

# Capítulo 7

## El Proceso de Diseño

### 7.1. Introducción

Una definición de Ingeniería es "Diseñar bajo restricciones". Para que una empresa privada sea exitosa, una línea de producto debe ser competitiva en muchos sentidos. Deben ser atractivos, funcionales, eficientes, durables, confiables, costeables y mas importante aún deben satisfacer las necesidades del cliente. También es necesario que los productos lleguen rápidamente al lugar del mercado. Un proceso de diseño estructurado ayuda al ingeniero diseñador a alcanzar estas metas.

Una visión del proceso de diseño es la mostrada en la figura 7.1. Muchos productos comienzan en "las nubes", como la expresión de una necesidad específica, pero sin una visión clara de como satisfacer esa necesidad. Eventualmente, surgirá un producto completamente nuevo. Entre medio, sin embargo, la ingeniería de diseño generará muchos conceptos alternativos y elegirá entre estos conceptos. Algunas veces, un concepto tendrá conflictos con las restricciones del proyecto, esto se aprecia en la figura 7.1. como la barrera impenetrable. Las restricciones pueden ir desde leyes físicas hasta económicas e incluso restricciones políticas. Otra parte importante del proceso de diseño es que es iterativo (puede ser necesario retroceder y empezar todo de nuevo). Es importante destacar que, los productos exitosos usualmente evolucionan en el tiempo. El automóvil actual, por ejemplo, es el resultado de muchos años de evolución, con mejoras siendo implementadas constantemente.

### 7.2. Herramientas del Proceso de diseño

Existen muchas herramientas y conceptos que son útiles en el proceso de diseño. Algunas de las herramientas mas usadas son los diarios de diseño y el concepto de M.S.E (K.I.S.S. por sus siglas en Inglés), conservación de la ambigüedad, C.E.P (E.T.C por sus siglas en Inglés) y el de construcción rápida de prototipos.

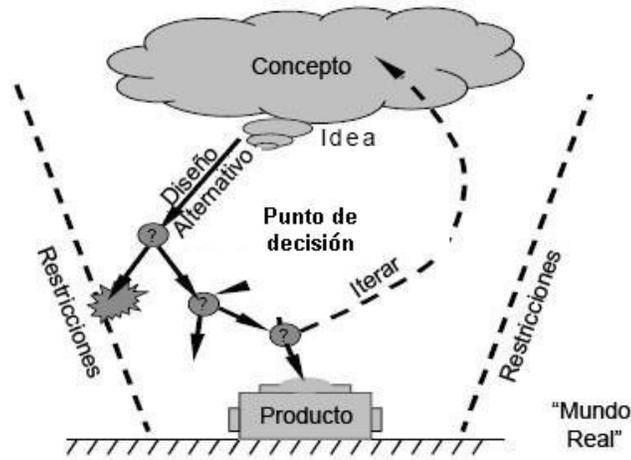


Figura 7.1: Esquema del Proceso de Diseño

## Diarios de diseño

Estar bien documentado es esencial. Tener a mano una revista de diseño es una buena idea practicada por la mayoría de los diseñadores exitosos. Adicionalmente de servir como una referencia útil, una revista especializada de diseño puede entregar evidencia crítica de cuando una idea fue concebida, cosa que puede ser muy importante al momento de obtener una patente.

Algunas sugerencias para llevar un Diario de Diseño son:

- Usar un cuaderno, en vez de hojas sueltas
- No ser tímido, ¡escribir con lápiz pasta!
- Llevar el diario a todos lados (las buenas ideas aparecen en cualquier momento)
- Pegar en el Diario de diseño tarjetas de negocios, impresiones del computador, artículos cortos, etc.
- Agregar la fecha de todos lo que se ingrese al diario
- Tener dos testigos que firmen y daten la pagina de una idea nueva y critica.
- Escribir todos los días en el Diario

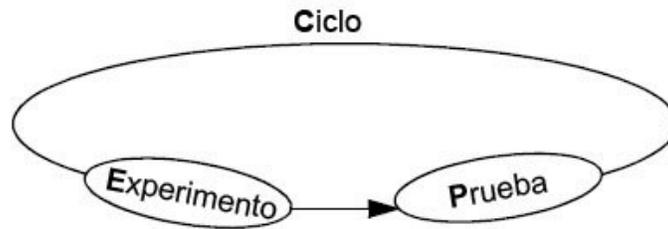


Figura 7.2: C.E.P.

## Algunos Conceptos de Diseño

Los siguientes son algunos conceptos básicos de diseño aplicables a cualquier proyecto de diseño.

M.S.E. (K.I.S.S por sus siglas en inglés)

Las siglas quieren decir "Mantenlo simple, estúpido". En general, el diseño más simple es el mejor, tiende a ser el más fácil de realizar, requiere de menos partes y es el más confiable. Aún en los sistemas complejos, mientras más simples son los componentes individuales, mejor.

Conservacion de la ambigüedad

Acuñado por la división de diseño de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Stanford "conservar la ambigüedad" quiere decir que en etapas tempranas de diseño, el diseñador debe mantener abiertas la mayor cantidad de posibilidades que sean posibles. En esta etapa es importante enfocarse en el "Qué" más que en el "Cómo". No comprometerse tanto con la primera idea que aparece, sino seguir buscando mejores formas de resolver el mismo problema (es decir, más barata, más rápida, más fácil, etc.).

C.E.P. (E.T.C por sus siglas en inglés)

Otro concepto de Stanford es el C.E.P siglas de "Ciclo-Experimento-Prueba". Como se muestra en la figura 7.2, C.E.P hace referencia a la naturaleza iterativa del diseño. Una vez que el diseñador tiene un concepto que Ella/El cree que puede funcionar se realiza un experimento para probar el concepto, este ciclo seguirá hasta que funcione bien.

## Construcción Rápida de Prototipos

¡El papel aguanta todo!, Sólo cuando las ideas son probadas físicamente, en la realidad, el diseñador puede tener una idea de las ventajas (o desventajas) de la nueva idea. Detalles del uso de modelaje en el proceso de diseño serán discutidos en una sección posterior.

### 7.3. Pasos a Seguir en el Proceso de Diseño

Un esquema del proceso de diseño se describe a continuación [1]:

- Reconocer la necesidad
- Definir el problema
- Planear y Ordenar el Proyecto
- Reunir información
- Generar conceptos alternativos para satisfacer los requerimientos del diseño
- Evaluar las alternativas
- Seleccionar el concepto que más promete
- Comunicar el diseño
- Implementar el diseño

Aunque esta lista es secuencial, muchas de estas etapas se pueden realizar al mismo tiempo. La "Ingeniería Concurrente" es un proceso que realiza estas fases en paralelo (no en serie) y es muy practicada en la industria hoy en día. Este capítulo provee información detallada de los distintos pasos en el proceso de diseño, que pueden ser útiles en muchos proyectos de diseño abierto.

#### Paso 1: Reconocer la necesidad, el cliente

Los diseñadores desarrollan un producto para ganar utilidades, esto implica que a alguien le gustará lo suficiente como para comprarlo. Por esto, es esencial determinar por adelantado lo que el cliente quiere. Una forma de lograr esto es entrevistando clientes directamente y preguntarles sobre sus necesidades. Por ejemplo, la empresa "Storage Technology Corporation" (STC) en Louisville, CO, produce sistemas de gran capacidad para almacenar datos. En las primeras etapas del diseño de una nueva línea de productos SCT trajo representantes de sus clientes de todo Estados Unidos (pagando todos los gastos) y escuchó sus necesidades. Un mejor enfoque aún

sería que la empresa vaya directamente hacia el cliente a escuchar sus necesidades en vez de que el cliente vaya hacia ellos. Otro método es, observar y grabar a un cliente usando un producto existente para explorar potenciales mejoras al producto.

