

63
2j



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROTOTIPO DE SISTEMA
DE DISEÑO PARAMETRICO
DE RECIPIENTES DE PROCESO
EN BASE A NURBS**

**TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN COMPUTACION
P R E S E N T A N
ENRIQUE LICEA ARRIOLA
JOSE R. ZEGARRA HOLDER**



**DIRECTOR DE TESIS
ING. LUIS G. CORDERO BORBOA**

MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis Padres,

Por brindarme su amor, apoyo y su paciencia para terminar la licenciatura y este trabajo.

A mis Hermanos,

Por esos momentos de diversión, compartiendo cada instante de nuestras vidas.

A mis amigos,

Porque con ellos pase muchos momentos difíciles y gratos en la vida estudiantil.

A Dios,

Por otorgarme la paciencia, fuerza de voluntad para terminar una etapa de la vida y por forjar otra.

Enrique Licea Arriola

'Aquellos, que, por falta de conocimiento, afirman: <<¡imposible!>> .

Permíteme que en nombre de la libertad les diga a todos : <<¡Traten!>> .

San German

A mi sorprendente Nina, por darme la razón principal para superarme cada día,

A Adela, mi adorada compañera, por alentarme en este esfuerzo y recordarme el camino de la disciplina,

A mi Madre, por ser ejemplo desbordante de creatividad y alegría ante la vida,

A mi Padre, por enseñarme a crear en mi trabajo,

A Ofelia, Leonor y Gladys, por ser cada una a su manera.

Pepe.

Prototipo de Sistema de Diseño Paramétrico de Recipientes de Proceso en base a NURBS

Prólogo

1. Introducción

1.1 Objetivos	1
1.2 Metodología	3

2. Fundamentos del Diseño Paramétrico Asistido por Computadora

2.1 Diseño Paramétrico Asistido por Computadora	5
2.1.1 Modelado Geométrico	6
2.1.2 Aplicación de Técnicas de Diseño Paramétrico durante el ciclo de Diseño	13
2.1.2.1 Limitaciones en el Manejo y Mantenimiento de las Geometrías	13
2.1.2.2 Limitaciones debidas al mismo ciclo de Diseño	14
2.1.2.3 Problemas de Búsqueda de Diseños Similares	15
2.2 Elementos Matemáticos de las Curvas Paramétricas	18
2.2.1 Formas Implícitas y Paramétricas	16
2.2.2 Polinomiales en base a Potencias	18
2.2.3 Bézier	19
2.2.4 Splines	26
2.2.5 B-Splines	28
2.2.6 B-Splines Racionales (NURBS)	34
2.2.7 Cónicas y Circulos	38

3. Características de Recipientes de Proceso

3.1 Conceptos Básicos	41
3.2 Recipientes	43
3.3 Tapas	46
3.3.1 Tipos de Tapas para Tanques	45
3.3.2 Tipos de Tapas para Recipientes a Presión	46
3.4 Boquillas y Bidas	48
3.4.1 Selección de Bidas para Boquillas	49
3.4.2 Tipos de Caras de Bidas	52
3.5 Soportes	53
3.6 Accesorios	57
3.7 Código ASME	59

Prototipo de Sistema de Diseño Paramétrico de Recipientes de Proceso en base a NURBS

Prólogo

1. Introducción

1.1 Objetivos	1
1.2 Metodología	3

2. Fundamentos del Diseño Paramétrico Asistido por Computadora

2.1 Diseño Paramétrico Asistido por Computadora	5
2.1.1 Modelado Geométrico	6
2.1.2 Aplicación de Técnicas de Diseño Paramétrico durante el ciclo de Diseño	13
2.1.2.1 Limitaciones en el Manejo y Mantenimiento de las Geometrías	13
2.1.2.2 Limitaciones debidas al mismo ciclo de Diseño	14
2.1.2.3 Problemas de Búsqueda de Diseños Similares	15
2.2 Elementos Matemáticos de las Curvas Paramétricas	18
2.2.1 Formas Implícitas y Paramétricas	16
2.2.2 Polinomiales en base a Potencias	18
2.2.3 Bézier	19
2.2.4 Splines	26
2.2.5 B-Splines	28
2.2.6 B-Splines Racionales (NURBS)	34
2.2.7 Cónicas y Círculos	38

3. Características de Recipientes de Proceso

3.1 Conceptos Básicos	41
3.2 Recipientes	43
3.3 Tapas	45
3.3.1 Tipos de Tapas para Tanques	45
3.3.2 Tipos de Tapas para Recipientes a Presión	46
3.4 Boquillas y Bidas	48
3.4.1 Selección de Bidas para Boquillas	49
3.4.2 Tipos de Carnes de Bidas	52
3.5 Soportes	53
3.6 Accesorios	57
3.7 Código ASME	59

4.	Ambiente de Diseño	63
4.1	Estructura y Representación de Geometrías NURBS	63
4.1.1	Estructuras de Datos	65
4.1.2	Geometrías Estándar	70
4.1.3	Topologías	91
4.1.3.1	Jerarquía de Objetos	91
4.1.3.2	Relaciones Restrictivas	94
4.1.3.3	Transformaciones Geométricas	95
4.1.4	Estructuras de Almacenamiento	98
4.1.5	IGES: un Estándar de Intercambio de Geometrías	100
4.2	Construcción y Despliegue de Geometrías NURBS	104
4.2.1	Proceso Constructivo	104
4.2.2	Construcción del objeto de acuerdo a la Topología	105
4.2.3	Despliegue en 2D y 3D	106
4.3	Procesos Principales	108
4.3.1	Descripción del Ambiente y Alcance del Programa	108
4.3.2	Control de Menú y Cajas de Diálogo	110
4.3.2.1	La estructura del Menú de Pantalla	110
4.3.2.2	Introducción de Parámetros usando Cajas de Diálogo	111
4.3.3	Proceso 1: Configuración del Sistema	114
4.3.4	Proceso 2: Generación de Recipientes y Tanques	117
4.3.4.1	Recipientes	117
4.3.4.2	Tanques	124
4.3.5	Proceso 3: Creación e Inserción de los Accesorios	126
4.3.5.1	Inserción de Boquillas	126
4.3.5.2	Inserción de Formas Estructurales	127
4.3.5.3	Inserción de Uniones	128
4.3.6	Proceso 4: Adición de Notas y Anotaciones	129
4.3.6.1	Inserción de Notas	131
4.3.6.2	Inserción de Anotaciones	133
4.4	Procedimiento de Diseño, Secuencia de Dibujo y Ejemplos	134
4.4.1	Procedimiento de Diseño	134
4.4.2	Secuencia de Creación de un Dibujo Utilizando el Sistema SDPTRP	135
5.	Justificación Económica	143
	Conclusiones	146
	Bibliografía	147
	Glosario	148

*El mejor momento para plantar un árbol
fue hace veinte años.*

El segundo mejor momento es ahora.

Proverbio Chino.

Prólogo

Este trabajo muestra la investigación, el desarrollo y los resultados generados al aplicar técnicas del Diseño Geométrico Asistido por Computadora al proceso de diseño de Recipientes de Proceso. En particular, se implementan representaciones paramétricas basadas en la teoría de los B-Splines Racionales (NURBS), en un ambiente de diseño que permite la elaboración semiautomática de planos de diseño y modelos tridimensionales de Recipientes de Proceso.

En el capítulo 1. *Introducción*, se proporciona el contexto que permitió idear este trabajo, se definen los objetivos y la metodología de su desarrollo.

En el capítulo 2. *Fundamentos del Diseño Paramétrico Asistido por Computadora*, se examinan los conceptos de Modelado Geométrico que sirven de base a este prototipo, y se proporciona un estudio evolutivo del estado del arte en las formalizaciones matemáticas de los B-Splines racionales y no-racionales, aplicables a curvas y superficies, como sustento de los algoritmos que se presentan en el capítulo 4.

En el capítulo 3. *Características de Recipientes de Proceso*, se establecen los conceptos y descripciones de los objetos a ser diseñados y representados geoméricamente, complementándose con una breve revisión del Código ASME.

En el capítulo 4. *Ambiente de Diseño*, se detalla la estructura interna de representación de geometrías y topologías, así como los principales algoritmos de representación de NURBS utilizados. A continuación, se presenta la estructura de las tablas relacionales utilizadas para almacenar los datos que dan forma a cada geometría y la estructura del formato de Intercambio de geometrías tridimensionales IGES. En seguida, se describe la secuencia de construcción y despliegue de las geometrías, así como su proyección automática en el dibujo. En las secciones tercera y cuarta del capítulo, se proporcionan los diagramas de flujo de datos resultantes del análisis de los procesos principales del ambiente, así como ejemplos de aplicación del sistema.

El capítulo 5. *Justificación Económica*, describe como se justifica esta aplicación en términos de la tasa de retorno a la inversión, específicamente al utilizarse en una compañía de Ingeniería.

Para finalizar se presentan las conclusiones de este trabajo. Separadamente se agrega la bibliografía, la simbología de dibujo, así como apéndices.

1. Introducción

1.1 Objetivos

A principios de la década de los 90, las herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD por sus siglas en inglés), empezaban a ser usadas productivamente en las empresas de Ingeniería y Diseño de Plantas Industriales en nuestro país. A pesar de los avances mostrados en esas fechas por los sistemas comerciales de CAD, los más populares estaban enfocados a proporcionar al diseñador un ambiente de dibujo y no tanto uno de diseño. Por esas fechas en particular, las más grandes compañías, a pesar de tener los recursos para ello, tenían dar el salto hacia el uso de aplicaciones CAD de tres dimensiones (3D) para la producción, pues no existían aún plataformas probadas en nuestro país, ni suficientes recursos humanos preparados en las áreas de diseño y soporte técnico. Actualmente, el camino andado por muchas compañías ya, demuestra la aceptación creciente de sistemas CAD en 3D orientados a la producción, a pesar de que el plano sigue siendo el requerimiento tradicional del mercado de la construcción a nivel mundial.

El plano sigue siendo el formato preferido de los ingenieros, fabricantes y constructoras, ya que se utiliza un lenguaje familiar para detallar, tipificar, orientar, identificar, especificar, asociar y dimensionar la representación de un componente o de conjunto de elementos ubicados en una región del edificio o planta.

Los sistemas de diseño de plantas en 3D más sofisticados de la actualidad (léase PDS) permiten la representación de cada componente en un espacio de tres dimensiones. Tanto las estructuras de acero y concreto, como los equipos, tuberías, instrumentos, cherosas y paneles eléctricos, ductos de aire acondicionado, plataformas, escaleras y sistemas pre-ensamblados, son ubicados espacialmente y conectados entre sí, como si se tratara de una maqueta electrónica. También los accesos y espacios libres pueden convertirse en volúmenes, y así ser sujetos junto con los demás componentes a un proceso de detección de interferencias o traslape volumétrico.

Sin embargo, actualmente para hacer la manufactura de la mayoría de los equipos y recipientes de proceso, es necesario contar con los planos de diseño, así como los de fabricación. Mientras los fabricantes y las compañías de Ingeniería no cuentan con la tecnología para aceptar o generar modelos tridimensionales será necesaria la utilización de planos. Los planos de diseño proveen información básica, como las dimensiones generales, elevación y orientación de boquillas e información proveniente de las hojas de datos (o especificaciones del equipo), y son elaborados por la compañía de Ingeniería para su entrega al fabricante. Los planos de fabricación son normalmente elaborados por el fabricante del equipo, y llevan el detalle suficiente para minimizar la interacción con la empresa de Ingeniería y conseguir su aceptación.

En un proyecto de ingeniería, cuando se utiliza una aplicación PDS, el proceso interdisciplinario de chequeo cruzado se ve afectado en la medida que los sistemas de cada disciplina para generar planos incluyen herramientas incompatibles (por ejemplo 2D vs. 3D) o que requerirían incluir actividades adicionales innecesarias para entregar información electrónica a la aplicación PDS. Si se desea contar con un sistema de trabajo completamente electrónico, es imprescindible resolver el problema derivado de manejar ambientes de CAD diferentes. Un problema particular se le presenta al departamento mecánico, ya que tradicionalmente elabora los planos de diseño en un ambiente de 2D, pero requiere interactuar con disciplinas (como tuberías) que modelan los equipos y tuberías en tres dimensiones. Después de generar el plano de diseño preliminar, lo entrega al departamento de tuberías para que se modele el equipo en tres dimensiones en base a él y se orienten las boquillas. El modelado en este caso es un trabajo redundante (no la orientación de boquillas), ya que consiste en reproducir el plano de diseño en el ambiente de 3D, además siendo los ejecutores ajenos a la disciplina diseñadora.

Esta realidad nos obligó a encontrar la forma de que el departamento mecánico genere, al tiempo que elabora su plano de diseño, el modelo en tres dimensiones de los tanques y recipientes de proceso.

La solución fue diseñar un sistema de dibujo que permite el intercambio estándar de geometrías de curvas y superficies hacia sistemas de CAD/CAE/CAM. Muchos de estos sistemas utilizan curvas y superficies polinómicas racionales, mejor conocidos como NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Los estándares más extendidos a nivel internacional, como IGES, STEP, ACIS y PHIGS permiten el intercambio de geometrías en base a NURBS.

El sistema prototipo trabaja como una aplicación de AutoCAD y utiliza representaciones paramétricas para generar modelos tridimensionales de recipientes de proceso y sus proyecciones correspondientes a dibujos en dos dimensiones. El dibujo se trabaja para incluirle el marco o borde, los títulos, otros elementos especiales, sus boquillas y la lista de materiales. La representación paramétrica es extraída de los modelos tridimensionales en un formato estándar para su transferencia a un sistema tridimensional de diseño de plantas.

Los objetivos del trabajo son:

1. Realizar investigación y desarrollo sobre una técnica de modelado de superficies, los B-Splines Racionales No Uniformes (NURBS), quienes poseen cualidades interesantes para su aplicación en diversas áreas de la ingeniería y del diseño;
2. Crear un Sistema Prototipo con las investigaciones anteriores que muestre las ventajas y desventajas de la representación en base a NURBS y que funcione como un laboratorio para comprender mejor la creación de este tipo de sistemas;
3. Aplicar productivamente el Sistema Prototipo en una compañía de ingeniería.

1.2 Metodología

La metodología de análisis y diseño para el prototipo es una aproximación al método Yourdon [36], ya que se tuvieron 2 etapas de análisis sucesivos. En la primera etapa, se procedieron a analizar los requerimientos de automatización específicos del departamento mecánico de una compañía de Ingeniería respecto del proceso de diseño de Recipientes de Proceso. El personal del departamento ya utilizaba la plataforma AutoCAD y contaba entonces con un pequeño grupo de estándares y simbología para dibujar y generar el plano de diseño de los recipientes. Una vez examinado el proceso se elaboraron los correspondientes diagramas de flujo y se determinó como primer objetivo, la creación de un ambiente de dibujo y generación de planos de diseño, importantes en la interacción con el fabricante y con el dueño de la planta.

Después de examinar el intercambio de la Información del departamento con otras disciplinas, se detectó una interacción importante con el departamento de tuberías, que utiliza el plano de diseño en la orientación de boquillas. Como se describe en la introducción, se encontró una aplicación adicional, que consiste en la entrega al departamento de tuberías del modelo tridimensional del recipiente. Este descubrimiento obligó a replantear el esquema original y plantearnos una segunda etapa de análisis.

Para lograrlo, se procedió a realizar una investigación sobre la teoría matemática de los NURBS y las técnicas de representación de curvas y superficies. Una vez que se comprendió la teoría de los NURBS, se analizó cada configuración y componente del recipiente en términos de su representación paramétrica. Así, fue posible pensar en su estructura de representación tanto para su almacenamiento y despliegue como para la generación del formato de intercambio. Al mismo tiempo se generaron las ideas para el diseño de la interfase de comunicación con el usuario (menús y cajas de diálogo). En seguida, se construyeron los algoritmos esenciales y al detalle de la implementación de los NURBS usando el lenguaje AutoLisp. A continuación se desarrollaron los algoritmos de acceso y escritura a las bases de datos de componentes y registros de diseño, por medio de comandos SQL.

Posteriormente se añadieron las cajas de diálogo y las herramientas de colocación de accesorios de dibujo y simbología original, siempre respetando los estándares de CAD previamente utilizados por el departamento mecánico.

Las pruebas se hicieron utilizando como ejemplo un recipiente horizontal, con tapas hemisféricas y aletas. Finalmente se hicieron ejemplos de dibujos para obtener la aceptación del departamento mecánico. Al final del capítulo 4, se incluyen tres dibujos representativos obtenidos con el prototipo.

Se deja como dato para el lector actual y futuro, que todo el ambiente se desarrolló en un equipo Intergraph TD-30 con tecnología Intel y Sistema Operativo Microsoft Windows 3.11. Los equipos TD-30 cuentan con poder de cómputo del orden de 100 Mflops (millones de instrucciones de punto flotante por segundo) con un procesador central Pentium de 133Mhz con arquitectura completa en 32 bits; caché de

Instrucciones de 8kb y separadamente caché de datos de 8kb; 512kb de caché secundario; 32MB de memoria RAM; procesador gráfico Matrox MGA-2064W con DAC y 4Mb de RAM, permitiendo una resolución de 1280x1024 con profundidad de color de 24 bits (incluye BitBlitting, dibujo de líneas y relleno en "firmware"); monitor multisync de 21" de tecnología "raster" de 1600x1200 "pixels" y hasta 16 millones de colores; disco duro de 540Mb con controlador FAST-SCSI 2; controlador de sonido; controlador de red; "CD-ROM", mouse de tres botones y teclado con bocinas y micrófono.

2. Fundamentos del Diseño Paramétrico Asistido por Computadora

2.1 Diseño Paramétrico Asistido por Computadora

El enfoque paramétrico involucra principalmente la automatización parcial o total de la producción de dibujos, modelos geométricos (2D y 3D) y otros aspectos de diseños mecánicos referentes a la variación en las dimensiones. La implementación de este enfoque se basa en la incorporación de reglas y algoritmos relacionados al diseño mediante programas dentro de un ambiente de CAD.

Desde los años 80 se han desarrollado modeladores paramétricos comerciales en los que las dimensiones del modelo geométrico pueden estar relacionadas entre sí por medio de expresiones o relaciones.

Los *Diseños Paramétricos* se aplican generalmente en actividades clasificadas por Pahl y Beitz [22] como *Variantes o Adaptativas*, que involucren generar nuevos diseños a partir de variaciones a un estándar de diseño, o que adapten en forma incremental un sistema, en contraposición con un *Diseño Original* donde se proponen principios y soluciones novedosas.

Pugh and Smith [26] sugieren una división de los diseños en aquellos en los que su principio de solución es estático, y aquellos para los que es dinámico. Estos corresponden a los diseños variante y original respectivamente, donde los *Sistemas Paramétricos* involucran una solución estática con elementos dinámicos. Pugh sugiere que las técnicas de CAD son más productivas cuando se aplican a diseños estáticos. Los más altos índices de productividad se alcanzan a través de la reutilización de la geometría de partes o ensambles de diseños previos, o a través de la automatización de la producción de diseños. Wilkes y Leonard [35] identifican al diseño variante como una forma de automatizar el proceso de diseño a través de la generación de programas específicos para cada rango de productos.

El diseñador de un producto esencialmente variante debe considerar un uso intensivo, mientras que los diseñadores de productos originales seguramente no tendrían un uso repetitivo que justifique el esfuerzo de desarrollo.

El sistema aquí presentado está basado en la adecuación de un estándar de diseño mecánico (ASME), que incorpora elementos paramétricos debido a los requerimientos del cliente. Los tanques y recipientes de proceso normalmente son diseños estáticos, donde la configuración genérica de la geometría no cambia significativamente, solo la posición relativa de cada componente que lo forma y sus correspondientes dimensiones. Por esta razón, los elementos paramétricos son utilizados en forma repetida en los diseños.

2.1.1 Modelado Geométrico

Matriz de Sistematización del Diseño	Sistematizable/ Productivo/ 2D y 3D	Desarrollo difícil de justificar
	Sistematizable/ Dominios Conocidos/ 2D	Poco efectivo/ desarrollo muy complejo

Figura 2.1.1 Modeldades del Modelado versus Principlos de Solución del Diseño, resultando las ventajas y desventajas de la sistematización.

Para entender las herramientas que se aplican en el Diseño Paramétrico es necesario conocer los aportes del Modelado Geométrico, un campo del Diseño Asistido por Computadora que se desarrolló en la década de los 70's.

Su objetivo es permitir la representación de formas con objeto de alterarlas, consultar sus propiedades geométricas y atributos no geométricos, analizarlas y generar información de manufactura [1].

Un modelo es un objeto construido artificialmente que permite la observación de otro de manera más simple. Los modelos son útiles puesto que utilizarlos en ocasiones es más sencillo que su contraparte física. Ahora bien, la totalidad de la información que se almacena en un modelo depende del alcance de las preguntas a contestar [18].

El modelado geométrico tiene que ver con los siguientes elementos [28]:

- La representación en computadora de las entidades geométricas y las transformaciones que se les pueden aplicar tales como movimientos rígidos y operaciones booleanas.
- Algoritmos para el razonamiento geométrico y para el cálculo de propiedades geométricas y los efectos de las transformaciones.
- Las teorías matemáticas que fundamentan tales representaciones y algoritmos.
- El equipo y programas en los cuales está inmerso el modelado geométrico.

El modelado geométrico ha evolucionado en tres ramas principales:

- Figuras de Alambre
- Superficies
- Sólidos

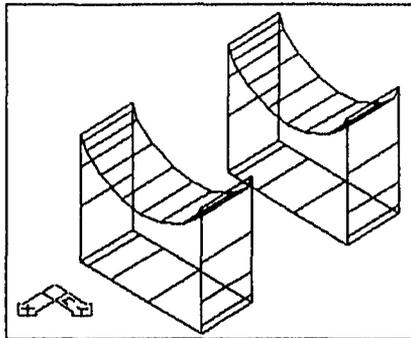


Figura 2.1.1.1 Figura de Alambre

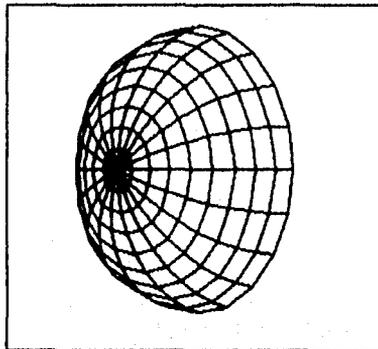


Figura 2.1.1.2 Figura de Superficie

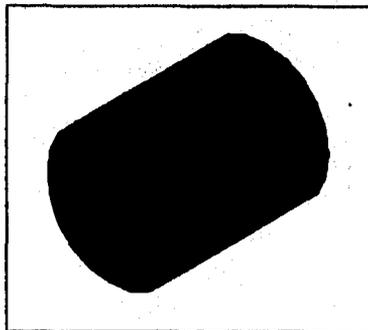


Figura 2.1.1.3 Figura de un Sólido

La tecnología de *Modelado de Figuras de Alambre* representa a los objetos mediante segmentos de línea o en ocasiones curvas cuadráticas interconectados y permite generar figuras de alambre en 2D, 2½ D (proyección tridimensional sin información de la coordenada z), y 3D. Aunque este tipo de representación permite desplegar objetos relativamente complejos, su estructura de datos es muy simple y limita la consulta de los mismos. En este esquema, la información se maneja bajo una estructura jerárquica donde normalmente los vértices son los elementos base del árbol. El concepto de objeto, en este caso, es una colección conectada de lados y vértices, donde uno o más ciclos de lados constituyen una de sus caras. Típicamente, una figura de alambre representa perfiles, líneas de construcción y líneas de centro, aunque también se utiliza en la representación de

En cuanto al *Modelado de Superficies*, la representación de estas formas descansa en dos conceptos básicos:

- El empleo de expresiones paramétricas
 - La descomposición en partes de una curva o superficie
- El primer concepto permite representaciones multivaluadas con respecto a un sistema coordinado y mantiene independencia de la representación con respecto a los ejes, eliminando el problema de valuaciones con tangente infinita, facilita la representación de curvas en sistemas de coordenadas homogéneas y permite la consulta de entidades mediante la parametrización [31].

El segundo concepto elimina el problema de representar una curva o superficie por una sola función analítica, que en ocasiones produce un polígono de alto orden involucrando problemas de solución (búsqueda de raíces) y oscilación, aunque incurre en el hecho de tener que colocar condiciones de continuidad entre los segmentos de curva modelados.

El *Modelado de Sólidos* es el campo del Diseño Asistido por Computadora que proporciona la capacidad de representar, manipular, analizar y consultar objetos sólidos en una computadora. Un sólido (representación de un objeto real), se puede entender como un conjunto continuo de puntos mapeados a una representación ideal en computadora, donde ese conjunto de puntos mantiene las siguientes propiedades:

- Rigidez
- Regularidad
- Definición finita en el espacio ocupado
- Cerradura bajo operaciones booleanas
- Descriptibilidad finita
- Determinismo en las fronteras

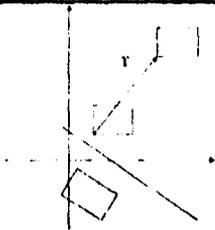
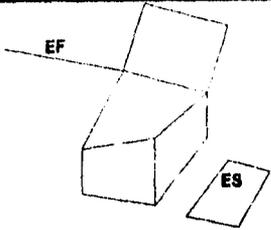
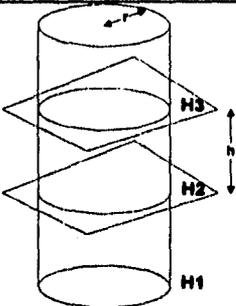
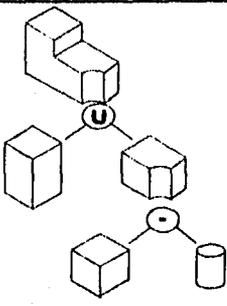
	
<p>A) Las transformaciones rígidas mantienen la forma de un objeto. Estas son la rotación, traslación y espejo. Observe que el rectángulo mantiene su forma.</p>	<p>B) Los objetos regulares no deben mantener sueltos sus elementos o flotando</p> <p>ES=Elemento Suelto EF=Elemento Flotando</p>
	
<p>C) Modelo de espacio medio de un cilindro finito</p>	<p>D) Arbol Constructivo de un objeto. Los nodos del árbol son operadores Booleanos en este caso la unión y la diferencia</p>

Figure 2.1.1.4 Propiedades de los sólidos

Cuando se elabora un diseño sin capturar las relaciones entre sus entidades, se dice que está definido exclusivamente por su geometría y se le llama Modelado Explícito. Este modo requiere que los usuarios definan la geometría explícitamente para definir el modelo. Normalmente es posible combinar el modelado de alambre, superficies o de sólidos sin mayor problema. Sin embargo, su principal problema es que para incorporar cambios incluso menores al modelo, es imprescindible realizar un cuidadoso análisis para modificar una porción del modelo. Esto involucra normalmente eliminar las secciones e cambiar y crearlas de nuevo. Por ejemplo, el diseño de una superficie explícita de una botella de plástico que requiere el cambio de su forma y su volumen, demandaría que el usuario borrara la mayoría de las superficies, re-especificara las curvas generativas, analizara las interconexiones entre superficies y reconstruyera el modelo.

Por otro lado, cuando se utilizan parámetros (variables) para modelar objetos geométricos y las relaciones de los elementos que lo componen, se está utilizando el Modelado Paramétrico. Los principales problemas e los que se enfrentan los sistemas usuarios de este método son [16]:

- a) Como capturar los parámetros y restricciones relativas a relaciones de la geometría, ecuaciones de la Ingeniería, posicionales y no geométricas.
- b) Como relacionar palabras clave y las acciones del usuario a estos parámetros y restricciones para capturar el intento de diseño y hacerlo disponible a otras aplicaciones. El intento de diseño es un concepto simple, pero el proceso de capturar la racionalidad del usuario es complejo. El componente principal de los modeladores modernos es la habilidad de definir las geometrías en términos de restricciones y reglas. Las restricciones son dimensiones, relaciones geométricas y algebraicas; las reglas definen como se comportan las entidades.
- c) Como permitir el mantenimiento posterior de estas variables

Como comparación se mencionará el caso de una técnica distinta denominada Modelado Variacional. El Modelado Variacional resuelve un conjunto de ecuaciones simultáneas para llegar a la solución. ¿Cuál es la diferencia con el Modelado Paramétrico? La más importante es que con el Modelado Paramétrico, el modelo está limitado a soluciones basadas en parámetros de geometría, posiblemente aún con ecuaciones muy simples, para definir esos parámetros. En el diseño variacional, las dimensiones fundamentales del modelo pueden basarse en un conjunto complejo de ecuaciones, que puedan calcular dimensiones basándose por ejemplo, en propiedades de materiales. El usuario no necesita preocuparse del orden específico de las relaciones usadas para construir el modelo, simplemente altera los parámetros necesarios. Por lo que el Modelado Paramétrico es un subconjunto del Modelado Variacional [18].

El Modelado Variacional le permite a los usuarios diseñar sin preocuparse del orden en que las restricciones fueron colocadas o resueltas. Los usuarios pueden definir el problema usando un proceso de evolución natural. Uno de los beneficios del Diseño Variacional es la habilidad para resolver geometrías subrestringidas -geometrías no totalmente definidas-, ya que los usuarios pueden especificar lo que hasta el momento conocen en términos de restricciones, encontrar una solución válida y evolucionar a un estado totalmente restringido.

Sin embargo, para ser efectivos, los Modeladores Variacionales "comerciales" requieren atacar un dominio conocido, ya que las ecuaciones son específicas al problema en mano. Por ejemplo, en un problema estructural, la edición o remoción de una columna alteraría el dominio del problema y por lo tanto la adecuación de las ecuaciones. Los enfoques aplicables en la solución de ecuaciones simultáneas darían la particularidad al sistema variacional. Un Modelado Variacional "basado en Atributos" en lugar de "orientado a la Construcción", involucraría ir restringiendo atributos a partir de bosquejos preliminares en lugar de registrar los pasos constructivos. El Modelado Variacional debería usarse idealmente tanto en 2D como en 3D, pero debido a la complejidad en describir problemas en 3D vía ecuaciones en lugar de vía construcciones, los sistemas actuales solo implementan el Modelado Variacional en 2D.

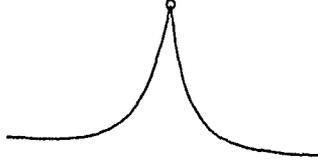
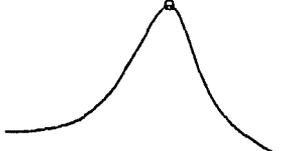
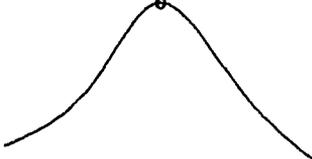
	<p>A) Control global sobre una curva. Observe la alteración del vertice V1 y el seguimiento que tiene la curva.</p>
	<p>B) La curva no debe oscilar al momento de generación. Esto se corrige con tensión (Disminución de la longitud de arco) o con polinomio de menor grado.</p>
	<p>C) Continuidad de posición entre dos segmentos.</p>
	<p>D) Continuidad de primera derivada o de vector tangente.</p>
	<p>E) Continuidad de segunda derivada o de vector curvatura.</p>

Figura 2.1.1.5 Facilidades deseables en un sistema de modelado de superficies

Figura 2.1.1.6 Tabla Comparativa de características de Sistemas de Modelado Variacionales [16]

	Pro/Engineer Rev. 12	I-Deas Master Series	CADDS 5 Rev 4	I/EMS 3	Anvil/5000 AIM	Catia Solutions V4	Unigraphics V10	HP PE/SolidDesigner	Cognition Mechanical Advantage	AutocAD Designer	Euclid 3	Bravo V4
<u>Modelador Explicito</u>	No	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	Si
<u>Manejador de Dimension</u>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Parcial
<u>Cambio del modelo desde el dibujo</u>	Si	Si	No	Si	Si	Si	Si	No	No	Si	No	No
<u>Paramétrico</u>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Parcial	Parcial
<u>Variacional - 2D ó 2.5D!</u>	2.5D	2.5D	2D	2.5D	2D	2D	2D	2D	2.5D	2D	No	2D
<u>Basado en características</u>	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Parcial	Si	Si	Si	No
<u>3D desde Perfiles conectados</u>	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	Si	No
<u>3D parametrización Automática</u>	No	No	No	No	No	Parcial	No	Parcial	No	No	No	No

2.1.2 Aplicación de Técnicas de Diseño Paramétrico durante el ciclo de Diseño

A pesar de los desarrollos extensivos en modelado geométrico en años recientes, la mayor parte de los productos resultantes de sistemas CAD en aplicaciones industriales son dibujos de ingeniería convencionales en proyección ortográfica. Sin embargo, la tendencia generalizada es a la representación de componentes en 3D y generar los planos en base a proyecciones orto o isométricas. Un enfoque intermedio sería el efectuar el diseño en 2D pero utilizar una representación en 3D. Este alternativa permite la ampliación de sistemas 2D actualmente en producción e que incluyan gradualmente al manejo de componentes en 3D, y que a medida que se estas nuevas funciones se vayan desarrollando, las funciones para generación de componentes en 2D sean reemplazadas por sus correspondientes en 3D. La gran ventaja esperada es la aceptación de un ambiente de diseño 3D por parte de diseñadores acostumbrados al ambiente tradicional de 2D, en la medida en que ellos mismos desarrollan sus habilidades para el diseño en 3D.

Algunas otras técnicas del diseño paramétrico son importantes por su aplicación al ambiente de diseño de Recipientes de Proceso y son bienvenidas por los diseñadores. Corresponden a funciones que se adaptan y complementan al ciclo de diseño y que aparecen gracias a la utilización de bases de datos como repositorios de componentes.

2.1.2.1 Limitaciones en el Manejo y Mantenimiento de las Geometrías

La complejidad de la tarea de programar una representación de un componente en un ambiente de diseño es función de [19]:

- La complejidad general de la geometría del componente
- El número de geometrías alternativas y configuraciones del componente
- La posibilidad de utilizar diseños previos de componentes
- El número de combinaciones posibles de características o detalles de configuración
- El número de componentes distintos

Construcción Geométrica basada en B-Splines

El proceso de diseño en cuanto a las limitaciones de las representaciones de la geometría puede ser mejorado utilizando el siguiente método:

- codificar cada componente del objeto a diseñar en base a su esquema de representación paramétrico de la forma B-Splines.

Debido a que cada componente puede representarse por una ecuación paramétrica B-Spline, es posible reducir a su mínima expresión la cantidad de código utilizado en la construcción de cada componente, ya que únicamente se requiere definir la posición de los puntos de control (talvez sus tangentes), escala y punto de inserción. En cuanto a la complejidad de los componentes en 2D, si bien todos ellos requieren construcciones geométricas, ya sea en base a líneas y curvas cónicas, pueden extenderse a un espacio de tres dimensiones gracias al grado de complejidad que

soportan los B-Splines Racionales. En este último caso, los NURBS no sólo permiten la representación de cualquier cuádrlica o cónica, sino también la de curvas de forma libre, cilindros genéricos, superficies regladas y de revolución [23].

Creación de nuevas especificaciones y componentes

Esta consideración es particularmente crítica en la programación de muchos componentes, ya que cualquier variación en la geometría, como una posición relativa distinta de una base o plataforma, debe ser programada por separado, y todas las posibles interacciones entre la geometría programada y otras características del componente deben incluirse en el código. Aún para componentes relativamente simples, es posible tener una explosión combinatorial de posibilidades que harían la programación poco económica. Una solución alternativa que acortaría este problema es utilizar una representación universal y estándar de todos y cada uno de los componentes del dibujo (en función de sus primitivas) en 3D, y almacenar las características particulares de cada uno, así como las relaciones que mantienen entre sí (en el caso de objetos compuestos) [35].

2.1.2.2 Limitaciones debidas al mismo ciclo de Diseño

Aunque se observa que en principio algunas tareas de diseño puedan ser completamente automatizadas usando técnicas paramétricas, en la práctica, esto no ocurre en todos los casos. Se sugiere [19] que una de las principales razones para esto es que los diseños se desarrollan sobre un período de tiempo, mientras que los programas paramétricos tienden a ser usados "de un solo golpe".

Los diseños se desarrollan sobre un período de tiempo por que la información de requerimientos del cliente o del mismo proceso y sus especificaciones son recolectadas gradualmente por el diseñador, por lo que éste tendrá que hacer algunas decisiones de diseño respecto a un arreglo general, factibilidad, etc. en base a datos incompletos.

