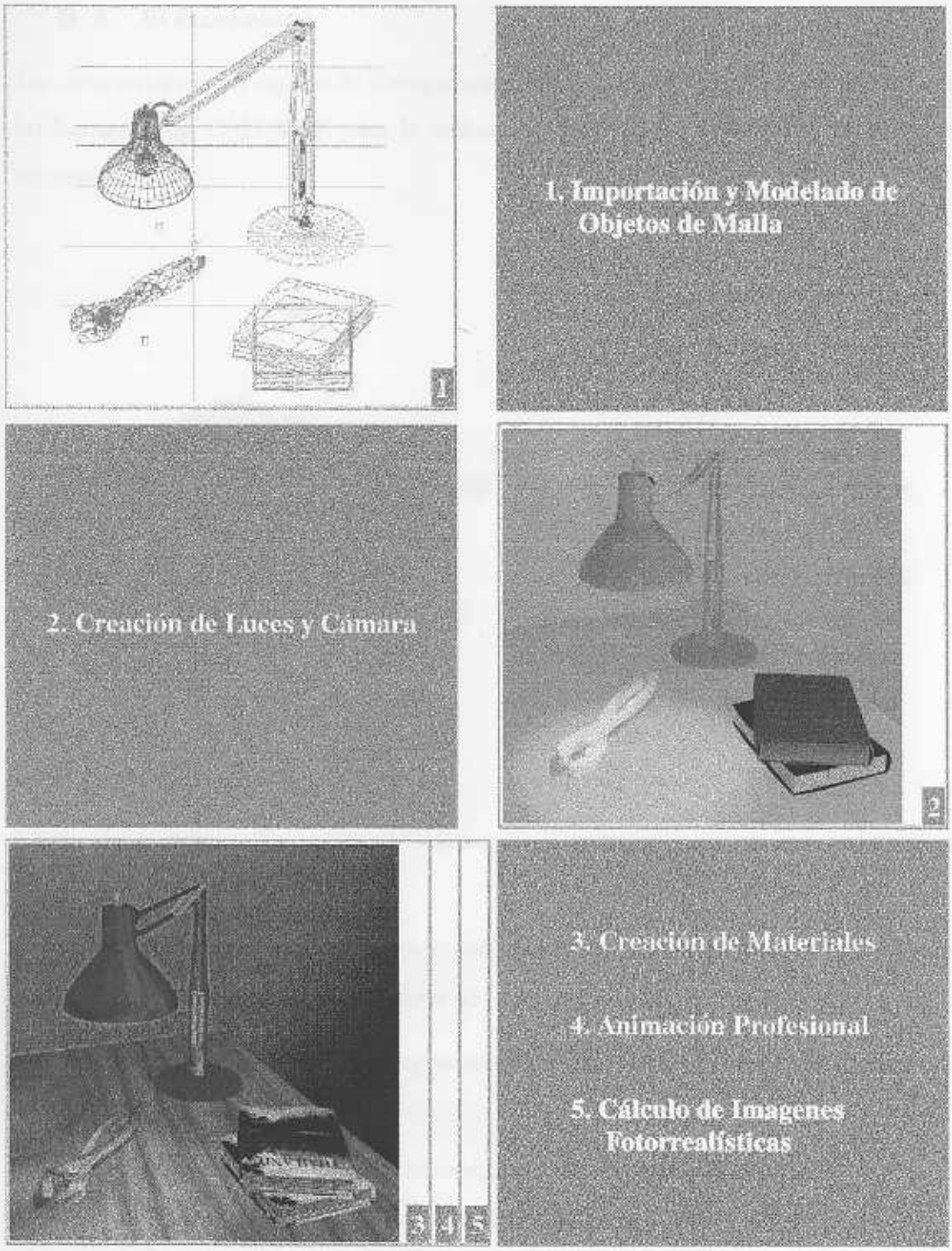
Creación de Materiales: Se pueden crear materiales para darle propiedades de color, textura y reflexión de luz a la superficie de los objetos. Los materiales son creados al combinar distintos atributos tales como color, brillo, y transparencia, junto con mapas de textura, opacidad, reflección, protuberancia, brillo, auto–iluminación y otros.

Animación Profesional: Los programas poseen un módulo con capacidades completas de animación, para dar un control preciso sobre las propiedades de objetos, luces, y cámaras[7]. También incluye un módulo de post–producción donde se pueden editar en conjunto, segmentos de distintas animaciones, componer imágenes y agregar efectos especiales como transiciones –entre animaciones– y titulaciones. También permite el cálculo de imágenes en red utilizando un número casi ilimitado de computadoras, incrementando la velocidad de generación de las animaciones.

Cálculo de Imágenes Fotorrealísticas: Los programas de Fotorrealismo realizan el cálculo de imágenes fotorrealísticas al analizar la geometría de malla, materiales, luces y cámaras que componen una escena. Estas imágenes vistas en secuencia –entre 12 y 30 imágenes por segundo– conforman los cuadros de una animación. Se pueden elegir entre cuatro distintos métodos de sombreado al calcular una imagen, los que inciden en el tiempo de cálculo y en la calidad fotorrealística de la misma.

En el Esquema 2.4 se visualiza los pasos a seguir en la aplicación de las herramientas de Animación y Fotorrealismo

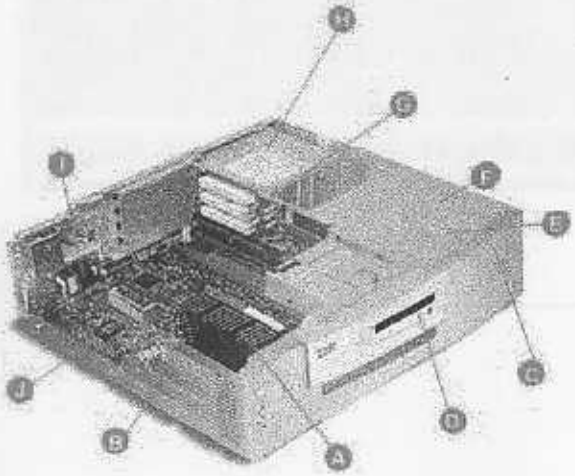
[7] v. Anexo H: Tabla de Control de Propiedades de Componentes para Animaciones de 3DStudio.



Esquema 2.4: Pasos a seguir en la realización del Fotorrealismo y Animación de Objetos.

II .5. El Hardware

Las características del equipo de Computación utilizado en el aprendizaje y aplicación de las herramientas CAD/CAE para la realización del presente trabajo de grado son las siguientes:



A. Procesador Pentium 200 MMX con Bus de 66 MHz.
B. 128 Megabytes de Memoria SDRAM.
C. CD ROM Drive 32X.
D. 1.44MB Diskette Drive (standart).
E. Disco Duro 2.5 GigaBytes (EIDE).
F. Puerto para Disco Duro Extra.
G. 3 Puertos de Expansión (PSI/ISA).
H. Fuente de Poder Easy-Swap.
I. Tarjeta de Red Ethernet 10/100.
J. Memoria de Vídeo de 2 Mbytes VRAM.

Otros datos adicionales sobre la interacción Hardware-Software que merecen ser mencionados son los siguientes:

- El sistema operativo utilizado como plataforma para ejecutar los programas CAD/CAE es Microsoft®Windows 95.
- Una vez instalado todos los programas la cantidad de memoria libre en disco duro disminuye a 1.774 Mbytes.
- Cada uno de los programas consume, aproximadamente, la siguiente cantidad de recursos del sistema para poder funcionar: 3Dstudio (50%), Mechanical Desktop (28%), Working Model FEA (30% incluye a Mechanical Desktop), Working Model Motion (5%), y Microsoft®Windows 95 (3%).

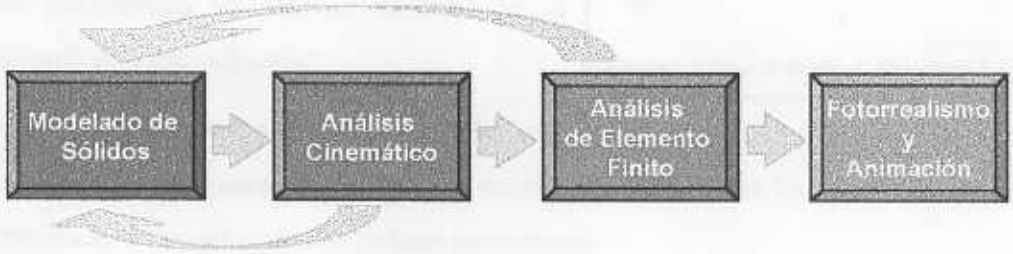
Capítulo III

Desarrollo del Modelo

A fin de establecer diferencias en la planificación, interacción entre etapas y tiempos de Desarrollo entre Ingeniería Concurrente y Secuencial, se desarrollará el modelo de silla para discapacitados según los principios fundamentales de ambas filosofías de diseño.

III .1. Desarrollo Secuencial del Modelo

Dado que la Ingeniería Secuencial está basada en la premisa de que una nueva fase no puede comenzar antes de que la fase anterior sea completada y aprobada, el desarrollo del modelo se planifica según el Esquema 3.1.



Esquema 3.1: Ingeniería Secuencial

Cada etapa representa la evolución del modelo en cada uno de los softwares descritos en el capítulo anterior; éstas pueden ser interpretadas como personas, equipos de trabajo o departamentos de una organización. Las flechas rectas y curvas indican, el avance en la aplicación de los programas y las iteraciones de los ciclos de diseño respectivamente.

Cada una de las etapas envueltas en el desarrollo secuencial de la propuesta conceptual (silla para discapacitados) y sus respectivas actividades, son descritas a continuación.

Modelado de Sólidos

Para convertir el diseño conceptual de la silla, en un modelo paramétrico sólido en Mechanical Desktop, es necesario hacer un breve análisis de las características geométricas de las piezas que lo componen y de las relaciones que éstas mantendrán con las demás piezas en el ensamble final, a fin de planificar su aplicación en el orden más eficiente.

En primer lugar se enumeraron las piezas para controlar adecuadamente la información a lo largo de todo el desarrollo (v. Anexo J). Segundo, y aprovechando la similitud entre las partes, se creó una pieza paramétrica; y al variar los valores de sus parámetros (ancho, largo y espesor), se obtuvieron las diversas pieza del modelo. Cada pieza derivada de la pieza paramétrica, es completada al crearle las *características colocadas*[1] correspondientes (ver Figura 3.1). El procedimiento para crear una parte paramétrica en MD se describe en el Diagrama de Flujo adjunto.

Diagrama de Flujo del Modelado Paramétrico de Sólidos.

Los diferentes pernos, tornillos y arandelas del prototipo se sustituyeron por pasadores paramétricos, que igualmente cumplen la función de unión entre las piezas y contribuyen a simplificar el modelo para los análisis posteriores.

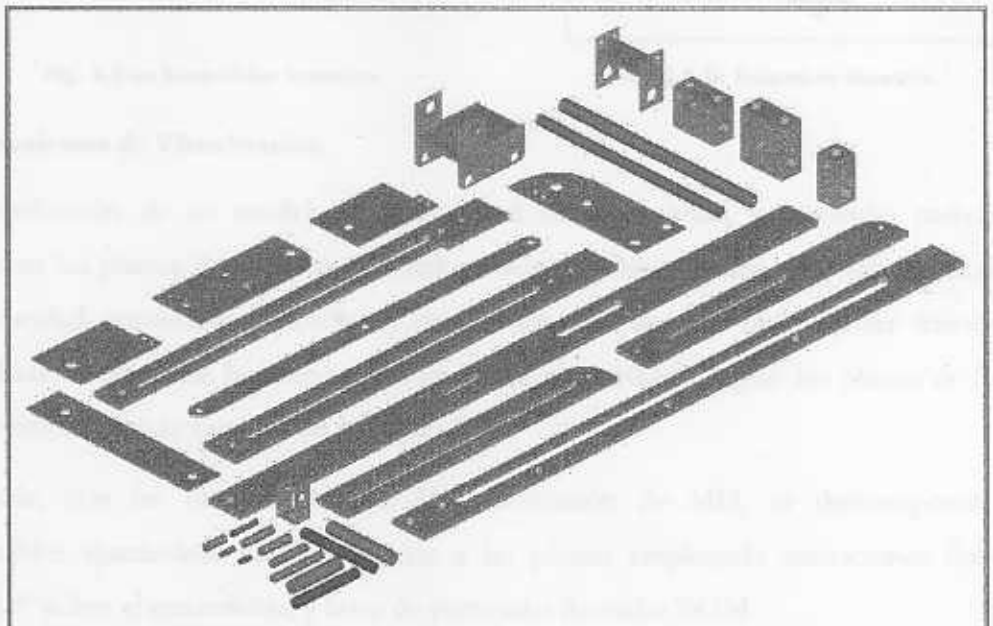


Fig. 3.1: Piezas que integran el Modelo creadas en MD.

[1] v. Capítulo II.: Objetos basados en Características, p 12.

Completadas las piezas, se procede a ensamblar el modelo, aplicando las herramientas de Modelado de Ensamble[2] de Mechanical Desktop. Debido a la gran cantidad de piezas, resulta complejo realizar un solo ensamble, por ello se agruparon en subensambles o ensambles internos (Figura 3.2-a); y aprovechando la simetría del prototipo se duplicaron para a su vez combinarlos en un solo ensamble denominado *Ensamble Maestro* (Figura 3.2-b).

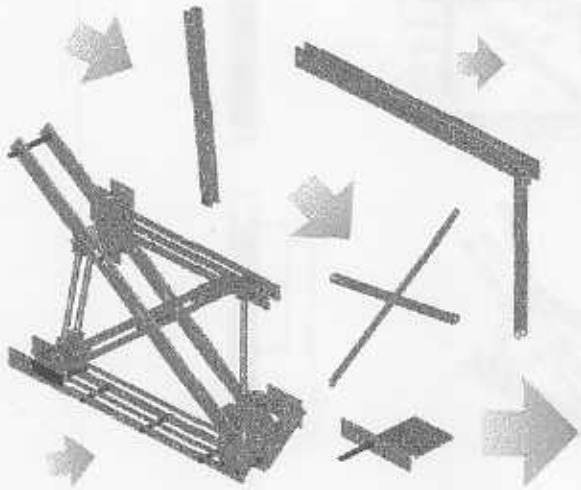


Fig. 3.2-a: Ensambles Internos.

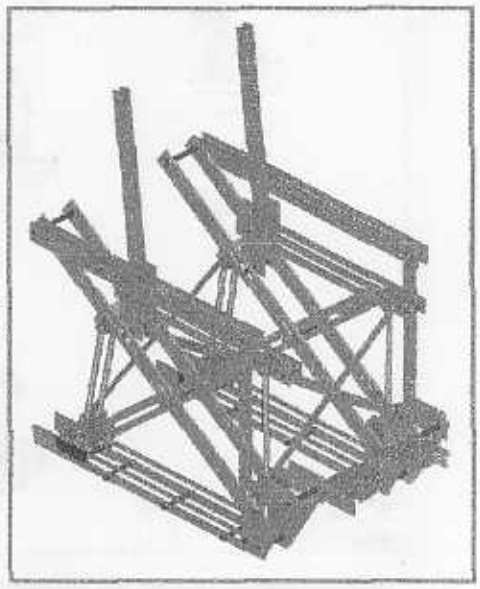


Fig. 3.2-b: Ensamble Maestro.