Pero ¿Quién es el cliente?, claramente será la persona que compre el producto. El cliente externo que auspicia un proyecto de diseño de una universidad es el cliente. Pero generalmente, existen otros clientes también: El trabajador de la fábrica que produce el producto, la persona que repara el producto si este falla; y quizás hasta el encargado de la tienda, quien decide que productos comprar y guardar en bodega. Finalmente un producto exitoso debe satisfacer las necesidades de tantos clientes como sea posible.

## Paso 2: Definir el problema

Existen dos fases distintas en la definición del problema: Determinar el problema (articularlo como una frase) y determinar los requerimientos del diseño.

### Determinación del Problema

Expresar el desafío del diseño en una frase resumida y cuidadosamente pensada puede ayudar a enfocar bien los temas. Sugerencias para crear frases efectivas que describan el problema son:

- Generalizar la frase para estimular soluciones creativas (Conservar la ambigüedad)
- No incluir una solución preconcebida al problema
- Expresar el problema en términos funcionales (ej. Un verbo y un sustantivo).

La intención es enfocarse en resolver el problema correcto. Uno de los errores más comunes que cometen los diseñadores es crear soluciones elegantes a problemas equivocados.

A continuación hay algunos ejemplos de problemas articulados como frases:

#### Aceptable

Hacer un mejor abre latas  
Construir una mejor trampa para ratones.  
Diseñar una mejor cortapasto

#### Mejor

Extraer el contenido de una lata  
Mantener los ratones afuera  
Pasto Corto, o mantener pasto corto

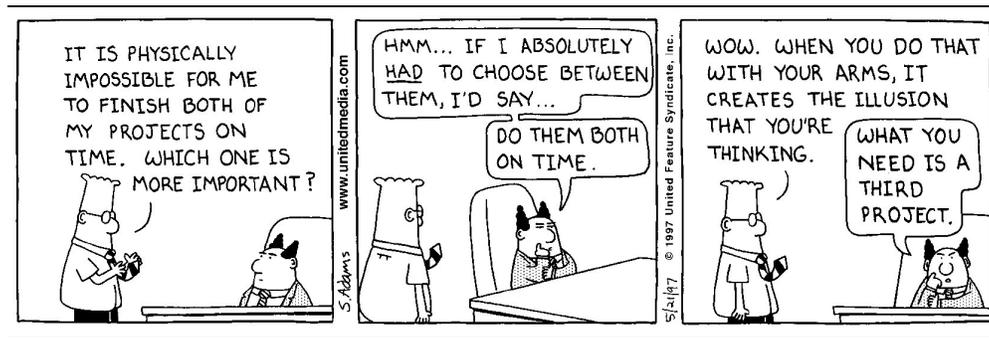


Figura 7.3: Manteniendo ocupado a los ingenieros. DILBERT

No todos los requerimientos del diseño son cuantificables, pero es importante listarlos de todas maneras.

Por ejemplo, todos los productos deben ser seguros de usar. Si se diseña un producto para ser seguro, se debe intentar de vislumbrar todas las formas posibles de mal utilizar el producto y luego realizar un diseño que prevenga este mal uso. ¡¡¡¡No se debe asumir que el usuario del producto leerá el manual de instrucciones o las advertencias!!!!.

### Paso 3: Planificar y Gerenciar el proyecto

La mayoría de las personas rinden mejor cuando entienden lo que están haciendo. Esto quiere decir que debes observar y manejar tus acciones. Incluso durante las etapas iniciales del diseño, un poco de planificación y gerenciamiento del proceso puede hacer maravillas. Juicios constantes del proceso de diseño permite la oportunidad de mejorar el proceso tanto en términos de efectividad como en eficiencia.

Aunque gerenciar diseños reales de ingeniería puede ser una labor compleja, la aplicación de un enfoque simple de gerenciar un proceso de diseño puede ayudar inmensamente. La secuencia mas básica de gerenciar actividades de proyectos es Planificar-Determinar-Ajustar.

#### Planificación

Diseñar un plan de trabajo involucra pensar en las labores a ser completadas, los recursos disponibles y las fechas límites para entregar el producto (o partes del producto). Luego distribuir los recursos para completar las labores a tiempo. El resultado es un "calendario" que muestra "Quién" hará que cosa, "Cuándo" lo hará y "Qué" recursos se utilizarán en qué labor.

El calendario combinado de labores y personas puede ser manejado de varia maneras. Cuando las labores poseen fechas límites predeterminadas, un enfoque de atrás hacia delante es

Tarea	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Reunión con Clientes	■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■		
Diseño Conceptual Inicial		■ ■ ■ ■ ■		
Plan de desarrollo inicial		■ ■ ■ ■ ■	■ ■ ■ ■ ■	
Diseño Conceptual Final			■ ■ ■ ■	
Diseño de materiales inicial			■ ■ ■ ■	
Aprobación del diseño conceptual				■ ■ ■ ■ ■

Figura 7.4: Carta Gantt

especialmente útil. Por ejemplo, si el diseño preliminar será revisado el 8 de abril, planifica la presentación del diseño para unos días antes del 8 de abril.

Notar que un plan de trabajo generalmente evoluciona desde un bosquejo con labores concebidas en abstracto hacia un plan detallado en el cual las labores principales están subdivididas en otras, requiriendo así de una calendarización mas detallada. Las buenas planificaciones consideran las dependencias entre las tareas. Por ejemplo, la colocación de paneles de una casa se hace después del encofrado y antes de la pintura. Sería ineficiente organizar la colocación de paneles antes de completar el encofrado, y sería también ineficiente que los paneles llegaran antes de que la estructura estuviera lista. Se quedarían a la intemperie y podrían arruinarse por el clima (y se pagaría al distribuidor antes de lo necesario), o debería realizarse un costo adicional de bodegaje temporal. Lo último es una de las razones por las que en manufactura el concepto de "justo a tiempo" es tan popular.

La incerteza también juega un rol importante. Por ejemplo, si la fecha de entrega de una cierta tarea es incierta, la fecha de inicio de otra tarea se vuelve incierta también. Para reducir el riesgo de perder recursos valiosos, planifica tareas alternativas (planes de contingencia) que otras personas puedan realizar en caso de que la primera labor tome más tiempo del esperado.

#### Uso de herramientas para calendarizar

Una herramienta útil para especificar y rastrear tareas calendarizadas es la Carta Gantt (Figura 7.4), una tabla en la que cada tarea está localizada en el tiempo. La carta indica la progresión del trabajo en el tiempo y entrega una forma fácil de visualizar qué actividades están planificadas para cualquier momento dado.