Los diseños también toman su tiempo, ya que los detalles son especificados mucho después de que se genere el arreglo conceptual. Esto aplica aún a componentes simples. Considérese una válvula para un recipiente a presión horizontal. En la etapa conceptual, se conocen detalles generales, como la longitud y diámetro del cuerpo del recipiente y de sus tapas, pero no los del tipo o posición de sus boquillas, ni otras características importantes de la válvula, los cuales son especificados en la etapa de diseño a detalle. Como consecuencia, los programas paramétricos escritos para generar un diseño completo, son usados muchas veces para documentar el diseño, después de que ya se han efectuado las decisiones más importantes, utilizándolos más bien como herramientas de dibujo. En otros casos, ni siquiera son utilizados como herramientas de dibujo, prefiriéndose el clásico dibujo en papel.

El punto final respecto a la forma en que los diseños evolucionen a lo largo del tiempo es que frecuentemente es necesario cambiar o refinar un diseño a medida que el proceso de diseño avanza. Con los programas paramétricos convencionales es necesario borrar la geometría de diseño original y volver a ejecutar el programa con la nueva información [32].

Estas consideraciones dan forma a un método de automatización de diseño más útil. La representación del diseño debe ser capaz de ser desarrollada continuamente.

Almacenamiento de Componentes y Diseños Previos

El proceso de diseño puede ser mejorado utilizando el siguiente método:

- Almacenar cada componente del objeto e diseñar en base a sus parámetros de diseño parciales o finales

En el caso que nos ocupa, es factible adptar el sistema para que maneje un número de geometrías alternativas y configuraciones de un componente, almacenando cada una por separado. Cuando se diseñan Tanques y Recipientes, en realidad se manejan un conjunto de instancias variantes de un componente típico al cual se le introducen pequeñas modificaciones. En lugar de mantener los parámetros de diseño en memoria temporal solo durante la sesión, estos se almacenan en una base de datos relacional, estructurados en base a una jerarquía de componentes. El componente es seleccionado de entre un conjunto predeterminado de especificaciones disponibles. Cada uno de ellos está predefinido en base a un conjunto de parámetros básicos, los cuales serán modificados en forma interactiva por el usuario. Cada diseño será almacenado en cada sesión, por lo que los componentes que se hayan construido, independientemente del estado de avance que les corresponde, conservarán sus parámetros de forma persistente. Esto permite continuar el proceso de diseño reutilizando diseños parciales o preliminares en fases posteriores.

2.1.2.3 Problemas de Búsqueda de Diseños Similares

Los métodos paramétricos permiten la producción acelerada de diseños que son la variación de un tema. Esta particularidad ocasiona también que sea muy fácil repetir el diseño de algo muy similar o idéntico a un diseño final previamente realizado. Esta situación puede resolverse, al menos en parte, si se buscan diseños similares en una base de datos de diseños existentes, que puedan ser usados en lugar de producir nuevos diseños. Esta búsqueda se automatiza mediante el uso de esquemas de clasificación de partes.

Varias limitaciones que merecen atención son [4]:

- el problema clásico de búsqueda en la base de datos existe, ya que si se usa una especificación muy cerrada, algunos diseños serán pasados por alto, y si se usa una especificación muy abierta, encontraríamos demasiadas instancias y el empate entre diseños sería muy pobre.
- la búsqueda se hace generalmente en base a atributos que caen dentro de rangos. En general, esto no ayuda a indicar la calidad del empate.
- Si se buscan diseños previos usando atributos que describen el resultado final, de todas maneras es necesario revisar todo el proceso de diseño antes de empezar la búsqueda.

Almacenamiento y búsqueda de Especificaciones

El proceso de diseño puede ser mejorado utilizando el siguiente método:

- Buscar una configuración genérica del objeto a diseñar entre especificaciones de diseño previas, en lugar de atributos de diseño finales, antes de que el proceso de diseño paramétrico inicie. Para lograrlo, se permitió al diseñador definir los elementos que componen el objeto a diseñar. Cada elemento está asociado a una especificación, de tal manera que es posible encontrar el esquema que reúna la mayor cantidad de especificaciones equivalentes. Esto implica que las especificaciones para los diseños deben almacenarse en una base de datos en asociación a los atributos que definen el diseño final en la base de datos.

2.2 Elementos Matemáticos de las Curvas Paramétricas

A continuación se presenta la evolución de los métodos de representación de curvas paramétricas, desde las curvas polinomiales básicas y el planteamiento de Bézier, hasta la representación de B-Splines Racionales (NURBS), hoy por hoy la más utilizada en los modeladores comerciales.

2.2.1 Formas Implícitas y Paramétricas

Los dos métodos más comunes de representar curvas y superficies en el modelado geométrico son las ecuaciones implícitas y las funciones paramétricas [23].

La ecuación implícita de una curva que yace en el plano xy tiene la forma $f(x,y)=0$. Esta ecuación describe una relación implícita entre las coordenadas x y y de los puntos comprendidos en una curva. Para una curva dada la ecuación es única. Un ejemplo es el círculo de radio unitario centrado en el origen, que se especifica con la ecuación $f(x,y) = x^2 + y^2 - 1 = 0$.

En forma paramétrica, cada una de las coordenadas del punto de una curva se representa separadamente como una función explícita de un parámetro independiente

$$C(u) = (x(u), y(u)) \text{ donde } a \leq u \leq b$$

Entonces, $C(u)$ es una función valuada por un vector de la variable independiente u . Aunque el intervalo $[a,b]$ es arbitrario, usualmente se normaliza a $[0,1]$. El primer cuadrante del círculo está definido por las funciones paramétricas

$$x(u) = \cos(u)$$

$$\text{para } 0 \leq u \leq \frac{\pi}{2}$$

$$y(u) = \text{sen}(u)$$

Haciendo $t = \tan(u/2)$, es posible derivar una representación alterna

$$x(t) = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

$$y(t) = \frac{2t}{1+t^2} \quad \text{para } 0 \leq t \leq 1$$

Entonces, la representación paramétrica no es única.

Es difícil mantener el argumento de que una de las dos formas es siempre más apropiada que la otra. Ambas tienen sus ventajas y desventajas y ambas se utilizan en los modeladores geométricos comerciales. A continuación hacemos una comparación de las dos [23]:

- Al añadir una coordenada z , el método paramétrico se extiende fácilmente a la representación de curvas arbitrarias en el espacio tridimensional, $C(u) = (x(u), y(u), z(u))$; la forma implícita sólo permite especificar curvas en el plano xy (o xz o yz).
- Es muy poco usual representar segmentos de curva limitados con la forma implícita. Con la forma paramétrica, por otro lado, la limitación se construye a través de los límites del intervalo del parámetro. Sin embargo, una geometría ilimitada (e.g. una simple línea recta dada por $f(x,y) = ax + by + c = 0$) es difícil de implementar usando geometría paramétrica.
- Las curvas paramétricas poseen un sentido natural de travesía (de $C(a)$ a $C(b)$ si $a \leq u \leq b$); las curvas implícitas no. Por lo que es sencillo generar secuencias ordenadas de puntos a lo largo de una curva paramétrica.
- La forma paramétrica es más natural cuando se diseña o representa una forma en una computadora. Los coeficientes de muchas funciones paramétricas, e.g. Bézier y B-Spline, poseen significado geométrico. Esto se traduce en métodos intuitivos de diseño.
- La complejidad de muchas operaciones geométricas y manipulaciones depende del método de representación. Los dos ejemplos clásicos son:
 - cálculo de un punto en una curva - difícil en la forma implícita;
 - dado un punto, determinar si yace o no en la curva - difícil en la forma paramétrica;

- En ocasiones, cuando se usa la forma paramétrica, se presentan anomalías paramétricas que no tienen relación con la geometría. Un ejemplo de esto es la esfera unitaria. Los polos son puntos paramétricos críticos muy difíciles de calcular algorítmicamente, a pesar de que geoméricamente los polos no son diferentes de ningún otro punto en la esfera.

Si se considera que la forma paramétrica puede ser arbitraria, se obtienen una gran variedad de curvas. Sin embargo, cuando se implementan en un sistema de modelado geométrico o diseño paramétrico se deben hacer algunas concesiones, ya que la situación ideal sería restringirse a una clase de funciones que [25]:

- a) sea capaz de representar precisamente todas las curvas que el usuario del sistema pueda necesitar;
- b) sean procesadas en la computadora eficientemente y con exactitud, en particular:
 - el cómputo de los puntos y derivadas de las curvas sea eficiente;
 - el procesamiento numérico de las funciones no se vea afectada con el redondeo de punto flotante
 - las funciones requieran poca memoria para su almacenamiento
- c) su representación matemática sea sencilla y fácilmente entendible.

2.2.2 Polinomiales en base a Potencias

Una clase ampliamente usada de funciones son los polinomiales. Aunque satisfacen los dos últimos criterios arriba mencionados, existen un número importante de tipos de curvas que no pueden representarse usando polinomios; sin embargo, la mayoría de ellas pueden ser aproximadas en los sistemas usando polinomios [8].

Una curva en base a potencias de grado N está dada por:

$$C(u) = (x(u), y(u), z(u)) = \sum_{i=0}^n a_i u^i \text{ para } 0 \leq u \leq 1$$

Los $a_i = (x_i, y_i, z_i)$ son vectores, por lo que

$$x(u) = \sum_{i=0}^n x_i u^i, \quad y(u) = \sum_{i=0}^n y_i u^i, \quad z(u) = \sum_{i=0}^n z_i u^i \quad (2.2.2.1)$$

En forma matricial la ecuación (2.2.2.1) es

$$C(u) = [a_0 a_1 \dots a_n] \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ \vdots \\ u^n \end{bmatrix} = [a']^T [u'] \quad (2.2.2.2)$$

Diferenciando (2.2.2.1) tenemos

$$a_i = \frac{C^{(i)}(u)|_{u=0}}{i!}$$

donde $C^{(i)}(u)|_{u=0}$ es la i -ésima derivada de $C(u)$ en $u=0$. Las $n+1$ funciones $\{u^i\}$ se llaman funciones base, y los $\{a^i\}$ son los coeficientes de la representación en base potencia.

El segmento bicúbico, aunque es altamente útil, presenta la desventaja de tener que proporcionar directamente el contenido de la matriz de coeficientes $\{a^i\}$, cuyos valores pueden diferir en diversos órdenes de magnitud y en donde la combinación adecuada de estos, para obtener un resultado deseado, es una operación en extremo laboriosa, situación que dentro de un ambiente de CAD, no es posible exceptar [1].

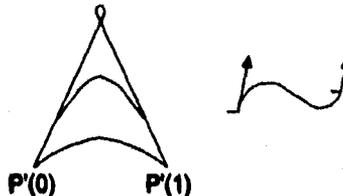


Figura 2.2.2 Las Curvas en base a Potencia se controlan por posición y vector tangente. A la izquierda, la curva incrementa su plenitud en función a la magnitud del vector tangente. A la derecha se muestra una curva con inflexión.

2.2.3 Bézier

En la formulación anterior para el diseño de segmentos de curva, el diseñador especifica información vectorial explícita, lo cual en ocasiones, puede resultar

extremadamente difícil, más aún, cuando no se tiene una experiencia en el área. Es así que el uso de manejadores que utilizan la representación en base a potencias requiere que el diseñador se esfuerce para formarse una idea sobre su significado físico.

La representación en base a potencias tiene las siguientes desventajas [1]:

- es antinatural para el diseño interactivo de formas o figuras; los coeficientes no implican ningún significado geométrico respecto de la forma de la curva. Además de que el diseñador típicamente quiere especificar las condiciones en ambos extremos de la curva, no sólo en el punto inicial.
- los algoritmos para procesar polinomiales de base a potencia tienen un enfoque algebraico y no geométrico.
- numéricamente, es una representación muy pobre, ya que si los coeficientes varían mucho en su magnitud se generan errores de redondeo.

El método de Bézier, nombre que refiere a su autor, soluciona estas desventajas y puede expresarse en función de los elementos de un segmento bicúbico.

Las primeras ideas que deben mencionarse sobre Bézier, se refieren, primero, a que no es una técnica de interpolación (no toca a todos los vértices que definen la forma) sino de ajuste, esto es, tome como base una serie de vértices, de los cuales solo toca el primero y el último y aproxime a los demás; permite una relación más cercana entre la entrada de información (vértices de control) y la salida (la curva) y, finalmente, su base matemática es polinomial.

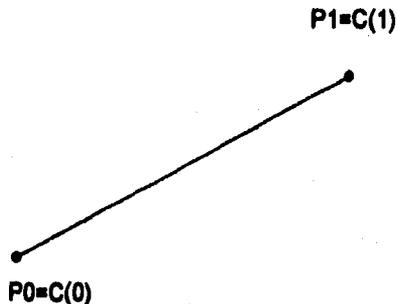


Figura 2.2.3.1 Una curva de Bézier de primer grado

Los puntos de una curva Bézier de grado n se encuentran evaluando la expresión [9]:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u)P_i \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (2.2.3.1)$$

donde P_i especifica los vértices de control.

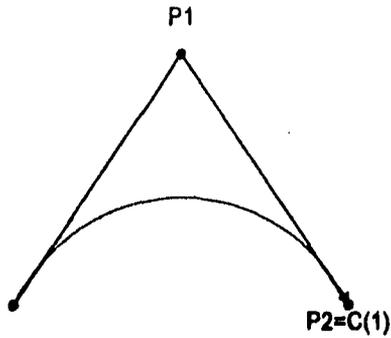


Figura 2.2.3.2 Una curva Bézier de segundo grado.

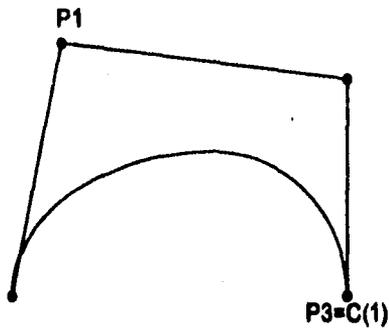


Figura 2.2.3.3 Una curva Bézier cúbica.

Su base, los *polinomios de Bernstein*, está dada por la siguiente expresión [9]:

$$B_{i,n}(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2.2.3.2)$$

donde

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

en la cual, n es el grado del polinomio y 1 es el vértice particular sobre el cual se indexa (de 0 a n). En general, un polinomio de grado n se especifica por $n+1$ vértices de control.

Observe que:

$$B_{0,n}(0) = B_{n,n}(1) = 1$$

lo que permite que $C(0) = P_0$ y $C(1) = P_n$; también indique que el máximo valor de la función se da en $u = \frac{1}{n}$.

La r -ésima derivada en los extremos de esta formulación está dada por lo siguiente:

$$C^r(0) = \left[\frac{n!}{(n-r)!} \right] \sum_{i=0}^r (-1)^{r-i} \binom{r}{i} P_i$$

$$C^r(1) = \left[\frac{n!}{(n-r)!} \right] \sum_{i=0}^r (-1)^i \binom{r}{i} P_{n-i}$$

así, la primera derivada en los puntos extremos está dada por

$$C'(0) = n(P_1 - P_0) \quad (2.2.3.3)$$

$$C'(1) = n(P_n - P_{n-1}) \quad (2.2.3.4)$$

lo cual dice que el vector tangente al inicio y al final de la curva sigue la dirección de los segmentos inicial y final del polígono de control, por lo cual, la curva es tangente a estos segmentos.

Condiciones de continuidad

Sean P y Q dos segmentos Bézier, donde el primero está formado de P_i vértices y es de grado n , y al segundo se forma por Q_i vértices y es de grado m .

La continuidad de primera derivada en el vértice de unión se obtiene cuando

$$P'(1) = aQ'(0) \quad (2.2.3.5)$$

donde a es un escalar. Usando (2.2.3.3) y (2.2.3.4) en (2.2.3.5) se genera:

$$Q_1 - Q_0 = \left(\frac{n}{m}\right)(P_n - P_{n-1}) \quad (2.2.3.6)$$

Como Q_0 debe ser igual a P_n , el final de un segmento es igual a la pendiente de inicio del siguiente segmento cuando los vértices Q_1 , P_n y P_{n-1} son colineales. Para un caso particular de dos segmentos de Bézier cúbicos, ($n=m=3$), donde el vector tangente es igual en magnitud y dirección en la unión de los segmentos, se tiene que la ecuación (2.2.3.6) es la siguiente :

$$Q_1 - Q_0 = P_3 - P_2 = Q_1 - P_3 \quad (2.2.3.7)$$

esí,

$$Q_1 + Q_2 = 2P_3 \quad (2.2.3.8)$$

lo que implica que P_3 es el punto medio del segmento P_3Q_1 . Debe observarse que para mantener continuidad de primera derivada, solo es necesario que P_3 esté sobre el segmento P_3Q_1 . Para las mismas curvas Q y P anteriores, la continuidad de segunda derivada esta dada por :

$$m(m-1)(Q_0 - 2Q_1 + Q_2) = n(n-1)(P_{n-2} - 2P_{n-1} + P_n) \quad (2.2.3.9)$$

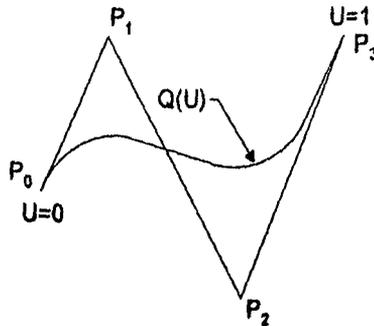


Figura 2.2.3.4 Curva de Bézier. Observe el polígono de control. La continuidad se logra con arreglos de vértices de control.

Curvas de Bézier Racionales

Aunque los polinomios tienen muchas ventajas, existen un número importante de tipos de curvas y superficies que no pueden representarse precisamente usando polinomios, por ejemplo, círculos, elipses, hipérbolas, cilindros, conos y esferas.

Sin embargo se sabe de las matemáticas clásicas que todas las curvas cónicas, incluyendo al círculo, pueden representarse utilizando funciones racionales, las cuales se definen como el cociente de dos polinomios. Se representan por funciones racionales de la forma [24]

$$x(u) = \frac{X(u)}{W(u)} \quad y(u) = \frac{Y(u)}{W(u)}$$

donde $X(u)$, $Y(u)$ y $W(u)$ son polinomios, esto es, cada uno de las funciones coordenadas tiene el mismo denominador.

Como ejemplos se tiene:

ej. 2.2.3.1 Círculo de radio 1, centrado en el origen

$$x(u) = \frac{1-u^2}{1+u^2} \quad y(u) = \frac{2u}{1+u^2}$$

ej. 2.2.3.2 Elipse, centrada en el origen; el eje y es el eje mayor, el eje x es el eje menor, y los radios mayor y menor son 2 y 1 respectivamente

$$x(u) = \frac{1-u^2}{1+u^2} \quad y(u) = \frac{4u}{1+u^2}$$

Una curva racional de Bézier de grado n se define por [23]:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) w_i} \quad 0 \leq u \leq 1$$

Las $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ y $B_{i,n}(u)$ como antes; los w_i son escalares, y se denominan pesos. Entonces $W(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) w_i$ es la función denominador común. Se asume que $w_i > 0$ para todas las i , lo cual asegura que $W(u) > 0$ toda $u \in [0,1]$. Se escribe

$$C(u) = \sum_{i=0}^n R_{i,n}(u) P_i \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (2.2.3.10)$$

donde

$$R_{i,n}(u) = \frac{B_{i,n}(u) w_i}{\sum_{j=0}^n B_{j,n}(u) w_j}$$

Las $R_{i,n}(u)$ son las funciones racionales base para esta forma de curva. Las propiedades de $R_{i,n}(u)$ se derivan de la ec. 2.2.3.10 y las propiedades correspondientes de $B_{i,n}(u)$ y son:

- P.1 No-negatividad: $R_{i,n}(u) \geq 0$ para toda i, n y $0 \leq u \leq 1$;
- P.2 Partición de la Unidad: $\sum_{i=0}^n R_{i,n}(u) = 1$ para toda $0 \leq u \leq 1$;
- P.3 $R_{0,n}(0) = R_{n,n}(1) = 1$;
- P.4 $R_{i,n}(u)$ tiene exactamente un único máximo en el intervalo $[0,1]$;
- P.5 Si $w_i = 1$ para todas las i , luego $R_{i,n}(u) = B_{i,n}(u)$ para todas las i ; i.e. las $B_{i,n}(u)$ son un caso especial de las $R_{i,n}(u)$.

Estas propiedades traen como consecuencia las siguientes propiedades geométricas de las curvas de Bézier Racionales.

- P.6 Caparazón Convexo: las curvas está contenidas en los Caparazones formados por los puntos de control P_i ;
- P.7 Invarianza en la Transformación: la rotación, translación y escalamientos se logran aplicándose a los puntos de control.
- P.8 Disminución de la Varianza:
- P.9 Interpolación de los puntos finales: $C(0) = P_0$ y $C(1) = P_n$;
- P.10 la k -ésima derivada en $u=0$ ($u=1$) depende de los primeros (últimos) $k+1$ puntos de control y sus pesos; en particular $C'(0)$ y $C'(1)$ son paralelas a $P_1 - P_0$ y $P_n - P_{n-1}$, respectivamente;
- P.11 las curvas de Bézier polinomiales son un caso especial de las curvas racionales de Bézier

2.2.4 Splines

Un *spline* es una curva polinomial generada por segmentos de grado k con continuidad de derivadas de orden $k-1$ en las uniones de los segmentos. El valor del parámetro que corresponde a los extremos de un segmento spline se les denomina nudos. Así, por ejemplo, un spline *cúbico* mantiene continuidad de segunda derivada en la unión de sus segmentos [1].

El término *spline* proviene de la analogía con una herramienta de dibujo, normalmente de metal delgado o de madera, la cual se tuerce elásticamente para pasar por algunos puntos de restricción.

La curva generada por el spline físico es aquella que minimiza su energía de tensión interna, que expresado matemáticamente, es la curva cuya curvatura cuadrada media es mínima y en ese sentido ésta es la curva más *suave* que pasa a través de los puntos fijos de restricción. En términos de coordenadas cartesianas, la curva de mínima energía es aquella que minimiza la siguiente integral entre dos puntos

$$\int \frac{z^2}{(1+z^2)^2} dx \quad (2.2.4.1)$$

Si se asume que $z \ll 1$, la minimización es sobre $\int z^2 dx$ cuya solución es una función cúbica por segmentos, continua hasta su segunda derivada, que cumple perfectamente con la definición de spline, en este caso cúbico, y de ahí la importancia de los splines y en particular de los cúbicos.

En la práctica, se emplean los splines de grados pequeños ($k \leq 3$) para generar curvas que suavicen a los puntos especificados. Su empleo con polinomios de bajo

grado reduce los requerimientos de computación y reduce la inestabilidad numérica que surge con las curvas de grados altos. Sin embargo, ya que los polinomios de grados pequeños no pueden unir una serie arbitraria de puntos, se requiere entonces segmentos polinomiales adyacentes. Los splines cúbicos poseen la ventaja de ser las curvas espaciales de menor grado que permitan un punto de inflexión y tienen la habilidad de rotar en el espacio. La ecuación de un segmento de spline cúbico en términos de un parámetro t es la siguiente:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n B_i z^{i-1} \quad \text{donde } t_1 \leq t \leq t_2 \quad (2.2.4.2)$$

donde $P(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]$

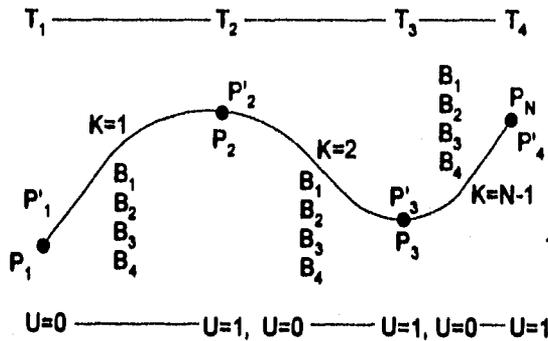


Figura 2.2.4.1 Componentes de una curva spline.

Condición en los extremos

Una condición es natural o relajada, cuando $\frac{d^2 P}{dt^2} = 0$ se aplica a los arcos inicial y final del spline completo an los valores de parametrización $t=0$ y $t=1$, lo cual produce alteración de continuidad de curvatura en las fronteras del spline.

También pueda ser útil que el spline sea *cíclico* para diseñar curvas cerradas, en cuyo caso pueden considerarse las condiciones

$$P_i'(0) = P_n'(t_n) \text{ donde } 0 \leq i \leq 2,$$

o anticíclico

$$P_i'(0) = -P_n'(t_n) \text{ donde } 0 \leq i \leq 2,$$

cada una de las cuales produce variaciones significativas en la forma de las curvas, principalmente al inicio y final de la misma.

Una consideración final que debe hacerse con respecto a los splines cúbicos se refiere a la existencia de oscilaciones que eliminan la suavidad de la curva, las cuales pueden eliminarse aplicando tensión por los extremos dando inicio a la teoría de splines bajo tensión, cuya principal objeción es que su formulación quede expresada en términos de funciones exponenciales en lugar de funciones polinomiales, por lo cual existe un impedimento para su evaluación eficiente. La oscilación sucede porque el spline se ve influenciado localmente por cada nodo a lo largo de la curva y la tercera derivada se mantiene constante en cada segmento. Las discontinuidades de la tercera derivada pueden inducir la generación de puntos de inflexión no deseados sobre la curva y así, ayudar a la generación de oscilaciones

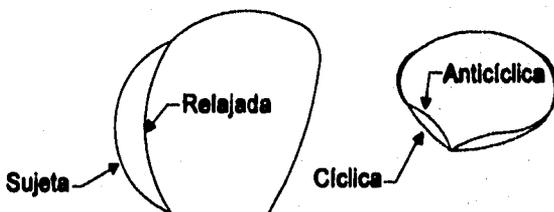


Figure 2.2.4.1 Splines bajo diversas condiciones en sus extremos

2.2.5 B-Splines

En los ambientes de Diseño Asistido por Computadora donde se cuenta con un modelador se torna evidente la necesidad de que éste incluya en sus expresiones facilidades para alterar localmente las formas.

La teoría de los splines no incluye la propiedad de control local de la forma, por lo que de existir una modificación en un vértice, es necesario recalcular el spline completo.

Si se tiene una base formada por splines que permite generar una curva o superficie como una combinación lineal de sus elementos, entonces se está generando un

sistema de diseño de curvas que mantiene las propiedades de los splines y agrega una nueva dimensión que se traduce en control local.

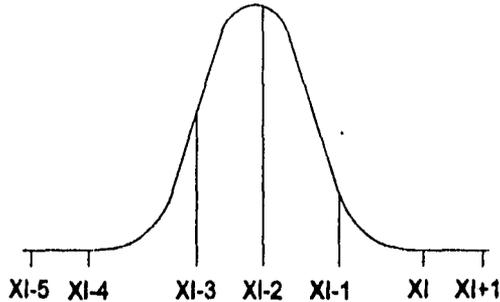


Figure 2.2.5.1 Spline cúbico sobre un número finito de arcos que se emplea para formar las funciones base de los B-Splines

Las curvas que consisten de un solo polinomio o segmento racional son frecuentemente inadecuadas. Sus limitaciones son [23]:

- Se requiere un grado muy elevado para satisfacer un número grande de restricciones; e.g. se requiere un grado de $n-1$ para pasar una curva polinomial de Bézier a través de n puntos. Sin embargo, las curvas de grado elevado son muy ineficientes al procesarlas y numéricamente inestables.
- Se requiere un grado elevado para modelar con exactitud algunas formas complejas.
- Las curvas de segmentos únicos no son adecuadas para el diseño interactivo de formas; aunque las curvas de Bézier pueden generarse a partir de sus puntos de control (y sus pesos), el control no es suficientemente local.

La solución es utilizar curvas (superficies) que sean *polinomiales en continuidad*, o *racionales en continuidad* [9].

Sea $U = \{u_0, \dots, u_m\}$ una secuencia no decreciente de números reales, i.e. $u_i \leq u_{i+1}, i = 0, \dots, m-1$. Las u_i se llaman *nudos* y U es el vector de nudos. La i -ésima función base B-Spline de grado p (orden $p+1$), denotado por $N_{i,p}(u)$, se define por

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{de otra forma;} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u) \quad (2.2.5.1)$$

Nótese que [23]:

- $N_{i,0}(u)$ es una función escalera, igual a cero siempre excepto en el intervalo medio abierto de $u \in [u_i, u_{i+1})$;
- Para $p > 0$, $N_{i,p}(u)$ es una combinación lineal de dos funciones base de grado $(p-1)$;
- El cómputo de un conjunto de funciones base requiere la especificación de un vector de nudos, U , y el grado, p ;
- La ec. 2.2.5.1 puede tener un cociente igual a $\frac{0}{0}$; se define este cociente igual a cero;
- Los $N_{i,p}(u)$ son polinomiales en continuidad, definidos enteramente sobre la línea de los reales; generalmente sólo el intervalo $[u_p, u_m]$ es de interés;
- El intervalo medio abierto $[u_i, u_{i+1})$, se la conoce como el *alcance i -ésimo del nudo*; puede tener longitud cero, ya que los nudos no necesitan ser distintos;
- El cómputo de las funciones de grado p genera una tabla triangular truncada de la forma

$N_{0,0}$			
	$N_{0,1}$		
$N_{1,0}$		$N_{0,2}$	
	$N_{1,1}$		$N_{0,3}$
$N_{2,0}$		$N_{1,2}$	
	$N_{2,1}$		$N_{1,3}$
$N_{3,0}$		$N_{2,2}$	\vdots
	$N_{3,1}$	\vdots	
$N_{4,0}$	\vdots		
\ddots			

Una curva B-Spline de grado p está definida por:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad a \leq u \leq b \quad (2.2.5.2)$$

donde los $\{P_i\}$ son los puntos de control y los $\{N_{i,p}(u)\}$ son las funciones base B-Spline de grado p definidas en el vector de nudos no-periódico (y no-uniforme):

$$U = \{ \underbrace{a_1, \dots, a_p}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b_1, \dots, b_p}_{p} \}$$

con $(m+1)$ nudos. Se considera que $a=0$ y $b=1$. El polígono formado por las $\{P_i\}$ se llama *polígono de control*.

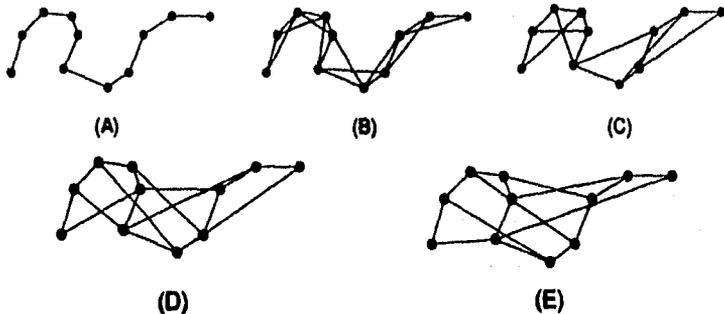


Figura 2.2.5.2 Una curva B-Spline de grado $m-1$ cae dentro de la región convexa definida por m vértices vecinos. (A) Lineal; (B) Cuadrático; (C) Cúbico; (D) $m=5$; (E) $5 \leq m$

Se requieren seguir tres pasos para calcular un punto en una curva B-Spline en un valor fijo de u :

1. Encuentra el segmento entre nudos donde se encuentra el punto
2. Calcula las funciones base diferentes de cero
3. Multiplica los valores de las funciones base diferentes de cero por los puntos de control correspondientes

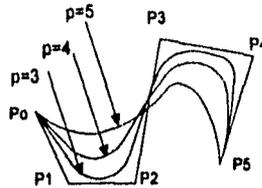


Figura 2.2.5.3 Curvas B-Spline de diferente grado, usando el mismo polígono de control.

Considérese como ejemplo una curva con $U = \{0,0,0,1,2,3,4,4,5,5,5\}$, $u = \frac{5}{2}$, y $p = 2$. Luego $u \in [u_4, u_4)$, y

$$N_{1,2}\left(\frac{5}{2}\right) = \frac{1}{8} \quad N_{3,2}\left(\frac{5}{2}\right) = \frac{6}{8} \quad N_{4,2}\left(\frac{5}{2}\right) = \frac{1}{8}$$

Multiplicando por los puntos de control se obtiene:

$$C\left(\frac{5}{2}\right) = \frac{1}{8}P_2 + \frac{6}{8}P_3 + \frac{1}{8}P_4$$

A continuación se listan algunas propiedades de las curvas B-Spline [9].

- P.1 Si $n = p$ y $U = \{0, \dots, 0, 1, \dots, 1\}$, luego $C(u)$ es una curva Bézier.
- P.2 $C(u)$ es una curva polinomial en continuidad (ya que $\{N_{i,p}(u)\}$ son polinomiales en continuidad); el grado, p , número de puntos de control, $n + 1$, y número de nudos, $m + 1$, se relacionan por

$$m = n + p + 1$$

- P.3 Interpolación en puntos finales: $C(0) = P_0$ y $C(1) = P_n$.
- P.4 Invarianza afina: incluyen rotaciones, traslaciones y escalamientos.
- P.5 Caparazón Fuerte.
- P.6 Esquema de modificación local.
- P.7 El polígono de control representa una aproximación a la curva.
- P.8 Al moverse a lo largo de la curva desde $u = 0$ hasta $u = 1$, las funciones actúan como switches; a medida que le u pasa por un nudo, una $\{N_{i,p}(u)\}$ se apaga y la siguiente se prende.
- P.9 Disminución de Invarianza: ninguna línea tiene más intersecciones con la curva que con el polígono de control.

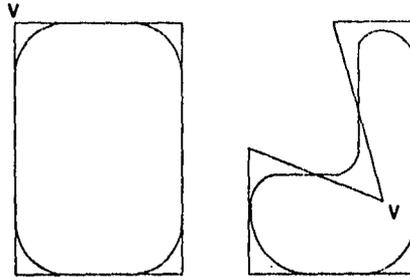


Figura 2.2.5.4 Alteración local de una curva B-Spline mediante el movimiento del vértice v

2.2.6 B-Splines Racionales (NURBS)

Las curvas racionales han empezado a utilizarse en algunos modeladores geométricos de gran difusión. Estas formulaciones tiene la ventaja de permitir crear formas libres y además incluir funciones bien conocidas, como las cuádricas.

Algunas razones para la aceptación generalizada y popularidad de los NURBS en la comunidad de gráficas y CAD/CAM son las siguientes [23]:

- Ofrecen una manera matemática para representar tanto formas analíticas estándar (cónicas, cuádricas, superficies de revolución, etc.) como curvas y superficies de forma libre. Por lo tanto las figuras analíticas y de forma libre son representadas precisamente, y puedan ser almacenadas en una sola base de datos unificada.
- Ya que permiten la manipulación de los puntos de control y los pesos, los NURBS poseen gran flexibilidad al diseño de una variedad muy grande de formas.
- La evaluación es rápida y computacionalmente estable.
- Los NURBS tienen una interpretación geométrica clara, lo cual es especialmente útil para los diseñadores.
- Los NURBS tienen ya una gama grande de herramientas geométricas que pueden usarse durante todo el proceso, para el diseño, análisis, proceso e interrogación de objetos.
- Los NURBS son invariantes a la escalaación, rotación, traslación y cortes, así como a las proyecciones paralela y de perspectiva.
- Los NURBS son una generalización genuina de las formas B-Spline no racionales así como de las curvas y superficies de Bézier racionales y no racionales.

Sin embargo, los NURBS tienen varias desventajas [27]:

- Se requiere almacenamiento extra para la definición de curvas y superficies tradicionales. Por ejemplo, para representar un círculo completo usando un

cuadrado que lo circunscribe se requieren 9 puntos de control y 12 nudos. La representación tradicional requiere el centro, el radio y el vector normal al plano del círculo. En 3D, esto significa guardar 38 y no 9 números.

- La aplicación inadecuada de pesos puede resultar en una parametrización muy mala, que puede destruir construcciones subsiguientes de superficies.
- Algunas técnicas de interrogación funcionan mejor con formas tradicionales que con los NURBS. Un ejemplo es la intersección superficies/superficie, ya que es especialmente difícil manejarlas cuando sólo se tocan y cuando se traslapan.
- Otros algoritmos fundamentales, como mapeo inverso de puntos están sujetos a inestabilidad numérica.

Sin embargo, los problemas mencionados no son peculiares de los NURBS, ya que otros esquemas de forma libre como los de Bézier, Coons y Gordon exhiben los mismos problemas.

¿Qué son los NURBS?