Herramientas de Visualización

La confección de un modelo tridimensional sólido termina, usualmente, cuando se preparan los planos. La presentación del modelo en dibujos tridimensionales se usa para dar claridad, comunicar conceptos y detalles estructurales que pudieran ser difíciles de visualizar. A través de las Generación de Dibujos de MD se logran los planos de forma automática como se muestra en la Figura 3.3.

Además, con las herramientas de Documentación de MD, se descomponen los ensambles ajustándose asociativamente a las piezas; empleando anotaciones formato "globo" sobre el ensamblaje, y listas de materiales llamadas BOM.

[2] v. Capítulo II: **Modelado de Ensambles**, p. 13.

Estas aplicaciones son de gran utilidad en publicaciones técnicas, manuales de operación, documentaciones, registros, para indicar la función de las partes y en mantenimiento para hacer compresibles tareas complejas. En la Figura 3.4 se muestra la explosión, la lista de materiales y el Balloon de las piezas que conforman el subensamble del modelo.

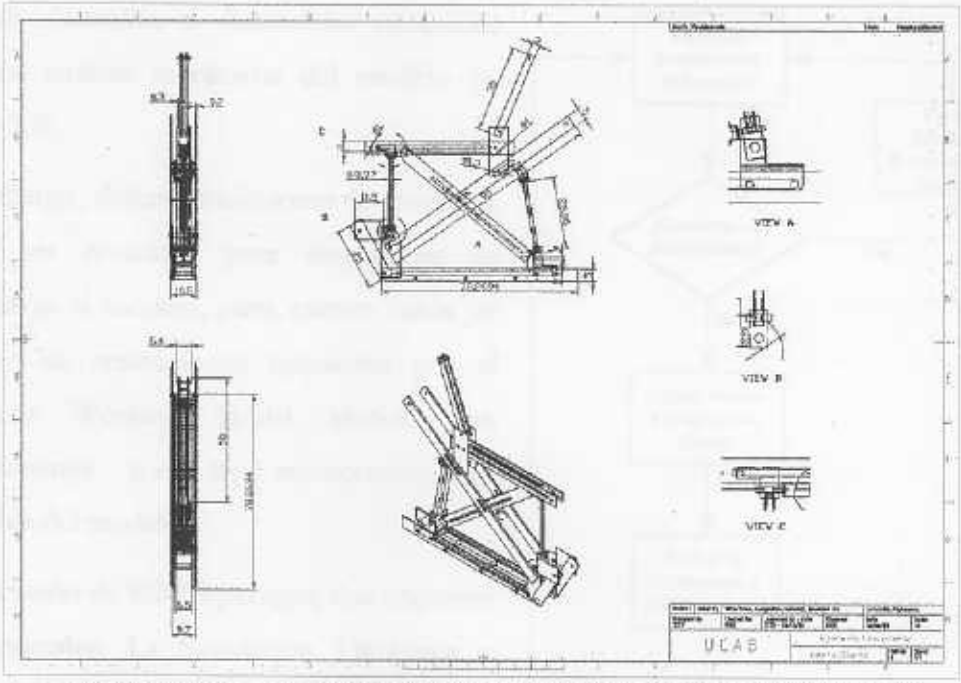


Fig. 3.3: Vistas Ortogonales, Isométricas y de Detalles del modelo (subensamble).

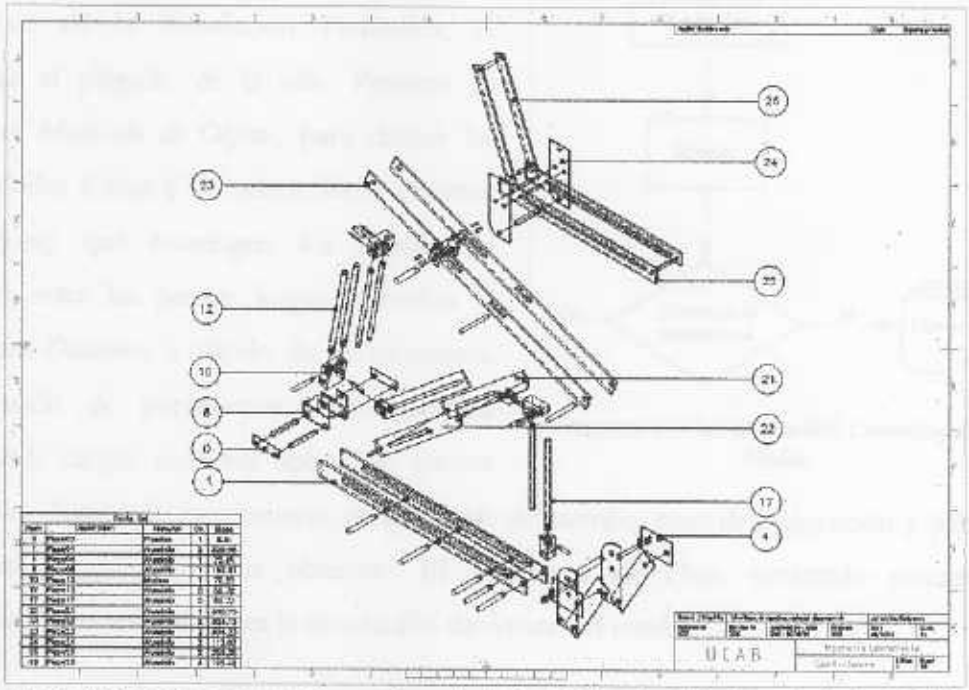


Fig. 3.4: Vistas descompuestas en formato globo (Balloon) y Lista de materiales (BOM).

Análisis Cinemático

El ensamble maestro es importado de Mechanical Desktop a Working Model Motion (segunda etapa del proceso secuencial), a través del comando de *Integración con programas CAD*. El programa aplica un conjunto de reglas lógicas a las restricciones de ensamble o *Mapeado Automático de Restricciones*[3] necesarias para los análisis mecánicos del modelo (v. Figura 3.5).

Sin embargo, dichas restricciones de ensamble deben ser revisadas para comprobar su adecuación al modelo, pues existen casos en los que las restricciones impuestas por el programa Working Model Motion son inconsistentes con las restricciones de ensamble del modelo.

La aplicación de WMM persigue dos objetivos fundamentales: La Simulación Dinámica o Análisis Dinámico y el Análisis Estático.

A través de la Simulación Dinámica, se visualiza el plegado de la silla. Primero se aplica el *Modelado de Objetos*, para definir las propiedades físicas y las restricciones (fuerzas y torques) que restringen los grados de libertad entre las piezas; luego se realiza la *Simulación Dinámica* o cálculo de movimientos, en función de parámetros preestablecidos (gravedad, cargas externas aplicadas, límites espaciales, límites de movimiento, etc.) además del tiempo, paso de integración y número de cuadros que se desea obtener. El Diagrama de Flujo mostrado resume el procedimiento aplicado para la simulación dinámica del modelo.

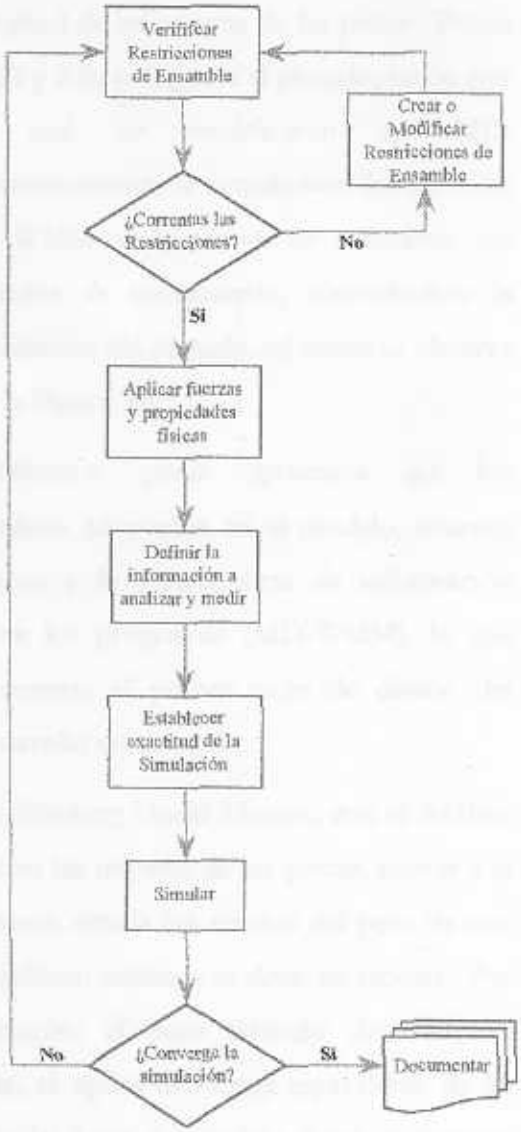


Diagrama de Flujo del Análisis Cinemático de un Modelo.

El sistema de carga aplicado al modelo para la simulación del plegado, corresponde a la fuerza promedio hacia adentro, generada por una persona en posición sentada para una flexión máxima del codo de 180°, para el percentil 5% (v. Anexo K).

De los cálculos se encuentra que el modelo no pliega, observándose que al modificar la longitud de las ranuras de las piezas (Piezas 1, 23 y 24), se lograría el plegado; razón por la cual se modificaron en MD. Posteriormente, se actualizaron los cambios en WMM y de nuevo se realizaron los cálculos de movimiento, obteniéndose la simulación del plegado, tal como se observa en la Figura 3.6.

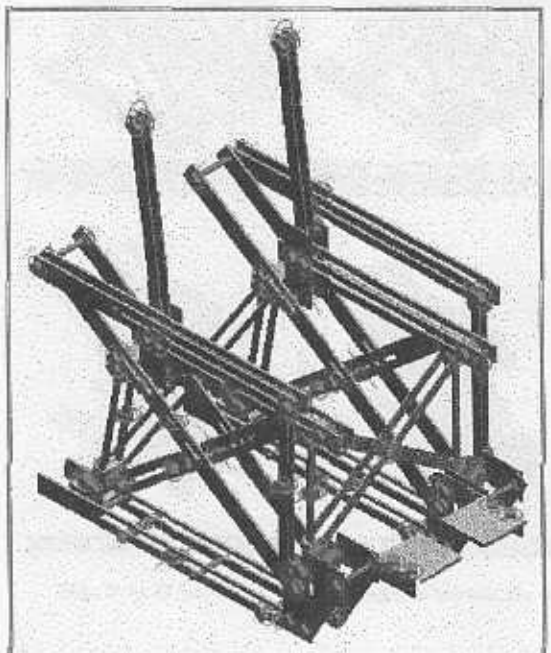


Fig. 3.5: Mapeado Automático de Restricciones en WMM.

Finalmente, puede apreciarse que los cambios adoptados en el modelo, ocurren gracias a la transferencia de información entre los programas (MD-WMM), lo que representa el primer ciclo de diseño del desarrollo secuencial.

Volviendo a los objetivos sobre la aplicación de Working Model Motion; con el Análisis Estático se determinan las fuerzas desarrolladas en las uniones de las piezas, sujetas a la acción de un sistema de carga dado. Dicho sistema, simula los efectos del peso de una persona sentada en la silla en condiciones de equilibrio estático; es decir en reposo[5]. Por ser ésta un equipo para uso general, se emplea el peso estándar de hombres pertenecientes al percentil 95%, específicamente, se aplica una carga equivalente de 98 Kg (v. Anexo K); dichas cargas se distribuyen en las áreas del modelo donde la persona ejerce apoyo (v. Anexo L).

[3] v. Capítulo II: **Integración con Programas CAD**, p. 16.

[4] v. Capítulo II: **Simulación Dinámica**, p 17.

[5] Recuérdese que la **estática** puede considerarse como un caso especial de la **dinámica**, donde las aceleraciones y velocidades son iguales a cero.

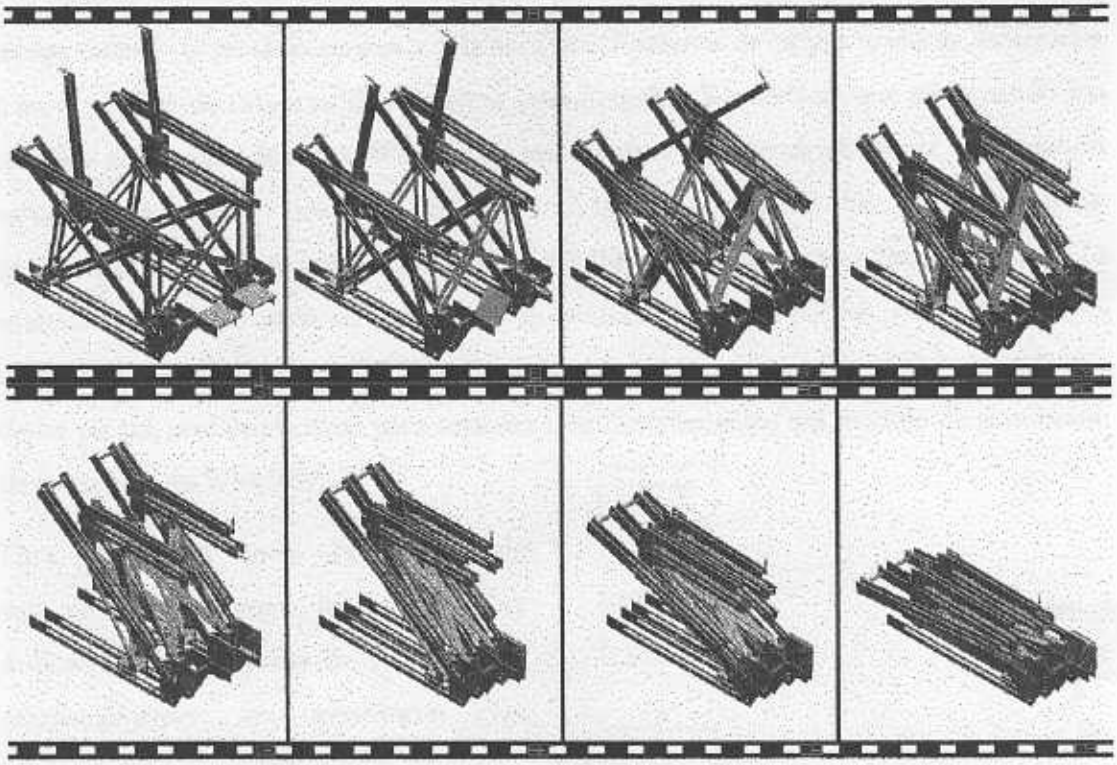


Fig. 3.6: El modelo "cobra" vida a través de la Simulación Dinámica de Working Model Motion.

El cálculo de las fuerzas o reacciones en las uniones, sobre el modelo articulado, es justificado por el software Working Model FEA; pues éste determina a través del Análisis de Elemento Finito, si las características mecánicas de las piezas (geometría y material) pueden soportar las condiciones de trabajo (p. ej.: deformación) a las que estarán sometidas.