Como una carta Gantt, una carta PERT (Figura 7.5) indica el tiempo de las actividades, pero también contiene las relaciones de dependencia. En la figura 7.5, por ejemplo, la "Tarea de

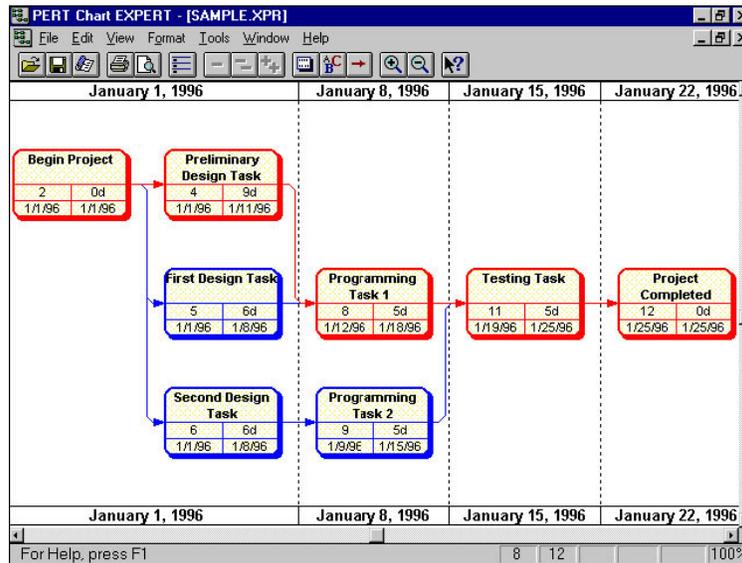


Figura 7.5: Tabla Pert

Prueba” depende de la completitud de la primera y segunda tarea de programación.

A pesar de que estas herramientas están generalmente al alcance de la mano y son fáciles de usar, son tan buenas como lo son las estimaciones de cuanto va a durar cada tarea. La experiencia reduce la incerteza de las estimaciones, pero aun los más experimentados estimadores de tareas usualmente incrementan sus estimaciones de tiempo para dar cabida a incertezas futuras. Cuando se calendarizan tareas, es inteligente documentar diferentes tipos de información asociadas con cada tarea.

- Una breve descripción de la tarea
- Las personas que realizarán la tarea
- Las fecha planificadas de inicio y término de la tarea
- Un resumen de las labores de las que depende la tarea y de las que dependen de la tarea
- Un costo estimado de la tarea
- Una estimación de las consecuencias de atrasarse en las fechas planeadas.

Un plan debe ser comunicado a todos los integrantes del equipo de diseño. Esto puede llevarse a cabo a través de un líder de equipo que presente y monitoree el plan. Otra forma es colocar el plan en un lugar accesible donde los miembros del equipo puedan corroborar su percepción del plan, realizar anotaciones y hasta indicar si algunas tareas se han completado.

## Determinación

Los planes son solo planes, y los calendarios y fechas de entrega parecen ser hechos para no respetarlos. Por lo anterior es sabio, determinar periódicamente si el proyecto está coincidiendo efectivamente con la planificación: Las fechas de inicio y finalización calendarizadas se comparan con las fechas reales, y los costos estimados se comparan con los costos reales. Cuando la planificación y el proceso no están sincronizados entre ellos, las incertezas para el resto del proyecto se incrementan. Para mantener la incerteza dentro de límites manejables, el plan debe ser modificado. La determinación periódica de que tan bien un proceso sigue una planificación es crítica en cualquier proceso de ingeniería. No sólo entrega la oportunidad de revisar las prácticas actuales y de mejorar los procesos, sino es el medio de evitar cualquier daño o costo futuro. Aunque a ningún líder de equipo le gusta escuchar que una tarea está atrasada con respecto a la fecha límite, los líderes de equipo efectivos, prefieren recibir esa noticia un mes (en vez de un día) antes de la fecha límite. La clave, naturalmente, es que mientras antes se notifique un problema, existen mayores posibilidades de solucionarlo o mitigarlo.

Los informes periódicos mantienen al equipo, y a sus clientes, informados acerca del estado del proyecto. Cada ciertos intervalos regulares de tiempo, se debe informar acerca del estado de las distintas tareas y del proyecto completo con respecto a lo indicado en la carta Gantt o PERT, además de agregar información nueva a cada tarea.

- Fechas de inicio y término planificadas versus las reales
- Una breve explicación sobre el por qué de las diferencias entre lo planeado y lo real
- Un breve resumen de los costos incurridos o las ganancias a raíz de atrasos o entregas adelantadas a lo planeado.
- Un breve reseña sobre quien necesita qué, de quien. Si un cliente no entrega la retroalimentación necesaria o pedida del plan de diseño, declararlo claramente en el informe de progreso.

## Ajustarse al Plan

Aunque la determinación es útil en si misma, su principal utilidad recae en los cambios que permite realizar. Pequeñas desviaciones de las fechas de comienzo y término planeadas versus las reales, por ejemplo, pueden no requerir modificaciones del plan. Sin embargo cuando las discrepancias entre lo planeado y lo real son muy grandes, el plan debe ser ajustado.

A estas alturas, debe estar claro que las determinaciones periódicas del cumplimiento o no de los planes es vital para dirigir el proyecto. En efecto, es de la información que se obtiene de estas revisiones periódicas que se aprende no solo qué modificar sino cómo modificar el plan para el futuro. Por ejemplo, la diferencia promedio entre las estimaciones preliminares de la duración

de las tareas y la duración real de ellas contiene información general sobre nuestra capacidad de estimar los tiempos requeridos para realizar tareas. También, la información sobre cómo se están utilizando los recursos nos indica si estamos sobre-utilizando o subutilizando a ciertas personas dentro de nuestro grupo. Esto, en realidad, nos entrega información de cómo asignar gente a tareas futuras de una manera más balanceada.

### Como dirigir un equipo

"Liderazgo" y "Gerencia" no son necesariamente lo mismo. Una buena gerencia implica buen liderazgo, pero también necesita de un proceso predecible y estructurado, mediciones cuidadosas y un análisis crítico.

Cargar el futuro con mucho entusiasmo puede fácilmente degradarse en frustración e inproductividad cuando el curso de acción actual no está sujeto a un análisis crítico periódico. Kart Popper, famoso teórico de ciencia, sostenía que los errores que cometemos son nuestra única fuente de aprendizaje [2] [3]. Desde esta perspectiva, es crucial que los equipos de ingeniería se mantengan abiertos a las críticas y reconozcan que en una buena gerencia existen roles y tareas para todos los estilos, y enfoques de manejar un proceso.

## Paso 4: Reuniendo Información

Mientras más información, mejor. La información completa y clara puede prevenir el diseñar un producto que ya exista en el mercado o viole algún estándar nacional. Una fuente de información es comprar y probar productos que estén compitiendo. Conocido como el benchmark, esta práctica de la industria establece normas de mercado para los productos. Para que un nuevo producto sea exitoso debe estar por sobre estas normas.

Una investigación de patentes es otra fuente útil de información que puede prevenir el diseñar un producto que infrinja la protección legal de alguien. Una búsqueda de patentes puede ser cara y consumir mucho tiempo, pero la información está en Internet.

Información sobre patentes de IBM <http://www.patents.ibm.com>

Oficina de Patentes y Marcas registradas de E.E.U.U <http://www.uspto.gov>

Preguntas frecuentes de "DO it Yourself" <http://doityourself.com/finance/invent.htm>

Entrevistas con inventores <http://www.thetech.org/revolutionaries>

Revista Digest del Inventor <http://www.inventorsdigest.com/>

Los códigos y estándares establecidos por gobiernos locales e incluso la misma industria unifican muchos productos. Estos estándares son muy útiles pues facilitan el intercambio de partes. Por ejemplo una tuerca de  $\frac{1}{4}$ 20 comprada en cualquier ferretería en el país encajará en un perno de  $\frac{1}{4}$ 20 comprado en cualquier parte, esto gracias a la precisión de los estándares establecidos por la industria de la ferretería (llaves).