Las definiciones matemáticas de las curvas y superficies NURBS son relativamente simples. Una curva NURBS es una función polinomial racional de la forma [9]:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i P_i N_{i,p}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,p}(u)} \quad (2.2.6.1)$$

donde las w_i son los denominados pesos, los P_i son los puntos de control (igual que en el caso de las curvas no racionales) y las $N_{i,p}(u)$ son las funciones B-Spline básicas normalizadas de grado p definidas recursivamente como

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \Rightarrow u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \Rightarrow \text{de otra forma} \end{cases} \quad (2.2.6.2)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

donde u_i son los denominados nudos que forman el vector de nudos

$$U = \{u_0, u_1, \dots, u_m\} \quad (2.2.6.3)$$

El grado, número de nudos y el número de puntos de control se relacionan por la fórmula $m = n + p + 1$. Para los B-Splines no uniformes y no periódicos, el vector de nudos tiene la forma

$$U = \{\alpha, \alpha, \dots, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \beta, \beta, \dots, \beta\} \quad (2.2.6.4)$$

donde los nudos finales α y β se repiten con una multiplicidad $p + 1$.

En nuestra aplicación, $\alpha = 0$ y $\beta = 1$. Las funciones básicas (2.2.6.2) se definen sobre la línea completa, sin embargo el foco es sobre el intervalo $[0, 1]$. La curva NURBS (2.2.6.1) con el vector de nudos (2.2.6.4) es una curva tipo Bezier. Interpola en los puntos finales y es tangencial en los puntos finales a la primera y última pata del polígono de control. La mayoría de las propiedades de las curvas no racionales también aplican a los NURBS.

Propiedades Analíticas y Geométricas

La forma de la curva (2.2.6.1) puede reescribirse en una forma equivalente [9]:

$$C(u) = \sum_{i=0}^n P_i R_{i,p}(u) \quad (2.2.6.5)$$

$$R_{i,p}(u) = \frac{w_i N_{i,p}(u)}{\sum_{j=0}^n w_j N_{j,p}(u)} \quad (2.2.6.6)$$

donde $R_{i,p}(u)$ son funciones racionales de base. Sus propiedades analíticas determinan el comportamiento geométrico de las curvas. Las propiedades más significativas son:

- Generalización: si todos los pesos se hacen igual a 1, entonces

$$R_{i,p}(u) = \begin{cases} B_{i,p}(u) & U = \{0, 0, \dots, 1, 1, \dots, 1\} \\ N_{i,p}(u) & \text{de otra forma} \end{cases}$$

donde los 0's y 1's en U se repiten con multiplicidad $p + 1$, y $B_{i,p}(u)$ denotan los polinomios de Bernstein de grado p .

- Localidad: $R_{i,p}(u) = 0 \Rightarrow u \notin [u_i, u_{i+p+1}]$

- Partición de la Unidad: $\sum_i R_{i,p}(u) = 1$
- Diferenciabilidad: En el interior del alcance de un nudo, las funciones racionales de base son infinitamente diferenciables en forma continua si el denominador está lejos de cero. Estas son $p - k$ veces continuamente diferenciables en un nudo, siendo k la multiplicidad del nudo.

$$R_{i,p}(u; w_i = 0) = 0$$

$$R_{i,p}(u; w_i \rightarrow +\infty) = 1$$

$$R_{i,p}(u; w_j \rightarrow +\infty) = 0 \quad j \neq i$$

Como consecuencia la curva NURBS exhibirá las siguientes características geométricas:

- Los casos de Bézier y las curvas B-Splines no racionales son casos especiales.
- Aproximación local: si un punto de control es movido o un peso es cambiado, esto afectará la curva sólo en $p + 1$ alcances de nudo.
- Propiedad de Caparazón convexo fuerte: si $u \notin [u_i, u_{i+1}]$ entonces $C(u)$ quede dentro de la caparazón convexo de P_{i-p}, \dots, P_i .
- Invarianza bajo transformaciones afines y perspectiva.
- La misma propiedad de diferenciabilidad que las funciones base.
- Si un peso particular es puesto en cero, entonces el punto de control correspondiente no tendrá ningún efecto en la curva.
- Si $w_i \rightarrow \infty$, entonces

$$C(u) = \begin{cases} P_i & u \in [u_i, u_{i,p+1}) \\ C(u) & \text{de otra forma} \end{cases}$$

Invarianza Afina

Una transformación Afina generalizada es una transformación lineal (escalación, rotación, cortes) seguida de una traslación. Mas precisamente, $A[P] = L[P] + T$, donde P denota un punto general. Mostremos como los NURBS son invariantes bajo las transformadas afines:

$$A[C(u)] = L[C(u)] + T = \sum_i L[P_i] R_{i,p}(u) + T$$

Por otro lado,

$$\sum_i A[P_i] R_{i,p}(u) = \sum_i (L[P_i] + T) R_{i,p}(u)$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_i L[P_i]R_{i,p}(u) + T \sum_i R_{i,p}(u) \\
 &= \sum_i L[P_i]R_{i,p}(u) + T
 \end{aligned}$$

ya que las funciones racionales base suman 1. Combinando las dos ecuaciones tenemos:

$$A[C(u)] = \sum A[P_i]R_{i,p}(u)$$

Esto es, obtenemos la imagen afina de una curva NURBS transformando los puntos de control y dejando los pesos sin cambiar. Por ejemplo, las proyecciones paralelas de los NURBS se obtienen proyectando los puntos de control.

2.2.7 Cónicas y Círculos

Las secciones cónicas están entre las curvas más importantes en CAD/CAM. Una razón importante para usar NURBS es su aplicabilidad para representar precisamente segmentos cónicos así como cónicas completas. Empezamos con la representación de un segmento cuyas tangentes finales no sean paralelas. Ya que las curvas cónicas son curvas cuadradas, las representamos como un NURBS cuadrático [24]:

$$C(u) = \sum_{i=0}^2 P_i R_{i,p}(u)$$

donde las funciones racionales base se definen sobre el vector de nudos $U = \{0,0,0,1,1,1\}$. Estas funciones base son de hecho las de las curvas Bézier racionales. Por lo que la ecuación del NURBS cuadrático se reduce a:

$$C(u) = \frac{(1-u)^2 w_0 P_0 + 2u(1-u)w_1 P_1 + u^2 w_2 P_2}{(1-u)^2 w_0 + 2u(1-u)w_1 + u^2 w_2}$$

es la ecuación de una curva cónica y que el radio

$$\frac{w_1^2}{w_0 w_2} = \text{CSF}$$

es constante para un segmento particular. Este radio se le conoce como *factor de forma cónica*. El valor de CSF -no los valores individuales de los pesos- determina una cónica particular, de acuerdo a lo que sigue:

CSF < 1 , elipse
 CSF = 1 , parábola
 CSF > 1 , hipérbola

Para obtener un arco circular se requiere lo siguiente [25]:

- $P_0P_1P_2$ debe ser isósceles.
- Si $w_0 = w_2 = 1$,

$$\text{Entonces } w_1 = \frac{|P_0 + P_2|}{2|P_1 - P_0|} = \frac{e}{f},$$

$$\text{elno } CSF = \frac{e^2}{f^2}$$

Durante la construcción de segmentos cónicos, dos casos pueden ocurrir:

1. El segmento es una semielipse (círculo); esto es, los vectores finales tangentes son paralelos.
2. El segmento quede fuera del triángulo de control.

Las semielipse se definen por medio de la fórmula

$$C(u) = \frac{(1-u)^2 P_0 + u^2 P_2}{(1-u)^2 + u^2} + \frac{2u(1-u)V}{(1-u)^2 + u^2}$$

donde V es un vector de dirección paralelo a los vectores finales tangentes. Para evitar usar el vector de dirección, podemos insertar nudos para obtener puntos de control "normales".

Si el arco es elíptico y queda fuera del triángulo de control, entonces podemos representarlo como un arco complemento, usando un peso negativo. Insertando un nudo en $u = \frac{1}{2}$ remueve el peso negativo y crea un nuevo polígono de control que contiene al arco en su caparazón convexo.

Podemos pegar los segmentos para obtener curvas cónicas completas. Por ejemplo, el círculo está compuesto de 4 segmentos, cada uno rotado 90 grados. La representación del círculo es:

$$C(u) = \sum_{i=0}^4 P_i R_{i,\theta}(u)$$

donde los puntos de control forman un cuadrado, y

$$U = \{0, 0, 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, 1, 1\}$$

$$w_i \Big|_{i=0}^6 = \{1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1\}$$

La elipse completa se obtiene del círculo por medio de una transformación afina. Ya que el mapa afín de una curva NURBS se obtiene al transformar los puntos de control y dejando los pesos sin cambiar, la elipse se describe por un rectángulo circunscrito usando los mismos vectores de peso y nudos.

La fórmula invariante para formas cónicas es:

$$CSF = \frac{(u_{i,3} - u_{i,1})(u_{i,2} - u_i)w_i^2}{[(u_{i,2} - u_{i,1})w_{i-1} + (u_{i,1} - u_i)w_i][(u_{i,3} - u_{i,2})w_i + (u_{i,2} - u_{i,1})w_{i+1}]}$$

3. Características de Recipientes de Proceso

3.1 Conceptos Básicos

Los recipientes son contenedores o envoltantes estructurales en donde se manejan materiales que son procesados, tratados, o almacenados. Por ejemplo: recipientes a presión, recipientes a reacción, recipientes agitadores y recipientes para almacenamiento (Tanques) [17].

Se considera como un recipiente a presión cualquier vasija cerrada que sea capaz de almacenar un fluido a presión manométrica, ya sea presión interna o vacío, independientemente de su forma y dimensiones.

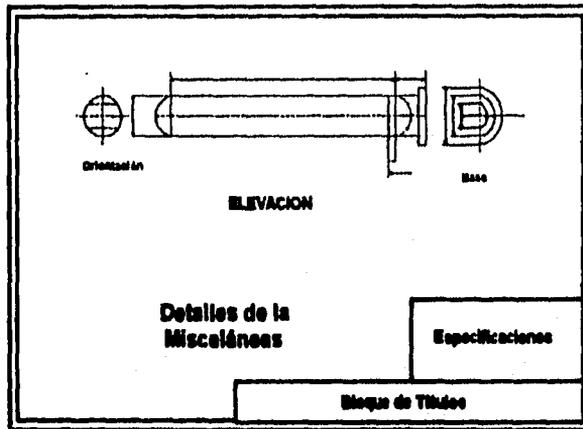


Figura 3.1.1 Vista general en plano de un Recipiente Vertical

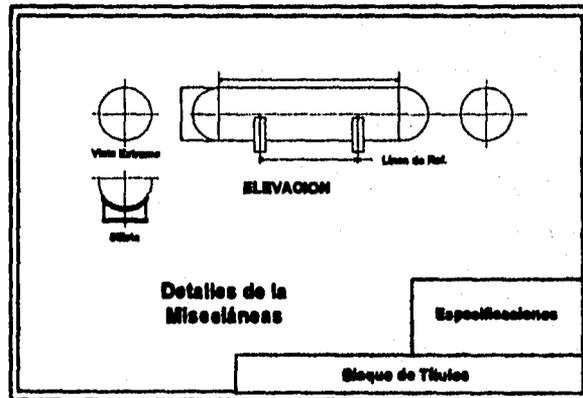


Figura 3.1.2 Vista general en plano de un Recipiente Horizontal

El cuerpo es un elemento estructural hecho para encerrar algún elemento o material en un espacio. La forma más común de fabricación de cuerpos es an base a la revolución de un plano curvo de acero (cilindro).

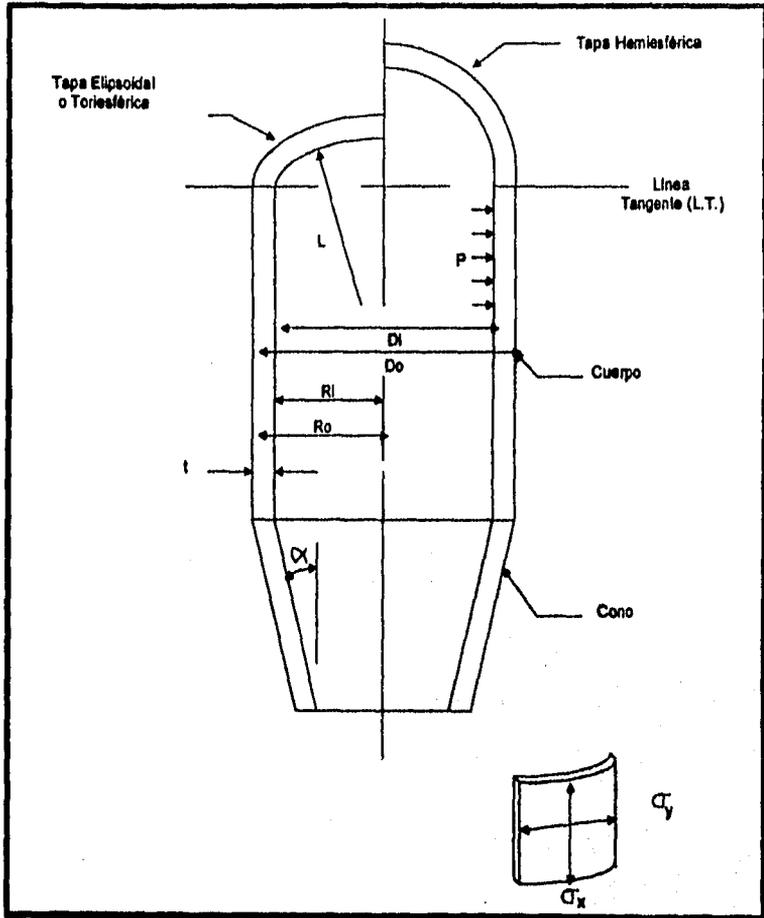


Figura 3.1.3 Configuración General y Datos de dimensiones para cuerpos y tapas de recipientes [21]

P = Presión Interna, psi
 DI, Do = Diámetro Interno/Externo, in.
 L = Radio de la corona, in.
 RI, Ro = Radio Interno/Externo, in.
 σ_x = Esfuerzo longitudinal, psi
 σ_y = Esfuerzo circunferencial, psi
 t = espesor del cuerpo, tapa o cono, in.

Las cabezas o tapas se ubican en los dos extremos (terminal cerrada) de un cuerpo cilíndrico. Los tipos de tapas más comunes utilizados son las siguientes: semiesférica, elipsoidal, bridada (aramante), torisférica, cónica y plana.

Los soportes son elementos estructurales que sostienen a los recipientes. Los recipientes verticales generalmente son sostenidos por faldón y/o por patas. Los recipientes horizontales generalmente están sostenidos por silletas.

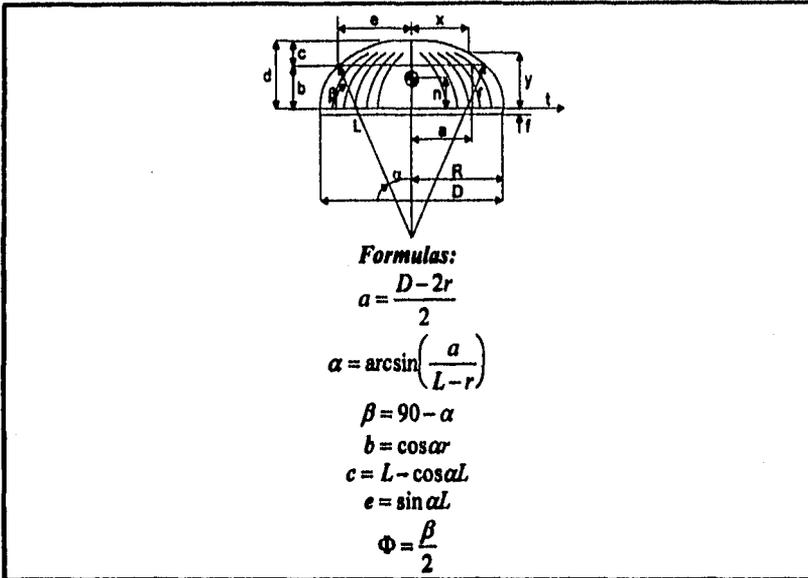
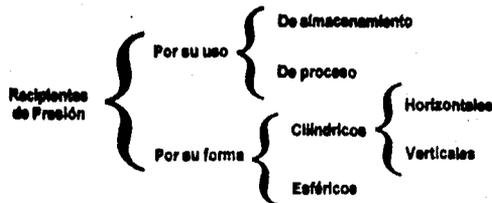


Figura 3.1.4 Propiedades de las Tapas [21]

3.2 Recipientes

Los recipientes de presión se pueden clasificar de la siguiente forma [21]:



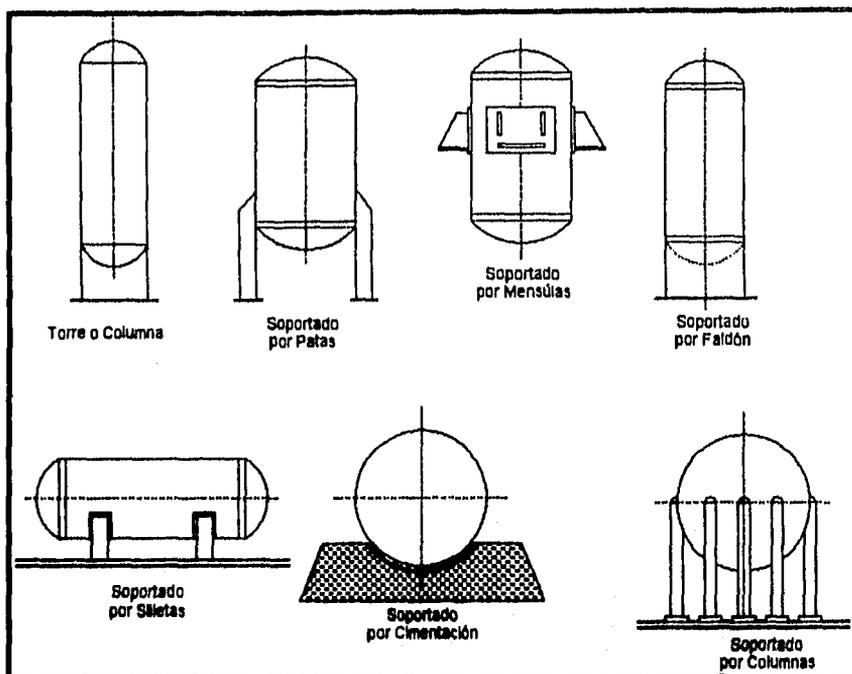


Figure 3.2.1 Formas y Posiciones de un recipiente

Por su uso se dividen en recipientes de almacenamiento y en recipientes de proceso.

Los primeros sirven únicamente para almacenar fluidos a presión, y de acuerdo con su servicio son conocidos como tanques de almacenamiento, tanques de día, tanques acumuladores, etc.

Los recipientes a presión de proceso tienen múltiples y muy variados usos, entre ellos son los intercambiadores de calor, reactores, torres fraccionadoras, torres de destilación, etc.

Por su forma, los recipientes a presión, pueden ser cilíndricos o esféricos. Los primeros pueden ser horizontales o verticales, y pueden tener, en algunos casos, chequetas para incrementar o decrecer la temperatura de los fluidos según el caso.

Los recipientes esféricos se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento, y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes a altas presiones.

Puesto que la forma esférica es la forma "natural" que toman los cuerpos al ser sometidos a presión interna, esta sería la forma más económica para almacenar fluidos a presión, sin embargo, la fabricación de este tipo de recipientes es mucho más cara en comparación con los recipientes cilíndricos.

3.3 Tapas

Para "cerrar" recipientes cilíndricos, existen varios tipos de tapas, entre otras tenemos las siguientes: Tapas planas, planas con ceja, únicamente abombadas, abombadas con ceja invertida, torisféricas, semielípticas, semiesféricas, tapas cónicas, toricónicas, etc.

3.3.1 Tipos de Tapas para Tanques

Los tipos de tapas para Tanques son:

Tapas Planas

Se utilizan para "cerrar" recipientes sujetos a presión atmosférica generalmente, aunque en algunos casos se usan también en recipientes a presión. Su costo entre las tapas es el más bajo, se utilizan también como fondos de tanques de almacenamiento de grandes dimensiones.

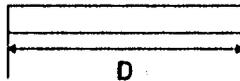


Figura 3.3.1 Ejemplo de Tapa Plana

Tapas Planas con Ceja

Al igual que las anteriores, se utilizan generalmente para presiones atmosféricas, su costo también es relativamente bajo, y tienen un límite dimensional de 6 metros de diámetro máximo.

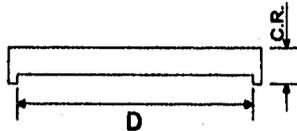


Figura 3.3.2 Ejemplo de Tapa Plana con Ceja

Tapas únicamente Abombadas

Son empleadas en recipientes a presión manométrica relativamente baja, su costo puede considerarse bajo, sin embargo, si se usan para soportar presiones relativamente altas, será necesario analizar la concentración de esfuerzos generada al efectuar un cambio brusco de dirección.

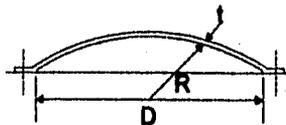


Figura 3.3.3 Ejemplo de Tapa únicamente Abombadas

Tapas Abombadas con Ceja Invertida

Su uso es limitado debido a su difícil fabricación, por lo que su costo es alto, siendo empleadas solamente en casos especiales.

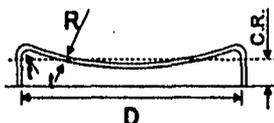


Figura 3.3.4 Ejemplo de Tapa Abombada con Ceja

3.3.2 Tipos de Tapas para Recipientes a Presión

Los tipos de Tapas para Recipientes a presión caen dentro de estas tres categorías generales: hemisféricas, torisféricas y elipoidales.

Las características principales y usos de estas tapas son [17]:

Tapas Hemisféricas

Utilizadas exclusivamente para soportar presiones críticas. Como su nombre lo indica, su elipse describe una media circunferencia perfecta. su costo es alto y no hay límite dimensional para su fabricación.

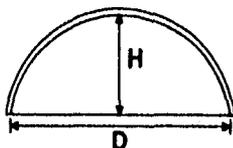


Figura 3.3.5 Ejemplo de Tapa Hemisférica

Tapas Torisféricas

Son las que mayor aceptación tienen en la industria, debido a su bajo costo y a que soportan altas presiones manométricas, su característica principal es que el radio de abombado es aproximadamente igual al diámetro. Se pueden fabricar en diámetros desde 0.3 hasta 6 metros.

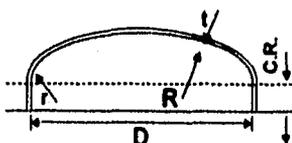


Figura 3.3.6 Ejemplo de Tapa Torisférica

Tapas Semiélticas

Son empleadas cuando el espesor calculado de una tapa toriesférica es relativamente alto, ya que las tapas semiélticas soportan mayores presiones que las toriesféricas. El proceso de fabricación de estas tapas es el troquelado, su silueta describe una elipse relación 2:1, su costo es alto y en México se fabrican hasta un diámetro máximo de 3 metros.

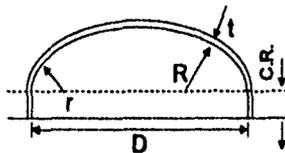


Figura 3.3.7 Ejemplo de Tapa Semiéltica

Tapas Cónicas

Se utilizan, generalmente, en fondos donde pudiera haber acumulación de sólidos y como transiciones en cambios de diámetro de recipientes cilíndricos. Su uso es muy común en torres fraccionadoras o de destilación, no hay límite en cuanto a dimensiones para su fabricación y su única limitación consiste en que el ángulo del vértice no deberá ser mayor de 60° . Las tapas cónicas con ángulo mayor de 60° en el vértice, deberán ser calculadas como tapas planas. Deberá tenerse la precaución de reforzar las uniones cono-cilindro

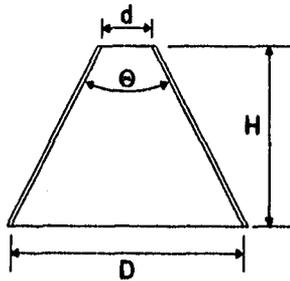


Figura 3.3.8 Ejemplo de Tapa Cónica

Tapas Toricónicas

A diferencia de las tapas cónicas, este tipo de tapas tiene en su diámetro mayor un radio de transición que no deberá ser menor al 6% del diámetro del diámetro mayor o 3 vértices el espesor. Tiene las mismas restricciones que la tapa cónica a excepción de que en México no se pueden fabricar con un diámetro mayor de 6 metros.

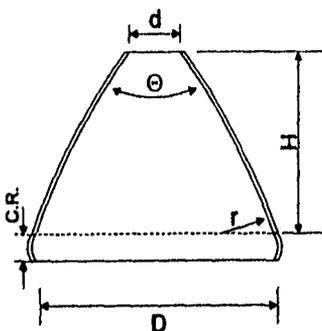


Figura 3.3.9 Ejemplo de Tapa Toricónica

3.4 Boquillas y Bridas

Todo los recipientes a presión deberán estar provistos de boquillas y conexiones de entrada y salida del producto, válvula de seguridad, entrada de hombre, venteo, etc., A continuación se enlistan algunas de las boquillas que se deben instalar en los recipientes a presión (17):

- A.- Entrada (s) de producto.
- B.- Salida (s) de producto.
- C.- Drene.
- D.- Venteo.
- E.- Entrada (s) de hombre.
- F.- Conexión para válvula de seguridad.
- G.- Conexión para manómetro.
- H.- Conexión para termómetro (termopozo).
- I.- Conexiones para indicadores de nivel.
- J.- Conexiones para control de nivel. etc.

De acuerdo con el tipo de recipiente a presión de que se trate, éstos pueden tener una o varias boquillas de las antes mencionadas. Los diagramas de tubería e instrumentación indicarán cuantas boquillas, de que diámetro y para que servicio se deben instalar en dichos recipientes.

En concordancia con el Código ASME Sección VIII División 1, todas las boquillas mayores de 3 pulgadas de diámetro, instaladas en recipientes a presión, deberán tener una placa de refuerzo en la unión del cuello de la boquilla con el recipiente. En México se ha hecho una costumbre reforzar también las boquillas de 3 pulgadas, lo cual es aconsejable.

Para instalar una boquilla, en un recipiente a presión, es necesario hacer un agujero en el cuerpo o tapa en que se vaya a instalar. Al efectuar este agujero se está eliminando área y las líneas de esfuerzos que pasaban por el área que se está eliminando pasarán tangentes al agujero practicado, ocasionando con ello una concentración de esfuerzos en la periferia de dicho agujero. Para evitar fallas en la periferia de donde se practico el agujero, es necesario reponer el material que se quitó.

3.4.1 Selección de Bridas para Boquillas

Se recomienda que las boquillas de 1-1/4" de diámetro y menores sean instaladas por medio de coples roscados de 3,000 y 6,000 libras/pulgada². Las boquillas de 1-1/2" y mayores, deberán ser bridadas.

De acuerdo a la forma de unir las bridas a los cuellos de las boquillas, existen los siguientes tipos de bridas [17]:

- 1.- Brida de cuello soldable. (Welding Neck)
- 2.- Brides deslizables. (Slip-On)
- 3.- Brida de traslape. (Lap-Joint)
- 4.- Bridas roscadas. (Threaded)
- 5.- Bridas de enchufe soldable. (Socket Welding)
- 6.- Bridas de orificio.
- 7.- Bridas ciegas. (Blind)
- 8.- Bridas especiales.

Bridas de cuello soldable. (Welding Neck)

Se distinguen de las demás por su cono largo y por su cambio gradual de espesor en la región de la soldadura que las une al tubo. El cono largo suministra un refuerzo importante a la brida desde el punto de vista resistencia. La ligera transición desde el espesor de la brida hasta el espesor de la pared del tubo, efectuado por el cono de la brida, es extremadamente benéfico bajo los efectos de flexión repetida, causada por la expansión de la línea u otras fuerzas variables y produce una resistencia de duración equivalente a la de una unión soldada entre tubos.

Por lo anterior, este tipo de brida se prefiere para todas las condiciones severas de trabajo, ya sea que éste resulte de altas presiones o de temperaturas elevadas o menores de cero, ya sea también para condiciones de carga que sean sustancialmente constantes o que fluctúen entre límites amplios. Las bridas de cuello soldable se recomiendan para el manejo de fluidos explosivos, inflamables o costosos, donde una falla pueda ser acompañada de desastrosas consecuencias.

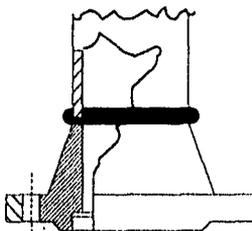


Figura 3.4.1 Ejemplo de Brida de Cuello Soldable

Bridas deslizables. (Slip-On)

Estas bridas se prefieren sobre las de cuello soldable, debido a su costo más bajo, a la menor precisión requerida al cortar los tubos a la medida, a la mayor facilidad de alineamiento en el ensamble y a que su costo de instalación final es menor que las bridas de cuello soldable. Su resistencia calculada bajo presión interna, es del orden de $2/3$ de las anteriores y su vida bajo condiciones de fatiga es aproximadamente $1/3$ de las últimas.

Por estas razones las bridas deslizables en presiones de 1,500 libras/pulgada² existen solamente en diámetros de $1/2"$ a $2-1/2"$, y no existen en presiones de 2,500 libras/pulgada². El manual de construcción de calderas ASME, limita su uso a $4"$ de diámetro.

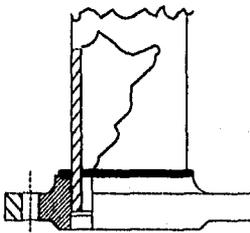


Figura 3.4.2 Ejemplo de Brida Deslizable

Bridas de Tralepe. (Lap-Joint)

Generalmente se instalan en tuberías de acero inoxidable o aleaciones especiales. Siempre que se utilice este tipo de brida, debe acompañarse de un extremo adaptador (stub-end). También se usa este tipo de bridas traslapadas cuando las tuberías no son paralelas a los ejes de los recipientes.

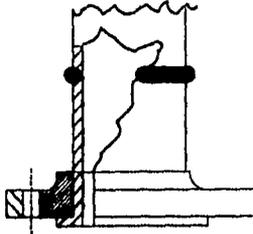


Figura 3.4.3 Ejemplo de Brida de Traslape

Bridas roscadas. (Threaded)

Se usan para unir tuberías difíciles de soldar, como aluminio, PVC, etc; Se recomienda usarlas en diámetros menores de 6". Las bridas roscadas son inconvenientes para condiciones que involucran temperaturas o esfuerzos de flexión de cualquier magnitud, particularmente bajo condiciones cíclicas donde pueda haber fugas a través de las cuerdas en pocos ciclos de esfuerzo o calentamiento.

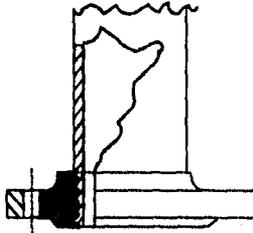


Figura 3.4.4 Ejemplo de Brida Roscada

Bridas de Enchufe Soldable. (Socket Welding)

Cuando se manejan fluidos tóxicos, altamente explosivos, muy corrosivos o aquellos que al existir fugas provocarían gran riesgo, debemos usar bridas de este tipo. También es recomendable usarlas en tuberías que trabajen a muy altas presiones.

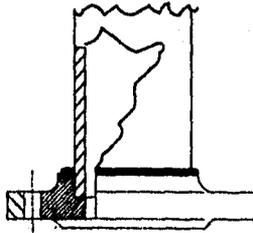


Figura 3.4.5 Ejemplo de Brida de Enchufe Soldable

Bridas ciegas. (Blind)

Se usan para cerrar los extremos de boquillas, tuberías y válvulas. Desde el punto de vista de presión interna y fuerzas ejercidas sobre los pernos, estas bridas, principalmente en tamaños grandes, son las que están sujetas a esfuerzos mayores. Al instalar las bridas ciegas debe tomarse en consideración la temperatura y el golpe de ariete, si existiera.

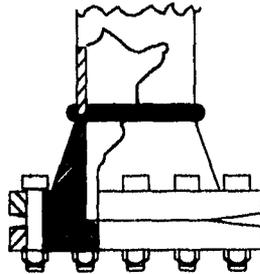


Figura 3.4.6 Ejemplo de Brida Ciega

Bridas especiales.

Cuando una brida no corresponde a los tipos antes mencionados, se le llamará brida especial. Su uso es muy común en cambiadores de calor, cuyos diámetros no correspondan generalmente a los estandarizados de bridas.

3.4.2 Tipos de Caras de Bridas

De acuerdo con la presión y fluido que se maneje, se debe seleccionar el tipo de cara que tendrán las bridas que se instalarán en recipientes a presión. Los tipos de cara de bridas más comunes son:

- 1.- Cara plana. (Flat Face)
- 2.- Cara realzada. (Raised Face)
- 3.- Cara machihembra. (Male and Female)
- 4.- Cara de Ranura y Lengüeta. (Tongue and Groove)
- 5.- Cara de junta de anillo. (Ring Joint)

Bridas de cara plana

Se usan generalmente para bajas presiones y cuando la brida será recubierta con algún material como hule, vidrio, etc

Bridas de cara realzada

Son las de uso más común, en recipientes a presión, ya que el realce ayuda a tener un buen sellado entre caras.

Las bridas de cara machihembra, ranura y lengüeta y junta de anillo, se usan en recipientes y tuberías que manejen fluidos tóxicos, explosivos y peligrosos en general, donde las fugas del fluido manejado representen grandes riesgos.

Al instalar estos tipos de bridas en recipientes a presión, se recomienda unir la brida "hembra" al recipiente y la "macho" a la tubería.

3.5 Soportes

Todos los recipientes a presión deben de estar soportados o estar sostenidos por algún elemento estructural (antes mencionado) y para ello existe distintos soportes como son los faldones, ménsulas, patas y silletas, entre otros.

El faldón es el soporte más utilizado y que satisface comúnmente los requerimiento de los recipientes verticales. Es ensamblado con soldadura continua a la tapa del recipiente y usualmente el tamaño requerido determina el espesor del faldón [17].

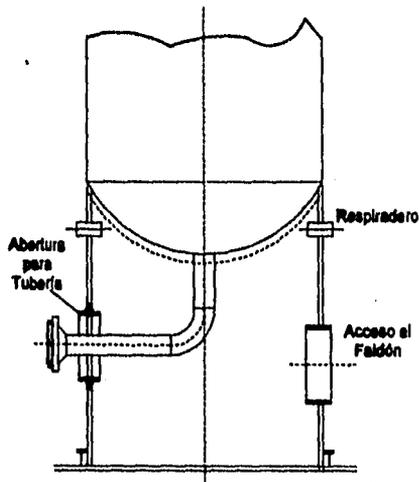


Figura 3.5.1 Detalle de Faldón

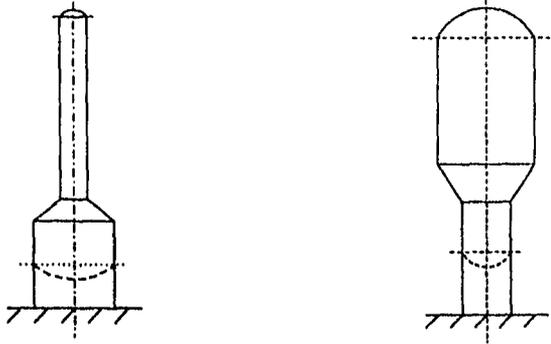


Figura 3.5.2 Tipos de Faldón No Uniformes

La ménsulas ofrecen un menor gasto y el soporte más directo para el recipiente. Estos soportes pueden absorber directamente las expansiones por deslizamiento sobre el engrasado o piezas bronceadas, es fácilmente conectado el recipiente con cantidades pequeñas de soldadura, como también es fácil la nivelación y/o iluminario en campo.

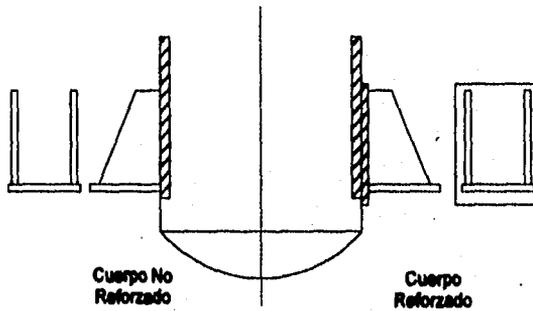


Figura 3.5.3 Tipos de Ménsulas

Dos u cuatro ménsulas son comúnmente empleadas, aunque pueden ser utilizadas más, dependiendo de la carga.

La ménsula pueda tener tener una placa superior, llamada placa de compresión, y una o dos placas de refuerzo o de unión en las juntas.

El soporte tipo patas generalmente es empleado en recipientes cilíndricos verticales de pequeñas dimensiones, por lo tanto de poco peso, por lo que las columnas verticales son casi siempre de pequeñas secciones, sin embargo desde el punto de vista estético, se puede incrementar la sección resultante en las columnas.