Análisis de Elemento Finito

El Análisis de Elemento Finito, constituye la tercera etapa del proceso secuencial del desarrollo del modelo. Con este análisis se evaluarán algunas piezas del modelo, según condiciones mecánicas específicas: esfuerzo, pandeo y vibración.

Análisis de Esfuerzo

Escapa de los límites del estudio la evaluación estática de todas las piezas del modelo, pues no se pretende mejorar el diseño mecánico de la silla; sin embargo, son objetivos del estudio mostrar la aplicabilidad y la potencialidad de ésta herramienta. Por tanto, se evaluarán cinco (5) piezas del modelo, las cuales poseen características que las diferencian dentro de su similitud: geometría y características *colocadas*.

Del análisis estático de WMM se obtienen las fuerzas desarrolladas en cada una de las piezas cuando el modelo se sujeta a la acción del sistema de cargas estáticas, necesarias para el análisis de esfuerzo de las piezas seleccionadas. Recuérdese que aún cuando los cálculos son realizados por WM FEA, los resultados dependerán de la información suministrada, razón por la cual es importante identificar las fuerzas *externas* (proporcionadas por el análisis estático de WMM) y las restricciones (traslacionales y/o rotacionales) que ocurren en los puntos de contacto entre las piezas[6]. Por consiguiente, un completo entendimiento del sistema de fuerzas y restricciones que actúan en cada una de las piezas, será importante para sostener o no los resultados del módulo de simulación de esfuerzos de WM FEA.

Para todos los casos de análisis de esfuerzo deben seguirse los pasos que se indican en el Diagrama de Flujo anexo, adicionalmente se introducen los siguientes datos específicos:

- Material: Aluminio (v. Anexo M).
- Factor de Seguridad: 1.
- Error Máximo Admisible: 10%.

Con esta información y según la geometría de las piezas se genera la malla. Luego el programa establece ecuaciones de forma matricial para las cargas aplicadas y para la geometría de cada elemento. De los cálculos (cuando converge el método numérico) se obtiene la matriz de desplazamiento o desempeño individual de cada elemento de la malla, representado visualmente sobre la pieza

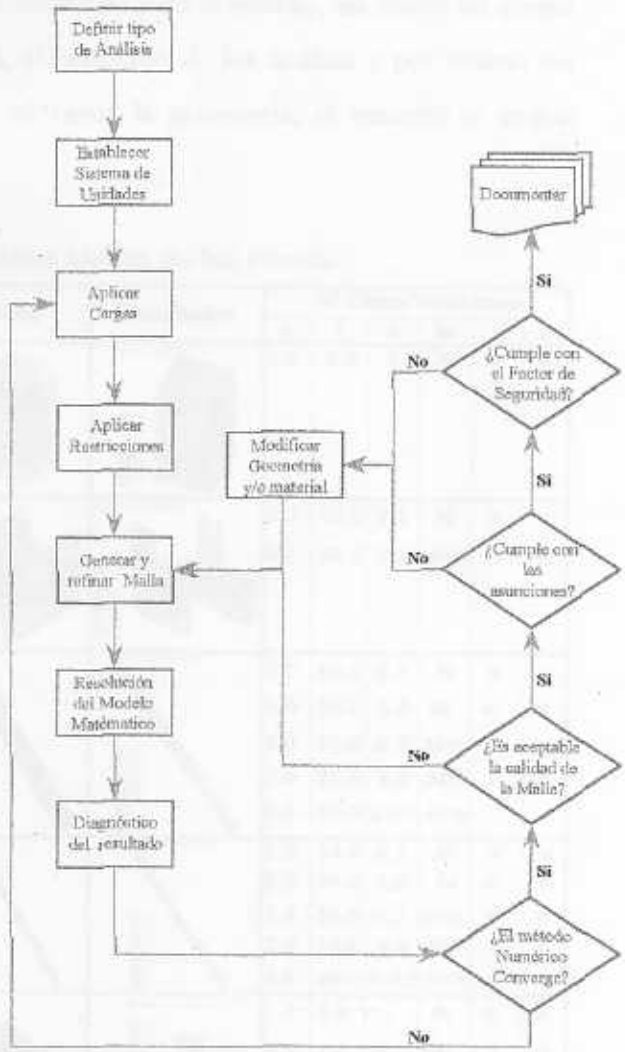


Diagrama de Flujo del Análisis Estático Lineal de una Parte.

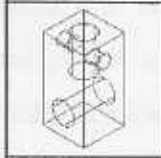
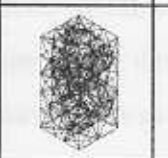
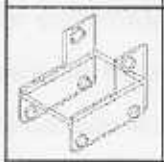
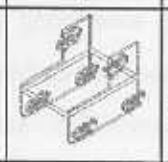
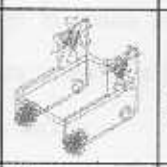
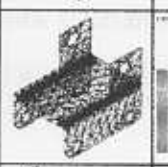
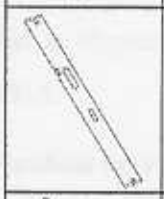
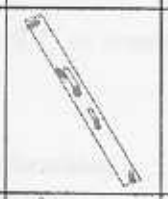
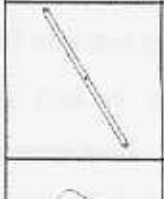
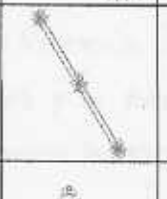
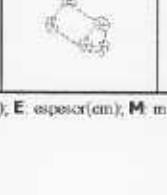
[6] Se recomienda utilizar el método de *Diagrama de Cuerpo Libre*, para realizar el análisis de fuerzas y restricciones.

por medio de un "mapeado" de colores, mostrando la distribución de los esfuerzos según las condiciones dadas.

Los resultados son evaluados por el programa, en función del margen de error, la calidad de la malla, etc., y de no aprobar el diagnóstico, el programa muestra una serie de recomendaciones o sugerencias a seguir: chequear las cargas aplicadas, verificar las restricciones, modificar la geometría de la pieza (lo que implica el cálculo de una nueva malla), probar otro material, o combinar estas alternativas para adecuar la optimización del diseño, de forma que soporte las condiciones a las que es sometido.

En la Tabla 3.1, se presentan las piezas seleccionadas para el estudio, así como las cargas y restricciones aplicadas, la malla generada, el resultado de los análisis y por último los cambios adoptados para su optimización al variar la geometría, el material o ambas características.

Tabla 3.1: Análisis Estático Lineal de las Piezas.

Pieza	Cargas	Restricciones	Malla	Resultados	Nº Ciclos/Variaciones					
					A	L	E	M	C	O
					3.0	6.0	3.0	Al	✓	✖
					8.2 8.2	10.0 10.0	7.1 7.1	Al AlT6	✖ ✓	✖ ✖
					5.0 5.0 5.0 5.0 5.0	90.0 90.0 90.0 90.0 90.0	0.7 2.0 0.7 2.0 1.97	Al Al AlT6 AlT6 AlT6	✖ ✖ ✖ ✓ ✓	✖ ✖ ✖ ✓ -
					2.5 2.5 2.5 2.5 2.5	54.0 54.0 54.0 54.0 54.0	0.3 1.0 0.3 1.0 0.42	Al Al AlT6 AlT6 AlT6	✖ ✖ ✖ ✓ ✓	✖ ✖ ✖ ✓ -
					1.0 1.0	1.6 1.6	- -	Al Al	✖ ✓	✖ ✖

Leyenda: (**A**: ancho(cm); **L**: largo(cm); **E**: espesor(cm); **M**: material; **C**: converge; **O**: optimizar; **Al**: aluminio; **AlT6**: Aluminio 6061T6; ✖ :no; ✓:si)

Particularmente, para no alterar las conexiones de las piezas con las demás en el modelo, sólo se modificaron sus espesores en cuanto a geometría; y se ensayaron con otros materiales por ejemplo el Aluminio 6061-T6 (v. Anexo M).

Análisis de Pandeo

Mediante el Análisis de Pandeo se busca, para el modelo estudiado, establecer cual será el comportamiento de aquellas piezas de geometría esbelta sometidas a compresión. Las piezas que cumplen esta condición en la silla para discapacitados son los tubos de sección cilíndrica hueca (Piezas 11 al 14, 17 y 18) que funcionan como brazos telescópicos para el plegado de la silla.

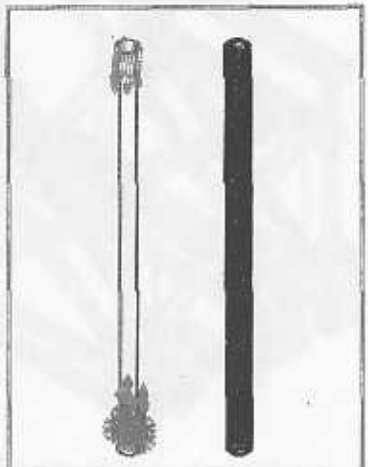


Fig. 3.7: Pieza con las Cargas y Restricciones aplicadas y su Malla generada para el Análisis de Pandeo.

Para realizar el análisis de pandeo es necesario aplicar las cargas obtenidas del análisis estático en WMM, y sus respectivas restricciones de ensamble. Luego, se genera la malla y se somete el modelo matemático al cálculo de análisis de elemento finito, con el objeto de determinar los factores de escala que multiplicados a la fuerza aplicada, producen la carga de pandeo crítica. Debido al número de elementos generados en la malla para el análisis de los tubos (7.612 elementos), el método numérico no logra converger a un resultado, pues sobrepasa la capacidad de almacenamiento del disco duro.

En la Figura 3.7, se muestra uno de los tubos sometido al análisis de pandeo en WM FEA.

Análisis de Vibración

El objetivo del Análisis de Vibración es determinar cuales son las frecuencias naturales a la cual el modelo vibrará y si éstas se acercarán a su frecuencia de operación, aumentando significativamente las cargas dinámicas en el modelo, e incrementando su probabilidad de falla.

El análisis de vibración no requiere de cargas aplicadas sobre el modelo, pues los resultados se basan en la geometría y en las restricciones de ensamble de la estructura analizada.

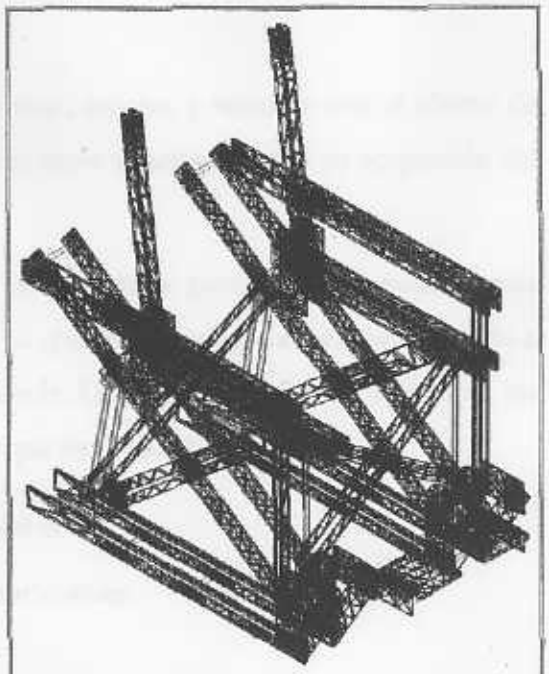


Fig. 3.8: Malla generada en el modelo para el Análisis de Vibración. El número de elementos generados es 32.270.

Para lograr la frecuencia natural del modelo, se establece que el análisis de vibración debe realizarse sobre el ensamble Maestro y no en piezas individuales como en el análisis estático lineal. Partiendo de esta premisa se aplicaron *uniones* (mate) de WM FEA en todos los puntos de conexión de las piezas, y posteriormente generar la malla para todo el conjunto (v. Figura 3.8). El ensamble Maestro se somete al análisis de elemento finito, sin converger a una solución, pues el tamaño de las matrices generadas por el número de elementos de la malla (más de 32.000 elementos), sobrepasaba la capacidad disponible de disco duro.

Finalmente, el análisis de vibración del modelo tampoco se logra concluir, ya que la capacidad del recurso disponible no soporta la complejidad de los cálculos realizados.

Con los resultados obtenidos de los cálculos de esfuerzos por elemento finito (no se incluyen los análisis de pandeo y vibración, pues no se obtuvo resultado alguno) se optimizan las piezas –modificando su geometría y/o material– y se adaptan automáticamente en el ensamble maestro de MD, y de nuevo se realiza la simulación dinámica para comprobar que el plegado sea correcto. Ésta interacción entre WM FEA, WMM y MD, es el segundo ciclo de desarrollo del proceso secuencial, para luego dar paso a la cuarta etapa del proceso utilizando el programa 3Dstudio.

Fotorrealismo y Animación

El diseño fotorrealístico incluye el uso de formas, colores y texturas con el objeto de visualizar como se relaciona el modelo con su entorno y medir el grado de aceptación del producto aún sin haber sido desarrollado.

Para el desarrollo fotorrealístico del modelo se exporta la geometría por partes desde MD como archivos de 3D Studio (raíz .3DS), ya que resulta engorroso exportarlo todo a la vez debido a la gran cantidad de malla generada. Una vez en 3D Studio se aplican los factores necesarios para definir la escena en la que se visualiza el modelo:

- Crear y colocar luces y cámaras, acordes con el modelo.
- Desestimar las caras cuyas normales no sean visibles.
- Definir materiales: color, textura y brillo.
- Importar objetos que sirvan de entorno o fondo al modelo.
- Controlar la resolución y la precisión de la presentación.

Dado que el fotorrealismo es un proceso artístico, es necesario realizar numerosos ensayos (render) hasta lograr un consenso entre los materiales, luces, perspectivas y movimientos aplicados. Alcanzado esto, se realiza el cálculo fotorrealístico de las imágenes o animaciones del modelo. La Figura 3.9 muestra el resultado de la visión fotorrealística del modelo de silla para discapacitados.