## Paso 5: Generando conceptos alternativos (inventos)

El proceso de invención puede ser la fase más creativa y estimulante del proceso de diseño. Pero, ¡también puede ser la más frustrante!, el desafío consiste en generar la mayor cantidad de conceptos de diseño alternativos posibles de donde escoger. Por ejemplo, en el diseño de una lijadora eléctrica, debe existir una forma de fijar el papel de lija a la máquina. Posibles soluciones a este problema son mediante una abrazadera, pegamento, aspiración, magnetos, broches a presión, zipper o velcro. Algunas de estas siete alternativas son bien conocidas pero otras pueden ser nuevas. Con un poco de suerte, el uso de algunos de estos conceptos será tanto nuevo como factible. La meta en esta sección es presentar algunas técnicas útiles para estimular la creación de ideas creativas. La mayoría son especialmente útiles bajo condiciones de trabajo en equipo y pueden ser aplicadas a conceptos completos de diseño o ser enfocados en componentes o subsistemas.

### Lluvia de Ideas

Aunque hoy en días es un término común de usar, la lluvia de ideas fue acuñada originalmente por Osborn en 1948 [4]. La lluvia de ideas es un proceso de solución de problemas en equipo efectiva, especialmente si se siguen algunas reglas simples.

1. Se escriben todas las ideas.
2. Se prohíben las críticas durante el proceso de la lluvia de ideas (las críticas vienen después).
3. Se buscan combinaciones y mejoras de ideas.
4. Mientras más ideas, mejor.
5. Se incentivan las ideas locas y nuevas; pues estimulan nuevas y factibles soluciones que de otra forma no se hubieran considerado.

Como un ejemplo del último punto, un grupo de ingenieros de la General Electric, incluyendo a Osborn, estaban buscando una forma fácil de conectar un cable a un circuito para poder medir voltajes. Las soluciones existentes en ese momento eran atornillar un cable o soldarlo al circuito,

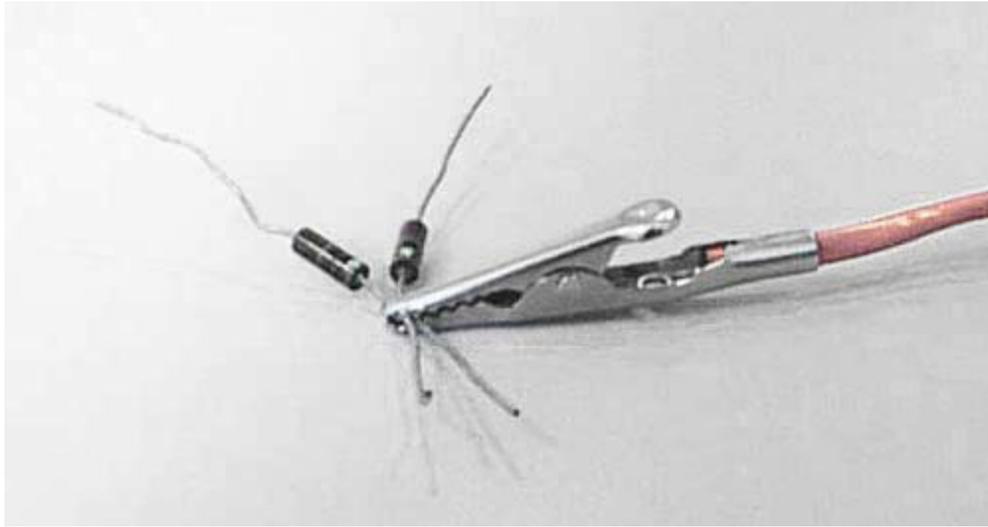


Figura 7.6: El clip cocodrilo nació de una "idea loca" en una lluvia de ideas

ambas consumen mucho tiempo y son demasiado permanentes. Alguien sugirió tener un ratón mordiendo dos cables. Esta idea obviamente "loca" llevó a un aparato muy utilizado hoy, el clip de cocodrilo (Figura 7.6)

Elegir un moderador para la sesión de lluvia de ideas. Proponer el problema al equipo (referirse a la sección Determinar el problema), y mantener a todo el equipo pensando sobre el problema en silencio y escribiendo ideas en tarjetas individuales. Después de unos minutos de pensamiento individual, el moderador le pide una idea a cada uno de los miembros del equipo y la escribe en un pizarrón o slip chart. Escribir todas las ideas donde todos puedan verlas es importante porque puede gatillar ideas nuevas y creativas o mejorar las ideas existentes. Cuando se acaban las soluciones, el moderador solicita ideas espontáneas del grupo en orden aleatorio. Una sección de lluvia de ideas debe ser libre y entretenida, durando entre 20-30 minutos.

### Inversión

La inversión significa dar vuelta algo de arriba abajo o de adentro hacia fuera. La idea básica de la inversión es imaginar que ocurriría si se cambia el orden de interacción entre piezas o sistemas. Si la pieza A está pegada y la pieza B es móvil, ¿Qué pasaría si la pieza B fuera fija y la A móvil? Por ejemplo, en 1826, Oersted descubrió que si se pasa una corriente por un cable bajo un campo magnético, se produce una fuerza lateral, el concepto operacional básico de un motor eléctrico. En 1831, Faraday descubrió una inversión a este concepto: si un cable se pasa por un campo magnético, se genera una corriente eléctrica, lo que genera un generador de corriente eléctrica. De hecho, un motor eléctrico generará una corriente eléctrica si es forzado a girar.

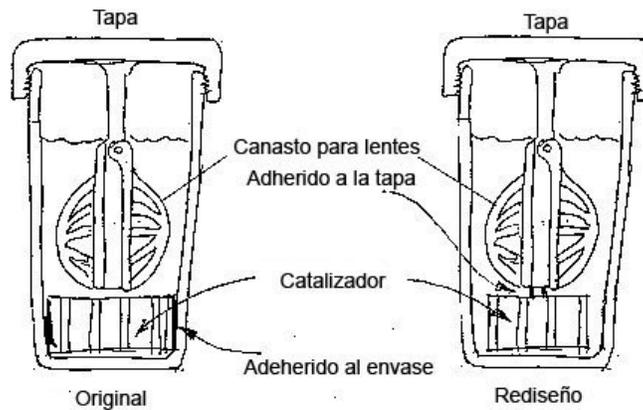


Figura 7.7: Dos diseños para un limpiador de lentes de contacto

Otro ejemplo son los estuches limpiadores de lentes de contacto, mostrados en la figura 7.7. Para minimizar la irritación del ojo después de que los lentes de contacto han sido desinfectados, se agrega un inserto catalítico en la solución limpiadora al fondo del estuche. En una etapa inicial de diseño, el inserto estaba pegado al fondo lo que lo hacía difícil de reemplazar. Un diseñador inteligente, quizás estimulado por la reacción de un cliente, realizó una inversión del diseño: agregar la inserción a la tapa del estuche. Cada vez que se abre el estuche para sacar los lentes, el inserto sale con la tapa.