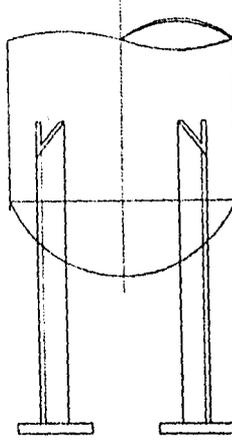


Figura 3.5.4 Típico Soporta de Pata

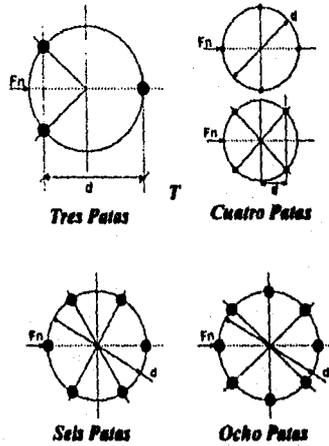


Figura 3.5.5 Posiciones de Patas

Desde el punto de vista estático y económico, es preferible en recipientes horizontales el uso de dos silletes únicamente, y esto es posible mediante anillos atisadores en el recipiente, cuando se usan más de dos silletes como soporte, se corre el riesgo de que se "sienten" y en vez de ayudar a soportar el equipo, los soportes serán soportados por éste, involucrando cargas que originalmente no se habían considerado.

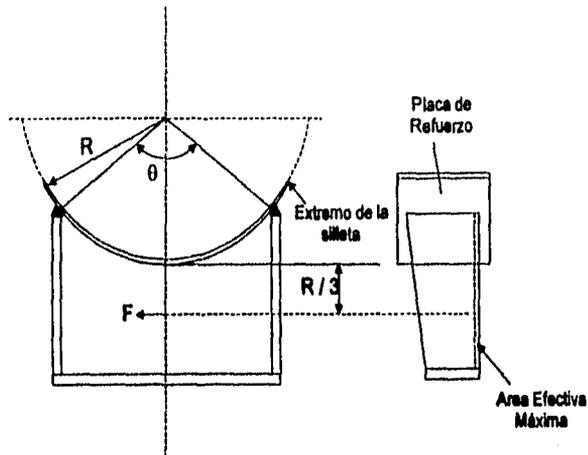


Figura 3.5.6 Tipos de Silleta en Forma General

La localización de las silletas está determinada algunas veces por la posición de las boquillas o sumideros en el fondo del recipiente, al ese no es el caso, las silletas podrían estar localizadas en el lugar óptimo desde el punto de vista estático.

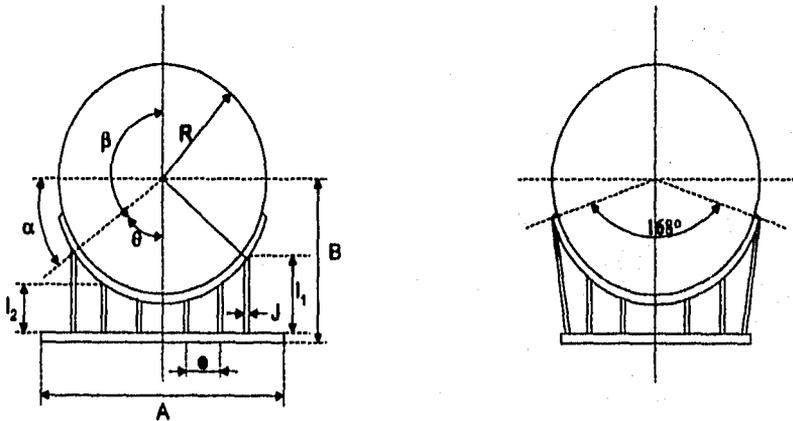


Figura 3.5.7 Dimensiones de un Recipiente Horizontal y Silleta

3.6 Accesorios

Los accesorios son dispositivos que se le colocan al recipiente para adecuarlo a una función especializada: A continuación se muestran varios tipos de accesorios [20]:

Eliminador de Vórtices

El propósito del eliminador de vórtices, es la supresión de los remolinos formados por los líquidos al momento de salir por la boquilla de salida o de descarga.

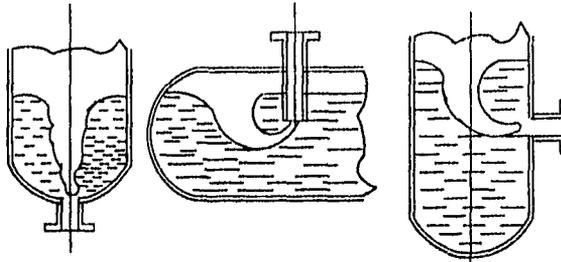


Figura 3.6.1 Ejemplos de Eliminador de Vórtices

Eliminador de Humedad

El propósito del eliminador de humedad, es la separación de humedad, vapor, gases, etc. que son desprendidos de la ejecución de los procesos químicos realizados por los equipos.

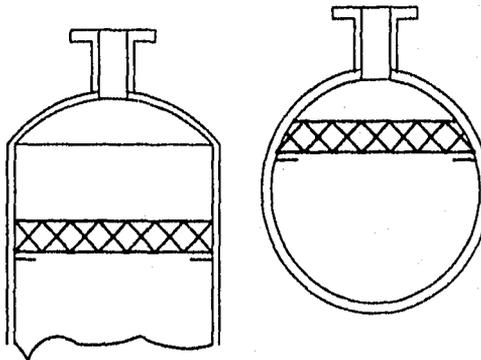


Figura 3.6.2 Ejemplos de Eliminador de Humedad

Como se observa también se eliminan los vapores de la descarga superior de los recipientes

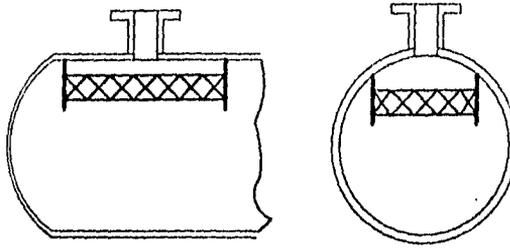


Figura 3.6.3 Otros ejemplos de Eliminador de Humedad

La identificación de los recipientes proporcionando datos generales de operación del equipo se detalla en la placa nombre.

Perfiles estructurales

En cuanto a los soportes de los equipos es importante el uso de los perfiles estructurales, y estos son utilizados para reforzar la estructura que carga al equipo, a continuación, se muestran algunos ejemplos de ellos:

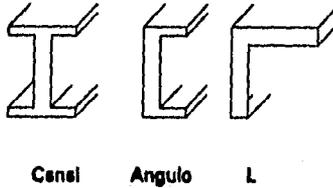


Figura 3.6.4 Ejemplo de Perfiles Estructurales

Reductor

Es utilizado como conexión de un tubo con el otro, es decir, elemento que sirve como acoplador de los tubos de diferentes diámetros.

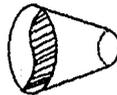


Figura 3.6.5 Ejemplo de un Reductor

Te

Es utilizado para unir dos flujos de distintas direcciones a una sola dirección.

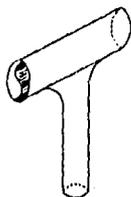


Figura 3.6.6 Ejemplo de una T

Codo

Pedazo de tubería con una curvatura especificada para la unión de dos tubos de un mismo diámetro.



Figura 3.6.7 Ejemplo de un Codo

Tapón

Elemento que taponas un extremo de la tubería para poder ser utilizado como una ampliación de la planta, o bien, como mantenimiento.



Figura 3.6.8 Ejemplo de un Tapón

3.7 Código ASME

El principal código utilizado en México, Estados Unidos de Norteamérica y en muchos otros países del mundo, es el "CODIGO ASME SECCION VIII DIVISION 1". Este Código es publicado por la Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos, su edición es trianual; 1966, 1968, 1971, 1974, 1977, 1980, 1983,..... sin embargo, la asociación antes mencionada emite ediciones trimestrales las cuales modifican constantemente el Código, manteniéndolo siempre actualizado [20].

El Código para calderas y recipientes a presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (A.S.M.E.), se originó por la necesidad de proteger a la sociedad de las continuas explosiones de calderas que se sucedían antes de reglamentar su diseño y construcción.

Inglaterra fué uno de los primeros países que sintió esta necesidad, y fue después de uno de los más grandes desastres que sufrió la ciudad de Londres al explotar una caldera en el año de 1815. La investigación de las causas de esta explosión la llevó a cabo la Cámara de los Comunes por medio de un Comité, el cual, después de agotar todas sus pesquisas, logró establecer tres de las principales causas del desastre: Construcción Inapropiada, material inadecuado y aumento gradual y excesivo de la presión. Al final de su informe, dicho Comité recomendaba el empleo de tapas semlesféricas, el hierro forjado como material de construcción, y el empleo de dos válvulas de seguridad.

En los Estados Unidos de Norteamérica, las personas dedicadas a la fabricación de calderas, se agruparon en una asociación en el año de 1889; Esta Asociación nombró un Comité encargado de preparar reglas y especificaciones, en las que se basara la fabricación en taller de las calderas. Como resultado de los estudios hechos por este Comité, se presentó ante la Asociación un informe en el que se cubrían temas como: Especificaciones de materiales, armado por medio de remaches, factores de seguridad, tipos de tapas y de bridas, así como reglas para la prueba hidrostática.

No obstante los dos intentos anteriores por evitar las explosiones de calderas, éstas seguían sucediendo, A principios de este siglo, tan solo en los Estados Unidos de Norteamérica, ocurrieron entre 350 y 400, con tramandas pérdidas de vidas y propiedades. Llegó a ser costumbre que la autorización para usar una caldera la diera el cuerpo de bomberos. Hasta la primera década de este siglo, las explosiones de calderas habían sido catalogadas como "Actos de Dios". Era necesario pues, la existencia de un Código legal sobre calderas.

El 10 de marzo de 1905, ocurrió la explosión de una caldera de una fábrica de zapatos en Crocktown, Massachussetta, matando a 58 personas, hirviendo a otras 117, y con pérdidas materiales de más de un cuarto de millón de dólares. Este accidente catastrófico hizo ver a las gentes de Massachussetts la imperiosa necesidad de legislar sobre la construcción de calderas para garantizar su seguridad. Después de muchos debates y discusiones públicas, el Estado promulgó, en 1907, el primer Código legal de reglas para la construcción de calderas de vapor, al año siguiente, el Estado de Ohio aprobó un reglamento similar.

Otros Estados y Ciudades de La Unión Americana que habían padecido explosiones similares, se dieron cuenta que éstas podían evitarse mediante un buen diseño y una fabricación adecuada, y también se dieron a la tarea de formular reglamentos para este propósito. De esta manera, se llegó a una situación tal, que cada Estado, y aún cada ciudad interesada en este asunto, tenía su propio reglamento. Como los reglamentos difarían de un estado a otro, y a menudo estaban en desacuerdo, los fabricantes empezaron a encontrar difícil el fabricar un equipo con el reglamento de un Estado que pudiera ser aceptado por otro. Debido a esta falta de uniformidad, en 1911, los fabricantes y usuarios de calderas y recipientes a presión, apalaron ante el concilio de la ASME, para corregir esta altuación. El Concilio respondió a esto nombrando un Comité "Para que formule especificaciones uniformes para la construcción de calderas de vapor y otros recipientes a presión especificados para su cuidado en servicio".

El comité estaba formado por siete miembros, todos ellos de reconocido prestigio dentro de sus respectivos campos, un ingeniero de seguros para calderas, un fabricante de materiales, dos fabricantes de calderas, dos profesores de ingeniería y un ingeniero consultor. El Comité fué asesorado por otro Comité en calidad de consejero, formado de 18 miembros que representaban varias fases del diseño, construcción, instalación y reparación de calderas.

Basándose en los reglamentos de Massachussetta y de Ohio y en otros datos de utilidad, el Comité presentó un informe preliminar en 1913, y envió 2,000 copias de él, a los profesores de Ingeniería Mecánica, e departamentos de Ingeniería de compañías de seguros

de calderas, a jefes de inspectores de los departamentos de inspección de calderas de Estados y Ciudades, a fabricantes de calderas, a editores de revistas de ingeniería y a todos los interesados en la construcción y operación de calderas, pidiendo sus comentarios.

Después de tres años de innumerables reuniones y audiencias públicas, fué adoptado en la primavera de 1925, el Primer Código ASME, "Reglas para la Construcción de Calderas Estacionarias y para las Presiones Permisibles de Trabajo", conocido como la edición 1914.

Desde entonces el Código ha sufrido muchos cambios y se han agregado muchas secciones de acuerdo a las necesidades. Las secciones han aparecido en el siguiente orden:

Sección I	Calderas de Potencia (Power Boilers)	1914
Sección II	Especificaciones de Materiales (Material Specifications)	1924
Sección III	Calderas de Locomotoras (Boilers of Locomotives)	1921
Sección IV	Calderas para Calefacción baja presión (Low-Pressure Heating Boilers)	1923
Sección V	Calderas en miniatura (Miniature Boilers)	1922
Sección VI	* Inspección (Inspection)	1924
Sección VII	Reglas sugeridas para el cuidado de las calderas de potencia (Suggested Rules for care of Power Boilers)	1926
Sección VIII	Recipientes a Presión no sometidos a fuego directo (Unfired Pressure Vessels)	1925
Sección IX	** Requisitos de Soldadura (Welding Qualifications)	1940

* Esta sección estuvo incorporada a la sección I desde su aparición hasta 1949, finalmente fue cancelada en 1952.

** La Primera vez que apareció esta sección, fué en 1937 como suplemento al Código.

El aumento de secciones en el Código, refleja el progreso de la industria en este campo. Se ha conservado un crecimiento espontáneo y se han requerido revisiones constantes.

Como ilustración se aclara que en 1914 las calderas se operaban a una presión máxima de 20 Kg/cm² (285 psi) y a temperaturas de 300°C (572°F), actualmente estas se diseñan para presiones tan altas como son 305 $\frac{Kg}{cm^2}$ (4,331 psi) y a temperaturas de 600°C (1,112°F); Los recipientes se diseñan para presiones de 200 kg/cm² (2,845 psi) y a un rango de temperatura entre -210°C a 550°C (de -348°F a 1,022°F)

Cada nuevo material, cada nuevo diseño, cada nuevo método de fabricación, cada nuevo sistema de protección, trae consigo nuevos problemas de estudio para el Comité del Código, exigiendo la experiencia técnica de muchos Sub-Comités, para expedir nuevos suplementos y nuevas revisiones al Código. Como resultado del espléndido trabajo de esos Sub-Comités, el Código ASME ha desarrollado un conjunto de Normas que garantizan cualquier diseño y cualquier construcción de calderas y recipientes a presión dentro de los límites del propio Código.

El Comité fué consultado para desarrollar las bases lógicas para establecer los valores de esfuerzos permisibles. De 1958 a 1962, el Comité especial Interrumpió sus trabajos para preparar la Sección III, el Código para Recipientes Nucleares. Su labor original fué terminada en 1968 con la publicación de la Sección VIII División 2. En esta División, los esfuerzos permisibles están basados en un coeficiente de seguridad aproximadamente igual a tres.

El Código ASME Sección VIII División 1, especifica Claramente algunas limitaciones, entre las principales se tienen:

- **Espesor mínimo;** Se establece que para recipientes construidos en acero al carbón, el espesor mínimo será de 3/32" independientemente de su uso, ya que para algunos casos particulares, se especifican espesores mínimos diferentes.
- **La relación R/T ≥ 10**
- **Los recipientes diseñados y construidos bajo este Código no deberán tener elementos principales móviles, ya sea rotatorios o reciprocantes, razón por la cual se excluyen del alcance del mismo las bombas, compresores, turbinas, y cualquier equipo que tenga elementos principales móviles.**
- **El volumen mínimo que deberán tener los recipientes a presión diseñados y construidos bajo este Código deberá ser de 120 galones.**
- **La presión mínima a que deberán diseñarse los recipientes será de 15 PSIG. (1 atmósfera).**
- **El diámetro interior mínimo será de 6".**
- **La presión máxima de diseño será de 3,000 PSIG.**
- **Deberán ser estacionarios.**

4. Ambiente de Diseño

El sistema prototipo tiene plena funcionalidad para la generación de dibujos de recipientes en un ambiente de producción de una compañía de Ingeniería. Si se considere completo al conjunto formado por los componentes NURBS, los bloques y las Construcciones Geométricas (CG), el sistema prototipo permite la manipulación en CAD de los componentes necesarios del recipiente para la correcta aplicación de las normas de diseño y la generación de los dibujos. El capítulo detalla principalmente la implementación en NURBS, especialmente debido al manejo de estructuras de datos y de almacenamiento.

4.1 Estructura y Representación de Geometrías NURBS

Representación NURBS

Para demostrar la visibilidad del esquema de representación NURBS en 3D, se seleccionaron los componentes esenciales más importantes del recipiente (ver tabla 4.1.1). Sus valores y relaciones se almacenan en dos tablas relacionales, como se explica en el capítulo 4.1.4 *Estructuras de Almacenamiento*. Durante la sesión para generar el dibujo, cada componente del recipiente (modelado matemáticamente en 3D) es transformado al espacio de 2D por medio de una proyección (ver la sección 4.1.3.3 *Transformaciones Geométricas*).

Una característica importante (en este prototipo) de las geometrías representadas como NURBS es que se almacenan de forma parsimoniosa, lo cual les permite tener tres ventajas principales con respecto a las CG:

a) puede dárseles fácilmente "inteligencia", es decir se vuelve factible la creación de rutinas de interrogación de componentes y así obtener sus características y atributos, no sólo durante la sesión de trabajo sino en cualquier otra sesión posterior

b) se puede registrar la "historia de diseño" de cada recipiente y/o sus componentes (ver la sección 2.1.2.2)

c) son fácilmente transportables a otros sistemas de diseño y modeladores de 3D; de particular interés, pueden ser exportados hacia el Sistema de Diseño de Plantas PDS.

Construcciones Geométricas

Los componentes restantes del recipiente (boquillas, patas, ménsulas, accesorios y otros) se generan mediante una rutina de construcción geométrica tradicional en el espacio de 2D. Es importante mencionar que todas las construcciones geométricas que utilizamos son transformables a la representación NURBS. Cada CG se genera siguiendo una simple secuencia de trazos geométricos parametrizados en función a las entradas del usuario. En muchos de ellos se utilizan ecuaciones cuadráticas tradicionales y/o la combinación de líneas y otros primitivos 2D. Cada CG requiere ser programada específicamente y su código insertado en forma independiente.

Componente	Especificación	Geometría
Cuerpo	C	NURBS
Tapa Hemisférica	TH	NURBS
Tapa Semielíptica 2:1	TS	NURBS
Sección o Tapa Cónica	TC	NURBS
Silieta	S	NURBS
Faldón	F	NURBS
Tanque	TQ	NURBS
Tapa Torisféricas F&D	TE	Construcción Geométrica
Tapa Toricónicas	TT	Construcción Geométrica
Pata	P	Construcción Geométrica
Ménsula	M	Construcción Geométrica
Boquilla	B	Construcción Geométrica
Brida	BR	Construcción Geométrica
Bota	BT	Construcción Geométrica
Platos	PL	Construcción Geométrica
Eliminador de Humedad	E	Construcción Geométrica
Cortador Vórtice	V	Construcción Geométrica
Placa Nombre	N	Construcción Geométrica
Mampara de Entrada	IB	Construcción Geométrica
Ground Clip	GC	Construcción Geométrica
Pascante	D	Construcción Geométrica
Bisagra	H	Construcción Geométrica
Angulo	A	Construcción Geométrica
Canal	CL	Construcción Geométrica
Trave	TR	Construcción Geométrica
Codo	CD	Construcción Geométrica
Te	TE	Construcción Geométrica
Reductor	RE	Construcción Geométrica
Pernos	PE	Construcción Geométrica
Burbuja de Boquilla	BB	Bloque
Soldaduras	SO	Bloques
Norte	NO	Bloque
Línea de Centro	LC	Bloque
Línea de Corte	LX	Bloque
Corte de Tubería	CT	Bloque
Centro de Gravedad	CG	Bloque
Placa	PC	Bloque
Datos de Diseño	DD	Bloques
Atributos de Diseño	AD	Bloques
Notas	NT	Bloques
Anotaciones	AN	Bloques

Tabla 4.1.1 Componentes y Elementos representados en el Sistema Prototipo

Las CG tienen las siguientes ventajas sobre los bloques:

- a) mayor flexibilidad de representación
- b) no dependen de un exclusivo punto de inserción
- c) permitan la orientación y manipulación arbitraria de sus propios elementos

Bloques

Los bloques se utilizan para representar toda la simbología del dibujo, así como las notas y anotaciones. En particular, se tiene un conjunto amplio de simbología de soldaduras, lo cual ahorra considerable tiempo al diseñador, debido a la gran cantidad de estas indicaciones que lleva el dibujo del recipiente y que con el sistema sólo requieren de unos cuantos "clicks".

4.1.1 Estructuras de Datos

Para almacenar una curva NURBS se requiere la definición de las siguientes entidades:

- n : el índice más grande de puntos de control;
- P_0^v, \dots, P_n^v : los puntos de control;
- p : el orden o grado;
- m : el índice más grande de nudos;
- u_0, \dots, u_m : los nudos.

En el diseño de una estructura muy grande, cada bloque constructivo es creado a partir de los datos más simples. Uno de los elementos básicos de una curva es el punto de control. Este puede ser racional, no-racional, de dos dimensiones o de tres, esto es, requiere dos, tres o cuatro coordenadas. Adicionalmente, juega un papel dual como punto de control para el cómputo de B-Splines o como un punto Euclidiano usado en manipulaciones geométricas simples, como cálculo de distancias e intersecciones. Para diferenciar como se trate un punto euclidiano de un punto de control pesado, se define:

P:

x	y	z
---	---	---

Pw:

x	y	z	w
---	---	---	---

Una vez definidos los puntos y puntos de control, se construyen objetos más complejos a partir de estos, como son los casos del polígono de control y del vector de nudos.

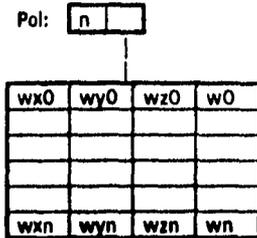


Figura 4.1.1 Estructura de datos del polígono de Control

En otras palabras, el polígono de control es una simple estructura que contiene el índice más grande y una liga a un arreglo de puntos de control y sus pesos. En la figura 4.1.1 cada punto de control está representado por sus coordenadas X, Y, Z, (a.g. wx0, wy0, wz0) así como por su peso correspondiente (a.g. w0). El vector de nudos también tiene un campo del índice más grande y una liga a un arreglo de nudos (u0, u1, ..., um). Estas estructuras contienen la mínima cantidad de información y por supuesto pueden ser extendidas para casos especiales.

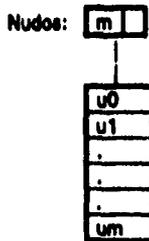


Figura 4.1.2 Estructura de datos del vector de nudos

Una vez que se tiene el polígono de control, el vector de nudos y un grado determinado, se construye la curva en base a sus constituyentes como sigue:

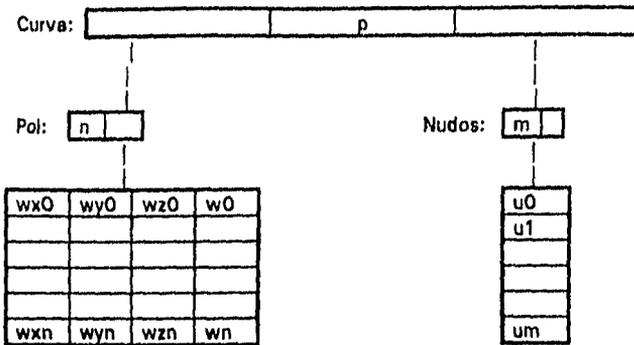


Figura 4.1.3 Estructura de datos de una curva

Un objeto curva consiste de un polígono, un grado y un vector de nudos. La belleza de esta definición es que sus constituyentes varios son fácilmente extraídos para su posterior procesamiento. Por ejemplo si uno necesita calcular la cubierta rectangular de una curva, en esa rutina el subobjeto polígono se extrae y se pasa a otra rutina que calcula y genera las cubiertas.

La implementación de una curva representada en base a NURBS (en lenguaje C) consta de tres rutinas principales:

Función que calcula el Alcance

Es una función entera que regresa el índice del alcance.

```

Int DaAlcance(n,p,u,U)
/* determina el índice del alcance de nudos */
/* entrada: n,p,u,U */
/* retorna: el índice de alcance del nudo */
if (u==U[n+1]) return(n); /* caso especial */
bajo=p; alto=n+1; /* inicia búsqueda binaria */
medio=(bajo+alto)/2;
while (u<U[medio] || u>= U[medio+1])
{
  if (u<U[medio])      alto=medio;
  else                 bajo=medio;
  medio=(bajo+alto)/2;
}
return(medio);

```

Algoritmo 4.1.1 Alcance de los Nudos de una curva NURBS

Función que calcula las Funciones Base

Este algoritmo calcula todas las funciones base y las guarda en un arreglo $N[0], \dots, N[p]$.

```

FuncionesBase(I,u,U,N)
/* calcula las funciones base */
/* entrada: I,u,p,U */
/* salida: N */
N[0]=1.0;
for (j=1;j<=p;j++)
{
    izq[j]=u-U[I+1-j];
    der[j]=U[I+1-j]-u;
    salvado=0.0;
    for (r=0;r<j;r++)
    {
        temp=N[r]/(der[r+1]+izq[j-r]);
        N[r]=salvado+der[r+1]*temp;
        salvado=izq[j-r]*temp;
    }
}

```

Algoritmo 4.1.2 Funciones Base para Cálculo del NURBS**Función que calcula el Punto de una Curva**

Este algoritmo calcula las coordenadas de un punto de la curva en base al polígono de control, el vector de nudos y el orden "p" de la curva.

```

PuntoCurvaNURBS(n,p,U,Pw,u,C)
/* calcula un punto de una curva B-Spline racional */
/* entrada: n,p,U,Pw,u */
/* salida: C */
alcance = DaAlcance(n,p,u,U);
FuncionesBase(alcance,u,p,U,N);
Cw = 0.0;
for (j=0;j<=p;j++)
    Cw = Cw + N[j]*Pw[alcance-p+j];
C = Cw / w; /* división por el peso */
}

```

Algoritmo 4.1.3 Punto en curva NURBS

Para una superficie es similar. Se requiere una red de control, dos grados y dos vectores de nudos. La red de control se define por dos índices para ubicar un elemento en la matriz de puntos de control: De la misma manera que con la curva, la red de control y los vectores de nudo se extraen fácilmente para realizar varias operaciones. Si se tuvieran que efectuar varias operaciones sobre una curva o superficie, estas definiciones son muy económicas.

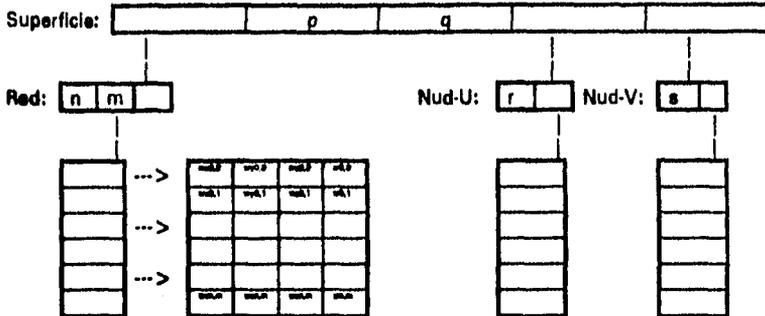


Figura 4.1.4 Estructura de datos de una superficie

Este algoritmo calcula las coordenadas de un punto de la superficie en base a los pares de polígonos de control, vectores de nudos y los órdenes "p" y "q" de la superficie.

Función que calcule un punto de la superficie

```
PuntoSuperficieNURBS(n,p,U,m,q,V,Pw,u,v,S)
/* Calcula un punto en una superficie racional B-Spline */
/* Entrada: n,p,U,m,q,V,Pw,u,v */
alcance_u = DaAlcance(n,p,u,U);
FuncionesBase(alcance_u,u,p,U,Nu);
alcance_v = DaAlcance(m,q,v,V);
FuncionesBase(alcance_v,v,q,V,Nv);
for (i=0;i<=q;i++)
  (temp[i]=0.0;
   for (k=0;k<=p;k++)
     temp[i]=temp[i]+Nu[k]*Pw[alcance_u-p+k][alcance_v-q+i];
  )
Sw=0.0;
for (i=0;i<=q;i++)
  Sw=Sw+Nv[i]*temp[i];
S=Sw=w;
}
```

Algoritmo 4.1.4 Punto en una superficie NURBS

4.1.2 Geometrías Estándar

La Geometría se refiere a la representación de un objeto físico por medio de un modelo, consistente de puntos, curvas y superficies. La filosofía de las definiciones geométricas que siguen a continuación es que su representación NURBS, siendo esencialmente independiente del sistema de coordenadas, deben ser numéricamente estables y fácilmente transformables. Cada geometría representa en forma canónica las posiciones en el espacio de cada punto de las curvas que componen la superficie, el desplazamiento entre posiciones y las direcciones de su generación. Adicionalmente, se utilizan escaleras para representar distancias o cantidades proporcionales, obteniéndose componentes escalados y de acuerdo al tamaño especificado por el usuario.

Cada entidad del recipiente está representada geoméricamente por la estructura de datos de una superficie NURBS, y su dimensionamiento paramétrico está determinado por la información proporcionada por el usuario durante el diseño. Por esta razón, las dimensiones de cada geometría están asociadas a estas entidades, a través de relaciones y proporciones.

La geometría de cada componente está representada por las siguientes variables: su especificación, el dominio paramétrico local de u y v , los grados de los polinomios p y q , los números de puntos de control n y m , los pesos default por punto de control, los vectores de nudos U y V , la forma canónica, el Arreglo de Códigos de Variables a utilizarse y finalmente, el número de dimensiones que definen al componente.

Cada una de estas variables es usada para transformar la geometría estándar de un componente (en base al esquema de construcción del polígono de control) y calcular las coordenadas espaciales de sus puntos de control correspondientes. Su significado específico está determinado por las dimensiones indicadas por el diseñador y el algoritmo de transformación que se les aplique. Las transformaciones que se aplican a las geometrías son cuatro: traslación, rotación, escalamiento y proyección (vea la sección 4.1.3.3 *Transformaciones Geométricas*).



Vista 4.1.2.1 Recipiente Horizontal con Bases en vista Isométrica

Geometrías de Recipientes y Soportes

Cada componente NURBS de un recipiente se define dimensionalmente por medio de las variables que aparecen en la siguiente tabla:

Cuerpo	longitud del cuerpo	sh lon	A	$sh\ lon > sh\ dia$
	espesor del cuerpo	sh esp	B	$(sh\ esp)$ ASME
	diámetro externo	sh dia	C	$sh\ dia < sh\ lon$
	radio externo	sh rad	D	$sh\ dia/2$
Tapa Cónica	espesor	cn esp		$(cn\ esp)$ ASME
	altura	cn alt	E	$cn\ alt \leq sh\ dia$
Tapa Semialférica	espesor	hd_esp_ts		(hd_esp_ts) ASME
Tapa Hemiesférica	espesor	hd_esp_th		(hd_esp_th) ASME
Faldón o Sección Cónica	longitud del faldón	sk lon	F	$sh\ lon > sk\ lon$
	ángulo de inclinación	sk_an	G	$0 \leq sk_an \leq 45$
	espesor del faldón	sk esp		$(sk\ esp)$ ASME
Silletas No utilizada por ahora	ángulo	si an	H	$2 \leq si_an \leq 120$
No utilizada	base	si ba	I	si ba
	ancho	si_anch	J	$0 < si_anch < 1/2$ $sh\ lon$
	distancia entre silletas	si_des	K	$si_des < 0.2 * sh_lon$
	altura	si alt	L	
	distancia entre silletas	si_dis	M	$si_dis < sh_long + si_anch$

Tabla 4.1.2.1 Variables y Relaciones Básicas de las Geometrías NURBS

Note: las variables que denotan espesores no se utilizan para la generación de las superficies.

En la tabla anterior, la columna de relaciones restrictivas implícitas se refiere a la validación que se efectúa sobre los datos de entrada del diseñador en la caja de diálogos para evitar se violen las normas ASME para cada componente.

Cuerpos

En esta sección se explica en términos generales, tomando como ejemplo el cuerpo del recipiente, la manera como se construye la geometría de cualquiera de los componentes del de este sistema.

El componente tomado como ejemplo es un cuerpo cilíndrico de un solo diámetro, sin anillos de refuerzo ni conexiones tipo tora. Se hace notar que el sistema prototipo permite el

manejo de Recipientes Verticales de varias partes por medio del uso de secciones cónicas y faldones intermedios o conexiones tipo torre.

La representación en 2D en elevación (resultante de una proyección al plano) es un rectángulo horizontal o uno vertical, dependiendo si se trata de un recipiente vertical u horizontal. En ambos casos se puede incluir en el dibujo la proyección en planta. Si se desea, en el caso del recipiente horizontal se puede proyectar en forma automática la vista de lado.

La representación del cilindro en 3D es una superficie formada por un conjunto de rectas ortogonales a dos círculos paralelos.

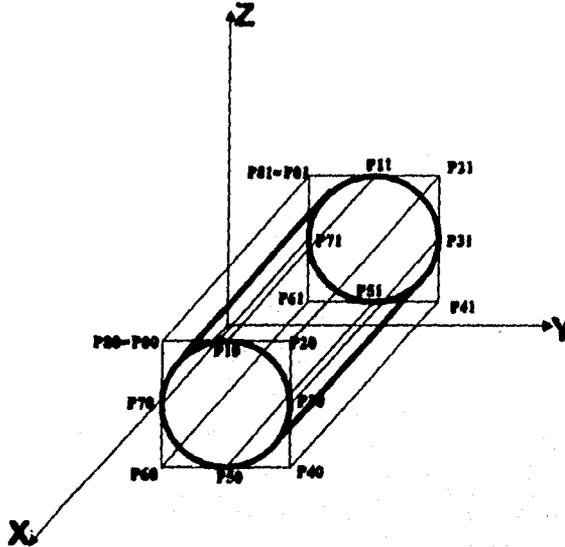


Figura 4.1.2.2 Polígono de Control del Cuerpo

En la generación del cuerpo, se utiliza la siguiente información en la generación de la geometría NURBS:

Datos de cada Círculo:

Grado	2
Número de nudos	12
Número de Puntos de control	9
El vector de nudos es	$U = \left\{ 0, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, 1, 1, 1 \right\}$
Pesos	$\{w_i\} = \left\{ 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1 \right\}$

aplicados sobre la forma canónica del polígono de control para el círculo

$$\{P_i\} = \{(1,0), (1,1), (0,1), (-1,1), (-1,0), (-1,-1), (0,-1), (1,-1), (1,0)\}.$$

Datos del rectángulo:

Grado	1
Número de nudos	4
Número de Puntos de control	2
El vector de nudos es	$U = \{0,0,1,1\}$
Pesos	$\{w_i\} = \{1,1\}$

Y los puntos de control del cuerpo son:

$$Pw = \begin{bmatrix} P00 & P01 \\ P10 & P11 \\ P20 & P21 \\ P30 & P31 \\ P40 & P41 \\ P50 & P51 \\ P60 & P61 \\ P70 & P71 \\ P80 & P81 \end{bmatrix}$$

Cada geometría debe ser construida de acuerdo a los parámetros que la determinan, en el caso del cuerpo, su radio y su longitud. El punto de origen de la construcción de cada entidad lo determina la topología del objeto a construir (ver sección 4.1.3 Topologías), siendo la primera entidad a generar la corresponde siempre el punto de inserción del objeto.

Como se observa en la figura 4.1.2.2, la variable *sh_fon* indica la longitud del recipiente, en un desplazamiento se ortogonal sobre uno de los ejes, mientras que la variable *sh_dia* nos indica el diámetro externo del recipiente.

La posición de los puntos de control que dan forma al cilindro está relacionada con las variables *sh_fon* y *sh_dia*.

Por ejemplo, si las dimensiones de un recipiente corresponden a una longitud de 10 metros y a un radio de 5 metros, durante la generación de la geometría del cuerpo se irá calculando la posición de cada punto de control de la siguiente manera:

1. Uno de los 8 puntos de control que forman en el primer círculo se tomado como punto base para generar los ocho restantes. El polígono de control del círculo es un cuadrado formado por 8 puntos de control. Cada punto-subsecuente es calculado a partir de uno de los anteriores y su relación con el diámetro externo.