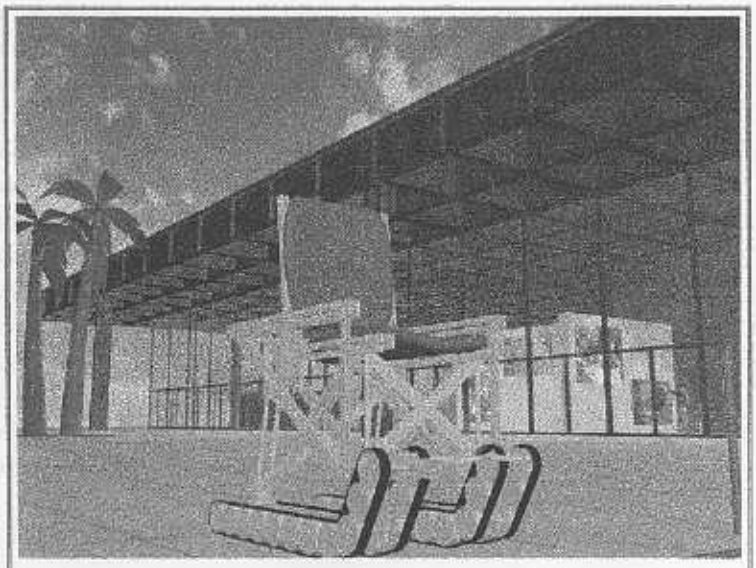


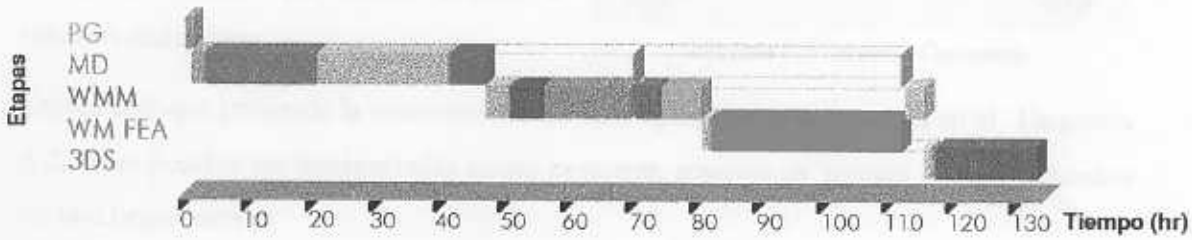
Fig. 3.9: Render Fotorrealístico del Modelo de la silla.

Tiempo Secuencial de Desarrollo del Modelo.

Para establecer los tiempos de ejecución de las actividades pertenecientes a cada una de las etapas descritas, se midieron los tiempos de duración de las tareas en que se dividen estas actividades. En el Anexo N, se presentan los tiempos de las tareas realizadas para el Desarrollo Secuencial del modelo.

A fin de lograr una mayor compresión de la secuencialidad de las etapas, se presenta el siguiente Diagrama de Tiempo en función de los tiempos de ejecución de cada una de las actividades, según el orden cronológico en que fueron realizadas.

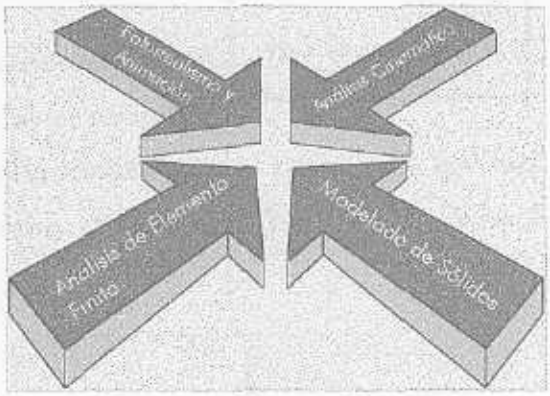
Diagrama De Tiempo Del Desarrollo Secuencial Del Modelo



Actividades	Horas
Planificación General de la Aplicación Secuencial de la Herramientas para el Desarrollo del Modelo	1,3
Planificación del Desarrollo del Modelo en Mechanical Desktop	1,9
Modelado Sólido de Piezas	17,0
Ensamble del Modelo	24,4
Documentación del Modelo	5,6
Planificación del Desarrollo del Modelo en Working Model Motion	3,5
Exportación del Modelo a WMM	5,0
Simulación Dinámica del Modelo Modificado	13,6
Modificación de Piezas en MD	0,4
Simulación Dinámica del Modelo Modificado	3,7
Simulación Estática del Modelo Modificado	6,3
Planificación del Desarrollo del Modelo en Working Model FEA	1,0
Análisis de Elemento Finito de las Piezas	29,7
Modificación de Piezas en MD	0,4
Simulación Dinámica del Modelo Modificado	3,1
Planificación del Fotorrealismo del Modelo en 3DStudio	1,0
Fotorrealismo del Modelo (Definitivo)	16,1

III .2. Desarrollo Concurrente del Modelo

La creación concurrente del modelo, presta especial atención a uno de los axiomas que rigen a dicha filosofía: "No esperar que la base de datos esté completa para obtener la data y/o información necesaria para hacer y soportar las decisiones"[7]. Lo que implica un intercambio constante de la información disponible, de manera de adoptar continuamente las mejoras necesarias para el desarrollo óptimo del modelo. Evidentemente, la interconexión o vinculación de las herramientas es fundamental para lograrlo, además de una eficiente distribución de la información y de las actividades que deben llevarse a cabo en cada etapa.



Esquema 3.2: Ingeniería Concurrente.

Dicho enfoque pretende la concurrencia de las etapas, como se muestra en el Esquema 3 2; éstas pueden ser interpretadas como personas, equipos de trabajo o departamentos de una organización.

Para emprender el desarrollo concurrente del modelo, es necesario una exhaustiva planificación de las actividades, es decir, considerar el orden en que se aplicarán las herramientas para que las etapas se solapen en el tiempo, organizar la información disponible o generada y establecer estrategias de trabajo para reducir la longitud del desarrollo.

Prototipo - Modelado de Sólidos

Para que el Desarrollo Concurrente sea consistente con el Desarrollo Secuencial las piezas conservan la misma identificación, facilitando la comparación de las actividades para ambos desarrollos (v. Anexo J).

La creación **básica** de las piezas que integran el modelo, es el primer paso a seguir con la herramienta de Modelado de Sólidos de MD. A partir de una pieza paramétrica se

[7] Trabajo de Grado: "Planes de Acción para la difusión e implantación de la filosofía de la Ingeniería Concurrente en la UCAB", realizado por Matute M y Paz P.

derivan el resto de las piezas, aplicando sólo sus *características geométricas* (ancho y largo) y los puntos de conexión entre ellas; es decir obviando provisionalmente sus *características colocadas*, tales como filetes, ranuras y cortes. En la Figura 3.10, se muestra una pieza del modelo (Pieza 8), creada con sus características más básicas.

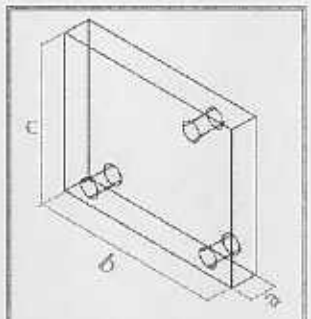


Fig.3.10:Pieza Básica Paramétrica.

Luego, se ensamblan las piezas parciales siguiendo el mismo procedimiento descrito en el proceso secuencial, un ensamble Maestro a partir de ensambles internos o subensambles, con la salvedad de que este primer ensamble no es el ensamble definitivo del modelo, denominado *Ensamble Preliminar* (v. Figura 3.11).

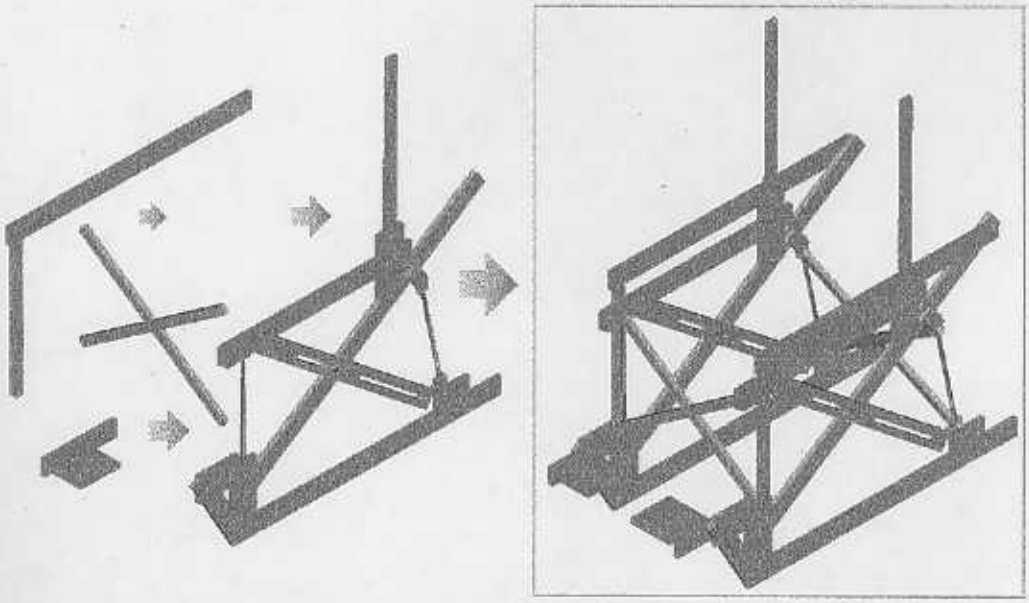


Fig. 3. 11 : Ensamble Preliminar para el Desarrollo Concurrente.

Igualmente y gracias a la característica de asociatividad entre las herramientas de MD, se documenta (planos, listas y explosión de materiales) el modelo parcial, para luego ser completado a medida que se completa el modelado sólido de las piezas (v. Figura 3.12).

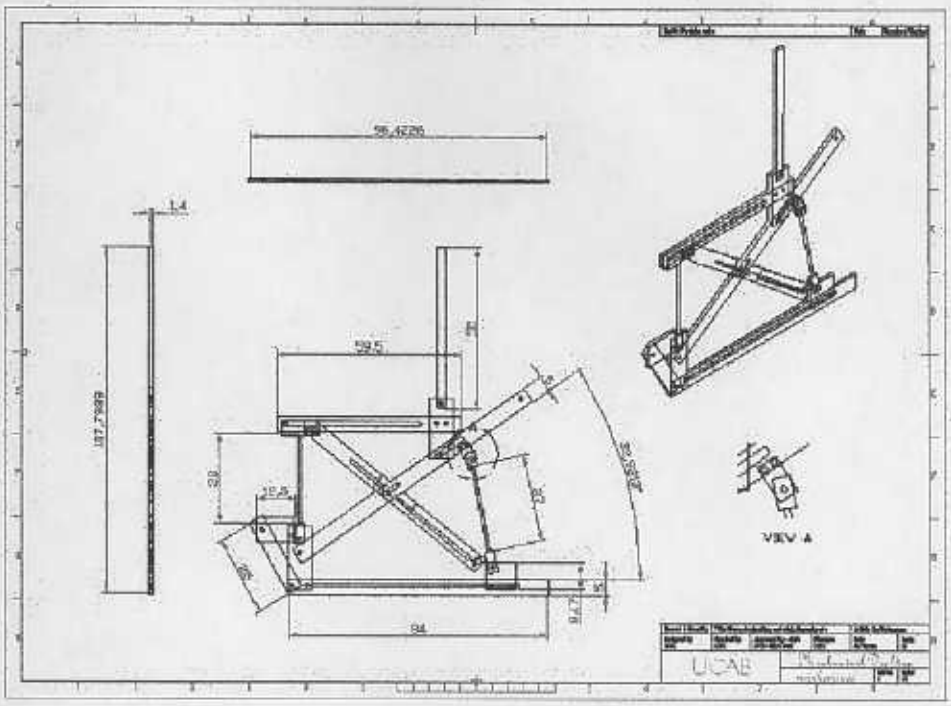


Fig. 3.12: Vistas Ortogonales, Isométrica y de Detalle del Modelo Preliminar.

Simultáneamente a la realización de las siguientes etapas (interacciones), las características *colocadas* hasta el momento omitidas en MD son incorporadas a las piezas básicas, y éstas se actualizan en el ensamble y en la documentación del modelo. De manera que el modelo es actualizado constantemente, mientras se desempeñan las actividades de otras etapas.

Interacción Modelado de Sólidos – Análisis Estático (I)

El propósito de realizar un ensamble preliminar –lo cual no debe confundirse con un desarrollo impreciso– es exportar la información inmediatamente a Working Model Motion para el **Análisis Estático**, a fin de obtener las cargas imprescindibles para el **Análisis Estático Lineal** en Working Model FEA.

Para el análisis estático del ensamble preliminar, se aplica y distribuye el mismo sistema de carga utilizado en el proceso secuencial (v. Anexo L), por las razones explicadas en ese aparte. Es obvio que los resultados (reacciones generadas en las uniones de las piezas) no son definitivos, pues el ensamble se modifica a medida que se completan las piezas en MD; sin embargo son lo suficientemente aproximados para continuar con el desarrollo del modelo, tal como lo estipula el axioma que rige a dicha filosofía.

Los resultados aproximados (por exceso o defecto) del análisis estático, permiten estimar los cambios a realizar en el modelo, de manera que cuando esté completo se realicen adaptaciones rápidas y cercanas a las estimadas.

Interacción Análisis Estático–Análisis de Elemento Finito (I).

Las piezas previamente completadas en MD y sus respectivas reacciones, se analizan mecánicamente en WM FEA[8] siguiendo el procedimiento descrito en el Desarrollo Secuencial[9] y aplicando el mismo sistema de cargas (v. Figura 3.13). En este análisis, no se optimizan las piezas puesto que las cargas asignadas son aproximadas, sin embargo se dilucidan detalles que son necesarios adelantar para el Desarrollo Concurrente, como: colocar las restricciones de movimiento (DOF), generar las mallas acordes para el cálculo finito, definir el factor de seguridad y el margen de error permisible, designar el material a ensayar, así como estimar las posibles modificaciones de las piezas para su optimización.

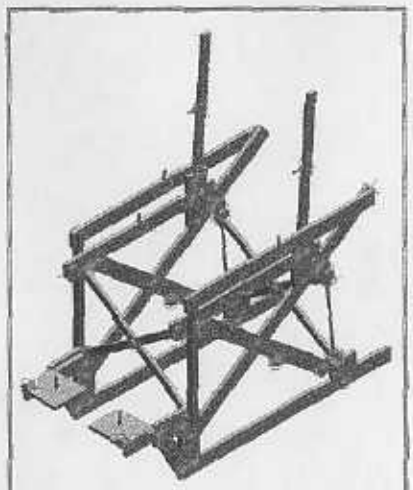


Fig. 3.13: Mapeado Automático de Restricciones y Sistema de Carga aplicado en el Modelo Concurrente.

Interacción Modelado de Sólidos – Análisis Dinámico (I).

Paralelamente, el ensamble parcial es exportado a WM Motion para el **Análisis Dinámico**. Con la simulación se verifica el plegado, pues el modelo preliminar es ensamblado respetando las coordenadas de unión entre las piezas –aún cuando sea necesario actualizarlas posteriormente– y se le aplica el mismo sistema de cargas empleado en el proceso secuencial (Figura 3.13).

El modelo importado no completa el plegado en una primera simulación, por lo que se verificaron los datos asignados, así como los resultados obtenidos. Al modificar las dimensiones de determinadas piezas se obtiene el plegado en una segunda simulación, estas modificaciones se establecen automáticamente en MD generándose poco a poco el ensamble final o definitivo.

---

[8] Recuerde que el Cálculo de Elemento Finito depende, entre otros aspectos, de la geometría estudiada.

Por la menor cantidad y precisión de las piezas en los ensambles preliminares, el tiempo del cálculo dinámico y estático es considerablemente menor que el tiempo utilizado para los cálculos en el proceso secuencial. Facilitando que las actividades se ejecuten en paralelo gracias a una amplia planificación de todo el proceso y no sólo de las actividades pertinentes a cada herramienta.

Interacción Modelado de Sólidos – Fotorrealismo (I).