### Analogías

Muchas buenas ideas de diseño son tomadas de otras áreas. El estar conciente del mundo que nos rodea puede estimular soluciones creativas. Por ejemplo, una tienda de juguetes puede ser una fuente de nuevas ideas.

Ejemplos de inventos y sus fuentes de inspiración incluyen:

Inspiración	Invento
Método de navegación de un murciélago	Sonar
Mango de las pistolas	Mangos de herramientas manuales
Erizo	Velcro
Colmillos de la serpiente de cascabel	Agujas Hipodérmicas
Luciérnagas	Luces químicas en frío

## Empatía

Imagina ser una parte del problema a solucionar. Por ejemplo, si el desafío es encontrar una nueva forma de limpiar CDs, imagina medir una pulgada y estar parado en CD. ¿Cómo podría limpiarse?, ¿con un escoba?, ¿una manguera? Estas ideas "locas" pueden llevar a un cepillo limpiador o un inyector que de hecho son muy factibles de hacer, ¡Aunque encoger a la gente no lo sea! O, si el problema es diseñar un nuevo sistema de transporte urbano, imagina a un gigante observando la ciudad entera, ¿Cómo movería el gigante a las personas y los bienes por la ciudad?

## Explicar el Problema

La gente usualmente está tan enfocada en un problema específico que les resulta difícil ver las cosas desde otra perspectiva. Intenta explicarle el problema a un amigo o colega quien tiene un punto de vista diferente. Expresarle el problema claramente a otro puede ayudar al diseñador a ver nuevas luces para resolver el problema.

## SCAMPER

SCAMPER es una técnica nemotécnica atribuida a Bob Eberle [5], basada en las ideas de Alex Osborn, el padre de la lluvia de ideas. Fue citada en un excelente libro sobre la creatividad de Ed Sobey [6], quien entregó el ejemplo a continuación. La palabra sugiere diferentes cambios que pueden ser realizados a diseños existentes para hacer que las ideas comiencen a fluir. Cada letra representa una o más formas de cambiar el diseño:

S ustituir

C ombinar

A daptar

M odificar, M agnificar, o M inimizar

P roveer nuevos usos

E liminar

R eorganizar o R eordenar

Ejemplo: Supón que tu problema es mantener el almuerzo caliente hasta la hora de almuerzo, Recorriendo las letras de SCAMPER, te podrías preguntar:

- ¿Puedo Sustituir los materiales de los cuales está hecha el envoltorio de mi almuerzo?, ¿Son los mejores materiales aislantes?
- ¿Puedo combinar aislantes?, ¿Existe algo con lo que pueda envolver el envoltorio de mi almuerzo para mantenerlo caliente?
- ¿Puedo adaptar una idea de alguna otra parte?, ¿Qué otros productos son aisladores?
- ¿Puedo modificar el envoltorio de mi almuerzo, por ejemplo en una lonchera?
- ¿Puedo hacer otros usos de mi bolsa del almuerzo?, por ejemplo mantener pescado fresco de vuelta del campamento, ¿Genera esto nuevas ideas?
- ¿Existe algo que pueda eliminar que esté transmitiendo calor al interior de la caja?
- ¿Puedo reordenar algo?, por ejemplo puedo reorganizar para cuando y como se haga mi almuerzo y me llegue a la universidad.

## Paso 6: Evaluar las alternativas (análisis ingenieril)

Una de las diferencias entre el diseño ingenieril y el diseño en general recae en el uso del análisis ingenieril para ayudar a tomar decisiones y guiar el proceso. Por ejemplo cualquier buen diseñador podría elegir acero para la construcción del eje de un automóvil, pero el análisis ingenieril se utiliza en la determinación de las dimensiones del eje para que transmita el torque desde el motor y aumentar la vida útil del automóvil.

Debido a que las herramientas analíticas del análisis ingenieril son aprendidas en la etapa final de la carrera de ingeniería, generalmente es difícil para los estudiantes que comienzan realizar un análisis adecuado. Sin embargo, un buen análisis es esencial para un buen diseño.

Se debe recordar que aun en el "mundo real", los ingenieros se ven obligados a aprender y aplicar nuevas metodologías y materiales constantemente, casi de una manera instantánea. Dada la estimación de que el conocimiento se duplica cada siete años, los ingenieros deben cultivar un habito de aprendizaje de por vida.

Varios capítulos al final de este libro entregan fundamentos sobre conceptos de electrónica y mecánica que pueden ayudar en los análisis de los estudiantes que recién comienzan.

Otras formas de obtener ayuda con el diseño es recurrir a los profesores auxiliares, ayudantes, estudiantes más avanzados o ex alumnos.

## Paso 7: Seleccionar la mejor alternativa

El diseño ingenieril siempre requiere de decisiones, esto pues el proceso de diseño entrega conceptos alternativos de donde elegir. Mientras algunas decisiones son fáciles de hacer, es más común tener un complejo arreglo de atributos que hacen del elegir la mejor alternativa algo difícil. Por esto puede ser útil usar metodologías para ayudar en este proceso.

Como otras metodologías de diseño, ésta es un proceso y obliga a tomar decisiones basado en una evaluación racional de alternativas [7]. Y, como otras técnicas, ¡el resultado es tan bueno como lo que se utilizó para proceder! Las leyes fundamentales de la programación computacional siguen esto también:

*Si entra basura → Sale Basura*

### Listar Criterios

El ingeniero debería hacer una lista con todos los criterios que Ella/El pueda pensar para comparar las soluciones diseñadas. Comenzar con los requerimientos iniciales de diseño y luego agregar otros que puedan ayudar a comparar los conceptos de diseño que compiten. Algunas posibilidades (no exclusivas) son:

Peso	Porte
Apariencia	Facilidad de uso
Facilidad de ensamblaje	Facilidad de reparación
Número de partes	Resistencia a la corrosión
Tiempo de producción	Costo de producción
Seguridad	Vida útil
Tiempo estimado antes de falla	Impacto medioambiental

### Asignar Prioridades a los Criterios

Existen dos formas de determinar prioridades. Una es usar una escala de 1 (menos importante) a 10 (más importante), aunque cualquier tipo de escala es válida. Por ejemplo si la apariencia es evaluada con un 10 y el costo con un 8, implica que la apariencia es un 25 % más importante que el costo. Para estimar un puntaje correcto, es bueno hacer que cada integrante califique independientemente de los otros y luego se promedian los puntajes.