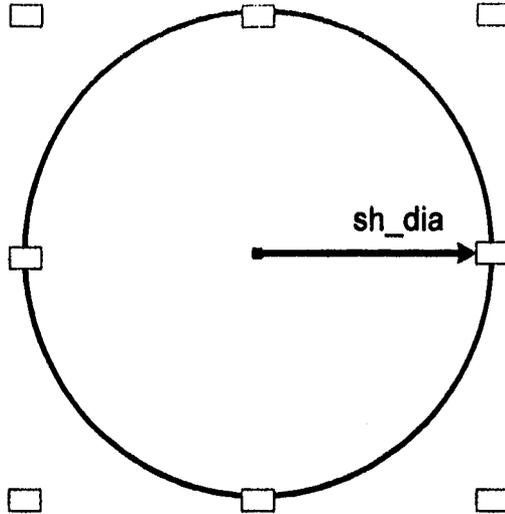


Figura 4.1.2.3 *Círculo NURBS en base a 9 puntos de control*

2. La superficie del cilindro se forma uniendo con rectas ortogonales, puntos del primer círculo con puntos de un segundo círculo, considerando un desplazamiento en el espacio correspondiente a la longitud del cilindro (variable sh_lon).

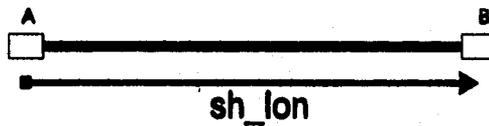


Figura 4.1.2.4 *Línea Recta NURBS en base a dos puntos de control, A y B*

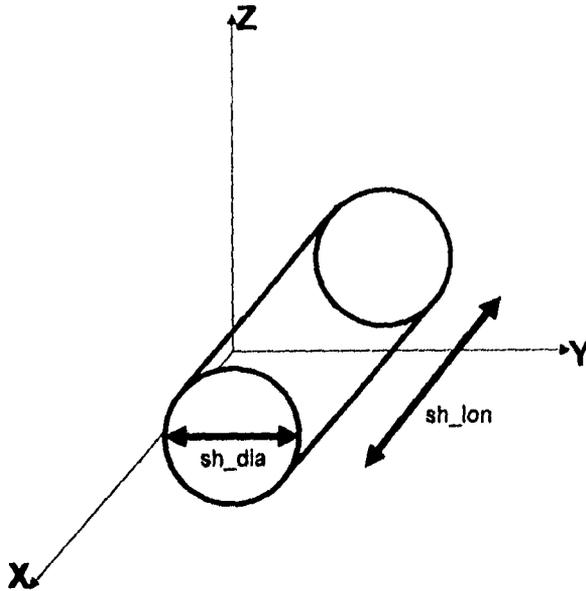


Figura 4.1.2.5 Relaciones Geométricas Básicas del Cuerpo

La forma canónica de una geometría específica como se ubicarán e irán creando los puntos de control en el espacio tridimensional. La geometría así creada es función de los parámetros dados por el diseñador.

sh_lon	longitud del cuerpo	sh_lon = Px0 a Px1	sh_lon > sh_dia
sh_esp	espesor del cuerpo	N/A	(sh_esp) ASME
sh_dia	diámetro externo	P30-P70, P10-P60 P31-P71, P11-P61	sh_dia < sh_lon
sh_rad	radio externo	N/A	sh_dia/2

Tabla 4.1.2.2 Variables utilizadas en el dimensionamiento del cuerpo

Si consideramos la variable $sh_rad = sh_dia / 2$, se tiene que la forma canónica del cuerpo es como sigue:

$$Q_{i,n} = \begin{bmatrix} P_i & (P00 + (sh_lon))x \\ (P00 + (sh_rad))y & (P10 + (sh_lon))x \\ (P00 + (sh_dia))y & (P20 + (sh_lon))x \\ (P20 - (sh_rad))z & (P30 + (sh_lon))x \\ (P20 - (sh_dia))z & (P40 + (sh_lon))x \\ (P10 - (sh_dia))z & (P50 + (sh_lon))x \\ (P00 - (sh_dia))z & (P60 + (sh_lon))x \\ (P30 - (sh_dia))y & (P70 + (sh_lon))x \\ P00 & (P80 + (sh_lon))x \end{bmatrix}$$

Se utiliza una rutina tipo "parser" para identificar el cálculo de cada uno de las coordenadas de la matriz de la forma canónica. Las variables se identifican por una letra de la A a la O, mientras que las coordenadas se representan por una Q y dos índices que especifican el renglón y la columna correspondiente en la matriz. La letra P se utiliza para representar el punto de inserción o el punto relativo de inserción, de acuerdo a la topología respectiva. Por ejemplo, los renglones de la forma canónica del cuerpo se representa en la table de geometrías como los registros siguientes:

Q0,0=P	Q0,1=x(P+A)
Q1,0=y(Q0,0+D)	Q1,1=x(Q1,0+A)
Q2,0=y(Q0,0+C)	Q2,1=x(Q2,0+A)
Q3,0=z(Q0,0-D)	Q3,1=x(Q3,0+A)
Q4,0=z(Q0,0-C)	Q4,1=x(Q4,0+A)
Q5,0=z(Q0,0-C)	Q5,1=x(Q5,0+A)
Q6,0=z(Q0,0-C)	Q6,1=x(Q6,0+A)
Q7,0=y(Q0,0-C)	Q7,1=x(Q7,0+A)
Q8,0=P	Q8,1=x(Q8,0+A)

Tabla 4.1.2.3 Representación de la Forma Canónica del cuerpo

Tapas

Las tapas se construyen siguiendo el sentido de las manecillas del reloj y de acuerdo con la siguiente orientación:

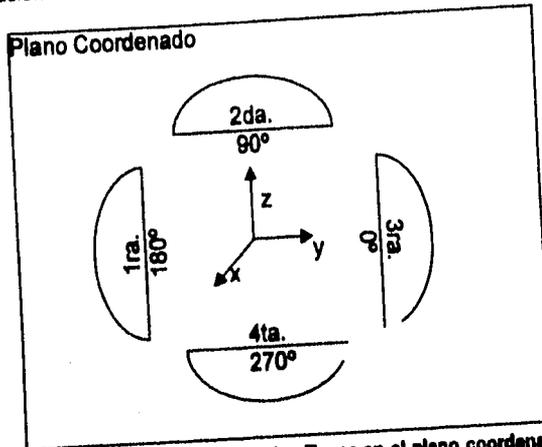


Figura 4.1.2.6 Orientación de las Tapas en el plano coordenado

Las Tapas que se seleccionaron para demostrar el prototipo son:

Tapas Hemisféricas

La tapa Hemisférica es generada al revolucionar un arco circular alrredador de un círculo base. Cada semicírculo es generado a partir del siguiente polígono de control formado por 6 puntos de control:

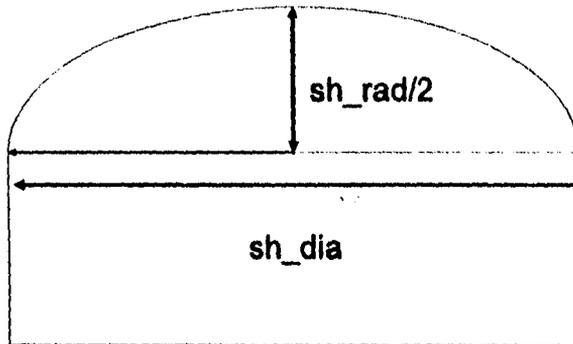
$$\{P_i\} = \{(1,0), (1,1), (0,1), (-1,1), (-1,0), (1,0)\}.$$

El vector de nudos es:

$$U = \left\{0, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1, 1, 1\right\}.$$

mientras que los pesos correspondientes son:

$$\{w_i\} = \left\{1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, 1\right\}$$

Tapas Semiélticas 2:1**Figura 4.1.2.7 Relaciones Geométricas de la Tapa Semiéltica 2:1**

La tapa semiéltica 2:1 es generada al revolucionar un arco éltico alrededor de un círculo base. Cada arco éltico es generado a partir del siguiente polígono de control formado por 6 puntos de control:

$$\{P\} = \{(1,0), (1,1), (0,1), (-1,1), (-1,0), (1,0)\}.$$

El vector de nudos es:

$$U = \left\{0, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1, 1, 1\right\}.$$

mientras que los pesos correspondientes son:

$$\{w_i\} = \left\{1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, 1\right\}$$

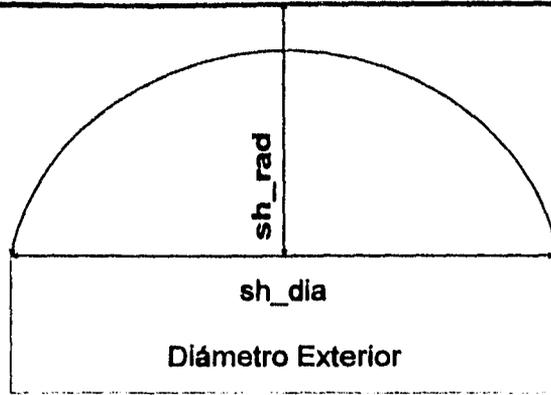


Figura 4.1.2.8 Relaciones Geométricas de la Tapa Hemisférica

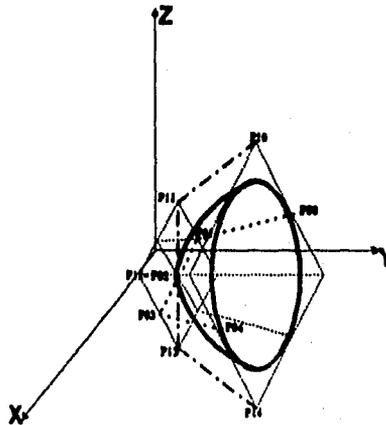


Figura 4.1.2.9 Polígono de Control de una Tapa Semi-elíptica o Hemisférica

En la generación de cualquiera de los dos tipos de tapas, se tiene la siguiente información:

Datos del círculo:

Grado	2
Número de nudos	12
Número de Puntos de control	9
El vector de nudos es	$U = \left\{ 0, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, 1, 1, 1 \right\}$
Pesos	$\{w_i\} = \left\{ 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1 \right\}$

Datos del arco:

Grado	2
Número de nudos	7
Número de Puntos de control	5
El vector de nudos es	$U = \left\{ 0, 0, 0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 1, 1, 1 \right\}$
Pesos	$\{w_i\} = \left\{ 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1 \right\}$

Y los puntos de control son:

$$P_w = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{02} & P_{03} & P_{04} \\ P_{10} & P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{20} & P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{30} & P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{40} & P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \\ P_{50} & P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} \\ P_{60} & P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} \\ P_{70} & P_{71} & P_{72} & P_{73} & P_{74} \\ P_{80} & P_{81} & P_{82} & P_{83} & P_{84} \end{bmatrix}$$

La generación de la tapa semielíptica es idéntica a la utilizada en tapa semiesférica, con la excepción de que el eje menor es la mitad del radio (eje mayor).

Sin embargo, las formas canónicas de cada tapa varían ligeramente. La forma canónica de la tapa hemiesférica es la siguiente:

Las columnas son los círculos y los renglones son los arcos de la tapa. Como al calcular los círculos y los arcos hay dos puntos que se repiten, éstos ya no se calculan, sólo se toma el previamente calculado.

Considerando una variable $sh_rad = sh_dia / 2$ tenemos la siguiente forma canónica para la tapa hemiesférica:

$$Q_{n,m} = \begin{bmatrix} P1 & (P00 - sh_rad)y(P01 + sh_rad)x & (P01 + sh_dia)x & (P00 + sh_dia)x \\ (P00 + sh_rad)z & (P10 - sh_rad)y P02 & (P03 - sh_rad)z & (P04 - sh_rad)z \\ (P10 + sh_rad)x & (P20 - sh_rad)y P02 & (P21 - sh_dia)z & (P20 - sh_dia)z \\ (P10 + sh_dia)x & (P11 + sh_dia)x P02 & (P11 - sh_dia)z & (P10 - sh_dia)z \\ P04 & P03 & P02 & P01 & P00 \\ P14 & P13 & P02 & P11 & P10 \\ P24 & P23 & P02 & P21 & P20 \\ P34 & P33 & P02 & P31 & P30 \\ P00 & P01 & P02 & P03 & P04 \end{bmatrix}$$

Para el caso de las tapas semielípticas, la forma canónica es como sigue:

Considerando una variable $sh_eli = sh_dia / 4$ tenemos la siguiente forma canónica para la tapa hemisférica:

$$Q_{n,m} = \begin{bmatrix} P1 & (P00 - sh_eli)y(P01 + sh_rad)x & (P01 + sh_dia)x & (P00 + sh_dia)x \\ (P00 + sh_rad)z & (P10 - sh_eli)y P02 & (P03 - sh_rad)z & (P04 - sh_rad)z \\ (P10 + sh_rad)x & (P20 - sh_eli)y P02 & (P21 - sh_dia)z & (P20 - sh_dia)z \\ (P10 + sh_dia)x & (P11 + sh_dia)x P02 & (P11 - sh_dia)z & (P10 - sh_dia)z \\ P04 & P03 & P02 & P01 & P00 \\ P14 & P13 & P02 & P11 & P10 \\ P24 & P23 & P02 & P21 & P20 \\ P34 & P33 & P02 & P31 & P30 \\ P00 & P01 & P02 & P03 & P04 \end{bmatrix}$$

Cónicas

La tapa cónica es generada al revolucionar una recta inclinada alrededor de un círculo base.

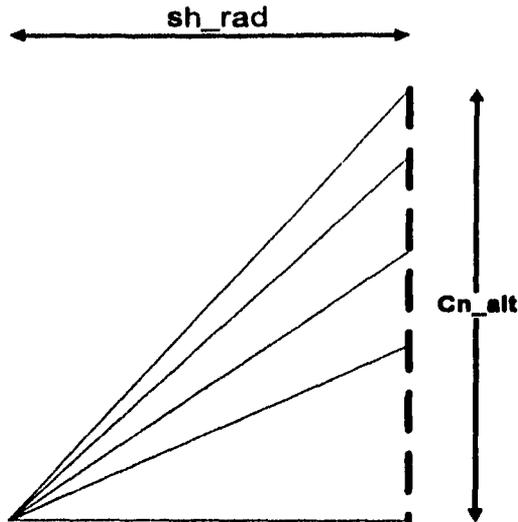


Tabla 4.1.2.10 Relaciones Básicas de las Tapas Cónicas

Cada cono es generado a partir del siguiente polígono de control formado por 6 puntos de control:

$$\{P_i\} = \{(1,0), (1,1), (0,1), (-1,1), (-1,0), (1,0)\}.$$

El vector de nudos es:

$$U = \left\{0, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, 1, 1, 1\right\}.$$

mientras que los pesos correspondientes son:

$$\{w_i\} = \left\{1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, 1\right\}$$

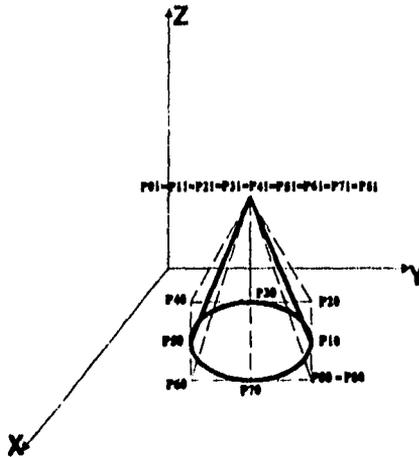


Figura 4.1.2.11 Polígono de Control de una Tapa Cónica

En la generación de una tapa cónica, se tiene la siguiente información:

Datos del círculo:

Grado	2
Número de nudos	12
Número de Puntos de control	8
El vector de nudos es	$U = \left\{ 0, 0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, 1, 1, 1 \right\}$
Pesos	$\{w_i\} = \left\{ 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1 \right\}$

Datos del rectángulo:

Grado	1
Número de nudos	4
Número de Puntos de control	2
El vector de nudos es	$U = \{0, 0, 1, 1\}$
Pesos	$\{w_i\} = \{1, 1\}$

Y los puntos de control:

$$P_w = \begin{bmatrix} P00 & P01 \\ P10 & P11 \\ P20 & P21 \\ P30 & P31 \\ P40 & P41 \\ P50 & P51 \\ P60 & P61 \\ P70 & P71 \\ P80 & P81 \end{bmatrix}$$

Se notará en la figura que existe una convergencia en un punto y este corresponde a la columna 2, es decir, de P10 a P18 es el mismo punto.

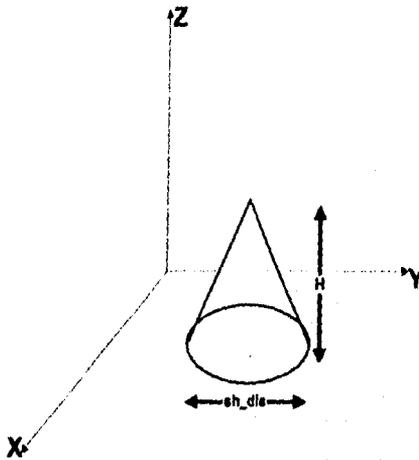


Figura 4.1.2.12 Relaciones Básicas del cono

tc_h	altura del cono	tcn_h = P00 - dia/2 del cuerpo	tcn-h < dia/2
tc_esp	espesor del cuerpo	N/A	(tc_esp) ASME

Tabla 4.1.2.3 Variables dimensionales del cono

La forma canónica de una geometría específica como se ubicarán e irán creando los puntos de control en el espacio tridimensional. La geometría así creada es función de los parámetros dados por el diseñador.

$$P_w = \begin{bmatrix} P_i & P00x, (P00-rad)y, (P00+h)z \\ (P00-rad)x & P01 \\ (P00-dia)x & P01 \\ (P20-rad)y & P01 \\ (P20-dia)y & P01 \\ (P40+rad)x & P01 \\ (P40-dia)x & P01 \\ (P60-rad)y & P01 \\ P00 & P01 \end{bmatrix}$$

Como observación el centro de la tapa cónica, es exactamente el centro de la parte superior del cuerpo.

Soportes

En el caso de los soportes, el prototipo maneja dos alternativas:

Para Recipientes verticales:

Faldón. Se trata de un caso de cuerpo cilíndrico o de la tapa cónica.

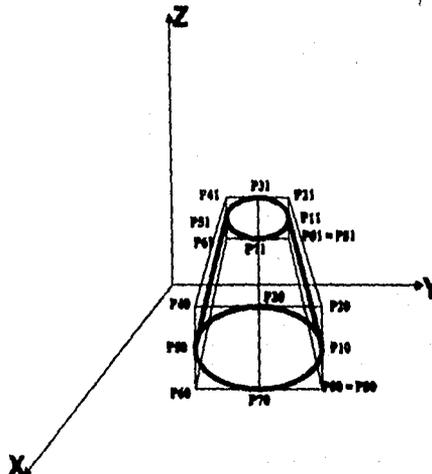


Figura 4.1.2.13 Polígono de Control de una Sección Cónica o Faldón

En la generación del soporte tipo faldón, se tiene la siguiente información:

Datos del cilindro:

Radio	1
Ángulo de inclinación	30°
Ángulo de inclinación de control	0°
El vector de control es	$U = \left(0, 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4}, 1, 1, 1 \right)$
Punto	$(w_1) = \left(1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1, \frac{\sqrt{2}}{2}, 1 \right)$

Datos del rectángulo:

Radio	
Ángulo de inclinación	
Ángulo de inclinación de control	
El vector de control es	$U = (0, 0, 1)$
Punto	$(w_1) = (1, 1)$

Y los puntos de control son:

$$P_i = \begin{pmatrix} P_{i0} & P_{i1} \\ P_{i0} & P_{i1} \end{pmatrix}$$

Se notará en la figura que los puntos de control de la parte superior del faldón es una circunferencia generada que la base, es decir, es un cilindro con la parte superior más expuesta. Se podría también tener un faldón tipo cilindro, cuando el ángulo de inclinación del faldón es igual a cero.

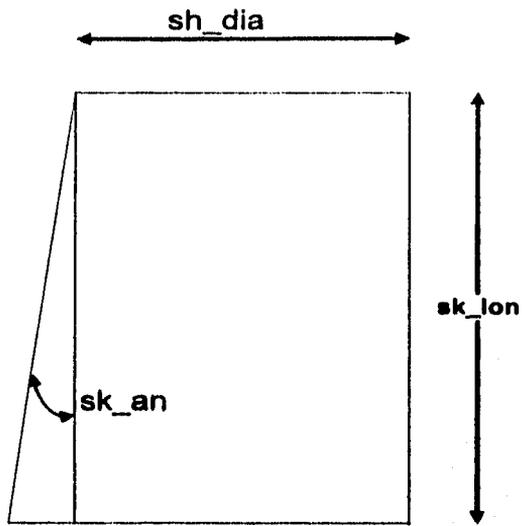


Tabla 4.1.2.14 Relaciones Geométricas Básicas del Faldón

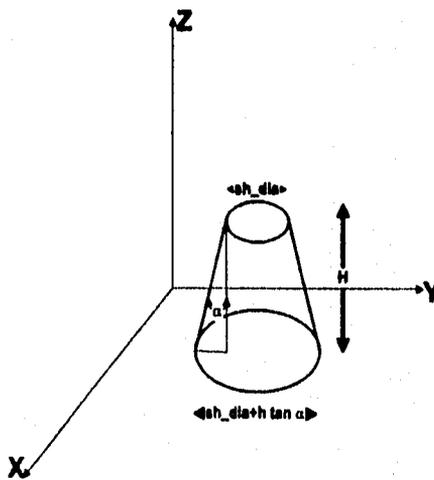


Figura 4.1.2.15 Relaciones Básicas del Faldón

La forma cenónica de una geometría específica como se ubicarán e irán creando los puntos de control en el espacio tridimensional. La geometría así creada es función de los parámetros dados por el diseñador.

sh_dia	diametro del cuerpo	determinado por el cuerpo	N/A
sk esp	espesor del faldon	N/A	{sk esp} ASME
sk an	angulo del faldon	N/A	
sk lon	longitud del faldon	N/A	

Tabla 4.1.2.4 Variables dimensionales del Faldón

Si consideramos las siguientes variables >

$$radc = H \tan \alpha$$

$$diac = 2 * radc$$

$$P_w = \begin{bmatrix} P_i & P00x, (P00 - h \tan \alpha)y, (P00 + h)z \\ (P00 - rad)x & (P11 - radc)x \\ (P00 - dia)x & (P11 - diac)x \\ (P20 - rad)y & (P21 - radc)y \\ (P20 - dia)y & (P21 - diac)y \\ (P40 + rad)x & (P41 + radc)x \\ (P40 + dia)x & (P41 + diac)x \\ (P60 + rad)y & (P61 + radc)y \\ P00 & P01 \end{bmatrix}$$

El faldón tiene la particularidad que tiene que calcularse la distancia que existe del perímetro del círculo interior al círculo exterior.

Para Reclipientes horizontales:

Silletas

Para generar un soporte tipo silleta, se tiene:

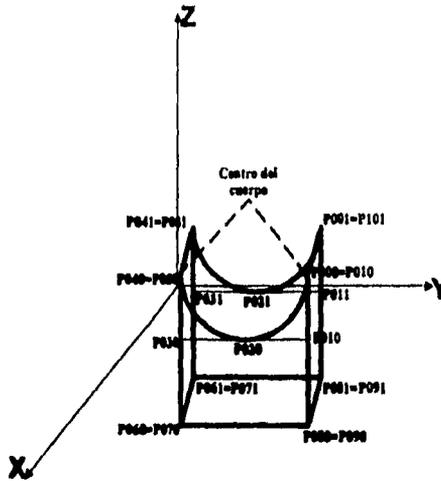


Figura 4.1.2.16 Polígono de Control de una Silleta

Datos del rectángulo con la subtracción del arco:

Grado	2
Número de nudos	13
Número de Puntos de control	10
El vector de nudos es	$U = \left(0, 0, 0, 0, \frac{1}{5}, \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{3}{5}, 1, 1, 1 \right)$
Pesos	$(w_i) = \{ 1, 1, \sin \alpha, 1, \sin \alpha, 1, 1 \}$

Datos del rectángulo:

Grado	1
Número de nudos	4
Número de Puntos de control	2
El vector de nudos es	$U = \{ 0, 0, 1, 1 \}$
Pesos	$(w_i) = \{ 1, 1 \}$

Y los puntos de control son:

$$P_w = \begin{bmatrix} P000 & P001 \\ P010 & P011 \\ P020 & P021 \\ P030 & P031 \\ P040 & P041 \\ P050 & P051 \\ P060 & P061 \\ P070 & P071 \\ P080 & P081 \\ P090 & P091 \\ P100 & P101 \end{bmatrix}$$

En este caso existe punto de control que son iguales, tales como P010 y P020, entre otros, estos son colocados así para evitar que se genere una curva.

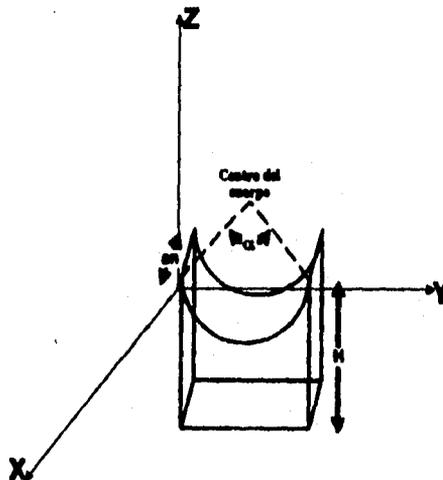


Figure 4.1.2.17 Relaciones Básicas de la Cilindr

Si consideramos las siguientes variables:

$$Dy = rad * \text{sen } \alpha$$

$$Dz = rad * \text{cos } \alpha$$

$$Cxyz = (Px, (Pi - rad)y, (Pi)z)$$

$$Pr = (Px, (C + Dy)y, (C + Dz)z)$$

Tenemos la siguiente forma canónica para la silleta:

$$Pw = \begin{bmatrix} Pr & (P000 + an)x \\ P00x, P00y, (C - rad)z & (P010 + an)x \\ P00x, Cy, P00z & (P020 + an)x \\ P00x, Cy, (C - rad)z & (P030 + an)x \\ P00x, (C - Dy)y, P00z & (P040 + an)x \\ P040 & (P050 + an)x \\ (P040 - h)z & (P060 + an)x \\ P060 & (P070 + an)x \\ (P000 - h)z & (P080 + an)x \\ P080 & (P090 + an)x \\ P000 & P001 \end{bmatrix}$$

4.1.3 Topologías

El concepto de topología comprende las relaciones espaciales entre las distintas entidades geométricas que componen un objeto geométrico.

En el sistema prototipo utilizamos el concepto de topología para representar y construir el objeto en el espacio tridimensional y pueda después ser desplegado en todas sus variantes (vea la sección 4.1.3.3 *Transformaciones Geométricas*). La topología de cada objeto se ha representado por medio de una secuencia de caracteres que es guardada en un archivo especial (vea la sección 4.1.4 *Estructuras de Almacenamiento*).

4.1.3.1 Jerarquía de Objetos

La topología establece una jerarquía en base a los siguientes niveles o categorías: *Objeto*, *Arreglo de Componentes* y *Componentes*. Las entidades de menor nivel, los *Componentes*, son relacionados entre sí para formar un *Arreglo de Componentes*, y estos a su vez se conjuntan para formar un *Objeto*.

La definición de las categorías denominadas *Objeto*, *Arreglo de Componentes* y *Componente* aparece a continuación:

Objeto

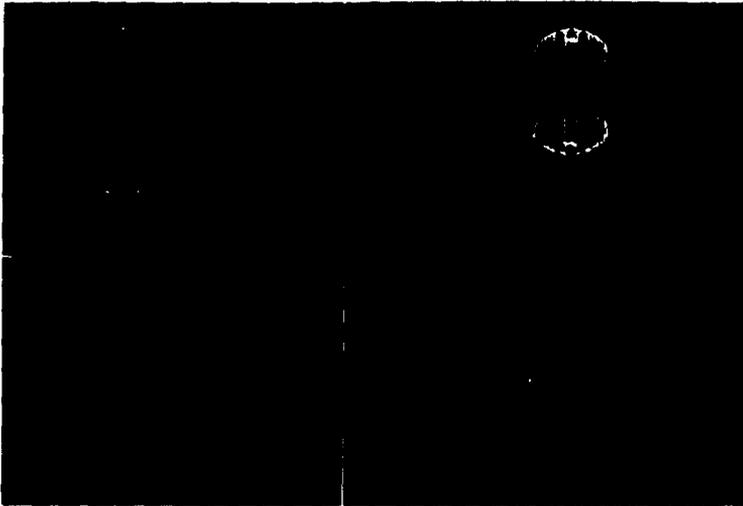
Son las entidades de nivel más alto en el modelo. Típicamente un objeto es un recipiente horizontal o vertical y agrupa un número de *Arreglos de Componentes* coherentes, como cuerpos, tapas y soportes. Para representar un objeto únicamente se requiere su extensión (número de componentes o arreglos) y su especificación (si es horizontal, vertical de una sola parte o vertical de dos o más partes). El objeto también contiene un elemento de cierre, el cual nos indica que el alcance del objeto ha terminado

Recipiente Horizontal, representado por RH. El cierre en este caso, se representa /RH.



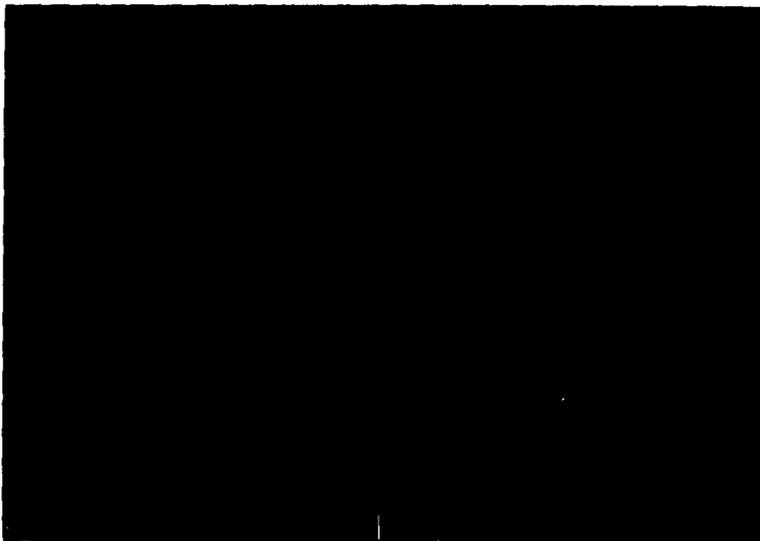
Vista 4.1.3.1 Recipiente Horizontal en Planta, Elevación e Isométrico

Recipiente Vertical (una sola parte), representado por RV. Su cierre por /RV.



Vista 4.1.3.2 Recipiente Vertical en Planta, Elevación e Isométrico

Tanque, representado por TQ. Su cierre por /TQ.



Vista 4.1.3.3 Tanque Típico en Planta, Elevación e Isométrico

Arreglo de Componentes

Cada uno consiste de dos o más *Componentes* individuales que están asociados entre sí por medio de una relación restrictiva. Cada componente está identificado por su posición dentro del arreglo.

El nivel de Arreglo de Componentes tiene asociado un número de atributos que son definidos al momento de su creación. Estos dependen de la naturaleza de la información de los componentes dentro del arreglo. Para representar un arreglo se requiere la posición del punto de inserción, su especificación, su extensión (cuántos componentes lo conforman) y el tipo de relación explícita que se verificará.

Los arreglos posibles para Recipiente Horizontal son:

Arreglo de Tapas
Arreglo Cuerpo-Arreglo de Tapas
Arreglo de Silletas
Arreglo Cuerpo-Arreglo de Silletas

Los arreglos posibles para Recipiente Vertical son:

Arreglo de Tapas
Arreglo Cuerpo-Faldón
Arreglo Cuerpo-Cono-Cuerpo
Arreglo Cuerpo-Arreglo de Tapas

El único arreglo posible para un Tanque es:

Arreglo Cuerpo-Arreglo de Tapas

Un *arreglo de componentes* está compuesto de varios componentes asociados entre sí por medio de relaciones restrictivas, cuya configuración define su estructura.

Componente

Para representar un componente se requiere el tipo de estructura, su identificador, la identificación del arreglo Padre, la identificación del arreglo asociado, el arreglo de variables de sus dimensiones reales y las coordenadas de los puntos de control que lo definen como una superficie NURBS.

4.1.3.2 Relaciones Restrictivas

En nuestro concepto, una relación restrictiva explícita es una condición paramétrica que debe cumplirse entre las proporciones de dos arreglos de componentes o de dos componentes distintos de un objeto. Una vez establecida, dicha relación se mantiene constante a lo largo de la vida del diseño o hasta que se elimine explícitamente. El propósito de una relación restrictiva es establecer la verificación a efectuar sobre las dimensiones geométricas de los componentes del recipiente que son coincidentes en el espacio. La verificación se efectúa a nivel topológico, ya que la geometría de un componente puede ser correcta y sin embargo al unirla con otra no coincidan sus dimensiones.

Utilizamos exclusivamente un conjunto base limitado (aunque ampliable) de relaciones restrictivas explícitas, aplicables a los distintos Arreglos de Componentes definidos

anteriormente. Cada una de ellas está limitada a una sola opción como se observa en la figura 4.1.3.4.

Código	Forma Corta	Descripción	Relación Restrictiva	Opcional
1	ACT	Arreglo Cuerpo-Arreglo de Tapas	con tapas	sin tapas
2	AS	Arreglo de Silletas	desfase = $0.2 * sh \text{ lon}$	desfase $< 0.2 * sh \text{ lon}$
3	ACS	Arreglo Cuerpo-Arreglo de Silletas	$diam.silleta = sh_dia$	$diam.silleta < sh_dia$
4	AT	Arreglo de Tapas	Dos Tapas	Solo una Tapa
5	ACF	Arreglo Cuerpo-Faldón	$ang = < 0$	$sk_rad < 2 * sh_rad$
6	ACC	Arreglo Cuerpo-Cono-Cuerpo	Reductor hacia arriba	Reductor hacia arriba

Figura 4.1.3.4 Relaciones restrictivas de los Arreglos de Componentes

4.1.3.3 Transformaciones Geométricas

Las transformaciones y proyecciones de curvas y superficies es muy común en el modelado geométrico y las gráficas por computadora. Las transformaciones incluyen a las traslaciones, rotaciones, escalamientos, "shears" y reflejos. Las proyecciones paralela y perspectiva son esenciales para visualizar las geometrías tridimensionales en una pantalla de video y otros dispositivos bidimensionales.

Con la excepción de la perspectiva, todas las transformaciones y proyecciones se efectúan sobre las curvas y superficies NURBS al aplicar operaciones sobre los puntos de control. Los pesos no cambian. Esto se deriva de la propiedad de Invarianza Afina (ver sección 2.2.6). La figura 4.1.3.5 muestra una proyección paralela general de un punto de control, P_i , a un plano de proyección dado por un punto de referencia Q , y un vector normal de longitud unitaria, N . P'_i denota la proyección de P_i .

La fórmula de Proyección Paralela correspondiente para superficies es:

$$P'_{i,j} = P_{i,j} + \left(\frac{N \cdot (Q - P_{i,j})}{N \cdot W} \right) W$$

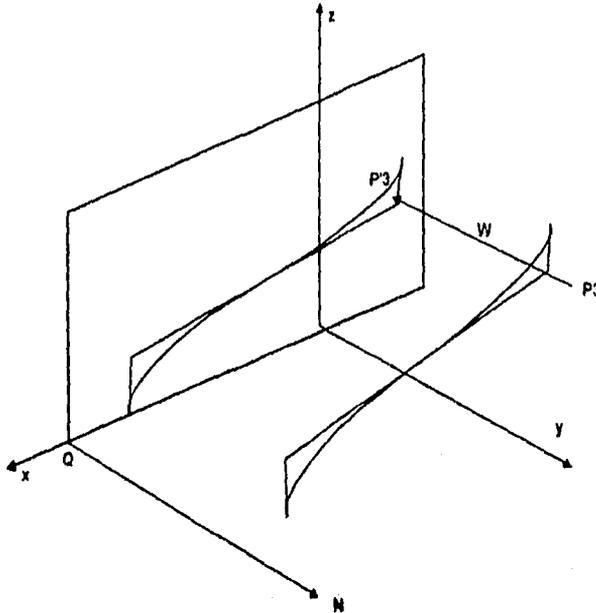


Figura 4.1.3.5 Proyección paralela de una curva NURBS

Traslación, Escalación y Rotación

En cuanto a las transformaciones geométricas usuales en 3D (escalación, traslación, rotación) se utiliza una matriz 4x4 para representar coordenadas homogéneas. La matriz de transformación que utilizamos es la siguiente:

$$M = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde la submatriz 3x3 R es la que permite la rotación y escalación, mientras T permite la traslación.