El modelo preliminar se exporta de MD a WMM para el análisis (parcial) estático y dinámico, y se exporta a la vez, a 3DStudio para el fotorrealismo (parcial).

Aunque el modelo preliminar se utiliza para realizar cálculos aproximados, no es adecuado para el fotorrealismo (por su creación incompleta), sin embargo se pueden preparar varios factores que han de tenerse en cuenta cuando se vaya a modelizar: crear luces y cámaras, definir materiales, e importar una escena que sirva de fondo al modelo. El Figura 3.14 muestra el modelo preliminar de silla para discapacitados con todos los factores que permanecerán en la escena fotorrealística final.

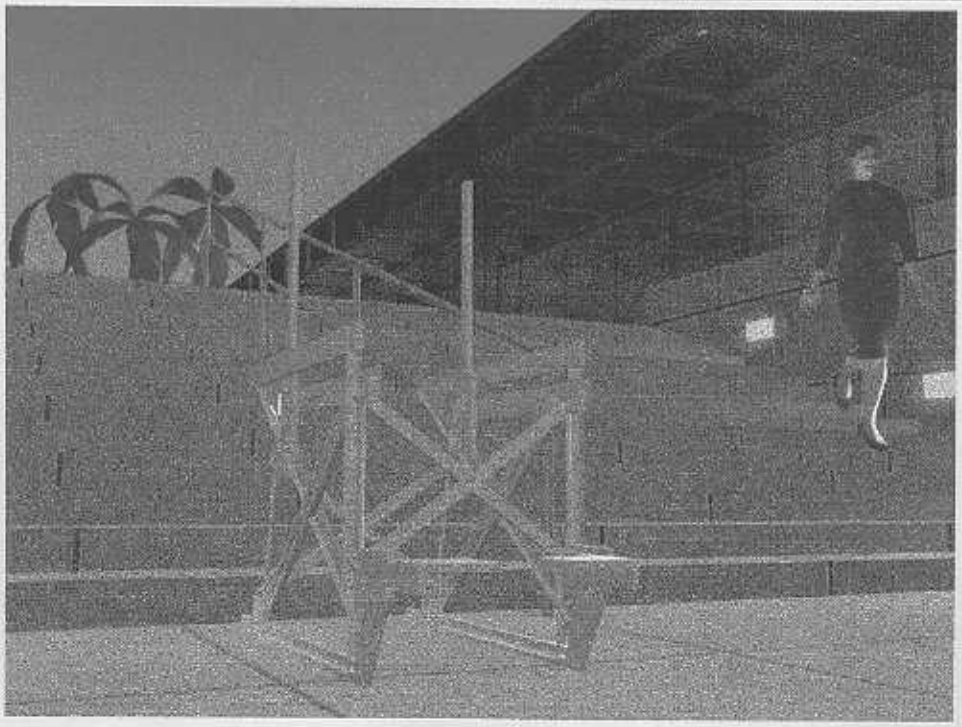


Fig. 3.14: Modelo Preliminar de Silla para Discapacitados en el Modelo Concurrente.

[9] v. Diagrama de Flujo para el Análisis Estático Lineal de una Parte, p. 33.

Interacción Modelado de Sólidos – Análisis Estático (II).

Si bien al modelo preliminar se le han practicado todos los análisis, todavía el desarrollo no ha concluido, pues el enfoque concurrente busca el continuo mejoramiento de las actividades para obtener un modelo con igual precisión y calidad que el modelo secuencial. Por tanto, todas las piezas completadas y modificadas en MD, nuevamente se exportan a WMM para un análisis estático final, del cual se obtienen las reacciones (en las uniones) definitivas para el análisis mecánico de las piezas en WM FEA.

Interacción Análisis Estático–Análisis de Elemento Finito (II).

En esta interacción se adoptaron las cargas definitivas y se realizaron los cálculos necesarios; las demás condiciones se establecieron con anterioridad: restricciones, tamaño de los elementos o malla, material, etc. Los resultados se evaluaron para optimizar las piezas, igual que en el proceso secuencial, considerando los diagnósticos presentados por el programa y modificadas en función de su geometría y/o material.

También se actualizaron las piezas en el ensamble junto con todas las piezas detalladas, para concluir y completar los análisis restantes.

Interacción Modelado de Sólidos – Análisis Dinámico (II).

Como reflejo de la sostenida supervisión de las actividades, se exporta el modelo actualizado en MD a WMM para el plegado definitivo, además se verifican las adaptaciones realizadas.

Aprobado el análisis dinámico se presenta el plegado "concurrente" definitivo. El cual puede visualizarse en la sección de simulación dinámica del Desarrollo Secuencial.

Interacción Modelado de Sólidos – Fotorrealismo (II).

El modelo "concurrente" definitivo o ensamble maestro se exporta de nuevo a 3Dstudio, a fin de lograr el aspecto definitivo del modelo. Todas las modificaciones hecha en las piezas se adaptan automáticamente sin afectar los factores predeterminados.

Se verifican las normales a las caras del modelo, las luces, cámaras y materiales aplicados, para finalmente aplicar el render fotorrealístico. La Figura 3.15 muestra el fotorrealismo definitivo, creado en el Desarrollo Concurrente.

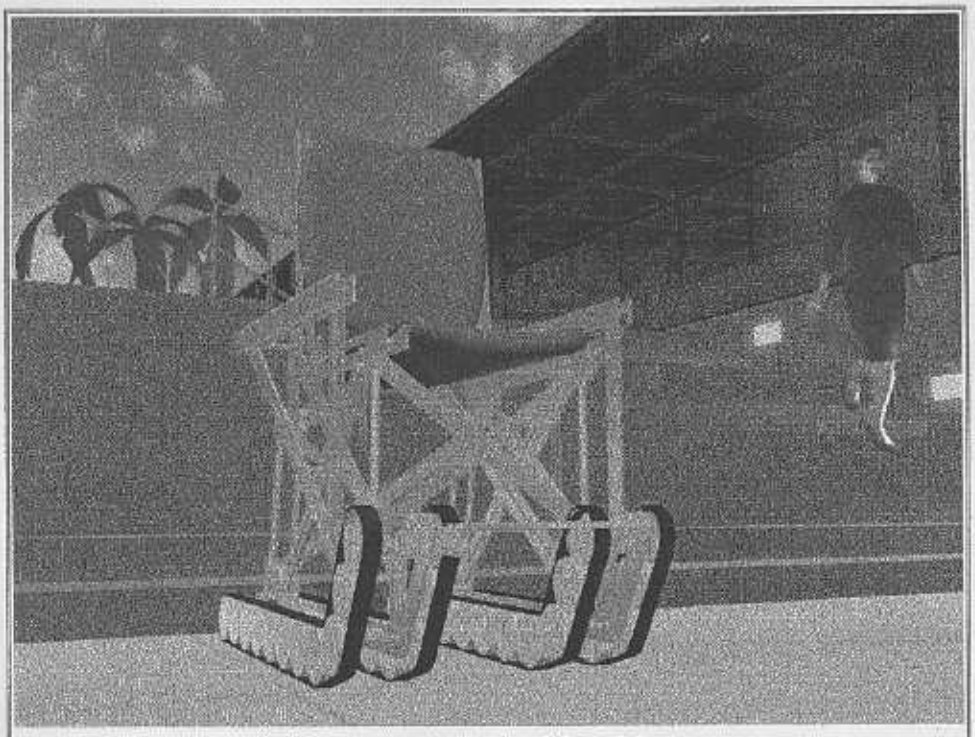


Fig. 3.15: Imagen Fotorrealística del Modelo Concurrente.

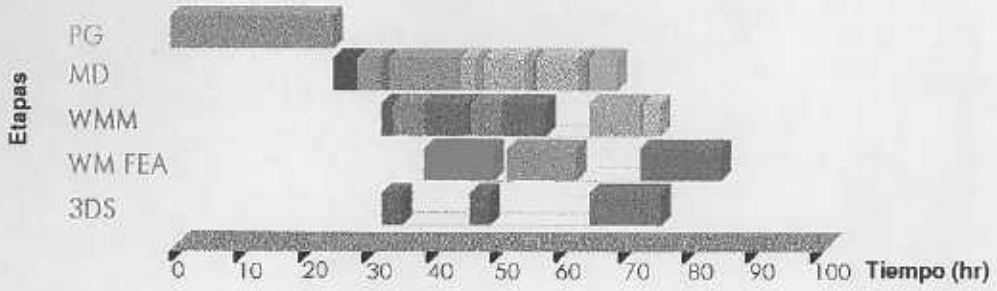
Tiempo Concurrente del Desarrollo del Modelo

Es obvio que durante la realización del Desarrollo Secuencial se obtuvo un aprendizaje en la aplicación de las herramientas para el caso específico de la silla para discapacitados; aprendizaje que luego se vería reflejado en el desempeño del Desarrollo Concurrente.

Para evitar aventajar un desarrollo respecto al otro, se ajustaron los tiempos medidos en el Desarrollo Concurrente basándose en el aprendizaje adquirido. El aprendizaje se estableció mediante la comparación de los tiempos medidos para actividades similares en ambos desarrollos (v. Anexo O).

Al igual que en el Desarrollo Secuencial, los tiempos de ejecución de las actividades para el Desarrollo Concurrente se establecieron midiendo los tiempos de sus tareas, ajustándolos con el factor de aprendizaje calculado (FA). Estos tiempos se detallan en el Anexo P. Con el objetivo de visualizar las interacciones descritas para cada etapa y el solapamiento de las actividades, se presenta el siguiente Diagrama en función de los tiempos ajustados para el Desarrollo Concurrente del modelo.

Diagrama de Tiempo Del Desarrollo Concurrente Del Modelo



Actividades	Horas
Planificación General de la Aplicación Concurrente de la Herramientas para el Desarrollo del Modelo	25,4
Modelado Sólido de Piezas (Preliminar) en Mechanical Desktop	3,6
Ensamble del Preliminar del Modelo	7,3
Documentación del Modelo Preliminar	0,7
Exportación del Modelo Preliminar en Working Model Motion	1,5
Exportación del Modelo Preliminar a 3DStudio	6,4
Simulación Estática del Modelo Preliminar	9,9
Análisis de Elemento Finito de las Piezas en Working Model FEA, con información aproximada	22,0
Simulación Dinámica del Modelo Preliminar	23,5
Detallado y Modificación de las Piezas en MD	14,3
Actualización del Ensamble en el Modelo	13,3
Documentación del Modelo Completo	4,5
Análisis Estático de las Piezas terminadas y completadas	8,0
Análisis de Elemento Finito de las Piezas Definitivo	12,6
Simulación Dinámica del Modelo Completo	2,7
Fotorrealismo del Modelo (Definitivo)	11,2

III .3. Indices de Desempeño

Aún cuando se utilizan las mismas herramientas y los mismos recursos, son notables las diferencias que existen entre el Desarrollo Secuencial (DS) y el Desarrollo Concurrente (DC) del modelo de la silla para discapacitados. Sin embargo, es necesario establecer índices de desempeño que cuantifiquen tales diferencias entre ambos enfoques en la aplicación de las herramientas CAD/CAE.

Indicadores de Comparación entre el DS y el DC

Uno de los indicadores que mejor establece la diferencia entre el DS y el DC es el tiempo expresado en función de: la planificación de las actividades, de cada herramienta aplicada y del desarrollo total del modelo. La siguiente tabla resume los tiempos para cada una de las etapas en la creación del modelo, el tiempo total de desarrollo y los porcentajes o pesos de participación de cada herramienta en los procesos de DS y DC, descritos con anterioridad en este capítulo.

Tabla 4.1: Tiempos por Etapas del Desarrollo Secuencial y Concurrente del Modelo.

	Secuencial		Concurrente		DS vs. DC
Etapa	**Totales (Horas)**	**Peso**	**Totales (Horas)**	**Peso**	**Variación**
Planificación	8,7	7%	25,4	16%	65,8%
Modelado de Sólidos	43,9	34%	43,8	27%	-0,2%
Análisis Cinemático	31,7	24%	35,5	23%	10,7%
Análisis de Elemento Finito	29,7	23%	34,6	22%	14,2%
Fotorrealismo	16,1	12%	17,6	11%	8,5%
Total	**130**	**100%**	**154**	**100%**	17,1%

Para la tabla mostrada los tiempos totales de desarrollo de ambas filosofías son sumados de forma lineal, es decir, adicionando la participación de cada una de las etapas sin tomar en cuenta el solapamiento de las actividades en el caso Concurrente, por ello este último es un 17,1% mayor al DS. Esta diferencia entre los tiempos de DS y DC se explican con cada una de las etapas involucradas, descritas a continuación.

Planificación en la Aplicación de las Herramientas

En el DS ocurren dos planificaciones, una general que incluye el proceso como tal y otra para cada una de las etapas (Mechanical Desktop, Working Model Motion, etc.). La primera sólo involucra el orden de aplicación de las herramientas sin profundizar en las actividades asociadas a cada etapa. La segunda se realiza con el objetivo de planificar la aplicación óptima de las actividades para cada herramienta en particular.

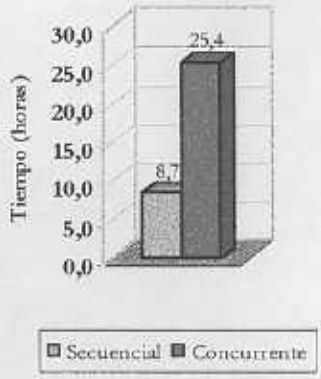
En el DC la planificación es mucho más amplia pues se consideran todas las actividades, así como la información necesaria para llevarlas a cabo durante todo el proceso. Inicialmente se establece cual es la información mínima que necesita una etapa para comenzar lo más tempranamente posible. Luego se dividen las etapas en actividades que proporcionen esta mínima información. Finalmente se establece la prelación de las actividades y su orden de ejecución en cada etapa para integrarlas con las actividades de las otras etapas.

Esto causa que el tiempo de planificación para el DC del modelo estudiado sea un 65,8% mayor que en el DS.

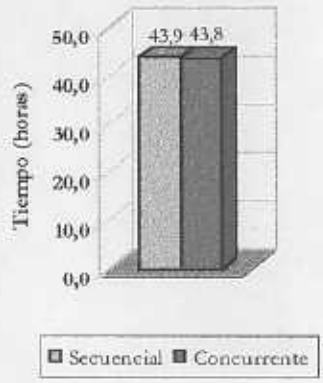
Modelado de Sólidos (Mechanical Desktop)

Los tiempos destinados para el modelado de sólidos en ambos desarrollos son semejantes –variación del 0.2%-, a pesar de que la secuencia de las tareas realizadas en cada uno de ellos no haya sido la misma. Esta pequeña diferencia se debe a que el tiempo de modificación de las piezas en el DS es mayor que en el DC, pues la adaptación de las modificaciones (provenientes del análisis mecánico) se realizan cuando el modelo está completamente definido,

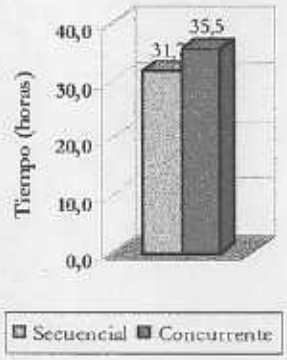
Planificación DS vs. DC



Modelado Sólidos DS vs. DC



Análisis Cinemático DS vs. DC

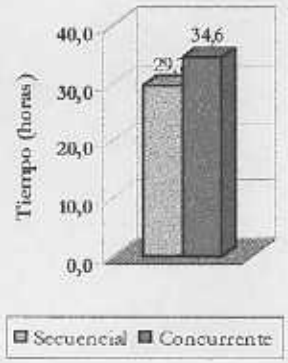


a diferencia del DC donde las modificaciones son adaptadas en el modelo a medida que se avanza en su completación, es decir, mientras se van detallando las piezas.