Si existe un número grande de personas en el grupo, o un gran número de criterios para evaluar, una matriz de interacción es una manera efectiva (y rápida) de determinar la importancia relativa de cada criterio con respecto a los otros criterios. Como se muestra en la figura 7.1, la matriz se realiza listando los criterios tanto en una columna a la izquierda como en una fila en la parte superior. (una planilla de excel es una excelente manera de simplificar el proceso). Elegir un moderador, y encuestar a todo el grupo sobre la importancia relativa de un criterio determinado

Cuadro 7.1: Matriz de interaccion para asignar prioridades

	<b>Criterio 1</b>	<b>Criterio 2</b>	<b>Criterio 3</b>	<b>Criterio 4</b>	<b>Criterio 5</b>	<b>Total fila</b>	<b>Valor Normalizado</b>
<b>Criterio 1</b>		1 vs. 2	1 vs. 3	1 vs. 4	1 vs. 5	$T_1$	$T_1/SUM$
<b>Criterio 2</b>	2 vs. 1		2 vs. 3	2 vs. 4	2 vs. 5	$T_2$	$T_2/SUM$
<b>Criterio 3</b>	3 vs. 1	3 vs. 2		3 vs. 4	3 vs. 5	$T_3$	$T_3/SUM$
<b>Criterio 4</b>	4 vs. 1	4 vs. 2	4 vs. 3		4 vs. 5	$T_4$	$T_4/SUM$
<b>Criterio 5</b>	5 vs. 1	5 vs. 2	5 vs. 3	5 vs. 4		$T_5$	$T_5/SUM$
COLUMN TOTAL						SUM	

versus cada uno de los otros criterios, de a uno a la vez. Por ejemplo la primera celda en blanco muestra la cantidad de personas que consideran que el criterio 1 es mas importante que el criterio 2 (las celdas en diagonal están en negro por razones obvias). Después de cada voto, llenar las dos celdas fuera de la diagonal que correspondan (Notar que si hay un total de N personas y un número X prioriza 1 por sobre 2, el número de personas que priorizan 2 por sobre 1 es simplemente N-X)

#### Normalizando los valores de prioridad

En función de tener una mejor idea de los valores relativos de prioridad, es una buena idea normalizar los valores, esto quiere decir calcular cada valor como la proporción con respecto al total que se establece igual a 1. Esto se hace dividiendo cada valor por la suma total de todos los valores. Cada criterio tendrá entonces un valor de prioridad que irá desde 0 a 1 y la suma de todos los valores será 1 (es decir, 100%). Un grafico circular es una buena manera de visualizar los resultados generales (Figura 7.8).

Ejemplo: La tabla 7.2 muestra como se pueden ver los resultados para un problema hipotético en el cual una estructura para juegos infantiles, con los siguientes requerimientos, esta siendo diseñada: liviano, barato, duradero, resistente a la corrosión y atractivo. El gráfico circular de la Figura 7.8 muestra claramente los valores relativos de prioridades.

#### Analizando Alternativas de Diseño

Ranquear cada alternativa de concepto de diseño de acuerdo a qué tan bien cree el grupo que ese criterio puede satisfacer los criterios de diseño identificados en los pasos 1, 2 y 3. Usar una

Cuadro 7.2: Matriz de interacción para ejemplo de plaza de juegos

	Bajo Costo	Liviano	Durable	Atractivo	Resistente a la corrosión	Row Total
Bajo Costo		7	6	5	5	23
Liviano	0		1	2	1	4
Durable	1	6		4	2	13
Atractivo	2	5	3		4	14
Resistente a la corrosión	2	6	5	3		16
					COLUMN TOTAL	70

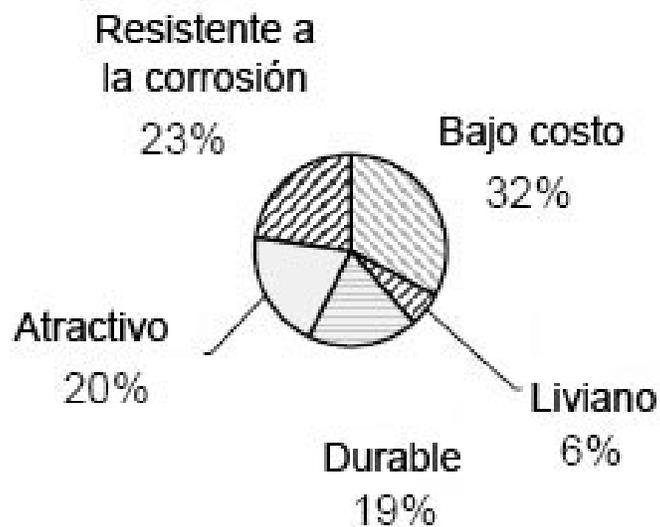


Figura 7.8: Un gráfico circular muestra claramente las diferentes prioridades

Criterios	Prioridad	Prioridad Normalizada	Madera		Acero		Aluminio		PVC	
Bajo Costo	10	0.37	5	1.85	2	0.74	1	0.37	2	0.74
Resistente corrosión	8	0.30	5	1.48	1	0.30	5	1.48	5	1.48
Duradero	5	0.19	3	0.56	3	0.56	5	0.93	5	0.93
Atractivo	3	0.11	2	0.22	3	0.33	5	0.56	5	0.56
Liviano	1	0.04	3	0.11	2	0.07	5	0.19	5	0.19
TOTALS	27	1.00		4.22		2.00		3.52		3.89

Cuadro 7.3: Matriz de decisiones para estructura de plaza de juegos – uso externo

escala consistente, por ejemplo de 0 a 5 o de 0 a 10. Un ranking de 0 significa que el concepto no cumple en absoluto con los criterios, y una puntuación máxima implica que el concepto responde perfectamente con el criterio.

#### Comparando Alternativas de Diseño

Crear una carta con las valoraciones de los criterios normalizados, ordenar desde el mayor hasta el menor. Esto ordena los criterios desde el más importante hasta el menos importante. Crear una columna separada para cada idea que este siendo comparada. Multiplicar cada valor rankeado por el factor de valorización del criterio (normalizado), y sumen al final (sugerencia: utilizar una hoja de calculo).

#### Analizar resultados

El concepto con el valor mas alto es el "mejor"; es decir, concuerda mejor con el criterio seleccionado. Algunos conceptos pueden tener totales significativamente menores que otros, lo que sugiere que podrían ser eliminados. Puede ser seleccionado el concepto con mayor puntuación, o se pueden estudiar los mayores puntajes en cada categoría y el concepto que se ubicó entre los mejores catalogados para la mayoría de los rankings. Asimismo, este metodo permite enfocar tiempo y energía a los criterios con peor desempeño del "mejor" concepto, para ver si se puede hacer alguna mejora. Otra técnica es tomar los mejores conceptos de cada criterio y generar una nueva idea que incorpora las mejores características de cada concepto. Pero cuidado, como los valores son subjetivos, no hay que esperar mucha precisión de los resultados. Un puntaje de 4.96 no es apreciablemente muy distinto a 5.04.

Criterios	Prioridad	Prioridad Normalizada	Madera		Acero		Aluminio		PVC	
Bajo Costo	10	0.34	3	1.03	2	0.69	5	1.72	5	1.72
Resistente corrosión	8	0.28	2	0.55	3	0.83	5	1.38	5	1.38
Duradero	7	0.24	3	0.72	3	0.72	5	1.21	5	1.21
Atractivo	3	0.10	5	0.52	1	0.10	5	0.52	5	0.52
Liviano	1	0.03	5	0.17	2	0.07	1	0.03	2	0.07
TOTALS	29	1.00		3.00		2.41		4.86		4.90

Cuadro 7.4: Matriz de decisiones para estructura de plaza de juegos – uso interno

## Paso 8: Comunicar el Diseño

Hace mucho tiempo, un producto era diseñado y fabricado por una sola creativa y trabajadora persona. Hoy la sociedad es mucho más compleja, y cualquier ingeniero o trabajador es sólo responsable por una pequeña pieza de un puzzle mucho mayor. Con el fin de terminar efectivamente un proyecto complejo, es vital una buena comunicación.

Métodos de comunicación incluyen informes escritos y manual de instrucciones, presentaciones orales y diaporamas. Detalles sobre informes escritos se pueden encontrar en el Capítulo 11. En el Capítulo 12 se encuentran detalles de las presentaciones orales. Los gráficos comunican efectivamente la intención de un diseño, desde bosquejos hasta diseños CAD, más sobre dibujos se puede encontrar en el Capítulo 10.

## Paso 9: Implementar el Diseño

¡Siempre funciona en el papel! Sólo construyendo un diseño físico podemos encontrar los problemas que no nos imaginábamos.

### Modelos en el Diseño

Modelar es una manera efectiva para responder rápidamente preguntas sobre un diseño en la medida que nos acercamos hacia la producción del prototipo final. Como se describe a continuación, un modelo puede tomar muchas formas. Un modelo ideal debe responder las incógnitas que están en duda, pero ningún más. En otras palabras, un modelo no debe ser más complejo de lo que necesita. Por ejemplo, un complejo modelo CAD es una pérdida de tiempo si recién se está en el etapa de diseño conceptual, donde realmente un buen bosquejo basta y sobra. Algunos tipo de modelos básicos que pueden ayudar en el proceso de diseño son:

## Modelo Físico

Modelos físicos pueden ayudar a responder preguntas de geometría, movimiento, interferencia, etc. Utilizar cualquier material disponible que se apropiado, tales como cartón, plumavit, plástico, láminas de metal, etc. Un creativo equipo logró responder muchas complejas preguntas geométricas al hacer un modelo 3D esculpiendo una barra de jabón. Se puede conectar distintas piezas de cartón grueso para crear mecanismos, pero no será capaz de resistir grandes fuerzas.

## Modelo Conceptual

Un buen bosquejo es el punto de partida para la mayoría de los diseños. Para más información consulte el Capítulo 10.

## Modelo CAD

Modelos CAD, son una forma efectiva para despejar dudas de espacio, movilidad, interferencia, etc., especialmente si están creados a partir de parámetros que podrán ser fácilmente cambiados. Para más información consulte el Capítulo 10.

## Diagrama de Cuerpo Libre

Un sencillo diagrama que muestre todas las fuerzas y momentos que actúan sobre un cuerpo es el punto de partida para la mayoría de los análisis de estructuras. Pero son pocos los estudiantes que se dan cuenta que el diagrama de cuerpo libre puede ser una herramienta de diseño, incluso si no se resuelve por completo. Sólo con conocer las direcciones y las magnitudes aproximadas de todas las fuerzas que actúan sobre una pieza, sirve para tener una buena idea de cómo debe ser el diseño para llevar a cabo su función. Para más información revise el Capítulo 14.

## Modelo Matemático

La herramienta fundamental del análisis ingenieril es el modelo matemático que representa la respuesta de un componente o sistema a acciones externas, tales como fuerzas, voltajes, temperatura, etc. Al usar modelos matemáticos se debe considerar todos los supuestos y simplificaciones que éstos implican.

## Planilla de Cálculo

Una buena planilla de cálculo es una excelente forma de realizar cálculos matemáticos de una manera rápida y eficiente. Las capacidades gráficas de las planillas de cálculo pueden ayudar a visualizar tendencias y relaciones entre las variables. Además las planillas de cálculo son muy útiles para hacer cálculos tipo "¿Qué pasaría si...?", por lo que se puede observar que impacto tienen las distintas variables en el resultado.

## Simulación Computacional

Una simulación computacional puede ser usada para simular el comportamiento de complejos sistemas o de distintos componentes. Típicos ejemplos son la simulación de las tensiones y deformaciones de una estructura, la distribución de la temperatura sobre una pieza, el flujo de un fluido en unos canales o el comportamiento de un circuito eléctrico. Algunas herramientas de simulación, tales como análisis de tensión por elementos finitos, se relaciona directamente con modelos CAD. Se debe tener cuidado al hacer simulaciones, y es aconsejable realizar pequeños cálculos y más sencillos para validar los resultados de las simulaciones. Los resultados de un complejos análisis de tensión por elementos finitos es inútil si se aplican las fuerzas equivocadas.

## Fabricación del Prototipo

La meta del proceso de diseño es fabricar un buen prototipo al primer intento. Se se hace con cuidado, se puede ahorrar mucho tiempo y energía. Tal vez el mejor ejemplo es el del avión Boeing 777, el cual tuvo un intenso proceso de modelación, simulación y análisis, lo que permitió que el primero avión que se construyó, también fuera el primero en venderse, ahorrando así, mucho dolares y tiempo.

Los prototipos finales deben ser fabricados con el mayor profesionalismo posible, ya que reflejan todo el trabajo previo que se ha invertido en el proyecto. Algunos prototipos pueden ser contruidos con herramientas sencillas. Diseños más complejos requieren de maquinas profesionales. Algunos empresas pueden fabricar prototipos profesionales a un costo razonable. Por ejemplo, se puede comprar una lamina de Plexiglas, probablemente sea necesario dimensionar la lámina para ajustarlo al diseño, en ese caso el diseñador puede hacerlo por su cuenta, o buscar alguna empresa especializada para dimensionar la lámina a las medidas exactas. La empresa ha de tener las herramientas adecuadas, lo que significa que tendrá un corte de mejor calidad de lo que el diseñador podría hacer por su cuenta.

## 7.4. Diseñar para ??? (DPX)

El título de esta sección puede parecer ambiguo, pero se refiere al hecho de que se debe considerar muchos aspectos de cualquier diseño. Esto incluye Diseñar para Fabricar (DPF), Diseñar para Ensamblar (DPE), Diseñar para Servir (DPS) y diseño universal.

### Las cuatro Fs]

Las cuatro Fs [8] provienen de las siglas en inglés: *form*, *fit*, *function* y *finish*, que significa; forma, calce, función, terminación. Los cuales se refieren a los aspectos de diseño de un componente de un sistema.

*Forma.* ¿El componente tiene la forma adecuada para cumplir su función?. Si es muy delgado, puede romperse o deformarse. Si es muy grande o grueso, puede ser muy pesado o caro. Si tiene un punta con filo, puede ser peligroso. Si tiene un parte muy angosta se pueden generar

tensiones muy grandes, lo que puede llevar a que falle, además será difícil de producir.

*Calce* implica si dos o más piezas se pueden ensamblar correctamente para formar un subsistema. ¿Calzarán las dos piezas sin problemas? Si se perfora un pieza para pasar una tuerca, ¿estarán las dos perforaciones alineadas? El calce se vuelve crítico cuando se trata de elementos que giran que necesitan rodamientos. Para que un rodamiento calce bien, se requiere de una gran precisión. Si el rodamiento está muy apretado, se sobrecalentará. Si está muy suelto, se producirán vibraciones que reducirán la vida del rodamiento y de otras piezas.

*Función* es la habilidad del sistema para llevar a cabo su tarea. Si una parte falla, entonces el sistema no funcionará. Suponga que el cigüeñal de un auto comienza a vibrar excesivamente cuando anda a 3800 RPM. Tiene la forma correcta, calza perfectamente y tiene la terminación adecuada para sus rodamientos, pero vibra. El diseño falla porque el comportamiento del auto se ve comprometido por una vibración del cigüeñal que se transmite al motor. El cigüeñal no funciona correctamente.

*Terminación* se refiere a la superficie final de la parte. ¿La superficie es rugosa, suave o pulida? ¿importa?. Algunas superficies son importantes por las apariencias. La carrocería de un auto debe ser suave para que la pintura tenga una apariencia brillante. Otras superficies no tienen tanta importancia. El block de aluminio del motor de un auto no necesita de una terminación pulida. Rara vez se mira un motor en términos de belleza, por lo que una superficie relativamente rugosa es aceptable. Algunas superficies son pulidas para mejorar su rendimiento, como los rodamientos. Cuando se diseña una pieza, es importante saber como será usado para especificar la superficie apropiada en el diseño.

## Diseñar para Fabricar (DPF)

Uno de los aspectos interesantes del diseño ingenieril es que se pueden concebir alternativas que cumplen los mismos requisitos, pero que el costo de fabricación puede diferenciarse por un factor de diez o más. Por ejemplo, para fabricar un corchete es necesario trabajarlo a máquina a partir de un bloque sólido de metal. Un proceso bastante caro y lento. Se puede obtener un resultado idéntico, sin hacer un compromiso de la calidad, cortando y doblando una lámina de metal.

Para las piezas que se producen en grandes cantidades, la forma en que se fabricada la pieza es tan importante como su función. El ingeniero debe cuidadosamente considerar distintos métodos de fabricación, como fundir, moldear, forjar, estirar, trabajar a máquina, estampar, etc. en el diseño de piezas producidas en grandes cantidades. Incluso prototipos únicos pueden verse beneficiados por una cuidadosa DPF.

Bralla[9] ha producido una excelente referencia que contiene una detallada guía de DPF para variados procesos de producción. Boothroyd [10] ha publicado una guía general de DPF. Storage Technology Corporation ha dictado 12 conceptos fundamentales de DPF [11]

1. *Reduce la cantidad de piezas.* La clave es simplicidad. El producto ideal tiene una sola parte.

2. *Usa diseños modulares.* Ocupa "ladrillos"
3. *No pelear con la gravedad.* Diseñar para que se pueda ensamblar de abajo para arriba.
4. *Reduce las superficies de proceso.* Evita redistribuciones onerosas.
5. *Procesa con espacio.* Minimiza los problemas de visión y las partes poco accesibles.
6. *Elimina todo tipo de amarres.* Son caros, difíciles de manejar y vibran. Usa adhesivos etc.
7. *Optimizar la simetría.* Hacer las piezas simétricas para que puedan funcionar en cualquier dirección (ej. Lavadora) o hacerlas claramente asimétricas. Diseñar para que el producto no pueda ser ensamblado incorrectamente.
8. *Optimizar la manipulación.* Diseñar superficies para manipular la pieza. Evitar partes flexibles o que se enreden.
9. *Diseñar para facilitar el ensamblaje.* Piezas con indicaciones claras de como conectarlas con otras piezas.
10. *Crear un nido* Diseñar para colocar la piezas mientras se ensambla.
11. *Reduce, simplifica y agrupa los procesos.* Agrupa procesos parecidos.
12. Optimizar la secuencia del proceso. Durante el diseño, piensa cómo será producido.

## Diseñar para Ensamblar (DPE)

La mayoría de los diseños consiste en el ensamblaje de varios componentes. Una vez que los componentes son producidos, deben ser ensamblados en el diseño final. Ingenieros diseñadores tienden a enfocarse en la función mientras ignoran como los componentes serán fabricados o como se ensamblarán. Aunque se puede encontrar información sobre el tema en otras partes [10], uno de los conceptos fundamentales de DPE es minimizar el número de piezas. Una pieza que no existe no tiene que ser producida, inspeccionada, transportada, inventariada ni ensamblada. Por lo que nunca vibrará, nunca fallará ni tendrá que ser reemplazada.

## Diseñar para Servir (DPS)

El diseño perfecto *jamás* necesita mantención. Sin embargo, esto no siempre es posible. Por ejemplo, el filtro de aceite de un auto mantiene el aceite limpio atrapando pequeñas partículas, evitando que dañen el motor. Pero eventualmente, tanto el aceite como su filtro deben ser cambiados para prolongar la vida del motor. Cambiar el filtro de aceite varía de auto en auto. En algunos autos es necesario elevarlos; alguien tendría que meterse debajo y desatornillar un filtro orientado horizontalmente. Cuando el filtro está suelto, el aceite derrama probablemente sobre el mecánico. Claramente, el diseño del motor y la ubicación y orientación del filtro implican que no

requiere de una mantención muy seguida. En otros autos el filtro se cambia desde arriba, sin la necesidad de meterse bajo el auto. El filtro también ha sido orientado verticalmente para que no derrame cuando se afloja. El segundo filtro es un ejemplo de (DPS). El diseñador reconoció la necesidad de una mantención periódica y desarrolló un producto que fuera de fácil y rápido acceso. Para un proyecto de diseño, se debe minimizar la mantención. Sin embargo si se llegara a necesitar, diseñarlo para que sea un proceso sencillo y además se debe entregar claras instrucciones.

## Diseño Universal

El concepto de *diseño universal* significa que un producto puede ser usado por la mayor cantidad de personas posibles, de todos los rangos de edad, habilidades y limitaciones. Hay principios que se deben considerar como parte del diseño:

1. *Uso equitativo*. El diseño es útil para personas con diversas habilidades.
2. *Uso flexible*. El diseño se acomoda a las preferencias y habilidades de un amplio rango de individuos.
3. *Uso simple e intuitivo*. El diseño es fácil de entender, sin importar la experiencia del usuario, su conocimiento, lenguaje o nivel de concentración.
4. *Información perceptible*. El diseño comunica información necesaria con eficiencia, sin importar las condiciones del ambiente o las habilidades sensoriales del usuario.
5. *Tolerancia para error*. El diseño minimiza los peligros y las negativas consecuencias debido a un accidente o mal uso.
6. *Bajo esfuerzo físico*. El diseño puede ser usado eficiente y cómodamente con un mínimo de trabajo.
7. *Tamaño y espacio*. El diseño tiene un tamaño apropiado y existe el espacio para acercarse, tomarlo, manipularlo y usarlo, sin importar el tamaño, postura o movilidad del usuario.

## 7.5. Referencias

1. Hyman, B., *Fundamentals of Engineering Design*, Prentice-Hall, 1998, 499 pp.
2. Popper, K.R., *Logic of Scientific Discovery*, Harper & Row, New York, NY, 1965.
3. Popper, K.R., *Conjectures and Refutations: the Growth of Scientific Knowledge*, Harper & Row; New York, NY, 1968.

4. Osborn, A.F., *Your Creative Power*, Charles Scribner, New York, NY, 1948.
5. Eberle, B., *SCAMPER: Games for Imagination Development*, DOK Publishers, Buffalo, NY, 1971; adaptado de A.F. Osborn, *Applied Imagination*, Charles Scribner, New York, NY, 1963.
6. Sobey, E., *Inventing Stuff*, Dale Seymour Publications, Alternative Publishing Group, Addison- Wesley Publishing Co., 1996.
7. Walton, J., *Engineering Design: From Art to Practice*, West Publishing Co., 1991.
8. Dally, J.W., *Introduction to Engineering Design, Book 2*, College House Enterprises, 1997.
9. Bralla, J.G. Ed., *Handbook of Product Design for Manufacturing*, McGraw-Hill, 1986, 1120 pp.
10. Boothroyd, G, Dewhurst, P. and Knight, W., *Product Design for Manufacture and Assembly*, Marcel Dekker, New York, NY, 1994.
11. Storage Technology Corporation, Louisville, CO, *Twelve Fundamentals for Design for Manufacturability*, Unpublished notes.