La traslación en 3D se define de la siguiente forma:

$$T(d_x, d_y, d_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Para la escalación en 3D se utiliza la siguiente matriz:

$$S(S_x, S_y, S_z) = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La rotación 3D sobre el eje x es:

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ 0 & \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La rotación 3D sobre el eje y es:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \text{sen}\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen}\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La rotación 3D sobre el eje z es:

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Proyección Ventana-Puerto

Para el caso del despliegue en pantalla, se utiliza una transformación conocida como ventana-puerto, donde se mapean las coordenadas de una ventana del mundo hacia las coordenadas de una ventana rectangular de la pantalla denominado puerto o "viewport".

Dadas una ventana y un puerto, ¿cuál es la matriz de transformación que mapea la ventana en coordenadas mundiales al puerto en coordenadas de pantalla?. La ventana, especificada por sus esquinas inferior-izquierda y superior-derecha, es primero trasladada a la coordenada mundial origen. En seguida, el tamaño de la ventana se escala al mismo tamaño que el puerto. Finalmente, se usa una traslación para posicionar el puerto. La matriz completa M es:

$$M_{wv} = \begin{bmatrix} \frac{u_{\max} - u_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & 0 & -x_{\min} \cdot \frac{u_{\max} - u_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + u_{\min} \\ 0 & \frac{v_{\max} - v_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} & -y_{\min} \cdot \frac{v_{\max} - v_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} + v_{\min} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Multiplicando $P = M_{wv} [x \ y \ 1]^T$ se obtiene el siguiente resultado:

$$P = \left[(x - x_{\min}) \cdot \frac{u_{\max} - u_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + u_{\min} \quad (y - y_{\min}) \cdot \frac{v_{\max} - v_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}} + v_{\min} \quad 1 \right]$$

4.1.4 Estructuras de Almacenamiento

Las representaciones de los componentes constituyentes de Recipientes se almacenan en archivos y tablas relacionales, las cuales serán accedidas directamente o por medio de SQL, respectivamente.

Una base de datos relacional es una base de datos diseñada para la manipulación y acceso por medio de un lenguaje estándar llamado "Structured Query Language" (SQL). La extensión de manejo de SQL en AutoCAD se denomina ASE, y permite la liga entre AutoCAD y bases de datos relacionales como dBase, Informix y Oracle. Una base de datos relacional está conformada por tablas que se relacionan unas con otras.

Una ventaja de utilizar ASE es que los datos se mantienen fuera de AutoCAD en una base relacional (BD), aunque la liga con las entidades AutoCAD las mantiene ASE. Esta liga elimina la redundancia, reduce el tamaño del dibujo y puede programarse para actualizar tanto el dibujo como la base de datos cuando haya cambios.

Otra de las ventajas del SQL es la capacidad de filtrado o Querying, la cual se utiliza para buscar diseños previos y reutilizar la experiencia pasada.

El sistema manejador de BD controla la interacción de todos los componentes del sistema con la base de datos. Las operaciones que realiza pueden categorizarse como *Constructores* o *Selectores*. Los Constructores usados dentro de la BD son:

ABRIR	Abre la BD
CERRAR	Cierra la BD
CREAR	Crea una nueva entidad dentro de la BD
MODIFICAR	Modificar los parámetros de una entidad de la BD
ELIMINAR	Borra una entidad de la BD
ADICIONAR	Añade una entidad existente a una entidad de mayor nivel
QUITAR	Quita una entidad de una entidad de mayor nivel

Las operaciones restantes, conocidas como Selectores, regresen información acerca de la BD sin alterar su estado.

Las operaciones pueden aplicarse a cualquier entidad, ya sean objetos, arreglos o componentes

El esquema de almacenamiento utiliza dos tablas y un archivo: La primera tabla está dedicada a las entidades y que se denomina Tabla de Geometrías Estándar; la segunda guarda los datos variables del diseño (e.g. los proporcionados por el usuario), que se denomina Tabla de Parámetros de Diseño. El archivo de Topologías permite registrar las relaciones espaciales entre entidades simples para formar entidades de mayor nivel.

A continuación se muestra la estructura de cada uno de los archivos:

Especificación del componente	STRING (3)
El dominio paramétrico local de u	REAL
El dominio paramétrico local de v	REAL
El grado del polinomio u	INTEGER (1)
El grado del polinomio v	INTEGER (1)
El número de Puntos de control de u	INTEGER (1)
El número de Puntos de control de v	INTEGER (1)
Pesos default por punto de control de u	STRING (15)
Pesos default por punto de control de v	STRING (15)
El vector de nudos de u	STRING (15)
El vector de nudos de v	STRING (15)
La forma canónica del polígono de control	MEMO
El número de variables dimensionales que definen al componente	INTEGER (1)
Arreglo de Códigos de Variables a utilizarse	STRING (15)

Tabla 4.1.4.1 Tabla de Geometrías Estándar

Tipo de Estructura	STRING (3)
El identificador del componente	INTEGER (1)
El identificador del padre	INTEGER (1)
La identificación del otro arreglo asociado, si lo hay	INTEGER (1)
El arreglo de Variables reales	STRING (100)
Puntos de Control de la superficie	MEMO

Tabla 4.1.4.2 Tabla de Parámetros de Diseño

Objeto:	
La especificación del objeto	STRING (3)
La extensión del objeto	INTEGER (1)
Arreglo:	
Punto de inserción	STRING (2)
La especificación del arreglo	STRING (3)
La extensión del arreglo de componentes	INTEGER (1)
Relación Restrictiva	INTEGER (1)
Componente:	
Punto de inserción	STRING (2)
La especificación del componente	STRING (3)
La posición del componente dentro del arreglo padre	INTEGER (1)
Transformación 1	STRING (15)
Transformación 2	STRING (15)
Transformación 3	STRING (15)
Cierre del arreglo	STRING (4)
Cierra del objeto	STRING (4)

Tabla 4.1.4.3 Archivo de Secuencia Topológica

4.1.5 IGES: un Estándar de Intercambio de Geometrías

Los NURBS no sólo son el estándar *de facto* en la industria CAD/CAM/CAE, sino que además está incorporado en varios estándares internacionales, [23] como son:

- IGES : Initial Graphics Exchange Specification;
- STEP : Standard for the Exchange of Product Model Data;
- PHIGS : Programmers'a Hierarchical Interactive Graphics System.

El prototipo utiliza el formato de intercambio IGES como medio para transferir las geometrías que genera a otras pequeñas de modelación o de CAD tridimensionales (que "importen" en formato IGES), como podría ser el Sistema de Diseño de Plantas PDS de Intergraph, el cual está basado en Microstation.

IGES, es un estándar americano de la ANSI (American National Standard Institute), es el formato más usado para intercambiar datos de productos en los sistemas CAD/CAM/CAE. Se desarrolló a principios de los 80's y especifica los formatos para intercambiar datos de gráficas y geometrías, con soporte para varias aplicaciones, entre ellas, dibujo, diseño de circuitos, elementos finitos y tuberías. Tanto las curvas y superficies como los sólidos tridimensionales están soportados en IGES. El IGES está mantenido por la Organization

IGES/PDES (IPO), bajo la directriz de la National Computer Graphics Association (NIST). La National Computer Graphics Association (INCGA) actúa como el administrador del estándar.

Una curva NURBS dentro de IGES [23] está definida por:

- grado, p , y número de puntos de control, $n + 1$;
- puntos de control euclídeos, P_i , y pesos, w_i ;
solo se permiten pesos positivos;
- un vector, U , conteniendo $m + 1 = n + p + 2$ nudos;
- valores de los parámetros inicial y final, sU y sI ;
- otra información no esencial pero útil: si la curva es planar o no-planar, abierta o cerrada, verdaderamente racional (las w_i no son todas iguales) o no-racional, periódica o no-periódica; además una curva puede etiquetarse como una línea, arco circular o cónico.

Se nota que los puntos de control y los pesos son elementos separados en IGES; no existe el concepto de puntos de control homogéneos, P_i^* . Solo se permiten valores positivos de los pesos.

Una superficie NURBS IGES se define de forma análoga. Los puntos de control y los pesos están separados; los pesos son positivos. Las únicas restricciones sobre los nudos u y v son $r = n + p + 1$, $s = m + q + 1$, $u_{i-1} \leq u_i$, para $i = 1, \dots, r$; y $v_{j-1} \leq v_j$ para $j = 1, \dots, s$ donde p y $n + 1$, y q y $m + 1$ son los grados y los números de los puntos de control en las direcciones u y v , respectivamente.

Entidades IGES

La unidad fundamental para definir un dato del archivo IGES, es la entidad. Estas se clasifican en dos grandes categorías [37]:

Entidades Geométricas, donde se define la figura física, incluyendo puntos, curvas, superficies, sólidos y relaciones (colección de estructuras similares de entidades).
Entidades No geométricas, donde provee de un atributo específico o características para las entidades geométricas. Las entidades no geométricas incluyen vistas, dibujo, notas generales, dimensiones, propiedades y asociación de entidades.

Algunas entidades tienen formas ("forms"), o definiciones separadas de la entidad conteniendo el tipo de entidad. Cada una de las entidades es representada por un valor en la sección de directorio y en la sección de datos de parámetros de el archivo de IGES.

Organización del Archivo IGES

Cada archivo IGES consta de cinco secciones identificadas por la letra en la columna 73 de cada línea (S, G, D, P o T). El archivo IGES consta de rangones de 80 caracteres.

Sección Inicio (START "S"): Contiene los comentarios escritos por el usuario, esto para ser identificado al momento de leer el archivo por otras aplicaciones de CAD.

Sección de datos Globales (Global "G"): Contiene información general como la aplicación que lo generó, autor, organización, el trazado estándar, sistema de medición, versión de IGES, entre otros datos. Necesarios para la aplicación que leerá el dibujo.

Sección de entrada de Directorio (Directory "D"): Sirve como índice para el archivos de IGES; esto es, una forma de entrada ordenada de los datos para cada entidad. Una entrada da directorio consta de 20 campos justificados a la derecha de 8 caracteres cada uno, en dos líneas consecutivas almacena la información que aplica para cualquier tipo de entidad.

Sección de datos de Parámetros (Parameter "P"): Contiene información geométrica que es específica para cada tipo de entidad - tales como el punto final de una entidad línea, el centro y radio de una entidad círculo, o el texto de una entidad de nota general. El dato del parámetro tiene diferente longitud dependiendo del tipo de entidad.

Sección Terminal (Terminate "T"): Es una línea larga; la cual debe ser la última línea del archivo de IGES.

a partir de un recipiente vertical en formato IGES

El inicio:

Este archivo fue producido por SDPTRP 1.0

S0000001

S0000002

1H,,1H,,8Hrecv.igs,18HSDPTRP Version 1.0,5H4.0.0.32,38,6,38,15,,G0000001

0,5H4.0.0.32,38,6,38,15,18HICA - Fluor Daniel,1,,3,2HMU,32, G 2

0.196850393700787,13H1960711.192447,0.0001,6.9808,14HENrique y José,23HSIG 3

stemas CAE/Tecnología,8,0;

G 4

```

118 1 0 1 1 0 0 000000001D 1
118 0 8 1 1 RULED SF ID 2
126 2 0 1 1 0 0 000010000D 3
126 0 8 5 0 BS CURVE ID 4
126 7 0 1 1 0 0 000010000D 5
126 0 8 5 0 BS CURVE 2D 6
120 12 0 1 1 0 0 000000000D 7
120 0 8 1 0 RVLTN SF ID 8
126 13 0 1 1 0 0 000000000D 9
126 0 8 3 0 BS CURVE 3D 10
110 16 0 1 1 0 0 000000000D 11
110 0 8 1 0 LINE ID 12
120 17 0 1 1 0 0 000000000D 13
120 0 8 1 0 RVLTN SF 2D 14
126 18 0 1 1 0 0 000000000D 15
126 0 8 3 0 BS CURVE 4D 16
110 21 0 1 1 0 0 000000000D 17
110 0 8 1 0 LINE 2D 18
    
```

118,3,5,0,0; IP 1

126,6,3,1,1,1,0,0,0,0,0,0.25,0.5,0.75,1,,1,,1,,1,,1,, 3P 2

1,,1,,1,,1,,-5.30878,16.99133,-0.3251,-6.9755,18.657,-0.3251, 3P 3

-6.9649,25.3312,-0.3251,3.1136,25.3312,-0.3251,3.0354,15.3372, 3P 4

-0.3251,-3.64207,15.32567,-0.3251,-5.30878,16.99133,-0.3251,0,, 3P 5

1,,1.16953E-018,0,,1,,; 3P 6

126,6,3,1,1,1,0,0,0,0,0,0.25,0.5,0.75,1,,1,,1,,1,,1,, 5P 7

1,,1,,1,,1,,-5.30878,16.99133,-30.3251,-6.9755,18.657,-30.3251, 5P 8

-6.9649,25.3312,-30.3251,3.1136,25.3312,-30.3251,3.0354, 5P 9

15.3372,-30.3251,-3.64207,15.32567,-30.3251,-5.30878,16.99133, 5P 10

-30.3251,0,,1,2.24550E-016,0,,1,,; 5P 11

120,11,9,0,3,14159; 7P 12

126,3,1,0,1,0,0,0,0,0,0,1,,1,,1,,1,,1,,1,,-1.981, 9P 13

```

24.6052,-0.3121,-1.981,24.5054,4.8579,-1.981,15.6198,4.7502, 9P 14
-1.981,15.6198,-0.1685,0.,1.,1.,-3.69476E-018,0.; 9P 15
110,-1.981,20.1452,-0.3121,-1.981,20.1452,0.6879; 11P 16
120,17,15,0.,3.14159; 13P 17
126,3,3,1,0,1,0,0,0,0,0,1.,1.,1.,1.,1.,1.,1.,-2.0221, 15P 18
24.5655,-30.246,-2.0221,24.4657,-35.416,-2.0221,15.5801, 15P 19
-35.3083,-2.0221,15.5801,-30.3896,0.,1.,-1.,-1.10843E-017,0.; 15P 20
110,-2.0221,20.1055,-30.246,-2.0221,20.1055,-29.246; 17P 21
S 2G 4D 18P 2I T 1
    
```

Listado 4.1.5 Ejemplo de archivo de intercambio en formato IGES

4.2 Construcción y Despliegue de Geometrías NURBS

En esta sección se describe la secuencia de construcción de la geometría completa del recipiente, uniendo cada uno de sus componentes de acuerdo a su particular topología, así como la manera en que son desplegadas en los espacios bi- y tridimensionales del ambiente de diseño.

4.2.1 Proceso Constructivo

Una vez que el usuario ha proporcionado los datos completos del Recipiente o Tanque, se activa una secuencia de rutinas que culmina en la creación de los componentes geométricos del recipiente, su colocación en el dibujo bidimensional y la generación del archivo de intercambio IGES.

La secuencia se puede sintetizar en los siguientes pasos:

1. Selección y Parametrización del Recipiente
 - 1.1 Verificación de Geometrías de acuerdo a relaciones implícitas
 - 1.1 Verificación de Topologías de acuerdo a relaciones explícitas
2. Inicia el ciclo constructivo para todos los componentes del Recipiente
3. Definición del Punto de Inserción o del Punto Relativo
 - 3.1 Transformación Canónica y Topológica aplicada al polígono de control del componente
 - 3.2 Creación del componente en dimensiones reales
 - 3.2.1 Se generan todos los puntos de la superficie de acuerdo a U y V
 - 3.2.2 Se captura la lista de vértices proyectados para el despliegue en 2D
 - 3.3 Creación de las caras de la superficie a partir de los vértices
 - 3.4 Despliegue en 3D
4. Se reinicia el ciclo de acuerdo a Topología, mientras no se trate del último componente
5. Al terminar con el último componente se agrupa todo el objeto
6. Despliegue en 2D y Ubicación dentro del dibujo

Opcional:

7. Generación del Archivo de Intercambio IGES

Una vez que ha sido seleccionado un tipo de recipiente o tanque, para cada uno de los componentes, se verifica el cumplimiento con las relaciones implícitas a cada componente geométrico. Estas proporciones se obtienen de la Tabla de Geometrías (ver sección 4.1.4 *Estructuras de Almacenamiento*). Como cada componente puede ser dimensionado en forma libre (exceptuando el diámetro externo coincidente con el cuerpo), se vuelve necesario efectuar un chequeo de las relaciones que guardan entre sí las dimensiones de los distintos componentes que forman el recipiente o tanque. Esta "verificación" se realiza por medio de las relaciones restrictivas mencionadas en la sección anterior, y que se mantienen en la Tabla de Topologías (ver misma sección 4.1.4 *Estructuras de Almacenamiento*). Pasado este punto entramos en un ciclo de construcción de los componentes, que inicia siempre con la asignación del punto de inserción del componente. En el caso del primer componente, éste será siempre el punto de inserción que se le pide al usuario. Posteriormente, se tratará del punto relativo, el cual indica la posición del "cursor" en el espacio, de acuerdo a las indicaciones de la topología del objeto.

A continuación, el componente es dimensionado de acuerdo a los parámetros dados por el diseñador, de manera que guarden la proporción deseada. En este caso, la forma canónica

del componente (y por ende las coordenadas de los puntos de control) es modificada de acuerdo a los datos de diseño. Adicionalmente, y de acuerdo a la topología correspondiente, la posición de los puntos de control será modificada una o más veces, este vez para reflejar ya sea un desplazamiento o rotación.

En seguida, se obtiene la geometría del componente en dimensiones reales, llamando al algoritmo de creación de superficies NURBS (ver algoritmo 4.1.4). Los puntos de la geometría que correspondan a la proyección del objeto en el plano serán capturados para ser posteriormente colocados en un espacio de 2D. Una vez terminada la generación de los vértices del componente, se crean una a una las caras que lo componen, para desplegarlo inmediatamente en el espacio 3D, en la vista activa.

Se procede de la misma manera con el siguiente componente, revisando esta vez la topología, que nos indica la manera de ubicarlo a partir de un punto relativo.

Una vez que se ha completado el ciclo, los componentes se agrupan dentro del ambiente de AutoCAD para conformar una sola unidad, colocándose los puntos capturados en su proyección en el espacio de 2D.

Opcionalmente el sistema puede generar inmediatamente después el archivo de intercambio de geometrías en formato IGES, para su transferencia a otros modeladores.

4.2.2 Construcción del objeto de acuerdo a la Topología

La construcción de un objeto se establece por medio una secuencia de instrucciones de ensamblado. Esta secuencia es revisada por un "parser", quien interpreta uno a uno los caracteres de la secuencia e identifica cada instrucción. Una vez decifrada, se efectúa la acción. Este "pseudolenguaje" de modelado permite representar jerarquías complejas susceptibles de ser manipuladas como una sola entidad.

La simbología utilizada es la siguiente:

R(grados) = Rotación

$D_{(x)}(\pm \text{variable} \pm \text{variable})$ = Desplazamiento

Pi = Punto de Inserción

tipo = variable que guarda el tipo de la tapa

La secuencia topológica de cada objeto está almacenada en el archivo de topologías de la siguiente manera:

Recipiente Horizontal: RH-ACT-C-AT-/AT-/ACT-ACS-AS-/AS-/ACS-/RH

```

RH
  ACT
    C
    R(0)
    Pi
    AT
      T(tipo)1
      R(180)
      Pi
      Dy(-A)
      T(tipo)2
      R(0)
  /AT
/ACT
ACS
  Pi
  AS
    Dz(-C)
    Dy(+K)
    Dz(L-D)
    Dy(+I)
    S1
    Dy(+J+(A-2(K+J)))
    S2
  /AS
/ACS
/RH
  
```

Recipiente Vertical:

RV-ACT-C-AT-/AT-/ACT-ACF-/ACF-/RV

```

RV
  Pi
  ACT
    C
    R(90)
    Pi
    AT
      T(tipo)1
      R(270)
      Pi
      Dz(+A)
      T(tipo)2
      R(90)
  /AT
/ACT
Pi
ACF
F
/ACF
/RV
  
```

4.2.3 Despliegue en 2D y 3D

El usuario puede indicar la modalidad de despliegue que desee al cambiar de un espacio 2D a uno 3D con una simple selección de menú.

Tanto la modalidad 3D como la 2D requieren que el algoritmo de generación de superficies NURBS genere un conjunto muy grande de puntos por cada geometría. En ambos casos es preciso conectarlos por medio de líneas para darle una forma visual al conjunto.

En la modalidad 3D, las conexiones forman un modelo de alambre mediante el cual se visualiza a cada uno de los componentes del recipiente en el espacio 3D. Si se desea visualizar al mismo recipiente, pero sombreado o sin transparencia, es necesario convertir dicho conjunto de puntos en una formación de vértices y caras. Esto se logra por medio de varios comandos del ambiente AutoCAD (en particular el comando PFACE). El despliegue en 3D se efectúa dentro del espacio de AutoCAD conocido como ModelSpace.

Como una particularidad del algoritmo de despliegue en su modalidad 3D, cada geometría NURBS puede desplegarse en diferentes niveles de detalle o resolución, con solo variar los parámetros independientes u y v . Este tratamiento permite utilizar "bajas" resoluciones al desplegar componentes cuyo cuerpo principal esté orientado hacia el extremo opuesto del plano visual de la pantalla, eliminando computaciones innecesarias. De esta forma es posible el despliegue de más modelos a mayor velocidad.

El despliegue en el espacio de 2D es un proceso particularmente importante debido a que gracias a él se inserta la imagen proyectada en el dibujo del recipiente. Hay dos modalidades de proyección, ambas ortogonales: vista de lado y vista en elevación. La generación de ambas vistas permite dimensionar al recipiente adecuadamente. El algoritmo solo despliega los puntos del recipiente que yacen en el perímetro de cada una de sus geometrías. Después del despliegue el usuario agrega la información para completar el dibujo.

4.3 Procesos Principales

4.3.1 Descripción del Ambiente y Alcance del Programa

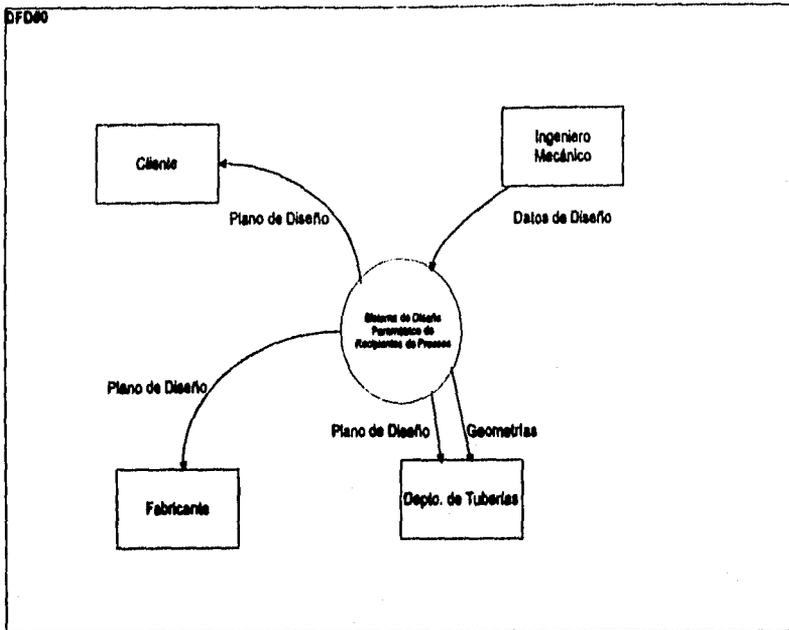


Figura 4.3.1.1 Nivel 0: Alcance del Sistema

El sistema prototipo consiste de rutinas en AutoLisp, menús, cajas de diálogos, tablas de datos y símbolos que se usan en conjunto con AutoCAD para producir dibujos a escala y en dos dimensiones de recipientes horizontales y verticales, en base a su representación tridimensional, así como para generar un archivo estándar de intercambio de geometrías.

Las características originales del sistema son la utilización de algoritmos basados en métodos paramétricos (incluyendo NURBS) para la generación de los recipientes, el almacenamiento de las variables y relaciones de cada uno de los componentes y objetos diseñados en una base de datos.

En esta sección contiene información general acerca del alcance del sistema prototipo, algunas de sus características especiales y las limitaciones del programa.

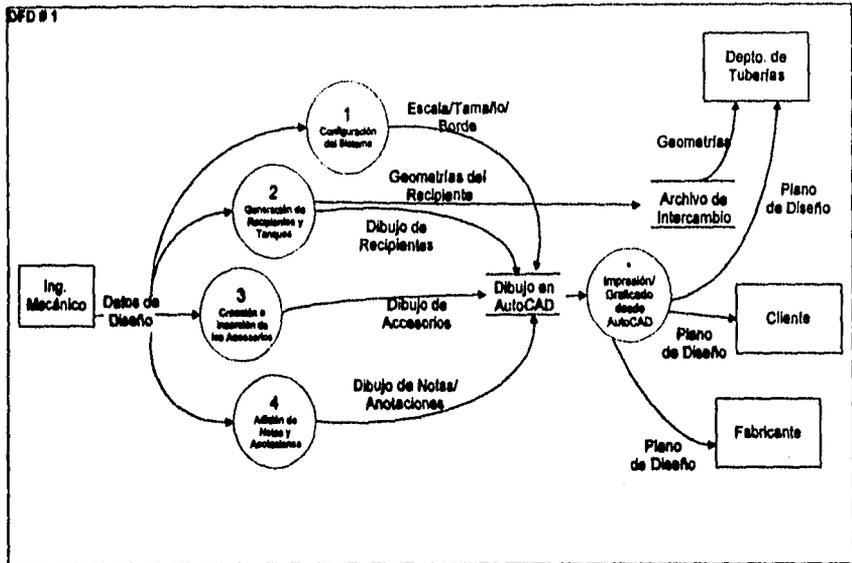


Figura 4.3.1.2 Nivel 1: Proceso del 1 al 4

La figura 4.3.1.2 presenta el diagrama de flujo [36] de los 4 procesos principales en el prototipo: Configuración del Sistema, Generación de Recipientes y Tanques, Creación e Inserción de Accesorios y Adición de Notas/Anotaciones. Durante el proceso de Configuración del Sistema se establecen los parámetros básicos de operación, como la escala, el borde y el pie de plano a utilizar. En el proceso de Generación de Recipientes y Tanques se recopilan los parámetros dimensionales del recipiente o del tanque, para después insertarlo dentro del espacio del borde del dibujo. Adicionalmente, se genera un archivo ASCII conteniendo los parámetros de las geometrías del recipiente en un formato de intercambio. El proceso de Creación e Inserción de Accesorios permite completar el dibujo del recipiente mediante la inserción de varios dispositivos accesorios como componentes del mismo. Durante el proceso 4, Adición de Notas/Anotaciones se añade la información textual de características especiales y procedimientos asociados a cada elemento del recipiente. Estos 4 procesos le permiten al diseñador completar el dibujo del recipiente, el cual será impreso o graficado (proceso marcado con un asterisco) para su entrega al cliente, al fabricante y al depto. de tuberías.

4.3.2 Control de Menú y Cajas de Diálogo

El menú principal del sistema prototipo es el siguiente:

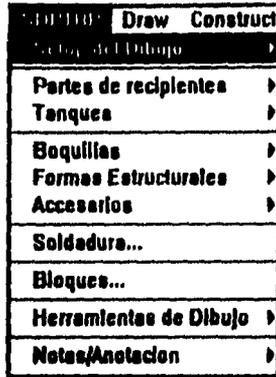


Figura 4.3.2.1 Menú General del Sistema Prototipo

La primera línea, Setup del Dibujo llama al proceso de Configuración del sistema. Las líneas segunda y tercera, llaman al proceso de Generación de Geometría NURBS, ya sea para recipientes o para tanques. El proceso de Creación e inserción de Accesorios es llamado desde las líneas cuarta hasta la octava, en sus diferentes variantes. La línea novena llama a comandos usuales del AutoCAD usados en este tipo de dibujos y no forma parte en realidad de este prototipo. La última línea efectúa la llamada al proceso de Adición de Notas y Anotaciones.

4.3.2.1 La estructura del menú de pantalla

La estructura del menú del sistema prototipo es como sigue:

Proceso 1: Configuración del Sistema

Setup del Dibujo

- Factor de Escala
- Tamaño de Borde
- Tipos de Borde
- Bloques de Borde
- Leyera Mecánico Nuevos
- Configuración

Proceso 2: Generación de Recipientes y Tanques

Partes de Recipientes

Tanques

- Tapa de Cono
- Tapa de Domo
- Tapa Flotante
- Boquillas
- Sumidero
- Apagar Dibujo

Proceso 3: Creación e Inserción de Accesorios

Boquillas

Formas Estructurales
 Accesorios
 Uniones
 Soldaduras

Proceso 4: Adición de Notas/Anotaciones

Notas/Anotaciones
 Nota Cabeza
 Nota Faldón
 Nota Sillata
 Nota Stencil
 Nota Vortex
 Nota Eliminador de Humedad
 Texto Elevación
 Texto Planta
 Texto Vista Final
 Bloque Referencia
 Rev. Triángulo
 Detalles/Secciones

Los archivos para los menús de AutoCAD son archivos ASCII programados en un lenguaje de menús. Cada línea de un menú personalizado contiene una secuencia de órdenes específica, usando una o más órdenes de AutoCAD y las opciones apropiadas. Cada secuencia empieza en la posición más a la izquierda y puede extenderse hacia la derecha indefinidamente.

Secciones principales

Los menús de AutoCAD están organizados en varias *secciones principales*, identificadas por *títulos específicos*. Cada sección principal contiene órdenes que hacen referencia a un dispositivo "hardware" particular o a un área de pantalla.

Subsecciones

Las secciones principales del menú pueden contener muchas subsecciones. Este es el caso normalmente de la sección RECIPIENTE cuyas numerosas subsecciones ayudan a controlar que parte del menú aparece en un momento dado. Cada subsección del menú contiene una lista de secuencias de órdenes específicas que se ejecutarán al seleccionarse con el dispositivo de señalero. Estas secuencias de órdenes pueden incluir sintaxis especiales para controlar la presentación en pantalla de las subsecciones de menú.

4.3.2.2 Introducción de parámetros usando cajas de diálogo

Es casi axiomático que cuando se está programando, cuanto más fáciles se hacen las cosas para el usuario, más duro resulta el trabajo como programador. Una caja de diálogo hace este trabajo mucho más fácil, al facilitarle al usuario la introducción de una larga lista de los parámetros del programa, pero se tiene que añadir código extra a la rutina para permitirlo. Hay dos pasos extra en el desarrollo, necesarios para añadir cajas de diálogo a las rutinas AutoLISP [27]:

1. Se tiene que escribir un archivo ASCII diferente, de código de instrucción, llamado *archivo DCL*. Estos archivos pueden tener cualquier nombre e incluyen la extensión .DCL. DCL (Dialog Control Language = Lenguaje de Control de Diálogo), es un lenguaje aparte, diferente de AutoLISP. Un archivo DCL contiene especificaciones de diseño que instruyen a AutoCAD sobre el formato de su caja de diálogo personalizado.

2.- Una vez que haya creado la especificación de diseño, se tiene que añadir funciones extra a su rutina AutoLISP, que inicien la presentación de la caja de diálogo, que controlen su comportamiento mientras esté en la pantalla, que gestionen la forma en la que acepta información del usuario, que validen los datos introducidos y que los almacenen en las variables que usará su rutina.

Las cajas de diálogo están compuestas por secciones llamadas *mosaicos*, que están colocadas en filas y columnas dentro de la caja de diálogo. Un mosaico puede contener cualquiera de los diversos tipos de mecanismos de introducción de datos estándar, dependiendo de cual sea el mecanismo más fácil para manejar cualquier elemento individual.

La validación de datos es extremadamente importante cuando se usan cajas de diálogo. Por ejemplo, AutoCAD maneja los datos introducidos a través de cajas de diálogo sólo como cadenas de caracteres. Si la rutina usa datos numéricos, las cadenas de caracteres tomadas de la caja de diálogo tienen que convertirse en números antes de que pasen a la parte del procesamiento de la rutina. Si el usuario, accidentalmente, introduce caracteres que no puedan convertirse en números, su rutina tiene que dar cuenta del error de una forma que haga la realización de las correcciones fácil e intuitiva.

Diseño de una caja de diálogo

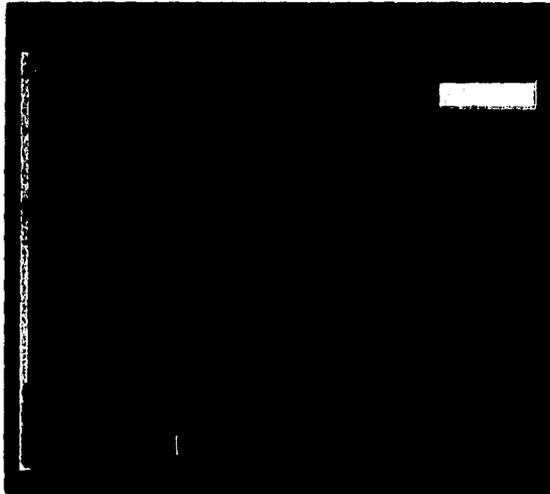


Figura 4.3.2.2 La caja de diálogo para Tapes Semi-elípticas

El Listado siguiente es un archivo DCL que contiene las especificaciones para la caja de diálogo que se ve en la figura anterior.

Listado del Archivo Tapas.dcl para Tapas.LSP

```

hd_se : dialog {
  label = "Tapa S.E. 2:1";
  key = "Tapa_elliptica";
  initial_focus = "id";
  spacer_1;
  : row {
    : image {
      key = "hd_image";
      color = black;
      aspect_ratio = 1;
      width = 30;
      fixed_width = true;
    }
    spacer_1;
    : column {
      : edit_box {
        label = "Espesor:";
        key = "espesor";
        mnemonic = "E";
        edit_width = 8;
      }
    }
  }
  errtile;
  ok_cancel;
}

hd_hem: dialog {
  label = "Tapa Hemisferica";
  initial_focus = "id";
  spacer_1;
  : row {
    : image {
      key = "hd_image";
      color = black;
      aspect_ratio = 1;
      width = 30;
      fixed_width = true;
    }
    spacer_1;
    : column {
      : edit_box {
        label = "Espesor:";
        key = "espesor";
        mnemonic = "E";
        edit_width = 8;
      }
    }
  }
  errtile;
  ok_cancel;
}

hd_cone : dialog {
  label = "Tapa Conica";
  initial_focus = "id";
  spacer_1;
  : row {
    : image {
      key = "hd_image";
      color = black;
      aspect_ratio = 1;
      width = 20;
      fixed_width = true;
    }
    spacer_1;
    : column {
      : edit_box {
        label = "Espesor:";
        key = "espesor";
        mnemonic = "E";
        edit_width = 8;
      }
      : edit_box {
        label = "Altura:";
        key = "altura";
        mnemonic = "A";
        edit_width = 8;
      }
    }
  }
  errtile;
  ok_cancel;
}

```

4.3.3 Proceso 1: Configuración del Sistema

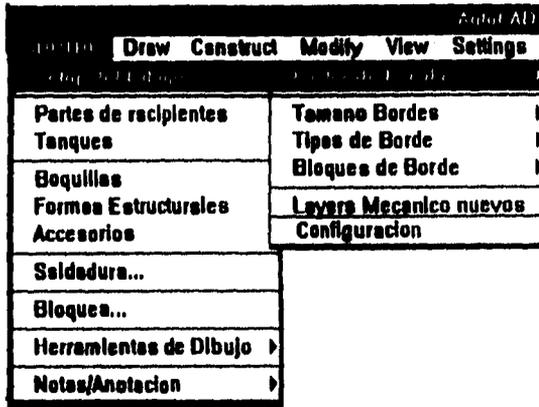


Figura 4.3.3.1

Sesión e instalación

Existen dos tipos de instalación del sistema prototipo:

- a) estación local.
- b) plataforma de red NOVELL NETWORK.

La instalación para a) consiste de lo siguiente:

Para instalar el programa, es necesario crear un directorio llamado SDPTRP en la estación de trabajo, ejemplos:

```
c:\>MD SDPTRP
```

Copiar el conjunto de rutinas lisp (*.LSP), cajas de dialogo (*.DCL), menús del programa (*.MNX, *.MNU) y el archivo por lotes versión local (SDPTRP.BAT) al subdirectorío creado.