Análisis Cinemático y de Elemento Finito

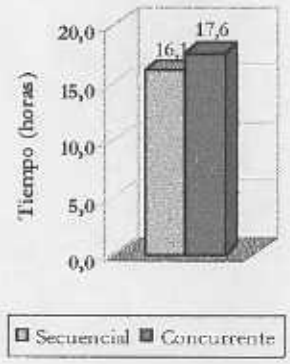
Los tiempos incurridos en el análisis cinemático y de elemento finito en el DC fueron superiores a los observados en el DS en un 10.7% y 14.2% respectivamente. Esto radica en que los análisis del DS se realizaron en un sólo paso con la geometría completamente definida, mientras que para el DC el número de análisis se incrementó, dado que se llegó al mismo resultado paulatinamente, a medida que se refinaba el modelo partiendo de una geometría preliminar.

Análisis FEA DS vs. DC



El tiempo de incremento esta asociado casi en su totalidad al tiempo de cálculo de la computadora, ya que para realizar los análisis adicionales en el DC sólo es necesario la actualización de los datos en los programas WM Motion y WM FEA, partiendo de los análisis iniciales.

Fotorrealismo DS vs. DC



Fotorrealismo

El fotorrealismo del DC también se realizó paulatinamente, comenzando con información geométrica parcial del modelo que se actualizaba a medida que avanzaba el desarrollo. Esto ocasiona un mayor número de imágenes fotorrealistas, aumentando el tiempo de cálculo en la computadora, por lo que el tiempo de DC del modelo es un 8,5% mayor al observado en el DS.

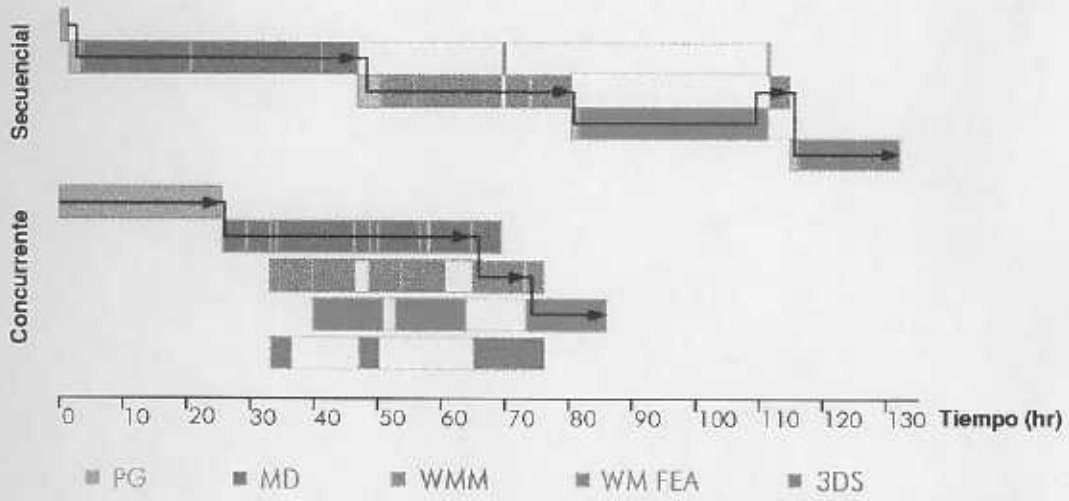
Desarrollo Secuencial vs. Desarrollo Concurrente

Examinando la tabla 4.1 se observa que los pesos o participación de cada herramienta son más homogéneos bajo el DC que para el DS, por ello se calcula la desviación promedio para cada desarrollo, obteniendo 4.9% y 8.4% respectivamente. Esto muestra que la planificación y el solapamiento de las actividades en el DC permiten una

intervención más uniforme de las herramientas; contrario al proceso secuencial donde ocurre una mayor desviación dado que la participación de las herramientas depende de los objetivos individuales a alcanzar en cada una ellas.

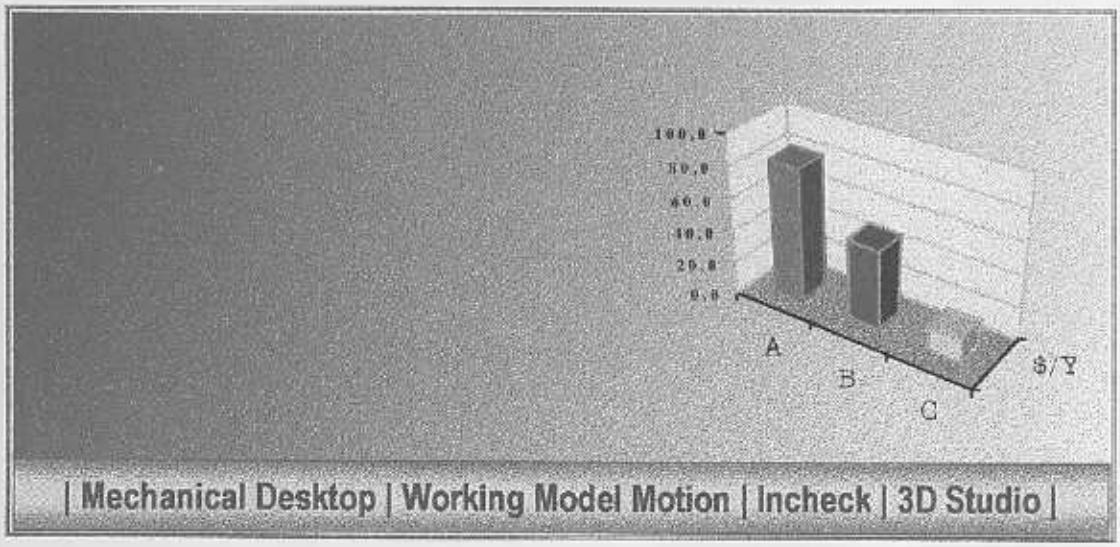
En el siguiente diagrama se deja ver la considerable diferencia entre los tiempos totales de ambos desarrollos, basándose en la ruta crítica de sus actividades. El DC tiene un menor tiempo de duración a pesar de que la duración de sus actividades son mayores a los de sus contrarias, las actividades secuenciales. Al dividir las actividades en el DC se generó un aumento en la cantidad de tareas a realizar; no obstante al realizarlas en paralelo con tareas de otras etapas se logra un ahorro de tiempo del 34.5% respecto al DS.

Diagrama De Ruta Crítica Para Los Desarrollos Del Modelo



Con el objeto de medir el grado de concurrencia entre las etapas del desarrollo realizado, se define el Porcentaje de Concurrencia como el tiempo de simultaneidad de actividades en etapas distintas, entre el tiempo total de desarrollo para todas las herramientas aplicadas(v. Anexo Q).

Para el DS el Porcentaje de Concurrencia se aproxima a cero (0,2%), dado que la única actividad simultánea durante todo el desarrollo es la planificación inicial. En el DC el porcentaje de simultaneidad entre actividades es del 68,3%, cuantificándose la diferencia entre ambas filosofías de diseño.



Capítulo IV

Recursos del Sistema

Definición del Sistema

Estructura Ramificada de Costos

Componentes de Costo

Perfil de Costos del Ciclo de Vida

Este capítulo establece el Costo del Ciclo de Vida (LCC) de la implantación de un sistema CAD/CAE, y se definen las características del Hardware y del Recurso Humano necesarias para la aplicación de éstas tecnologías.

Capítulo IV

Costo del Ciclo de Vida en la Aplicación de las Tecnologías CAD/CAE

El estudio de las herramientas CAD/CAE no podría estar completo sin una estimación de los costos que implica su aplicación. El presente capítulo determina el perfil de los costos del ciclo de vida de un sistema CAD/CAE, basándose en el estudio de los recursos necesarios para su implantación.

IV .1. Definición del Modelo

Las organizaciones tienen sus propias necesidades tecnológicas en función de su tamaño, tipo de producto, mercado objetivo, nivel de competencia, y muchas otras variables tanto internas como externas a sí mismas. La satisfacción de necesidades tecnológicas tan diversas ocasiona, de la misma forma, una gran variedad de sistemas (Hardware/Software/Recurso Humano) específicamente diseñados para tal fin. Los sistemas CAD/CAE no son la excepción a esta realidad.

Con el objeto de considerar esta variabilidad y ampliar lo más posible el estudio de los costos del ciclo de vida (Life Cycle Cost, **LCC**) de un sistema CAD/CAE, se define como objeto de estudio un sistema con las siguientes características generales:

- Un escenario de Diseño Concurrente de Productos con un requerimiento tecnológico similar al observado en el desarrollo de la silla para discapacitados.
- 15 Estaciones de Trabajo (Workstations) basadas en tecnologías Windows-Intel, y configuradas para el diseño de productos: Modelado de Sólidos, Análisis Cinemático, Análisis de Elemento Finito y Fotorrealismo.
- Un equipo de ingenieros de diseño conformado por 15 integrantes (tamaño de un equipo de diseño para una organización promedio).

Esta definición tan amplia permitirá, dependiendo de las necesidades específicas de cada organización, configurar el sistema deseado al modificar, agregar, o eliminar

características específicas, como: puestos de trabajo, nivel tecnológico, número de servidores, etc.

Las asunciones para el sistema planteado son las siguientes:

- Las estaciones de trabajo se actualizarán anualmente para mantener el nivel tecnológico de diseño establecido, considerándose que a los cuatro años ya no es posible actualizarlas debido a la brecha tecnológica alcanzada.
- Los programas se actualizarán bianualmente, ya que éste es el promedio de lanzamiento de nuevas mejoras para herramientas (software) de diseño.
- Para lograr la Concurrencia del trabajo, los equipos estarán conectados en red gracias a un servidor.

IV .2. Definición de los Recursos del Sistema

Los recursos esenciales sobre los que se basan los sistemas CAD/CAE son los programas (software), los equipos de computación (hardware) y el recurso humano (operadores) que utilizará estas herramientas Los programas CAD/CAE se describieron en apartes anteriores del presente trabajo de grado (v. Capítulo II), quedando por definir el equipo y el recurso humano apropiado para la aplicación de estas herramientas.

El Hardware

Para determinar la configuración idónea de las estaciones de trabajo requeridas en la aplicación de las herramientas CAD/CAE bajo un ambiente de complejidad de diseño similar al observado en el desarrollo de la silla para discapacitados, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Requerimientos mínimos establecidos por cada uno de los programas CAD/CAE.
- Rendimiento del equipo utilizado en el desarrollo de la silla para discapacitados.
- Relación costo-rendimiento de equipos de computación CAD/CAE.

La Tabla 4.1 describe para cada uno de los programas de diseño utilizados, los requerimientos mínimos de hardware establecidos por la compañía fabricante y el rendimiento observado durante el desarrollo de la silla para discapacitados, en función de las características de la computadora utilizada.

Tabla 4.1: Requerimientos Mínimos del Software y Rendimiento del Hardware

	Caracteristica –*Computadora Utilizada*–				
Requerimientos Mínimos / Rendimiento	**Procesador** *-Pentium 200-*	**Memoria RAM** *-128 MB-*	**Disco Duro** *-3.0 GB-*	**Memoria de Video** *-2 MB-*	**Monitor** *-15" 1024x768-*
Mechanical Desktop	**Pentium / I:** tiempos de espera innecesarios.	**64 MB / S.**	**62 MB / S.**	**ND / I:** lentitud de los comandos zoom, congelamiento de la pantalla.	**ND / I:** uso en exceso de comandos zoom. Esfuerzo constante de la vista.
WM Motion	**Pentium / I:** tiempo de cálculo extenso.	**64 MB / I:** tiempo de cálculo extenso.	**62 MB / S.**	**ND / I:** lentitud de los comandos zoom, congelamiento de la pantalla.	**ND / I:** uso en exceso de comandos zoom. Esfuerzo constante de la vista.
WM FEA	**Pentium / I:** tiempo de cálculo extenso.	**ND / I:** tiempo de cálculo extenso.	**ND / I:** limitaciones de cálculo por la capacidad del DD.	**ND / S.**	**ND / S:** uso en exceso de comandos zoom. Esfuerzo constante de la vista.
3D Studio	**486 / I:** tiempo de cálculo extenso.	**8 MB / S.**	**ND / S.**	**ND / S.**	**ND / I:** uso en exceso de comandos zoom. Esfuerzo constante de la vista.

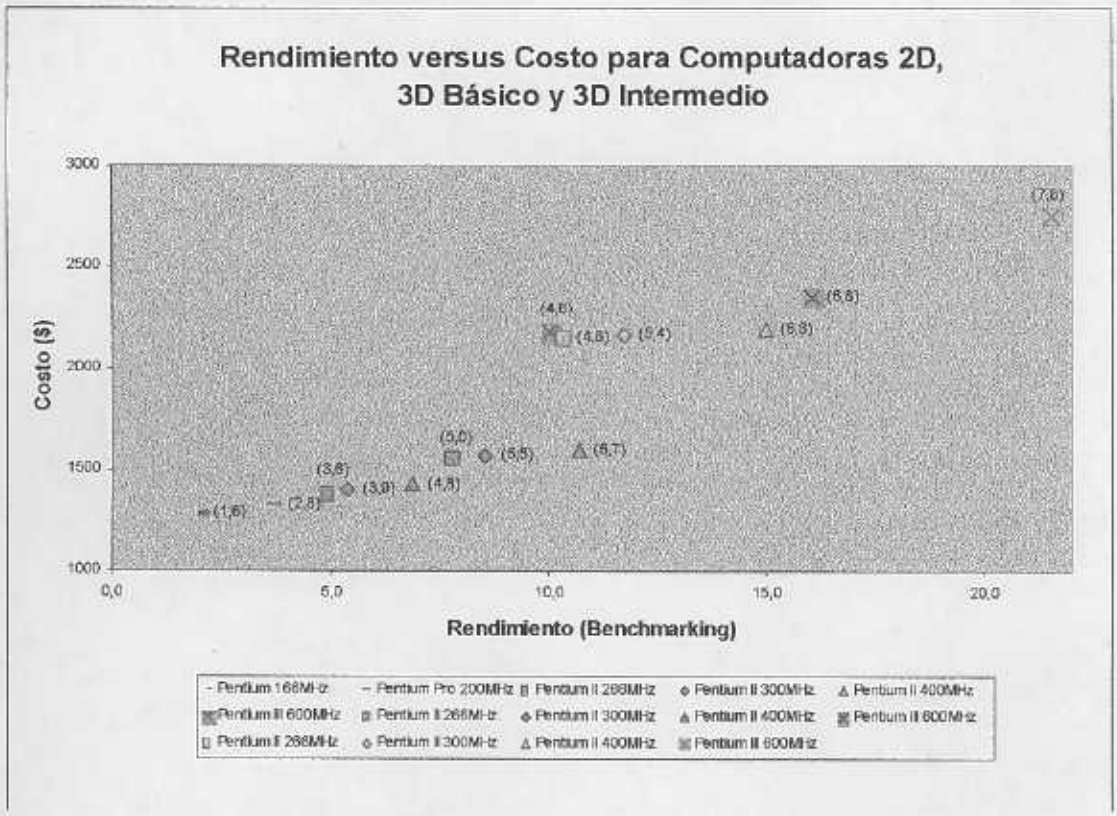
Leyenda: S: Suficiente I: Insuficiente ND: Información No Disponible

Dado que las principales observaciones en el rendimiento del equipo utilizado son los extensos tiempos de cálculo, la lentitud de algunos comandos, las limitaciones en la capacidad del disco duro e insuficiencias en el monitor, se determina que el equipo adecuado para la utilización de estas herramientas debe contar con un procesador superior a Pentium 200, más de 128 MB de memoria RAM, un disco duro superior a 3.0 GB de capacidad, memoria de vídeo mayor a los 2 MB y un monitor superior a las 15"; siendo el límite para su selección la relación rendimiento/costo asociados a cada configuración particular.

Para establecer las características del equipo adecuado se parte de un estudio comparativo de rendimiento entre computadoras (benchmarking) para aplicaciones CAD, realizado para tres niveles distintos dependiendo del grado de complejidad de diseño: 2D, 3D Básico y 3D Intermedio. El estudio compara computadoras Windows-Intel variando algunos de sus componentes (microprocesador, tarjeta de vídeo),

dependiendo del nivel de diseño requerido. En el Anexo R se exponen los rendimientos obtenidos en el estudio comparativo para cada una de las configuraciones estudiadas. Los precios de referencia para cada configuración del estudio están reflejados en el Anexo S, obtenidos a través de diversos proveedores de computadoras.

Para determinar el equipo idóneo no se consideran procesadores superiores a Pentium III 600, ya que otros estudios especializados demuestran que la relación Rendimiento/Costo desmejora a partir de los 533 MHz[1]. La Gráfica 4.1 muestra los precios, el rendimiento y la relación rendimiento/precio para cada una de las configuraciones establecidas.



Donde la configuración que más se aproxima al equipo utilizado para desarrollar el modelo de silla para discapacitados corresponde al Pentium 166 MHz 2D (Rend/Costo*10^3=1.6), y el equipo más apropiado para utilizar las herramientas

[1] v. Anexo T: Pentium III Benchmarking.

CAD/CAE bajo el escenario de diseño establecido y con la mayor relación costo/rendimiento es el Pentium III 600 MHz 3D Intermedio (Rend/Costo*10^3=7.8).

Recurso Humano

Para establecer el equipo humano requerido en la aplicación de las tecnologías CAD/CAE es necesario determinar que competencias técnicas (conocimientos y habilidades) debe poseer para el máximo aprovechamiento de estas herramientas. En el presente trabajo los conocimientos y habilidades se establecieron gracias al aprendizaje adquirido durante el desarrollo del modelo, basándose en las características de los programas utilizados. El Anexo U se exponen los conocimientos y habilidades requeridos para el uso de cada una de estas herramientas; el Esquema 4.1 muestra de forma resumida estas características y potencialidades.

Esquema 4.1: características y potencialidades del recurso Humano

La mayoría de estos conocimientos y habilidades son normalmente adquiridos en las escuelas de Ingeniería (geometría plana y de sólidos, mecánica analítica, vibraciones mecánicas, etc.), mientras que el resto –materiales, luces, cámaras y animación– se adquieren a través de estudios de fotografía y filmación. Debido a que el trabajo fotorrealístico es realizado no con objetivos profesionales (broadcasting), sino con el

objeto de mostrar las características visuales del producto una vez terminado, se determina que el recurso humano apropiado para la aplicación de estas herramientas deberá estar formado fundamentalmente en áreas asociadas a ingeniería.

IV .3. Estructura Ramificada de Costos

El ciclo de vida para el sistema planteado comprende todas las fases, desde la adquisición de los equipos y programas, hasta su venta o retiro de servicio. La estructura ramificada de los elementos de costo para el modelo estudiado se muestra en la Figura 4.2.

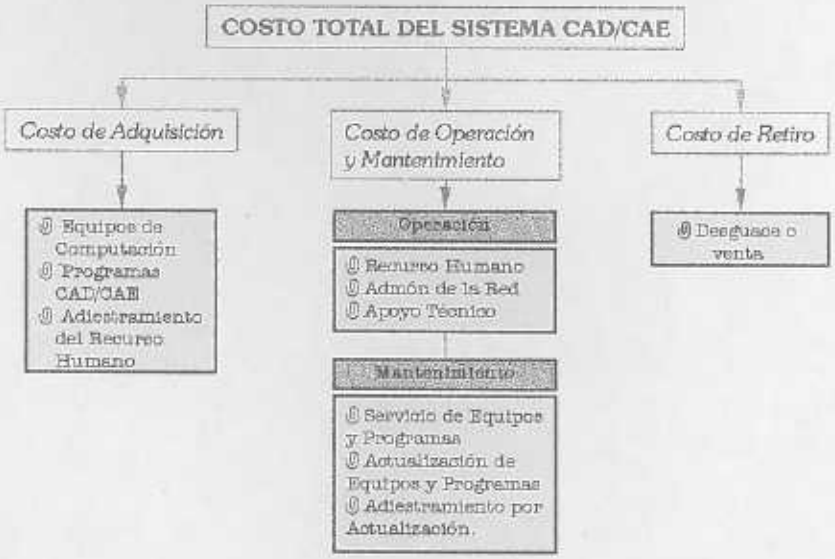


Fig. 4.2: Estructura Ramificada del Ciclo de Vida de Costo.

Para el análisis del sistema no fueron incluidos algunos elementos de costo, pues se considera, que se extienden más allá de los objetivos planteados en el presente trabajo de grado. Entre estos elementos de costo están:

- Infraestructura: mobiliario e instalaciones generales.
- Equipos de apoyo: impresoras, escáneres, UPS, etc.
- Consumibles: papel, cartuchos de impresión, etc.
- Otros: consumo de energía.

IV .4. Estimación de los Componentes de Costo

Para determinar los componentes de costo del sistema planteado se utilizarán diversas fuentes: proveedores de servicios y herramientas CAD/CAE, datos técnicos de los programas utilizados, revistas especializadas y un estudio del LCC de una red de computadoras Windows-Intel para aplicaciones de oficina (v. Anexo V). El cálculo se realiza en dólares americanos, debido a que el precio de la mayoría de los componentes de costo se manejan en esta moneda. No se toman en cuenta los impuestos, puesto que éstos varían dependiendo de la región donde se desee implantar esta tecnología.

A continuación se presenta de forma detallada los elementos del LCC para el modelo estudiado.

Costos de Adquisición

Los costos de adquisición son aquellos relativos a la obtención del sistema, como producto disponible para ser utilizado y apoyado. Los costos de adquisición están compuestos por los siguientes elementos: Adquisición e Instalación de Equipos y Programas, y Entrenamiento Inicial del Recurso Humano.

Adquisición de Equipos (Hardware)

Los costos de adquisición de equipos están conformados por quince (15) computadoras PC y un (1) servidor con las características necesarias para conformar el ambiente Concurrente de diseño de productos. La garantía estándar para estos equipos es de tres (3) años a partir de su adquisición.

La estación de trabajo tiene un costo de mercado de US$ 2.749[2] para la configuración establecida (Pentium III 600 nivel 3D Intermedio), por lo que el costo total de adquisición de PC's es de US$ 41.235.

El propósito del servidor es el de conformar una red que permita la concurrencia del equipo de diseño, por lo que se debe configurar con la finalidad de proveer servicios de comunicación (conexión con otros servidores, correo electrónico e intercambio

electrónico de archivos), servicios generales (impresión, escaneo) y mantenimiento remoto (instalación y actualización de programas, resolución de problemas, etc.). El costo de un equipo con estas características es de US$ 4.650[3].

Adquisición de Programas (Software)

Esta partida representa los costos de adquisición de las herramientas CAD/CAE utilizadas en el presente trabajo de grado: Mechanical Desktop, Working Model Motion, Working Model FEA y 3DStudio. El sistema operativo Microsoft® Windows, plataforma para estos programas, se asume instalado de fábrica en el hardware (computadoras y servidor) ya que éste es el estándar actual en la industria de la computación, por lo que su costo está incluido dentro de los costos de adquisición de los equipos.

Los costos de adquisición para cada uno de los programas descritos, son los siguientes: Mechanical Desktop US$ 4.995, WM Motion y WM FEA US$ 6.000 (US$ 9.995 al adquirirse simultáneamente), y 3D Studio US$ 3.495.; así al adquirir 15 licencias de cada uno de estos programas asciende al monto total de US$ 277.275

Instalación de Equipos y Programas

Los costos de instalación están asociados con la instalación y configuración de los equipos y programas de la red. Se establecen a partir del estudio del LCC mostrado en el Anexo V, en US$ 25 para cada PC y US$ 100 para el servidor. Los programas CAD/CAE no tienen costo de instalación, pues se incluye en el precio de adquisición. El costo de instalación de los sistemas operativos de las computadoras y el servidor, también se incluye en el precio de adquisición de los equipos. Los costos de instalación ascienden a un total de US$ 475.

Adiestramiento Inicial

Para el cálculo de este componente se parte de la suposición de que los operadores dominan el sistema operativo Windows, y poseen los conocimientos y habilidades necesarios para el manejo de las herramientas CAD/CAE, descritos con anterioridad en

---

[3] v. Anexo S: Precios de Mercado del Hardware.

este capítulo; debido a esto, los costos de adiestramiento están conformados únicamente por el entrenamiento en el uso de las herramientas CAD/CAE.

Los costos de adiestramiento en sitio para cada una de las herramientas son los siguientes: MD Nivel I (40 horas) US$ 1850, MD Nivel II (40 horas) US$ 1850, WM Motion (24 h) US$ 1925, WM FEA (24 h) US$ 1925, 3Dstudio Nivel I (40 horas) US$ 1850. Basándose en esto, el costo total de entrenamiento alcanzan los US$ 9.400.

Costos de Operación y Mantenimiento

Los costos de operación representan para el sistema estudiado, los costos asociados a salario del recurso humano, administración de la red (computadoras y servidor), y apoyo técnico. Los costos de mantenimiento están reflejados en el servicio y actualización periódica de equipos y programas, y el adiestramiento del recurso humano por actualización.

Recurso Humano

Los costos del recurso humano son los salarios devengados por el equipo de diseño que operan las herramientas CAD/CAE. El sueldo mensual de un ingeniero con cero (0) años de experiencia ha sido establecido por el Colegio de Ingenieros de Venezuela en Bs. 600.000. Sumando todos los beneficios de ley, el sueldo alcanza anualmente los Bs. 12.400.000, que transformados a Dólares Americanos (tasa de cambio promedio del mes en curso de 680 Bs./$) se obtienen US$ 15.800. El costo total de nómina anual para 15 ingenieros asciende a US$ 39.375.

Actualización en el Adiestramiento de Operarios

El re-entrenamiento de los operarios es ocasionado por las actualizaciones en las herramientas CAD/CAE y el sistema operativo, que se realiza al principio del tercer año de vida del sistema. Los costos de re-entrenamiento para los programas mencionados son: MD (20 horas) US$ 925, WM Motion (12 h) US$ 960, WM FEA (12 h) US$ 960,

---

[3] v. Anexo S: Precios de Mercado del Hardware.

3Dstudio (20 horas) US$ 925 y Windows (4 horas) US$ 60. Los costos totales de adiestramiento por actualización alcanzan los US$ 4.695.

Actualización de Equipos (Hardware Upgrade)

El hardware se actualizará periódicamente con la finalidad de mantener en el tiempo su nivel tecnológico. Los costos anuales de actualización de los equipos se establecen a partir del estudio del LCC mostrado en el Anexo V, en un 25,2% y 19,6% de los costos de adquisición para las computadoras y el servidor, respectivamente. Esta información es obtenida a partir de la estimación de actualizaciones de equipos (hardware) de usuarios de computadoras PC. Por lo que los costos de actualización del hardware ascienden para el segundo, tercer y cuarto año a US$ 692,75 para cada PC y de US$ 911,4 para el servidor. Alcanzando anualmente un total de US$ 11.302,62.

Mantenimiento de Equipos

El mantenimiento de los equipos se aplica al final del periodo de garantía estándar (3 años), y se basa en el costo de contratar la reparación en sitio de las computadoras para el día siguiente (next-day) y la reparación en sitio del servidor para el mismo día (same-day). El Mantenimiento anual de los equipos se establecen a partir del estudio de LCC mostrado en el Anexo V, en US$468 para el servidor, y en US$176 para cada computadora. Totalizando los costos de mantenimiento proyectados, alcanzan los US$3.108 para el cuarto año de vida del sistema.

Actualización de Programas (Software Upgrade)

El costo de actualización (upgrade) de los programas incluye tanto a las herramientas CAD/CAE como al sistema operativo Windows. Basándose en actualizaciones de versiones anteriores para estos mismos programas, se estima que los costos de actualización representan un 20% de los costos de adquisición de las herramientas CAD/CAE y un 45% del sistema operativo. Debido a que la frecuencia de actualización de los programas ocurre cada dos años, los costos para el tercer año de vida del sistema equivalen a US$ 55.455 y US$ 641, respectivamente; para alcanzar un total de US$ 56.096,25.

Servicio de Programas

Los costos de mantenimiento y servicio de los programas CAD/CAE se relacionan a aquellos costos incurridos para el adecuado funcionamiento y apoyo técnico requerido para el máximo aprovechamiento de estas herramientas. Estos han sido establecidos por proveedores que prestan este servicio, en un 15% de los costos de adquisición del software; y representan para el sistema estudiado US$ 41.591 al año.

Administración y Mantenimiento de la Red

Los costos de Administración y Mantenimiento de la Red incluyen a aquellos asociados con configurar, monitorear y mantener sus componentes para el adecuado funcionamiento del sistema. Los costos anuales incurridos en la administración y mantenimiento de una red conformada por 15 computadoras y un servidor, se establecen a partir del estudio de LCC mostrado en el Anexo V en US$ 1.300.

Retirada de Servicio

El sistema alcanza su periodo de vida útil a los cuatro años debido a que no es posible seguir actualizando el hardware, ante lo que se plantea la necesidad de sustituir los equipos por nuevas herramientas. Aunque los equipos no sean competitivos para el desarrollo de productos bajo el nivel tecnológico establecido al final de este periodo, pueden ser utilizados para otras aplicaciones, proponiéndose su venta en el mercado secundario de computadoras.