La instalación para b) consiste de lo siguiente:

Crear el subdirectorío SDPTRP bajo el directorío donde se halle el "software" en el servidor:

```
w:\software\>MD SDPTRP
```

El subdirectorío se protege mediante el comando FLAG, colocando los atributos de "read only" y de "share", sobre todos los archivos (para no ser modificados y para ser compartidos).

Para entrar en sesión en red, debe tenerse acceso al archivo de comandos SDPTRP.BAT, el cual proporciona las rutas de búsqueda de los directorios de configuración del programa y AutoCAD en el servidor.

```

SET ACAD = W:\SOFTWARE\ACAD12-C\SUPPORT;W:\SOFTWARE\ACAD12-
          C\FONTS;W:\SOFTWARE\ACAD12-C\ADS;c:\SDPTRP
SET ACADCFG = C:\SWAPCAD
SET ACADSWAP = -swapdir C:\SWAPCAD
SET ACADPAGEDIR = C:\SWAPCAD
SET ACADDRV = W:\SOFTWARE\ACAD12-C\DRV
W:\SOFTWARE\ACAD12-C\ACAD %1 %2 %3 %4 %5
SET ACAD =
SET ACADCFG =
SET ACADSWAP =
SET ACADPAGEDIR =
SET ACADDRV =

```

Al ejecutar el archivo SDPTRP.BAT, automáticamente entra a AutoCAD, cargando y configurando el programa de SDPTRP.

La configuración de sistema prototipo, básicamente consiste de lo siguiente:

Archivo de Menú SDPTRP.MNU

Esta extensión del archivo identifica un menú de AutoCAD que contiene indicaciones de menú de pantalla y órdenes ejecutadas cuando elige una indicación en pantalla con el ratón. Para este caso, se creó el menú SDPTRP.MNU, el cual es el personalizado. La versión compilada del MNU, se tiene la extensión MNX.

Archivo de Menú SDPTRP.MNL

Un archivo ASCII con esta extensión contiene código de AutoLISP asociado con un archivo de menú de AutoCAD. Siempre que se carga el archivo de menú, AutoCAD busca un archivo con la extensión MNL y el mismo nombre que el archivo del menú. Si se encuentra tal archivo, lo cargará después de cargar al menú. En este caso, se tiene el archivo SDPTRP.MNL, que contiene las llamadas a las rutinas LISP.

Rutinas LISP

Un archivo ASCII con esta extensión contiene rutinas escritas en AutoLISP, el lenguaje de programación interna de AutoCAD. AutoCAD no compilará estos archivos, de hecho, los carga dentro de la memoria e interpreta sus instrucciones de manera secuencial. Todas las construcciones geométricas, así como las geometrías NURBS son generadas mediante la ejecución de rutinas en lenguaje LISP.

Configuración del Sistema

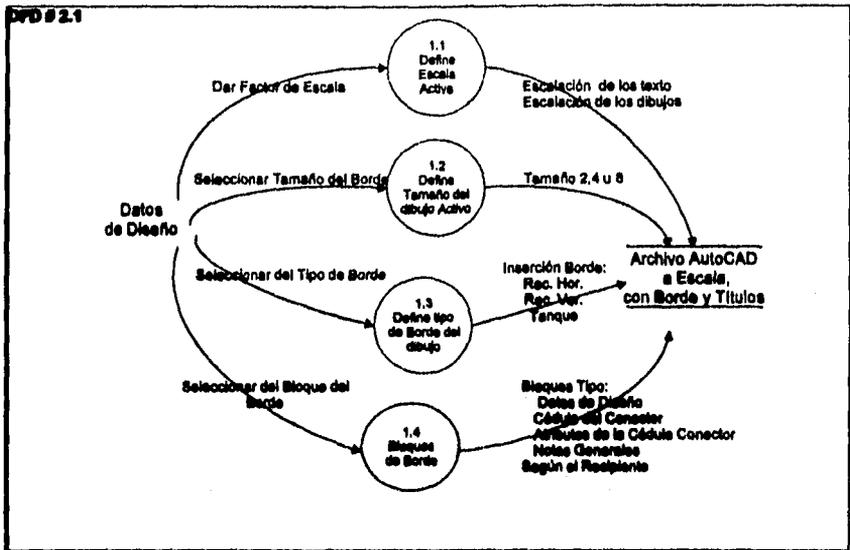


Figura 4.3.3.2 Nivel 2: Configuración del Sistema

El primer paso requerido al inicio de un nuevo dibujo de recipientes, es decidir el factor de escala que se utilizará en el dibujo. El recipiente se dibuja a escala completa, por lo que el factor de escala es equivalente al tamaño del borde de plano, esto es, que se incrementará en tamaño para acomodar ya sea el dibujo del recipiente o del tanque. Los dos tamaños de borde aceptados son el doble carta (11"x17") y el cuatro cartas (34"x22").

Después de haber establecido la escala, será necesario definir el tipo de borde deseado: para recipientes o para tanques. Inmediatamente después, se seleccionan los bloques de datos de diseño para un determinado tipo de recipiente que harán en el pie de plano. A continuación, se muestran los nombres de los bloques que serán insertados dentro del pie de plano:

Recipientes Verticales

- 4V Bloque de Datos de Diseño Vertical con cédula de conexiones.
- 4VD Bloque de "Atributos" de Datos de Diseño Vertical.

Recipientes Horizontales

- 4H Bloque de Datos de Diseño Horizontal con cédula de conexiones.
- 4HD Bloque de "Atributos" de Datos de Diseño Horizontal.

Inserción del Pie de Plano con Información

Después de insertar los bloques de Datos de diseño, es necesario insertar la información del plano como son Número de dibujo, título del dibujo, etc. por medio de los atributos del bloque del pie del plano.

4.3.4 Proceso 2: Generación de Recipientes y Tanques

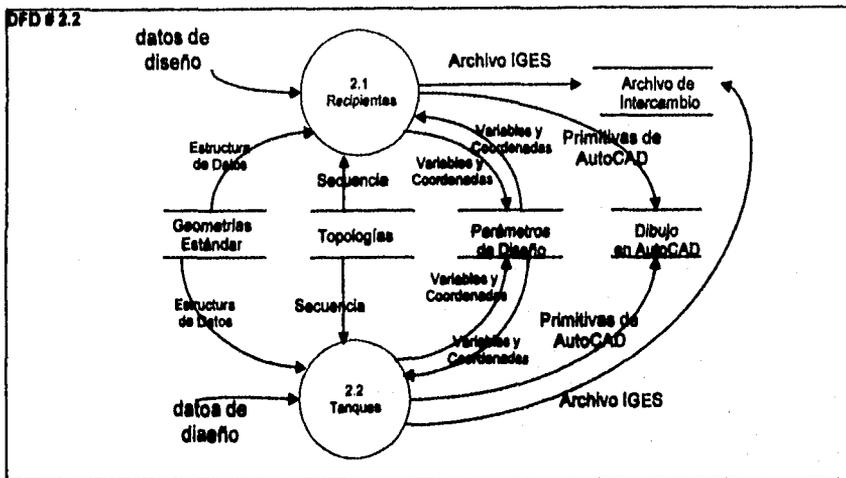


Figura 4.3.4.1 Nivel 2: Generación de Recipientes y Tanques

La generación automática de componentes se divide en dos: generación de recipientes y generación de tanques. Ambos procesos se describen a continuación.

4.3.4.1 Recipientes

El dibujo del cuerpo de un recipiente se efectúa en tres pasos: primero, se le pregunta al usuario especifique que tipo de recipiente va a dibujar; en el segundo, se efectúa el dimensionamiento paramétrico del cuerpo, donde por medio de cajas de diálogo se le pregunta al diseñador por sus dimensiones; en el tercer paso, el programa proceda a realizar la inserción automática o manual de su proyección en un punto dentro del área del dibujo.

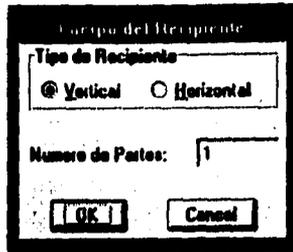


Figura 4.3.4.2

Durante la interacción con el usuario en el segundo paso, se pide la siguiente información: el D.E. (Diámetro Exterior) del cuerpo, su espesor y su longitud, como también la especificación de la tapa y su espesor.

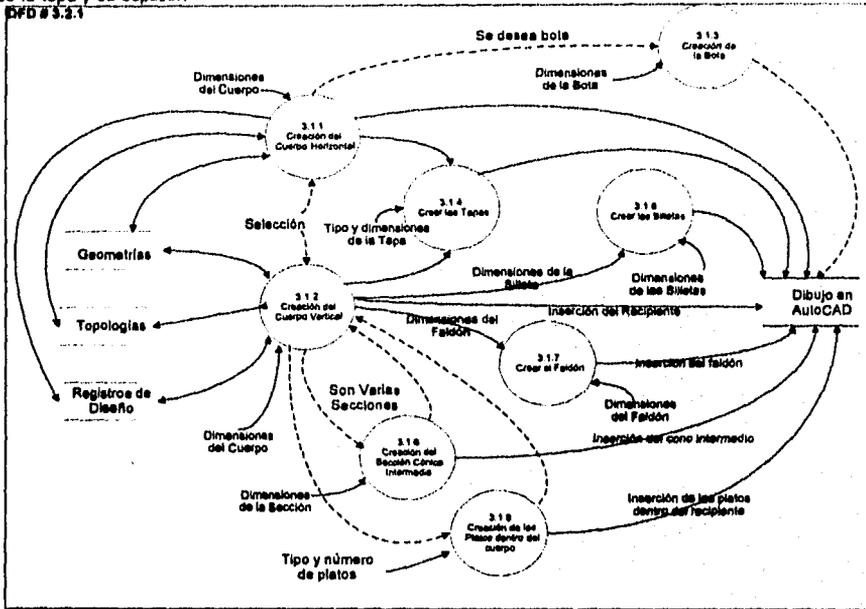


Figura 4.3.4.3 Nivel 3: Generación de Recipientes y Tanques: Recipientes

La inserción puede ser manual o automática. Si se selecciona la opción manual, se le pide al usuario indique las coordenadas del punto de inserción. Si se trata de la opción automática, el programa inserta al cuerpo en función de su tamaño en una posición central dentro del dibujo

Generación del cuerpo

En este prototipo se tratará exclusivamente cuerpos cilíndricos de un solo diámetro, sin anillos de refuerzo ni conexiones tipo torra. La representación en 2D es un rectángulo horizontal o uno vertical, dependiendo si se trata de un recipiente vertical u horizontal.

Recipientes Verticales

Los recipientes verticales básicamente consisten de:

Cuerpo

Tapas

Secciones (en caso de necesitarse)

Soporta Tipo Faldón/Soporta Tipo Ménsula/Soporta Tipo Patas

Boquillas

Recipientes Horizontales.

Los recipientes horizontales básicamente consisten de:

Cuerpo

Tapas

Soporte tipo Silleta

Soporte Tipo Bota

Boquillas

La rutina de generación del cuerpo le pide al usuario proporcione los siguientes datos de diseño:

Para cuerpos horizontales, diámetro interno, longitud, espesor, tipo y espesor de la cabeza. Por último definir si lleva o no bota, en caso de no llevar bota podría llevar una silleta el cual podrá ser colocada posteriormente.

Para cuerpos verticales, es necesario definir si se tienen varias secciones (por default es de una sección o parte). Cada sección pide una especificación en particular, que incluye los siguientes datos: Diámetro Externo, longitud y espesor, así como tipos de tapas y su espesor. En caso de tener varias secciones, los datos de estas se darán en forma independiente, y en caso de necesitarse, los datos del faldón intermedio (elemento que une dos secciones del cuerpo por medio de una sección cónica).

Figura 4.3.4.5 Generación de Recipiente Horizontal

La generación de tapas (llamadas indistintamente cabezas) se realizó de forma muy similar, con el despliegue de cajas de dialogo para cada tipo de cabeza.

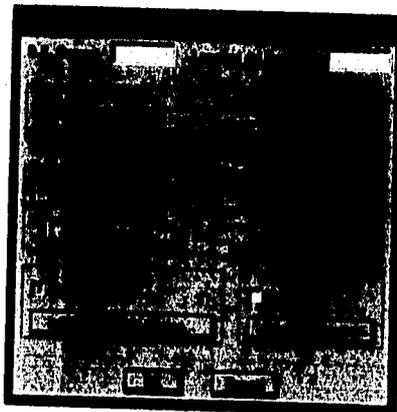


Figura 4.3.4.6 Generación de Recipiente Vertical

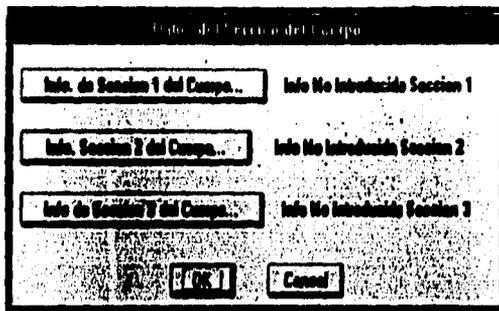


Figura 4.3.4.7 Generación de Secciones del Recipiente Vertical



Figura 4.3.4.8 Especificación de una Tapa Semisférica

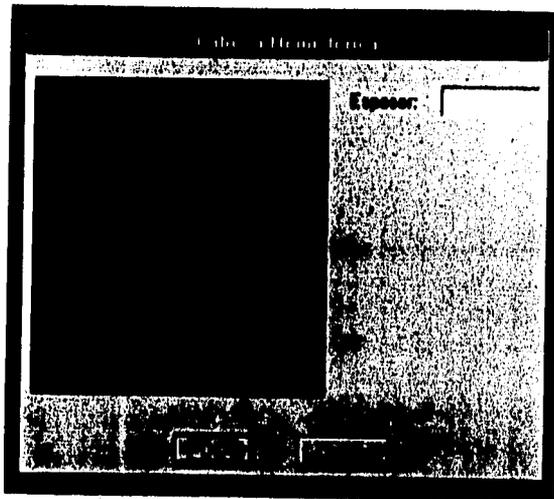


Figura 4.3.4.9 Especificación de una Tapa Semiesférica

Silletas

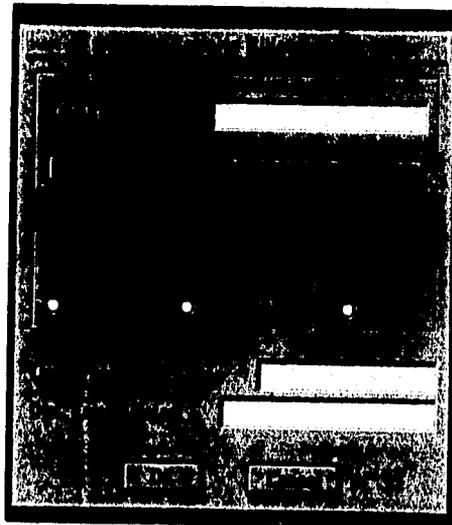


Figura 4.3.4.10 Especificación de una Silleta

Dimensionamiento Silieta

Dimensiones Silieta:

Dim "A":	<input type="text"/>	Dim "H":	<input type="text"/>
Dim "B":	<input type="text"/>	Dim "J":	<input type="text"/>
Dim "C":	<input type="text"/>	Dim "L":	<input type="text"/>
Dim "D":	<input type="text"/>	No. Costas:	<input type="text"/>
Dim "E":	<input type="text"/>	Dia Perno:	<input type="text"/>
Dim "F":	<input type="text"/>		

REC

Figura 4.3.4.11 Dimensionamiento de una Silieta

4.3.4.2 Tanques

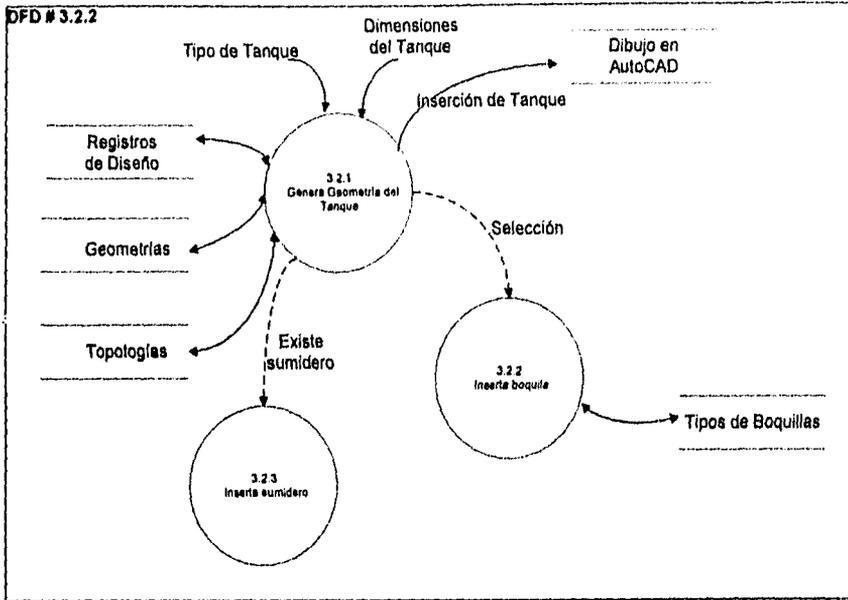


Figura 4.3.4.12 Nivel 3: Generación de Recipientes y Tanques: Tanques

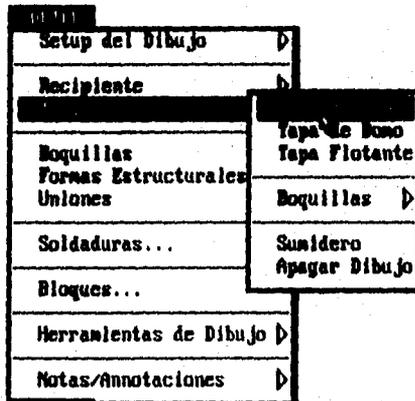


Figura 4.3.4.13 Menú de Selección para Generación de Tanques

Los tanques generados, como antes se mencionó, son genéricos en tamaños 4x, con la única diferencia del tipo de techo. Estos son: Flotante, Domo y Cónico, como se muestran a continuación:

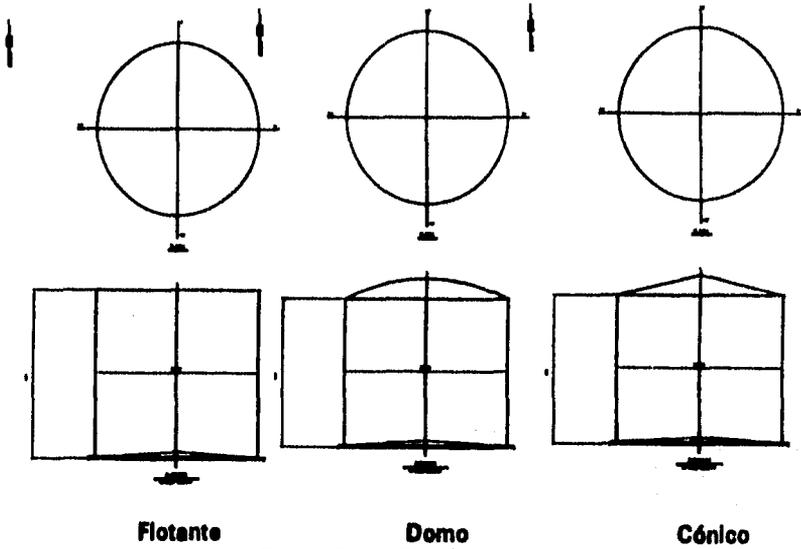


Figura 4.3.4.14 Tipos de Tanques

4.3.5 Proceso 3: Creación e Inserción de los Accesorios

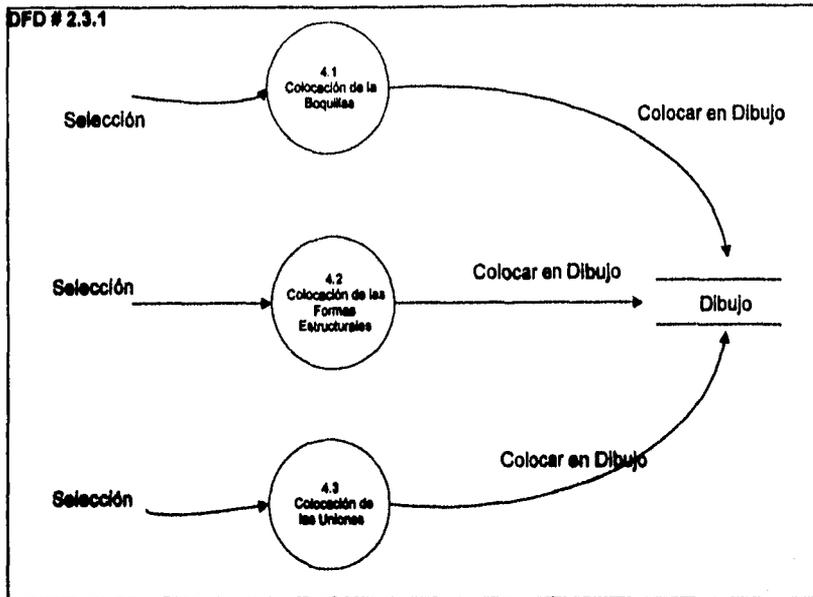


Figura 4.3.5.1 Nivel 2: Creación e Inserción de Accesorios

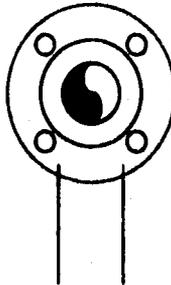
La generación automática de accesorios se divide en tres partes, que son: inserción de boquillas, formas estructurales (ayuda como soporte) y las uniones de tubería.

4.3.5.1 Inserción de Boquillas

La generación de cada boquilla va íntimamente relacionada con el tipo de brida. La boquilla es dibujada por medio de una rutina AutoLISP que incluya cajas de diálogo, donde se alimentan los datos de la brida. Dependiendo de la brida seleccionada se dibujará el detalle de la boquilla.

Figura 4.3.5.2

Al insertar la boquilla el "prompt" solicita la siguiente información: Punto de inserción (Línea central de boquilla y tipo de cara de brida), tamaño, y el rango a utilizar (150#, 300#, 600# o 900#) y el ángulo de rotación. Al proporcionar los datos, automáticamente se generará el detalle de boquilla.



Detalle de Boquilla de Cuello Soldado y 150 libras

Figura 4.3.5.3

4.3.5.2 Inserción de Formas Estructurales

Como ya se mencionó anteriormente las formas estructurales son una ayuda a los soportes de los recipientes y aquí se manejan 3 tipo de formas:

Las formas estructurales también son generadas con rutinas en AutoLISP, llamadas desde el menú.

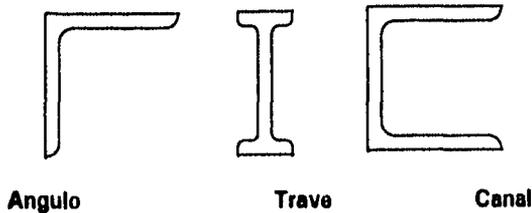


Figura 4.3.5.4

Angulo: Al insertar el ángulo la información solicitada es: Punto de inserción, longitud de la pata 1, longitud de la pata 2, espesor y orientación.

Trave: Al insertar una trave la información solicitada es: Punto de inserción, profundidad del interior de la trave, ancho de las pestañas, espesor, y orientación

Canal: Al insertar una canal la información solicitada es: Punto de inserción, profundidad del canal, longitud de la pata, espesor y la orientación

Se debe notar que en este caso el dibujo es generado con vista en planta.

4.3.5.3 Inserción de Uniones.

Como se mencionó anteriormente las uniones son utilizadas para juntar la tubería o finalizar la misma. Los tipos de uniones son:

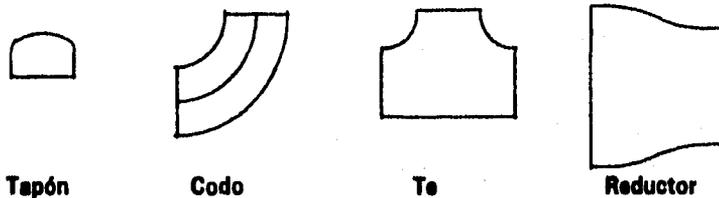


Figura 4.3.5.5

Tapa: Al insertar una tapa de tubería la información solicitada es: Punto de inserción, tamaño y la rotación.

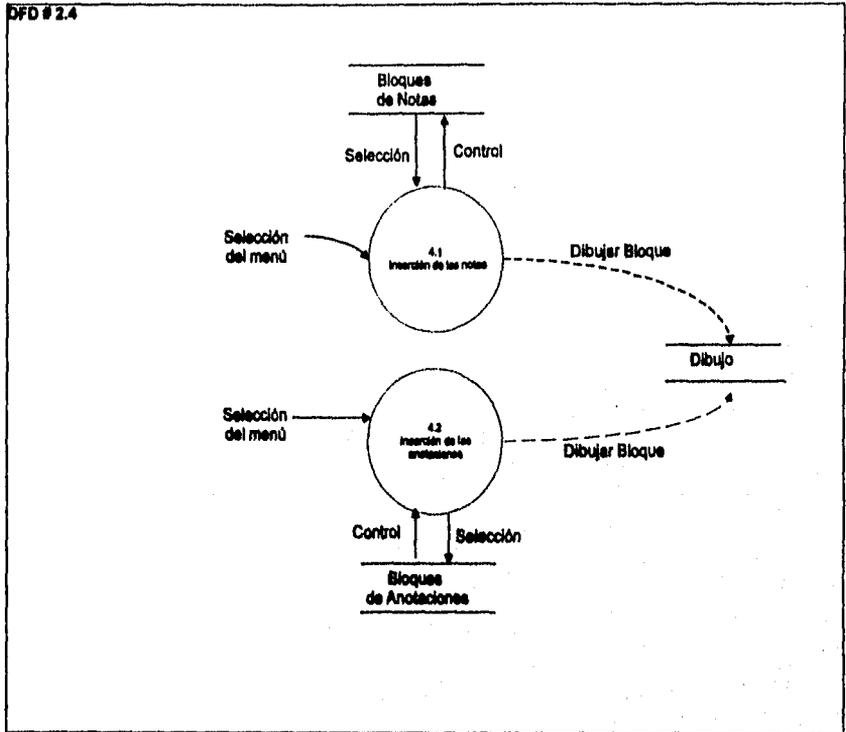
Codo: Al insertar un codo de tubería la información solicitada es: Punto de inserción, tamaño de la tubería (nominal) y ángulo de rotación.

T: Al insertar una T de tubería la información solicitada es: Punto de inserción, tamaño de la cara 1 (rama principal), tamaño de la cara 2 (rama secundaria) y ángulo de rotación.

Reductor: Al insertar un reductor concéntrico o excéntrico de tubería la información solicitada es: Punto de inserción, tamaño de la cara 1 del reductor (terminal larga), tamaño de la cara 2 del reductor (terminal pequeña), ángulo de rotación y tipo excéntrica o concéntrica.

4.3.6 Proceso 4: Adición de Notas y Anotaciones

Los textos estándar se dividen en dos grupos: Notas y Anotaciones. Las Notas son insertadas con cierta información, dependiendo del accesorio. Las anotaciones son estándar, de carácter general y están totalmente predefinidas.

**Figura 4.3.6.1 Nivel 2: Adición de Notas y Anotaciones**

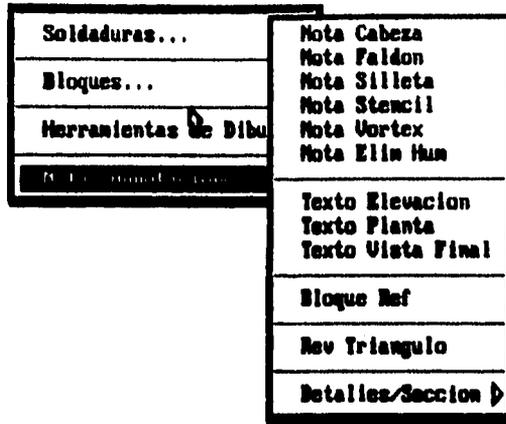


Figura 4.3.6.2 Vista del Menú de Notas y Anotaciones

4.3.6.1 Inserción de Notas

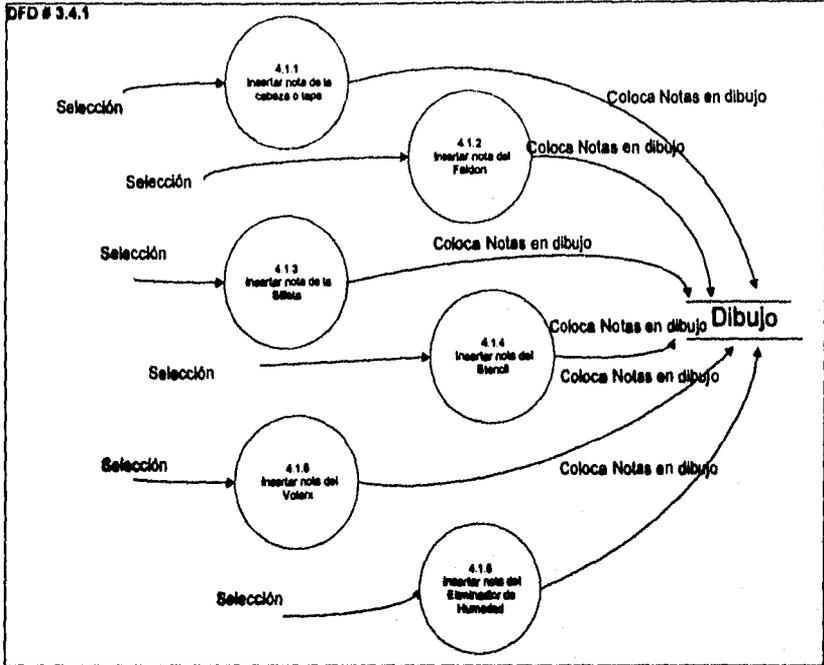


Figura 4.3.6.3 Nivel 3: inserción de Notas

La inserción de las notas de los accesorios son similares con la diferencia que se proporcionen datos de cada uno de los accesorios.

La generación de las notas y anotaciones se efectúa insertando bloques, los cuales contienen atributos y son llamados desde el menú. Los bloques son colocados a la escala que se encuentra activa.

Las notas manejadas en el programa son:

Nota de Tapa:

CABEZA S.E. 2:1
X8 MIN. ESP.
(TIP.) AMBOS EXTREMOS

Nota del Faldón:

DETALLE BASE DEL FALDON XXX
 DE (XX), XX DIA PERNO
 EQ. LSPACIO DE SEPARACION
 DEL RECIPIENTE Q's C.P. = XX
 PLACA BASE: ESP. = XX
 D.E. = XX
 D.I. = XX

Nota de la Silleta:

SILLETA - MARCA NO.
 PARA (2) 1" DIA. PERNOS
 AGUJEROS RANU. EN TERMINAL "lejano" AGUJEROS RANU. EN TERMINAL .

Nota del Vortex: Inserta nota del eliminador de vértices, con el factor de escala actual, la información solicitada para la inserción de la nota es: Punto de inserción, justificación (derecha o izquierda), y el tipo de del eliminador de vértice.

CORTADOR VORTEX
 TIPO 1

Eliminador de Humedad

TIPO " A " DE ELIMINADOR DE HUMEDAD
 CON ESPESOR 1 DIA. 001
 ALAMBRADO T-304 SS 9 # CU. / FT.

4.3.6.2 Inserción de Anotaciones

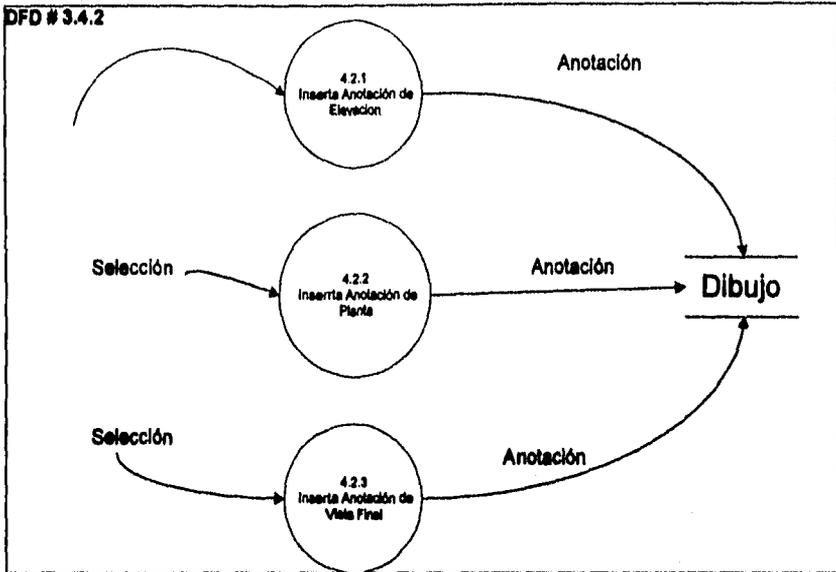


Figura 4.3.6.4 Nivel 3: inserción de Anotaciones

Las anotaciones manejadas en el programa son:

Anotación en Elevación: Solo inserta la leyenda de elevación en el punto deseado y el ángulo de rotación.

ELEVACION
VER PLANTA DESDE
ORIENTACION REAL

Anotación en Planta: Solo inserta el texto de "Elevación Final" en el punto deseado y con el ángulo deseado, con el factor de escala actual.

VISTA EN PLANTA

Anotación en Vista Final: Inserta el texto de "Vista Final", en el punto y el ángulo deseado, al factor de escala actual.

ELEVACION TERMINAL "subsecuente"

4.4 Procedimiento de Diseño, Secuencia de Dibujo y Ejemplos

4.4.1 Procedimiento de Diseño

El diseño de tanques y recipientes afecta tanto al usuario como al fabricante, y se realiza de acuerdo a las siguientes etapas [17]:

- 1.- Establecimiento de las condiciones de diseño (tamaño, temperatura, presión, códigos).
- 2.- Selección de materiales.
- 3.- Determinación de las dimensiones principales.
- 4.- Comprobación de resistencias, diseñando asimismo, detalles constructivos tales como soportes, uniones a tuberías, etc.
- 5.- Verificación del diseño bajo condiciones extremas.
- 6.- Preparación de la información necesaria para la fabricación, prueba y operación del equipo.

En el establecimiento de las condiciones de diseño se tendrá en cuenta lo siguiente:

- 1).- Factores referentes a la función del recipiente
 - a.- Tamaño y forma
 - b.- Fluido contenido
 - c.- Método de soporte (recipientes cilíndricos horizontales soportados sobre pilotes, suspendidos, cilíndricos verticales o esféricos soportados por columnas o por faldones cilíndricos o cónicos)
 - d.- Número posición y tamaño de las aberturas
- 2).- Factores referentes a las condiciones de trabajo:
 - a.- Carga estática (presión interna y/o externa, temperatura, peso y cargas transmitidas por tuberías, viento, sismo, etc.
 - b.- Cargas variables (variaciones lentas de carga normalmente estática, cargas por vibraciones de maquinaria, viento, sismo, etc.
- 3).- Factores referentes a la probabilidad de fractura
 - a.- Costo
 - b.- Proximidad a otros equipos o lugares habitados.

Establecidas las condiciones de diseño, seleccionado los materiales y determinado las dimensiones principales, se reúnen en una hoja de datos y se procede al diseño mecánico del equipo mediante la siguiente secuencia:

- 1.- Revisión de la hoja de datos (no deben faltar los datos requeridos)
- 2.- Cálculo del recipiente:
 - a.- Comprobación de capacidades.
 - b.- Cálculo del espesor del cuerpo
 - c.- Cálculo del espesor de tapas
 - d.- Aplicación de Normas o Procedimientos
 - e.- Cálculo de pesos
 - f.- Análisis de embarque, transporte y montaje (orejas de izaje)
- 3.- Realización del plano de diseño:
 - a.- Croquis de elevación y planta

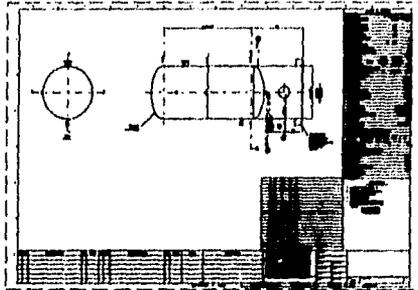
- b.- Croquis de detalles
- c.- Lista de Normas Incluidas en el plano
- d.- Información para tabla de boquillas
- e.- Información para datos de diseño y materiales
- f.- Incluir todas las notas directa o indirectamente sobre el plano
- g.- Anotar los planos de referencia
- h.- Incluir memoria de cálculo (para la Secretaría del Trabajo y Previsión Social)

4.4.2 Secuencia de creación de un dibujo utilizando el sistema de diseño SDPTRP.

1.- Análisis y cálculo de las especificaciones del recipiente.

Antes de empezar a trazar el dibujo se realizan cálculos como:

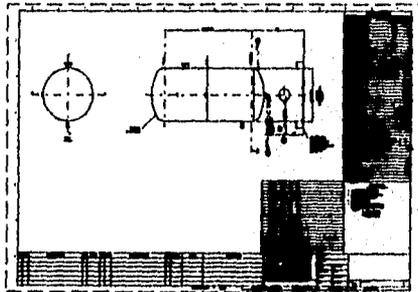
- Tipo de recipiente
- Tipo de cabeza de la placa
- Espesor de la placa del cuerpo.
- Espesor de la placa de la cabeza.
- Dimensiones
- Tipo de aislamiento



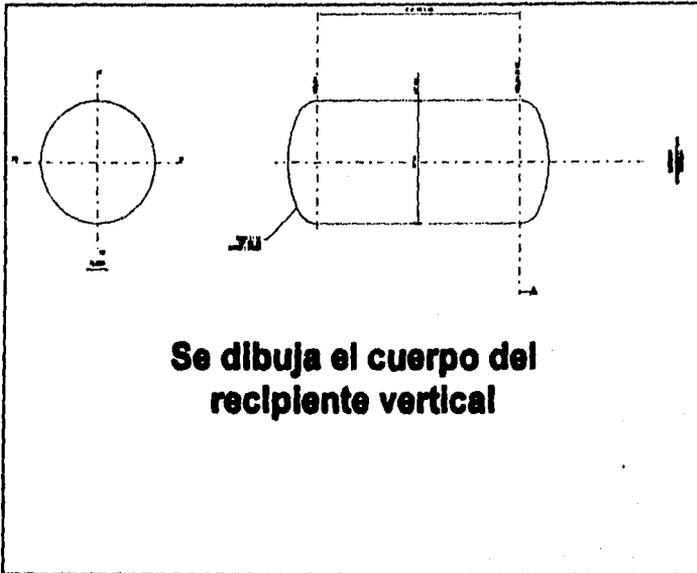
2.- Declaración de la escala y unidades de medición.

Antes de empezar el dibujo se establecen las siguientes condiciones:

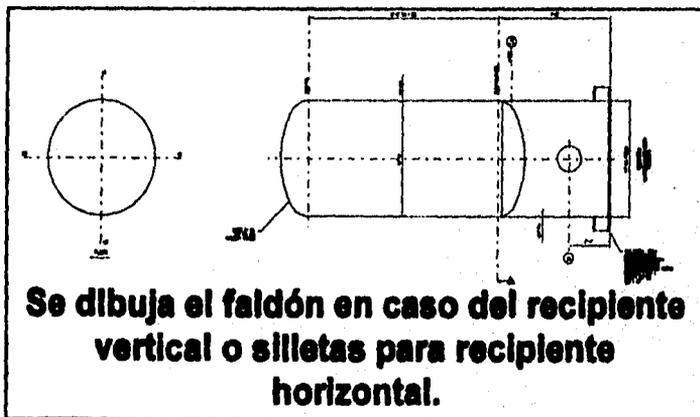
- Determinar Escala
- Determinar las unidades



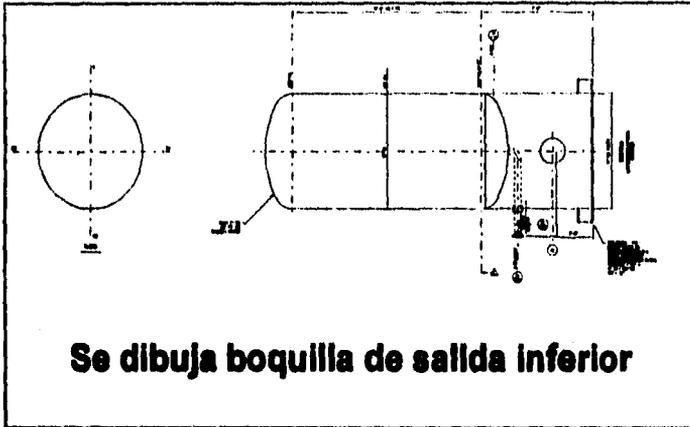
3.- Se proporciona la información del recipiente como diámetro, longitud y espesor del cuerpo.



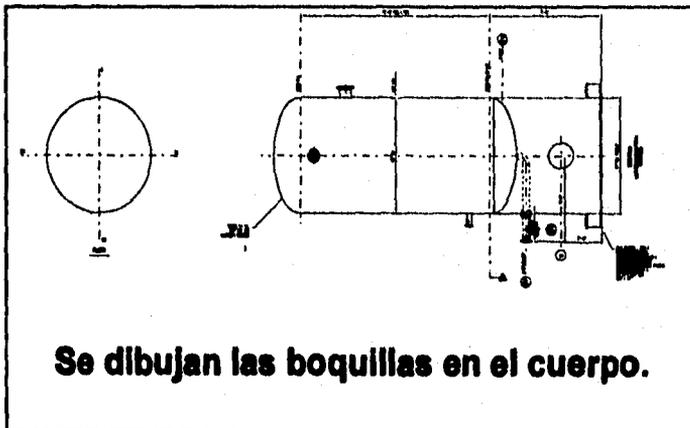
4.- Se proporciona información del faldón como altura, base, espesor y tipo.



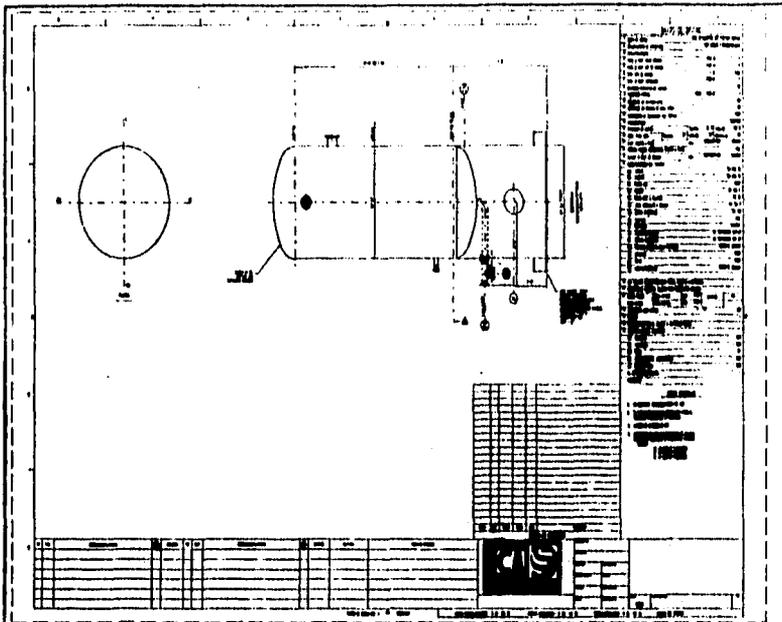
5.- Se selecciona el punto de inserción de la boquilla inferior (o superior) y se proporcionan las dimensiones de la boquilla como son tamaño, localización, entre otros datos.



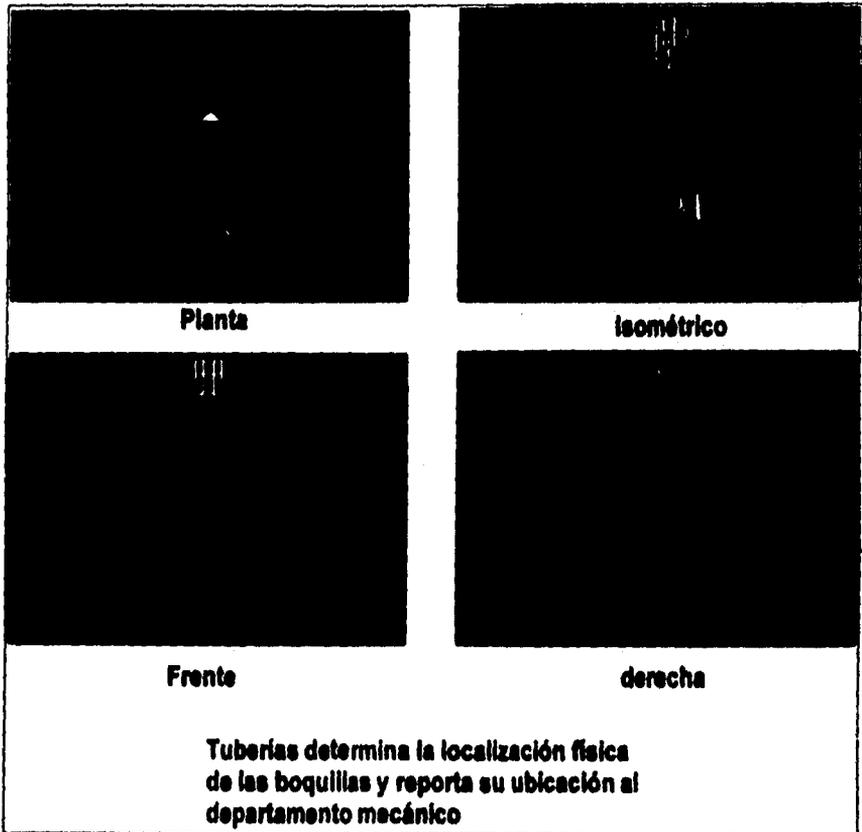
6.- Se selecciona el punto de inserción y se insertan las boquillas en el cuerpo.



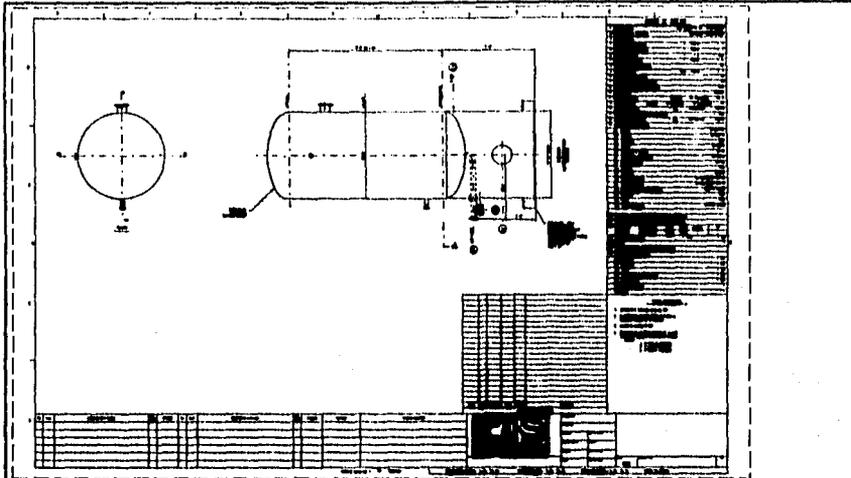
7.- Ubicación de las boquillas.



Se dibujan las boquillas, cuyos datos son proporcionados por el departamento de proceso. Se manda el plano al departamento de tuberías para determinar la localización de las boquillas. Inserta el pie de plano, se proporcionan los datos del pie de plano.

8.- Orientación de boquillas por parte del depto. de tuberías.

9.- Se añaden las boquillas y las notas, se completan las cotas



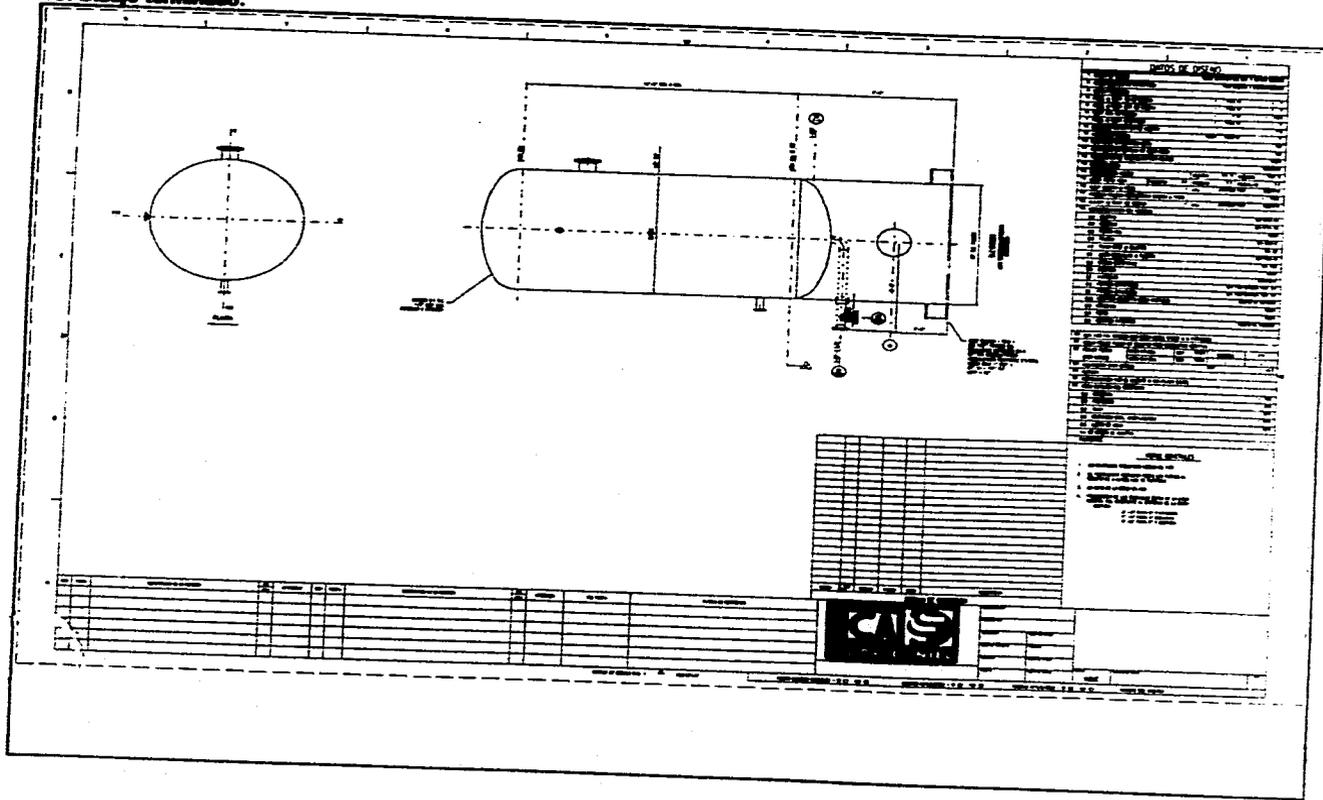
Se dibujan las boquillas con la localización definitiva. Se establecen las acotaciones (el programa las realiza en forma automática).

Se insertan las notas.

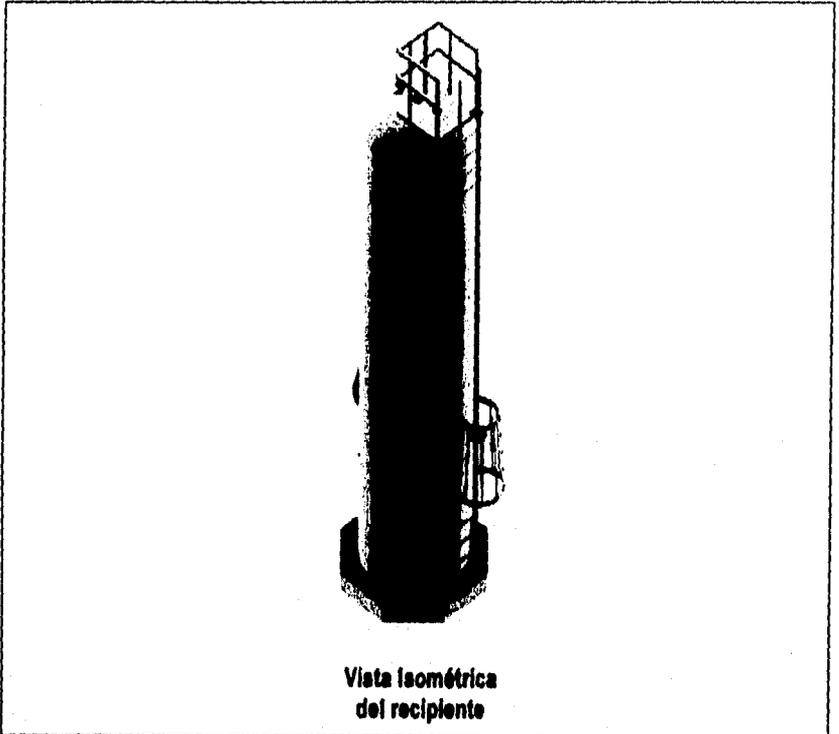
Dibujar detalles de las boquillas, refuerzos o soportes.

Llenar el cuadro de boquillas.

10. Objeto terminado.



11.- Vista texturizada del modelo tridimensional



5. Justificación Económica

"La productividad es la única respuesta a la inflación"

Chester Bowles

La productividad de los diseñadores de recipientes y tanques está muy influenciada por la capacidad de la aplicación de manipular sus partes componentes y de proporcionar estándares de diseño basados en la norma ASME. Una de las mejores formas de justificar la implementación de una aplicación de CAD es la de calcular el retorno de Inversión (RI). Este cálculo proporciona la información necesaria (objetiva, cuantificable) para que los ejecutivos de la compañía toman una decisión acerca del sistema.

La siguiente fórmula proviene del manual "The CAD Productivity Guidebook" de Autodesk, Inc, 1995:

$$\frac{\left(B - \left(\frac{B}{1+E} \right) \right) (12-C)}{A + (B * C * D)} = RI$$

A: Costo Unitario del Sistema (\$)

B: Costo Mensual de Mano de Obra (\$)

C: Tiempo de Entrenamiento requerido (meses)

D: Pérdida de Productividad por Entrenamiento (%)

E: Ganancia Final en Productividad (%)

Explicación de las Variables

A: Costo Unitario del Sistema (\$)

Para calcular el caso de la variable A, se consideró que el sistema tiene un universo potencial de 20 usuarios. El tiempo estimado de desarrollo del sistema es de 1,200 horas-hombre, por lo que se consideraron 60 horas-hombre de desarrollo por estación de trabajo. En el caso que se analiza, no fue necesario considerar el costo de un equipo típico de diseño (PC 486, 12Mb RAM, 300Mb D.D.) ni el costo de una licencia de AutoCAD ya que ambos son parte del equipamiento preexistente por diseñador, y por supuesto que no se intenta evaluar en este caso a la plataforma de CAD. El costo de hora-hombre de programador se calcula a razón de \$ 10.00 dólares.

B: Costo Mensual de Mano de Obra (\$)

En cuanto a la variable B, se considera un costo de \$ 6.00 dólares por hora-hombre (un diseñador experimentado) de la persona que usa el sistema para producir los dibujos, incluyendo las prestaciones y el costo empresa. Para efectuar el cálculo se consideran un promedio de 180 horas por mes por persona.

C: Tiempo de Entrenamiento requerido (meses)

El entrenamiento en el sistema (para alcanzar el nivel de proficiencia) requiere de tres días completos del curso y de dos a tres semanas de entrenamiento para dominarlo completamente dependiendo de la habilidad del diseñador. Para efectos prácticos, consideramos un mes de entrenamiento. No se considera el tiempo de entrenamiento para dominar la herramienta de AutoCAD.

D: Pérdida de Productividad por Entrenamiento (%)

Esta variable considera el tiempo estimado de pérdida en la productividad durante el período de entrenamiento (en porcentajes). Por ejemplo, si una persona que aprende el nuevo sistema sólo genera la mitad del trabajo que normalmente haría, el valor será de un 50%. La pérdida de productividad depende de las habilidades del diseñador.

E: Ganancia Final en Productividad (%)

Después del período de entrenamiento se espera un incremento promedio en la productividad del 400%. Esto es, si se utiliza el sistema, un dibujo quedará terminado en la cuarta parte del tiempo. El criterio que se utilizó para llegar a esta cifra proviene de comparar los tiempos de ejecución de dibujos de diversas clases de recipientes en dos variantes:

Caso A) únicamente utilizando los comandos de AutoCAD (dibujos) y comandos PDS (modelo)
Caso B) utilizando el sistema prototipo de diseño de recipientes

ACTIVIDAD		CASO A	CASO B
DIBUJOS 2D	Recipiente Horizontal (planta y elevación, LdM)	25	6.25
	Recipiente Vertical (planta y elevación, LdM)	25	6.25
	Recipiente Horizontal con Bota (planta y elevación, LdM)	30	7.5
	Tanques (planta y elevación, LdM)	25	6.25
MODELOS 3D	Recipiente Horizontal	5	2.5
	Recipiente Vertical simple	5	2.5
	Recipiente Horizontal con Bota	7.5	3
Tanques	5	2.5	
TOTAL		127.5	36.75

TABLA 5.1 Estimado de Horas de generación de dibujos y modelos de recipientes

Nota: LdM son las siglas de Lista de Materiales.
También se hace notar que se trata de dibujos doble carta, sin el detalle para fabricación.

Dividiendo las horas de la suma total del caso A entre el caso B, se tiene que el incremento de la productividad debido al uso del programa es de 347%.

Como ejemplo, para calcular el Retorno a la Inversión (RI) del primer año se tienen los siguientes valores:

A: Costo Unitario del Sistema	600 dolares
B: Costo Mensual de Mano de Obra	1080 dolares
C: Tiempo de Entrenamiento requerido	1 mes
D: Pérdida de Productividad durante Entrenamiento	50%
E: Ganancia de Productividad despues Entrenamiento	347%
Costo del Capital	36 %
inflación para Mano de Obra	30 %

Una vez dados estos valores se evalúa siguiendo la fórmula y se obtiene el siguiente resultado para el primer año, para una sola licencia:

$$\frac{\left(1080 - \left(\frac{1080}{1 + 3.47}\right)\right)(12 - 1)}{600 + (1080 \cdot 1 \cdot 0.5)} = \frac{9222}{1140} = 8.08 = 808\%$$

En la siguiente tabla se expresan los resultados generales de retorno de inversión durante un lapso de 5 años.

La tasa de interés (costo del capital) que un banco daría si se hubiera pagado el desarrollo con un préstamo. Para efectos del ejemplo se asume una tasa de 36 % anual. Asimismo, se considera una inflación anual sobre el costo de la mano de obra de un 30 % anual.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Costo del Programa	(\$600)	(\$390)	(\$507)	(\$659)	(\$857)
Pérdida de Productividad	(\$540)	\$0	\$0	\$0	\$0
Ganancia Anual de Productividad	\$9,222	\$11,988	\$15,585	\$20,260	\$26,339
Ganancia Anual Neta (Pérdida)	\$8,082	\$11,598	\$15,078	\$19,601	\$25,482
Ganancia Acumulada (Pérdida)	\$8,082	\$19,681	\$34,759	\$54,360	\$79,842
Ri Acumulado	808%	3,682%	6,956%	10,030%	13,104%
Ri Anual Promedio	808%	3,074%	3,074%	3,074%	3,074%
Valor Presente Neto al Costo de Capital	\$23,338				
Periodo de Ri	2 meses				

Tabla 5.2 Resultados del Cálculo del ROI a 5 años

En la tabla se aprecia como resultado final en Valor Presente de nuestra ganancia acumulada, así como el periodo de Retorno a la Inversión de este tipo de programas.

Conclusiones

En primer lugar, se concluye que es factible y deseable la generación (semiautomática o automática) de dibujos en 2D a partir de los modelos de objetos representados en 3D. En cuanto a la interfase del usuario, es posible crear un ambiente 2D que maneje internamente modelos 3D de forma transparente, sin que los diseñadores necesariamente se percaten o preocupen por su existencia. Los beneficios del esquema son importantes, ya que se eliminaron actividades de modelado en el proceso de trabajo existente, demostrándose su redundancia. Es de notarse sin embargo que el tiempo de respuesta del sistema en la construcción de los dibujos es satisfactorio sólo si se utiliza equipo de cómputo adecuado para el diseño en 3D.

En segundo lugar, el uso de un pseudo-lenguaje de modelado de objetos como base para la representación de sus geometrías y su topología se traduce en un menor trabajo de mantenimiento al código del programa, especialmente cuando se desean introducir al ambiente nuevos componentes u objetos.

En tercer lugar, se observa que los NURBS ocupan un espacio de almacenamiento mínimo. En particular es posible modular la resolución de la representación de cualquiera de las geometrías de manera arbitraria, de manera que sea posible la utilización de algoritmos de despliegue con bajo nivel de detalle en el caso de componentes "alejados" del espectador.

Dadas las ventajas de los NURBS para ser transformados geoméricamente, manipulados sus puntos de control, su gran alcance en la representación de geometrías, su aplicación paramétrica y su requerimiento de un formato muy compacto, se concluye que son sin duda un excelente candidato para convertirse en el estándar de facto para la representación de geometrías en los paquetes de dibujo y diseño.

Mirando como ampliar este trabajo en el futuro, un mayor desarrollo del pseudo-lenguaje aquí explicado en un lenguaje de modelado más robusto, facilitaría la creación de geometrías tridimensionales complejas, extendiendo el espectro de posibilidades al enorme conjunto que la teoría de NURBS permite representar. Debido a que tanto la estructura geométrica como la topológica fueron concebidos como objetos, esta estructura se presta de manera natural para su programación en un ambiente orientado a objetos.

Finalmente, la aplicación de métodos paramétricos en este trabajo estuvo limitado en los siguientes aspectos (recañándose que no son limitaciones *per se* de los NURBS):

- El enfoque, tal como está implementado, no soporta la colección incremental de datos de diseño durante la vida del modelo.
- Las clases de geometría susceptibles de representarse en base a las topologías presentadas son limitadas, debiéndose utilizar esquemas más robustos que permitan combinaciones más complejas.
- El programa aún no permite la creación explícita de los polígonos de control de cada geometría. Una primera alternativa podría ser la construcción automática de componentes (y la tabla de geometrías) en base a un modelo elaborado por el diseñador.
- El programa no incorpore información sobre el intento de diseño.
- El programa no incorpora la búsqueda de diseños previos que puedan ser adecuados, y por lo tanto se repiten diseños similares o incluso idénticos.

Bibliografía

- [1] Alvarez Medina, G. M. "Un sistema de Modalado Geométrico Híbrido, basado en superficies recortadas y Beta-Splines", Tesis Maestría. DEFFI, UNAM
- [2] Arvo, James (edited by) "Graphic Gems II", Academic Press 1991, USA
- [3] AutoLISP Programmer's Reference Manual, release 12, may 26, 1992, Autodesk Inc.
- [4] Barley S.A., "Executive-centred system design for CAD applications", CAD vol. 24 number 5 may 1992 ed. Butterworth-Heinemann
- [5] CAD, Computer Aided Design, "Special Issue: NURBS: theory and practice", volume 27, number 2, Elsevier Science Ltd., February 1995, USA
- [6] Chou, Jln and Piegl, L., "Data reduction using cubic rational b-splines", ", IEEE Computer Graphics & Applications, May 1992, USA
- [7] Dubrovín, B., Nývřkov, S. y Fomenko, A., "Geometría Moderna", Editorial Mir, 1987, Moscú
- [8] Farin, G.E. "Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design - A practical guide" 3rd. ed., Academic Press, 1993, Boston, USA.
- [9] Ferin, Gerald, "From Conics to NURBS: a Tutorial and Survey", IEEE Computer Graphics & Applications, september 1992, USA
- [10] Foley, James at all, "Computer Graphics, principles and practice" Addison-Wesley Publishing Co. 1992
- [11] Fowler, B. and Bartele, R., "Constraint-based curve manipulation", ", IEEE Computer Graphics & Applications, September 1993
- [12] Geaner R., and Smith, J. "Maximizing AutoLISP", NRP, 1992, USA
- [13] Hall, Tom, "Productivity issues in PC-CAD graphics", ", IEEE Computer Graphics & Applications, October 1987, USA
- [14] Harrington, Stevan "Computer Graphics: a Programming Approach" McGraw-Hill ,1985, USA
- [15] Kirk, David (edited by) "Graphic Gems III", Academic Press 1992, USA
- [16] Kurlend, R., "Understanding variable-driven technology", Computer Aided Engineering, January 1994, Penton Publication, USA
- [17] León Estrada, J.M., "Diseño y Cálculo de Recipientes a presión", Ingeniería León S.A.1994
- [18] Mantyla, M., "An introduction to Solid Modeling" Computer Science Press, 1988, USA
- [19] McMahon, C.A. at all, "Observations on the Application and development of parametric-programming techniques", CAD vol. 24 number 10 october 1992 ed. Butterworth-Heinemann
- [20] Megyesy, Eugen F., "Pressure Vessel Handbook", ninth edition, 1992, USA
- [21] Moss, Dennis R., "Pressure Vessel Design Manual", 1989, Gulf Publishing Co., USA
- [22] Pahl, G. y Beitz, W. "Engineering Design", Springer-Verlag 1984, UK
- [23] Piegl, L. "On NURBS: a Survey", IEEE Computer Graphics , January 1991, USA
- [24] Piegl, L., "Algorithms for computing conic splines", ASCE J. Computing in Civil Engineering, Vol. 4, No. 3, July 1990
- [25] Piegl, L. and Tiller, "A menagerie of rational B-splines circles", IEEE CG&A, Vol. 9, No. 5, Sept. 1989
- [26] Pugh, S. and Smith, D.G. "CAD in the context of Engineering Design - the designer's viewpoint" Proc. CAD 76, 1977
- [27] AutoCAD Customization Manual, release 12, may 26, 1992, Autodesk Inc.
- [28] Requicha, A. A., "Representation for rigid solids:Theory, methods and systems" Computing Surveys, Vol. 12, No. 4, Dec 1980, citado en Alvarez Medina, G.M. ref. anterior
- [29] Requicha, A.A.G. and Rossignac J.R., "Solid Modeling and Beyond", ", IEEE Computer Graphics & Applications, September 1992
- [30] Rogers, David F., "Procedural Elements for Computer Graphics" McGraw-Hill ,1985, USA

- [31] Rogers David F. and Adams J.A., "Mathematical Elements for Computer Graphics", 2nd Edition, McGraw-Hill, 1980, New York, USA
- [32] Roller, D., "An approach to computer-aided parametric design", CAD vol. 23 number 6 June 1991 ed. Butterworth-Heinemann
- [33] Thomas Robert M., "AutoCAD 12 para Profesionales", McGraw-Hill/SYBEX, 1993, USA
- [34] Tiller, W., "Rational B-Splines for curve and surface representations", CG&A, Vol. 3, No. 10, Sept. 1983
- [35] Wilkes, J.R. y Leonard, R. "Variant design as a means of automating the design process" Computer-Aided Engineering Journal, June 1988
- [36] Yourdon, Edward "Yourdon Systems Method: Model-driven Systems Development" Yourdon Press, 1993, USA
- [37] AutoCAD IGES Interfere Specification Manual, release 12, may 26, 1992, Autodesk Inc.
- [38] Terquín, Anthony J. and Blank, Leland T., "Ingeniería Económica", McGraw-Hill 1987

Glosario

Algoritmo de deCasteljau El algoritmo que calcula recursivamente un punto en una curva de Bézier.

Bloque Una entidad gráfica en AutoCAD, creada por el usuario que se reutiliza frecuentemente en varios dibujos, por lo que es almacenada como archivo.

B-Spline Una función polinomial continua en n segmentos. Se define sobre una partición de nudos, tiene soporte local, y es no-negativa. Si una curva Spline es expresada en términos de B-Splines, se le llame Curva B-Spline.

CAGD Computer Aided Geometric Design (diseño geométrico asistido por computadora)

Caja de Diálogo Un interfaz gráfico para la introducción de datos en AutoCAD. Requiere ser programado en cada caso mediante un lenguaje simple y fácil de usar.

Caracterización Convexo El conjunto convexo más pequeño que contiene un conjunto dado.

Colineal Que estén en una línea recta

Conjunto Convexo Un conjunto tal que la línea recta que conecte dos puntos cualquiera del conjunto esté contenida completamente dentro del conjunto.

Construcción Geométrica Es un componente gráfico que se construya utilizando una secuencia de comandos de primitivas de AutoCAD. Cada componente se debe programar por separado.

Continuidad Geométrica Las propiedades de suavidad de una curva o superficie que son más generales que su orden de diferenciableidad.

Control Local Un esquema de curva o superficie tiene la propiedad de control local si un cambio en los datos de entrada sólo cambia la curva o superficie en la región cercana al dato cambiado.

Curva El camino de un punto que se mueve en el espacio. Otra definición es: la imagen de una línea real bajo un mapa continuo.

Curva de Bézier Una curva polinomial que se expresa en términos de los polinomios de Bernstein.

Curva Spline Una curva continua compuesta de varios segmentos polinomiales. Las curvas Spline son representadas normalmente como B-Splines. Si los segmentos son polinomiales racionales, se tendrá una curva spline racional.

Curvas y Superficies Racionales Proyecciones de curvas o superficies no racionales (Integrales) de un espacio de cuatro dimensiones a uno de tres.

Disminución de invarianze Intuitivamente: un esquema de curva o superficie tiene esta propiedad si su salida tiene menos "culabros" que los datos que sirven para construirlo.

Espacio La colección de todos los puntos.

Forma en base e Potencias Un polinomio está representado en la forma en base a potencias si se expresa en término de los monomios $1, t, t^2, \dots$

Función Base Las Funciones forman espacios lineales, los cuales tienen bases. Los elementos de estas bases son las funciones base.

Geometría La representación matemática de un objeto en el espacio.

Interpolación Encontrar una curva o superficie que satisfaga algunas restricciones impuestas exactamente. La restricción más común es el requerimiento de que se pase por un conjunto de puntos dados.

Invarianze Afine Una propiedad de un esquema de generación de una curva o superficie: no importa el cálculo de un punto en una curva o superficie ocurre antes o después de que un mapa afín se aplique a los datos de entrada.

Mapa Afín Cualquier mapa compuesto de traslaciones, rotaciones y escalamientos. Mapas paralelos a paralelos. Deje intactos los radios de puntos colineales.

Menú Lista de comandos que puedan seleccionarse y a la que se puede acceder desde un tablero digitalizador o desde la pantalla. AutoCAD cuenta con siete diferentes de menú: de dispositivo auxiliar, de botones, de cursor, de iconos, despleables, de pantalla y tablero.

Modelado de Sólidos La descripción de objetos que tienen como fronteras e superficies.

Nudo Una curva spline se define sobre una partición de un intervalo en la línea real. Los puntos que definen la partición se conocen como nudos. Si se evalúa la curva en un nudo, la curva spline pasa a través de un punto de junta.

NURBS Nonuniform Rational B-Spline. Una curva B-Spline racional no-uniforme.

Polígono B-Spline Los coeficientes de expansión de una curva B-Spline en términos de B-Splines son puntos. Cuando se conectan de acuerdo a su numeración natural, forman el polígono de B-Spline.

Polígono de Control Vea polígono de Bézier o polígono B-Spline.

Polinomio de Bernstein Las funciones base de las curvas de Bézier.

Polígono de Bézier Los coeficientes en la expansión de una curva de Bézier en términos de polinomios de Bernstein son puntos. Cuando se conectan de acuerdo a su numeración natural, forman el polígono de Bézier.

Precisión Un esquema de generación de curvas o superficies tiene una precisión n -ésima si reproduce polinomios de grado n .

Punto Una localidad en el espacio. Si uno usa sistemas de coordenadas para representar el espacio, un punto está representado como un n -tupla de números reales.

Punto de Control Uno de los puntos en un Polígono de Control. En términos prácticos corresponde a una coordenada x, y, z de una representación geométrica.

Punto de Juntura Una curva spline está compuesta de segmentos. El punto común compartido por dos segmentos se llama punto de juntura. También vea nudo.

Sección Cónica La curva de intersección entre un cono y un plano. Otra definición es: la imagen proyectada de una parábola. Una cónica no degenerada es ya sea una elipse, una parábola o una hipérbola.

Segmento Una curva polinomial individual (o polinomial racional) en un ensemble de tales curvas para formar una curva spline.

Superficie El lugar de todos los puntos de una curva móvil y deformable.

Tangente La línea recta que mejor se aproxima a una curva suave en un punto en ella. Esta línea recta es paralela al vector tangente.

Topología El conjunto de relaciones espaciales entre varios componentes geométricos. Estas relaciones son transformadas matemáticamente para generar rotaciones, escalaciones, desplazamientos y proyecciones.

Vector Una dirección. Usualmente la diferencia de dos puntos.

Vector Tangente La primera derivada de una curva diferenciable en un punto en ella. La longitud del vector tangente depende de la parametrización de la curva.