El valor de salvamento de los equipos se ha estimado en un 25% a los cuatro años de haberse adquirido, por lo que el valor de retirada de servicio significa un ingreso para el sistema planteado. El valor de salvamento para cada computadora y el servidor representan ingresos por US$ 549,8 y US$ 930, para alcanzar un total de US$ 9177.

Para el software se asume un valor de salvamento cero; también se asume que el costo de despido del recurso humano es equivalente a cero.

IV .5. Perfil del Ciclo de Costo de Vida

Una vez establecidos los componentes de costo, se procede a determinar el costo del ciclo de vida del sistema analizado. El Anexo W muestra de forma detallada los costos obtenidos para cada componente del sistema y su respectiva descripción.

La Tabla 4.3 resume los costos totales por componente para cada año de vida del sistema, observándose que los costos de Adquisición del sistema (US$333.305) representan un 21,6% respecto al costo total del ciclo de vida (US$1.541.230), mientras que los costos de Operación y Mantenimiento (US$1.217.372) constituyen desde el primer hasta el cuarto año de vida del sistema un 79,0% de los costos totales. Por concepto de Retirada de Servicio (valor de salvamento: US$ 9.177) se recupera apenas un 0,6% de los costos totales incurridos durante la vida del sistema. La Gráfica 4.1 muestra el perfil de costos del ciclo de vida del sistema CAD/CAE.

Tabla 4.3: Costo de ciclo de Vida del Sistema CAD/CAE.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Total por Componente
Costos de Adquisición					**$333.036**
Equipos (Hardware)	$45.885				$45.885
Programas CAD/CAE	$277.275				$277.275
Adiestramiento Inicial	$9.400				$9.400
Instalación	$475				$475
Costos de Operación y Mantenimiento					**$1.217.372**
Sueldo del Operadores	$237.000	$237.000	$237.000	$237.000	$948.000
Actualización de Software			$56.096		$56.096
Actualización de Hardware		$11.303	$11.303	$11.303	$33.908
Re-Adiestramiento			$4.695		$4.695
Administración de la Red	$1.300	$1.300	$1.300	$1.300	$5.200
Servicio	$41.591	$41.591	$41.591	$41.591	$166.365
Mantenimiento del Equipo	Garantía	Garantía	Garantía	$3.108	$3.108
Costos de Retirada					**-$9.177**
Valor de Salvamento				-9177	-$9.177
Total Año	$612.926	$291.194	$351.985	$285.125	**$1.541.230**

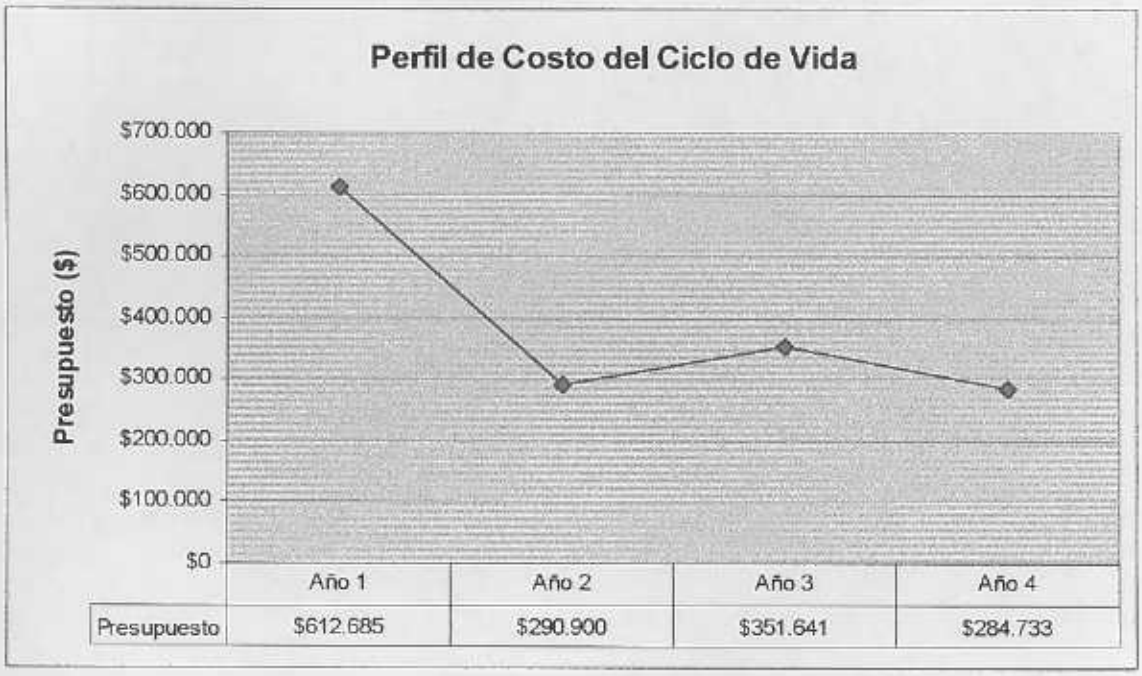


Gráfico 4.1.

Como puede observarse en el Gráfico 4.1, los costos para el primer año de vida del sistema son considerablemente superiores al resto de los periodos estudiados, debido a la adquisición de programas y equipos. Para el segundo y cuarto año los costos incurridos son esencialmente costos de Operación y Mantenimiento del sistema, de forma que los costos durante esos periodos son similares. El tercer año contiene además de los costos de Operación y Mantenimiento, aquellos relativos a la actualización de equipos, programas y adiestramiento del recurso humano, haciéndolo ligeramente superior a los periodos contiguos.

El costo de aplicación de las herramientas CAD/CAE por puesto de trabajo, y bajo un ambiente de red, se establece en US$ 102.749 para los cuatro años de vida del sistema. Por lo que el costo anual promedio por puesto de trabajo se estima en US$ 25.687.

Los componentes de costo para el sistema estudiado, expresados como porcentaje del total para los cuatro años de vida del sistema, se detallan en el Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2.

Se observa que los componentes con mayor peso en la aplicación de estas herramientas están representados por: el sueldo del recurso humano (61,15%), adquisición de programas CAD/CAE (17,88%) y servicio de programas (10,73%); el resto de los componentes de costo no llegan a superar el 11% de los costos totales. Es necesario hacer notar el poco peso que representa la adquisición de equipos de computación (2,96%) en comparación con el resto de los componentes de costos mencionados anteriormente.

Conclusiones

Conclusiones

- Las tecnologías de Diseño e Ingeniería Asistidos por Computadora permiten el modelado, análisis y visualización de modelos que, al ser virtuales, aceleran el diseño y redundan en una mayor precisión en el desarrollo y especificación de los productos. Sin embargo, por sí solas no garantizan el éxito en el desarrollo de productos, ya que el aprovechamiento de los recursos involucrados –tiempo, hardware y equipo humano– está determinado por la filosofía de diseño bajo la cual se utilizan estas herramientas.

- La filosofía de Ingeniería Concurrente reduce significativamente los tiempos de diseño de productos, en comparación con la filosofía tradicional o Ingeniería Secuencial. Esta reducción del tiempo se logra mediante la planificación exhaustiva y el solapamiento de las actividades de diseño, así como de un constante intercambio de información entre los actores involucrados en el proceso.

- El Desarrollo Concurrente de productos requiere tanto de un equipo tecnológico como de un equipo humano calificado para la aplicación de las herramientas CAD/CAE. Los recursos tecnológicos deben seleccionarse en función de la relación costo/rendimiento y del producto a desarrollar. El recurso humano debe poseer conocimientos y habilidades integrales para el desarrollo de productos, actualizándose continuamente para mantener la competitividad al nivel de los avances tecnológicos globales.

- Los costos incurridos en la aplicación de las herramientas CAD/CAE bajo la filosofía de Ingeniería Concurrente, representan una alta inversión que se justifica para organizaciones de tamaño mediano o grande. Estos costos están representados en su mayoría por aquellos costos asociados al recurso humano y a los programas de diseño CAD/CAE.

Bibliografía

Bibliografía

- BARANDICA ROMO, José Luis. "*Ergonomía*". Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España.
- "CADXPress". Editorial Terra. México. Mayo 1999.
- GARCÍA GARCÍA, Isidoro. "*Costos Logísticos*". Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España.
- HIBBELER, Rousell. "*Mecánica para Ingenieros - Estática*". Editorial Continental, S.A. DE C.V. Segunda edición, 1989. México, D.F.
- KLAUSS-JORGEN, Bathe. "*Finit Element Procedures*". Editorial Prentice-Hall. 1996.
- MATUTE, Mariela y PAZ, Patricia. "Planes de Acción para la implantación y difusión de la Filosofía de Ingeniería Concurrente en la UCAB". UCAB, 1998.
- "*Mechanical Destokp, V 3.0. Student Guide*", Autodesk, Inc Publications.
- "*MSC/Working Model, V.5.0 User's Manual*", The MacNeal-Schwendler Corporation, 1999.
- MUSTAFA PULAT, B. "*Fundamentals of industrial Ergonomics*". Waveland Press, Inc. Second Edition, 1999. Prospect Heights, Illinois.
- TIRUPATHI, Chandruptal y ASCHOR, Belengundu. "*Introduction to Finit Element in Engineering*". Editorial Prentice-Hall. 2° Edition, 1997.
- VAN VLACK, Lawrence. "*Materiales para Ingeniería*". Editorial Continental, S.A. Segunda edición, 1981. México, D.F.
- WARREN J., Luzadder y DUFF, Jon M.: "*Fundamentos de Dibujo en Ingeniería*". Editorial Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. Edición décimo primera, México, 1996.

- http://dali.ece.curtin.edu.au/~clive/public_html/Concurrent/CTECE.htm *"Comparison of traditional Engineering and CE Approach"*.
- http://www.soce.org/papers/gglmetrics/GGImetrics.htm. *"Metrics for Measuring Product Development"*. Goldense, Bradford Society of Concurrent Engineering, Diciembre 3, 1993.
- http://www.GrupoAbstract.com/b2b/e_CADws.htm. *"Tecnologías CAD/CAE On-Line"*. Grupo Abstract.
- http://www.autodesk.com. *"Mechanical Desktop 3 / Technical Spec"*. Autodesk Inc.
- http://www.mechanicalsolutions.com. *"Mechanical Desktop Release 4: The Pre-Millennium Update"* TOWNSEND, J. Computer-Aided ENGINEERING/CAEnet.
- http://www.mechanicalsolutions.com. *"Design Validation: Finite Element Analysis And Modeling on Your Desktop"* TOWNSEND, J. Computer-Aided ENGINEERING/CAEnet.
- http://www.mechanicalsolutions.com. *"Engineering Inside Mechanical Desktop"* MILLS, Robert. Computer-Aided ENGINEERING/CAEnet.
- http://www.mechanicalsolutions.com. *"Intel Servers in the Engineering Enterprise"* BECKERT, Beverly A.. Computer-Aided ENGINEERING/CAEnet.
- http://www.mechanicalsolutions.com. *"Healing with CAE"* MENDOZA, Michael. Computer-Aided ENGINEERING /CAEnet.
- http://www.mechanicalsolutions.com. *"NT Workstations: Ramping Up to More Powerful Processing"* BECKERT, Beverly A.. Computer-Aided ENGINEERING/CAEnet.
- http://www.soce.com. *"Computer Support for Concurrent Engineering"* RAMANA, Y.V. KANAKANAHALI, Srinivas y JAGANNATHAN, V. Concurrent Engineering Research Center.
- http://www.soce.com. *"Justifying Concurrent Engineering"*. LAWSON, M. Concurrent Engineering Research Center.
- http://www.soce.com. *"Standards in Concurrent Engineering"* KANNAN, R. Concurrent Engineering Research Center.

Abreviaturas

ACM – Automatic Constrained Map

BOM – Bill Of Materials

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

DC – Desarrollo Concurrente

DD – Disco Duro

DOF – Degrees of Freedom

DXF – Data Exchange Format

FA – Factor de Aprendizaje

FEA – Finite Element Analysis

FEM – Finite-Element Modeling

GB – GigaBytes

GC – Grado de Concurrencia

GUI's – Graphical User Interface

IC – Ingeniería Concurrente

IS – Ingeniería Secuencial

LCC – Life Cycle Cost

MB – Megabyte

MD – Mechanical Desktop

MHz – Megahertz

MMX – MultiMedia Architecture

NURB's – Non Rational B-splines

PC – Personal Computer

PDM – Product Data Management

PG – Planificación General

PIM – Product Information Management

RAM – Random Access Memory

VRML – Virtual Reality Modeling Language

WMFEA – Working Model FEA

WMM – Working Model Motion

Glosario

A

Antropometría. Tratado de las proporciones y medidas de las dimensiones del cuerpo humano o de algunas de sus partes.

B

Broadcasting. Acción de divulgar, emitir un programa.

Boolean. Comandos que permiten unir, sustraer e intersectar sólidos.

C

Chaflan. Coloca un corte biselado en la intersección de dos objetos.

Cinemática. Parte de la Dinámica que se relaciona con los aspectos geométricos del movimiento.

Cinética. Parte de la Dinámica que se relaciona con el análisis de las fuerzas que producen movimiento.

Costos del Ciclo de Vida. Es la suma total de los costos directos, indirectos, recurrentes y no recurrentes, ya sean incurridos o estimados, asociados a la vida de un sistema.

D

Deformación (ε). Deformación debida a un esfuerzo aplicado.

Deformación elástica. Deformación reversible.

Deformación elástica. Deformación permanente producida por el desplazamiento de átomos (o moléculas) a nuevos sitios de la red.

Diagrama de Cuerpo Libre. Es una figura que indica *todas* las fuerzas que actúan sobre una partícula o cuerpo.

Dinámica. Rama de la ciencia física que trata de los cuerpos que tienen movimiento acelerado.

E

Esbeltez. Se denomina cuando la sección transversal de una columna es constante.

Ergonomía. Estudio de la interacción entre los seres humanos, los objetos que usan y los ambientes en que actúan.

Esfuerzo. Fuerza por unidad de área (σ).

Estática. Rama de la ciencia física que trata el equilibrio de los cuerpos, es decir, aquellos que se encuentran en reposo o se mueven a velocidad constante.

F

Firmware. Instrucciones de un programa que están construidas de manera permanente dentro de un circuito electrónico.

I

Instance. Es la sola concurrencia de la definición de una parte colocada en un ensamble físico. Toda la información sobre la parte, incluyendo su nombre y atributos, es guardada una sola vez en el archivo de referencia.

M

Mate. Unión. Comando que permite definir la unión entre dos objetos.

P

Parámetro. Cantidad sujeta a determinarse satisfaciendo ciertos valores condicionales. Son esas características que diferencian a un objeto de otro parecido.

S

Simetría. Refleja un objeto a lo largo de una línea central.

U

Upgrade. Actualizar un equipo o programa.

V

Vibración. Movimiento periódico de un cuerpo o de un sistema de cuerpos conectados, desplazados desde su posición de equilibrio.

Vibración Libre. Movimiento periódico que ocurre cuando el movimiento se mantiene por fuerzas gravitacionales o por fuerzas restauradoras elásticas.

W

Workstation. Estación de Trabajo.

Z

Zoom. Proporciona varias opciones para acercar o alejar la imagen en el dibujo.

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas