



El método ingenieril es una actividad de toma de decisiones para desarrollar materiales, productos y procesos.

## Introducción

En el capítulo anterior se estableció que el ingeniero soluciona problemas para beneficio de la humanidad. Sin embargo, a diferencia del científico el ingeniero no es libre para seleccionar el problema que le interesa, debe resolver los problemas como resulten y su solución debe satisfacer requerimientos que muchas veces están en conflicto. Generalmente la eficiencia cuesta dinero; la seguridad aumenta la complejidad; la mejora del rendimiento incrementa el peso. La solución ingenieril es la solución óptima, el resultado final, que teniendo en cuenta todos los factores es la más deseable. Puede ser la más confiable dentro de un límite de peso permisible, la más simple que satisfaga ciertos requerimientos, o la más eficiente para un costo dado. Además, en muchos problemas de ingeniería el costo social es significativo [1].

Sabemos del avance que significó la incorporación de la ciencia a la ingeniería en el siglo XVIII, lo cual llevó al desarrollo del método ingenieril para resolver los problemas y que, aunque tiene una relación con el método científico, difiere de él. El llamado método científico, en general, parte de la proposición de hipótesis, las cuales se comprueban mediante observación, experimentación y otros procesos, seguida por análisis de resultados y la formulación de teorías o leyes. Por su lado el método ingenieril se fundamenta en el aprendizaje y el pensamiento creativo y se basa en la detección de necesidades, diseño de productos, implantación del diseño y evaluación de resultados; considerando una definición amplia de los conceptos *diseño* y *producto* que puede incluir por ejemplo «diseño de la planeación estratégica» o de «la política de talento humano.»

Este capítulo se centra en la explicación de cómo hace las cosas la ingeniería, es decir en establecer qué es el método ingenieril.

# Capítulo 4

## Cómo lo hace la ingeniería. El método ingenieril

### Contenido breve

#### 4.1 Introducción

#### 4.2 Definición del método ingenieril

#### 4.3 Los pasos del método ingenieril

#### 4.4 Partir de una necesidad. Definir ampliamente el problema

#### 4.5 Determinar las especificaciones

#### 4.6 Hacer un estudio de factibilidad

#### 4.7 Realizar una búsqueda de información

#### 4.8 Desarrollar conceptos alternativos de diseño

#### 4.9 Seleccionar el diseño más promisorio

#### 4.10 Implementar un modelo matemático o físico

#### 4.11 Determinar la relación entre las dimensiones y los materiales del producto

#### 4.12 Optimizar el diseño

4.13 Evaluar el diseño optimizado

4.14 Comunicar las decisiones de diseño al personal de producción

4.15 Controlar la producción

4.16 Intervenir en las ventas y el servicio

4.17 Analizar las fallas y retroalimentar el proceso de diseño

4.18 El equipo tecnológico: el ingeniero, el científico y el técnico

4.19 La interdisciplinariedad

4.20 La complejidad

4.21 La ingeniería concurrente

4.22 Conclusión

Referencias

## 4.2 Definición del método ingenieril

De una manera muy general el método ingenieril es una actividad de toma de decisiones –contra las limitaciones físicas, económicas, sociales y políticas– para desarrollar materiales, productos o procesos que satisfagan una necesidad. Evidentemente el método ingenieril es muy diferente del trabajo científico. La motivación básica tras esta última actividad es la curiosidad intelectual del científico, mientras que el ingeniero trabaja impulsado por la identificación de una necesidad. El científico se desenvuelve en un ambiente en el cual el tiempo y el dinero no son consideraciones primarias, mientras que la actividad del ingeniero está constreñida por muchos factores, incluyendo el tiempo, el dinero y otros recursos. El científico busca el reconocimiento y validación de sus pares, en tanto que el resultado del método ingenieril está siempre sometido a una aceptación dispersa por una parte relevante de la sociedad.

Hay otras diferencias entre los problemas científicos e ingenieriles, lo más difícil de estos últimos es que son abiertos y mal estructurados. Al contrario de los problemas científicos, hay muchas soluciones posibles, e incluso aceptables, para aquellos. Aunque ninguna de esas soluciones se puede decir que sea correcta desde el punto de vista científico estricto sólo una de las posibles se constituye en la mejor solución. Más aún, los problemas de ingeniería normalmente no se pueden resolver aplicando rutinariamente las ecuaciones matemáticas de una manera estructurada. En vez de ello, el método ingenieril es de naturaleza iterativa, o sea que la única manera de lograr un diseño mejorado es mediante la iteración. Este proceso requiere la adquisición de una amplia base de datos, y la solución se construye sobre varias decisiones que deben tomarse en varios niveles (naturaleza acumulativa del diseño) [2].

Más aún, una solución técnica puede que no sea suficiente. Cuestiones como el costo, la seguridad, la estética, las preferencias del mercado, las normas y códigos no pueden ignorarse y pueden llegar a ser factores determinantes. Y, como ya se anotó, las soluciones ingenieriles siempre están sometidas a constricciones físicas, económicas, sociales y políticas.

Desde otro punto de vista, el método ingenieril se define como una estrategia para producir el mejor cambio, con los recursos disponibles, en una situación deficientemente entendida o incierta.

Este enfoque heurístico, propuesto por muchos autores, ha sido ampliamente preconizado por Koen, quien afirma que el método ingenieril consiste en el uso de heurismos para producir el mejor cambio, con los recursos disponibles, en una situación deficientemente entendida. Es decir, que el método ingenieril es el uso de heurismos de ingeniería [3].

“Un heurismo es cualquier noción que proporcione una ayuda o dirección plausible en la solución del problema, pero que en el análisis final es injustificada, sin posibilidad de justificación, y falible. Es una guía para descubrir y revelar.”

Se indica que no es difícil hallar ejemplos de heurismos, que varían desde la decisión de oído, o a ojo, hasta las nociones más complejas sobre cómo debe resolverse un problema. Koen ha dado varios ejemplos de heurismos ingenieriles que son particularmente relevantes y se pueden usar inclusive para enseñar el método ingenieril:

- Haga pequeños cambios en el estado del arte.
- Fortalezca el eslabón más débil.

- Use la retroalimentación en el diseño
- Distribuya los recursos mientras el costo de no saber sea mayor que el costo de hallar.

En la definición de Koen, la heurística sugiere cómo debe el ingeniero distribuir los recursos, minimizar los riesgos y diseñar un producto. Más aún, la heurística asume la responsabilidad de que la experiencia ingenieril no se pase por alto cuando se generalizan herramientas para solucionar un problema. Se dice que la heurística proporciona medios para hacer chequeos cruzados y puede servir para evaluar resultados obtenidos con aproximaciones más complejas, como las que se logran con el uso del computador.

Así pues el método ingenieril pretende construir un modelo con leyes parciales aplicables a la situación específica que se enfrenta.

### 4.3 Los pasos del método ingenieril

Para recordar los pasos del método simplificado de la ingeniería se recomienda tener presentes las siglas DAMES (DAMAS en Inglés) que significan:

D = Definir el problema  
A = Analizar  
M = Meditar  
E = Evaluar alternativas  
S = Señalar la solución

Desglosando este método de una manera más amplia, un ingeniero usa el siguiente esquema de trabajo:

- a. Parte de una necesidad e identifica el problema
- b. Determina especificaciones
- c. Hace un estudio de factibilidad
- d. Realiza una búsqueda de información
- e. Desarrolla conceptos alternos de diseño
- f. Selecciona el diseño más promisorio
- g. Implementa un modelo matemático o físico
- h. Determina la relación entre las dimensiones y los materiales del producto
- i. Optimiza el diseño
- j. Evalúa el diseño optimizado, mediante análisis minuciosos del modelo matemático o por ensayo de los modelos físicos
- k. Comunica las decisiones de diseño al personal de producción
- l. Controla la producción
- m. Interviene en las ventas y el servicio
- n. Analiza las fallas y retroalimenta el diseño y la fabricación

Hagamos una breve revisión de lo que cada uno de estos conceptos significan [4].

### 4.4 Partir de una necesidad. Definir ampliamente el problema

Esto implica decidir entre múltiples soluciones posibles la que consideramos más

apropiada, después de realizar una amplia definición de lo que intentamos solucionar, esto incluye el recabar el mayor número de datos posibles. Es común el error de no poner suficiente atención a la recopilación de datos, lo que lleva a adoptar soluciones incorrectas.

Para apreciar mejor la solución ingenieril hay que entender primero lo que es el problema, pues sin clarificar esta noción es imposible intentar su resolución. De acuerdo con Krick “un problema proviene del deseo de lograr la transformación de un estado de cosas en otro. Tales estados podrían ser dos lugares cuya distancia que los separa habría que recorrer. El problema puede ser el ir de una ribera de un río a la opuesta, de una ciudad a otra, de un planeta a otro. Otros problemas comprenden la transformación de una forma o condición en otra, por ejemplo, la de un pan común en tostado. En todo problema hay un estado inicial de cosas; llamémoslo «estado A». Asimismo, hay otro estado que quien trata de resolver el problema busca cómo alcanzar; designémoslo «estado B» [5]. Obsérvese que lo anterior ocurre en el caso de problemas personales, de comunicación, de negocios y, de hecho, en todos los problemas.

Además, un problema involucra algo más que hallar una solución; requiere una forma preferible de lograr la transformación deseada; por ejemplo, el medio de transporte que sea el mejor con respecto al costo, rapidez, seguridad, comodidad y confiabilidad. Una norma de preferencia para seleccionar de entre varias soluciones se llama criterio.

Un problema es la expresión del deseo de pasar de una situación a otra. La solución es el medio para lograr ese paso.

## 4.5 Determinar las especificaciones

Esto significa, ampliar más los detalles, o sea, hacer consideraciones como las siguientes:

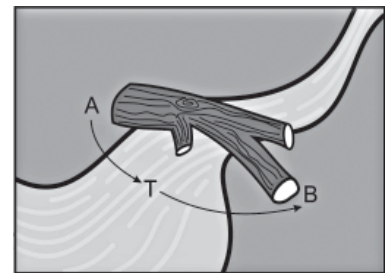
- ¿Cuáles son las necesidades de los usuarios?
- ¿Qué debería ser la solución?
- ¿Cuáles son los límites del problema (denominados también imposiciones y restricciones)?
- ¿Cuáles son las características de la población que usará el producto?

Como se ve, una parte importante en la definición del problema es determinar las especificaciones que debe cumplir el producto final, sea este un aparato, una construcción, un proceso o un sistema. Es decir, hay que identificar, hasta donde sea posible, las restricciones. Esto porque es difícil imaginar un problema en que no haya restricciones a las soluciones. Una restricción es una constricción que debe cumplir una solución. Ejemplos: el carro que quiere no puede costar más cierta cantidad; ciertas características de las estructuras de edificios están especificadas por los reglamentos de construcción; luz, agua y nutrientes deben proporcionarse a una semilla para que se transforme en planta.

Así, todo análisis de un problema en ingeniería consiste en poder identificar dos estados A y B y la transformación que lleva del estado A al B. La solución generalmente es un diseño de esta transformación (T) dados algunos recursos disponibles. Un problema puede ser cruzar un río, donde el estado A es estar en una orilla y el B es estar en la otra y la Transformación T es el cruzar el río. Actualmente el cruce se hace mediante un vado el cual cambia todos los años y eso produce que muchos vehículos se hundan, se echen a perder, etc. Entonces la solución al problema es un diseño de esta transformación (el cruce del río) según las características propias que tiene el problema (morfología del río y las orillas, flujo vehicular, recursos y tecnología disponible, ingenio, etc.) y para ello es necesario definir estas características lo más precisamente posible. Además, se debe considerar cuáles de estas características corresponden a los criterios y cuáles a las restricciones, en ese sentido un criterio podría ser el que se privilegiarán las alternativas de solución que tengan el menor valor y una restricción puede ser que se tiene un presupuesto de \$XXX para la solución, por ejemplo.

Una solución es un medio de lograr la transformación deseada. Un problema para el que haya sólo una solución posible es ciertamente raro; en la mayor parte de los problemas hay muchas soluciones posibles, muchas más de las que haya tiempo de investigar. Piénsese en los numerosos modos de viajar y en todas las posibles rutas con las que pueden combinarse para obtener medios alternativos para ir de un punto a otro de la Tierra.

Un tipo especial de restricciones son las especificaciones fijadas por las normas y códigos, por el mercado, por las características de los materiales o por la decisión de los clientes.



Ejemplo grafico del cruce de un río

## 4.6 Hacer un estudio de factibilidad

---

De acuerdo con la magnitud del problema y las soluciones que el ingeniero esté tratando, puede ser aconsejable hacer un estudio de factibilidad. Un estudio de factibilidad es el proceso de definir exactamente qué es el proyecto y qué temas estratégicos deben considerarse para determinar su factibilidad, o posibilidad de éxito. Es un análisis preliminar de los requerimientos. Es la diligencia que todo ingeniero o empresa debe hacer antes de empezar cualquier proyecto, pues el estudio debe ser capaz de indicar si se continúa o no, o se cambian los requerimientos a unos más reales.

En cierto sentido un estudio de factibilidad es un corto análisis formal del problema y su objetivo es dar al ingeniero una clara evaluación de las posibilidades técnicas, económicas, sociales y políticas de la solución. Puede incluir estudios de documentos, búsquedas de información y simulaciones.

Inicialmente el estudio debe responder a preguntas como:

- ¿Es factible técnicamente? (funcionará?)
- ¿Cómo funcionará?
- ¿Se podría hacer con los recursos existentes?
- ¿Qué impacto tendrá sobre quien presenta la solución y sobre quien la recibe?
- ¿Cuál será la inversión y qué tan largo se tomará el retorno de la inversión?

Hay varios niveles de estudios de factibilidad, de acuerdo con el alcance y la magnitud del problema, los cuales determinan el tiempo y el dinero invertidos en este paso.

En algunos casos el estudio de factibilidad se convierte en un proyecto en sí, y puede incluir estudios de mercado y de impacto e información más detallada como:

Clarificación del problema

- ¿Cuál es el paso fundamental que se mejorará?
- ¿Quiénes serán los usuarios y su papel?
- ¿Cuáles son los requerimientos más importantes de la solución?
- ¿Cuáles partes del problema serán las más riesgosas para manejar?
- ¿Qué modificaciones futuras se pueden esperar racionalmente?
- ¿Qué soluciones existen en el mercado o quién podría suministrar otras?

En los casos complejos hay personas y organizaciones especializadas en realizar completos estudios de factibilidad que pueden costar muchos millones de pesos [6].

## 4.7 Realizar una búsqueda de información

---

En el estudio de factibilidad se realizan búsquedas de información, de todas maneras aunque no se haga éste, es necesario buscar toda la información posible sobre el problema y sus posibles soluciones.

Ya la definición del problema y la determinación de las especificaciones exigen la búsqueda de información y, a su vez, deben establecer los principales interrogantes. Estos pueden ser respondidos con los conocimientos y experiencias del mismo ingeniero o de los miembros del equipo, pues muchas veces es posible que se hayan solucionado problemas similares o existan soluciones disponibles en el mercado en condiciones económicas favorables y bastaría con adoptarlas.

En otros caso hay que buscar la información, esto lo puede hacer el ingeniero directamente o acudir a los profesionales de ella. En ambos casos se requiere tener muy bien identificada la necesaria y de acuerdo con ello las posibles fuentes. Una vez realizada la búsqueda y hallada hay que seleccionar la que realmente sea pertinente al problema entre manos y se debe archivar racionalmente para poderla utilizar en cualquier momento [7, 8].

Las principales fuentes de información son:

- Los conocedores
- Diccionarios y enciclopedias
- Manuales y recetarios
- Información técnica de los productores (catálogos y manuales)
- Libros
- Revistas
- Tesis de grado
- Patentes
- Internet (buscadores, carteleras electrónicas, listas de interés, etc.)
- Bases de datos especializadas
- Las memorias y la asistencia a seminarios, congresos, encuentros y foros.

Los conocedores pueden ser los dueños, los operarios y los usuarios, una visita de campo, entrevistas, fotografías, esquemas y descripciones del estado inicial de cosas pueden dar la información suficiente para definir el problema exactamente.

Otras veces los conocedores son los especialistas en la materia y, si están accesibles, una o varias entrevistas, con cuestionarios atinados, puede ser suficiente.

Los diccionarios y enciclopedias proporcionan información confiable pero limitada. Las tres limitaciones principales son: por lo común es muy resumida, es muy general –a menos que sean enciclopedias especializadas– y no está actualizada. Esto debe tenerse en cuenta y saber que estas fuentes sólo sirven como introducción para lograr una idea muy general del asunto.

Los manuales y recetarios cumplen las mismas funciones que los anteriores y tienen las mismas limitaciones, aunque por su naturaleza pueden suministrar una información más específica que permite enrutar mejor la búsqueda.

No debe menospreciarse la información técnica que proporcionan los productores de bienes y servicios, si se examina con cuidado es posible encontrar en ella buenos datos.

La información que proporcionan los libros es mucho más amplia y detallada, por ello han sido la fuente tradicional, sin embargo no es actualizada porque el proceso de escritura y traducción de un libro se toma varios años, lapso que puede ser significativo dada la velocidad con que cambia la tecnología.

Las revistas y demás publicaciones periódicas son fundamentales, el conocimiento está bastante actualizado, son muy específicas y el artículo mismo, las referencias y direcciones de investigadores son fuentes valiosísimas para adquirir información. Muchas revistas están en línea o son electrónicas y se pueden consultar con mayor facilidad.

Las tesis de grado doctorales, y en menor grado las de maestría, son medios para conseguir información. Hay entidades dedicadas a ubicar estos trabajos y no deben pasarse por alto cuando se hace una búsqueda en profundidad.

La información que proporcionan las patentes es de alto valor, es posible que toda ella no pueda utilizarse por cuestiones de derechos, pero en ellas se encuentran indicaciones y datos que facilitan la definición de los problemas y sus soluciones.

Actualmente la primera fuente de información es la World Wide Web, *WWW*. En ella se puede buscar si se conoce la dirección electrónica o mediante los motores de búsqueda (Alltheweb, Google, Excite, Yahoo, Altavista, Lycos, Savvysearch, Infoseek, Hotbot, etc.) en los cuales con una palabra o una frase se accede a miles de páginas relacionadas con el tema. Acá la cuestión es seleccionar la información pertinente entre la avalancha de datos que se obtienen, eso requiere entrenamiento y criterio.

Las bases de datos especializados, sea en CD o en línea, son una fuente altamente eficaz para lograr información de excelente calidad las buenas bibliotecas las poseen y deben ser consultadas, pues son actualizadas y específicas.

Por último, la asistencia a eventos donde se trate el tema en cuestión es valiosa porque no solamente se tiene acceso a trabajos actualizados sino que se conoce a especialistas y organizaciones relacionadas con el campo de trabajo.

Además del tipo de búsquedas que hemos mencionado a veces será necesario hacer ensayos y simulaciones para obtener información de primera mano. Estos son ya trabajos ingenieriles que deben estructurarse como tales [9].

## 4.8 Desarrollar conceptos alternativos de diseño

Es difícil encontrar una definición que cubra todas las características de lo que es el diseño, en sentido amplio, y que sea adecuada para todas las profesiones. Un ingeniero químico, un ingeniero mecánico, un ingeniero electrónico, un arquitecto o un diseñador gráfico tienen diferentes conceptos del diseño en su propio campo de interés. Aunque las definiciones verbales son diferentes, es posible encontrar conceptos y propiedades comunes en ellas, a continuación se dan algunas definiciones interesantes con sus palabras clave entre paréntesis.

- Hallar las componentes físicas correctas de una estructura física (hallar, física).
- Una actividad cuyo objetivo es solucionar un problema (objetivo, actividad de solución).
- Toma de decisiones frente a la incertidumbre con grandes penas para el error (decisiones, incertidumbre, penas).
- Simular lo que queremos hacer antes de hacerlo, tantas veces como sea necesario para tener confianza en el resultado final (simular, confianza).



- El factor condicionante para aquellas partes del producto que estarán en contacto con la gente (contacto con la gente).
- Relacionar el producto con la situación para dar una satisfacción (producto, satisfacción).
- Llevar a cabo un acto de fe muy complicado (acto de fe).
- La solución óptima a la suma de necesidades verdaderas de un particular conjunto de circunstancias (necesidades verdaderas).
- El salto imaginativo de los hechos presentes a las posibilidades futuras (salto imaginativo, hechos presentes, posibilidad futura).
- Un actividad creativa que trae a la existencia algo nuevo y útil que no existía previamente (actividad creativa, útil que no existía).
- La creación de un resultado final que satisface una necesidad humana mediante una acción definida (creación, resultado que satisface necesidad humana, acción) [10, 11, 12, 13].

Cada una de esas definiciones es literalmente cierta, y se puede aplicar a algún caso de diseño, pero éste se entendería mejor si se consideran todas en un caso particular. Entre las muchas características del diseño, *la satisfacción de una necesidad* es el primer ítem que debe considerarse en una definición conceptual. La *necesidad* es normalmente una expectativa humana, sin embargo la naturaleza y la sociedad son diferentes después de que se completa el diseño. Se mantiene un balance crítico entre la naturaleza, la sociedad y la tecnología, pero en general gana la tecnología. La figura 4.1 ilustra el proceso de diseño y el papel de la sociedad y la naturaleza.

Un diseño no es exitoso o completo si no satisface una necesidad. En realidad un diseño perfecto nunca se logra dentro de los límites prácticos de tiempo. El diseñador debe encontrar una manera de satisfacer la necesidad usando la información disponible, dentro del tiempo permitido.

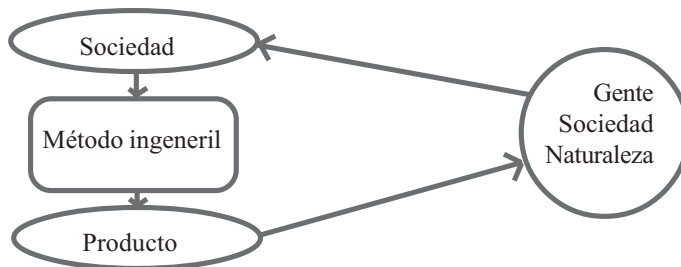


Figura 4.1. El proceso de diseño [14].

La actividad del diseño es planear y realizar una estrategia creativa para llevar a cabo una tarea física, mental, moral o artística o satisfacer una necesidad. El propósito del diseño es:

- Satisfacer una especificación funcional dada.
- Conformarse a las limitaciones del objetivo.
- Responder a los requerimientos implícitos o explícitos en la realización (tiempo, espacio, energía, costo, etc.) y estructura (estilo, simplicidad, etc.).
- Satisfacer las restricciones del proceso mismo de diseño.

Las actividades de diseño incluyen la creatividad, la toma de decisiones y el

1. *Diseño original*, que comprende la elaboración de un principio original de solución para un sistema con una tarea igual, similar o nueva.
2. *Diseño adaptativo*, que adapta una principio de solución conocido a una tarea cambiante.
3. *Diseño variante*, que varía el tamaño y la organización de ciertos aspectos del sistema escogido, mientras que la función y la solución del sistema permanecen sin cambiar.

En particular el diseño en ingeniería es la sinergia de las actividades de la ingeniería y del diseño enfocadas en un producto particular. Es interesante comparar las características contradictorias entre las actividades de la ingeniería y las actividades del diseño, como se ve en la tabla 4.1, estas se mezclan de tal modo en el concepto de diseño ingenieril que éste solo es el motor de la profesión.

**Tabla 4.1** Las actividades de la ingeniería y del diseño se mezclan perfectamente en el diseño ingenieril.

<i>Diseño</i>	<i>Ingeniería</i>	<i>Diseño ingenieril</i>
Actividad mental	Actividad que demanda tiempo	Actividad iniciada mentalmente que consume tiempo
Conceptual	Físico	Productos físicos desarrollados conceptualmente
Cercano al arte	Cercano a la ciencia	Trabajo creativo basado en principios científicos
Intuitivo	Metodológico	Metodología empezada intuitivamente
Crea problemas	Resuelve problemas	Las cadenas Solución –problema y Problema –solución son irrompibles

A continuación de presentan algunas definiciones de diseño ingenieril.

- Una actividad iterativa de toma de decisiones para producir planes por medio de los cuales se convierten las fuentes, ojalá óptimamente, en sistemas o aparatos para responder a las necesidades humanas.
- El proceso que usa las herramientas de la ingeniería –matemática, gráficos, lenguaje– y principios científicos para desarrollar un plan, que realizado plenamente satisfará una necesidad humana.
- El uso de principios científicos, información técnica e imaginación en la definición de una estructura mecánica, máquina o sistema para llevar a cabo funciones pre-especificadas, con la máxima economía y eficiencia.
- Una actividad con propósito dirigida al objetivo de suplir las necesidades humanas, particularmente aquellas que pueden responderse con los factores tecnológicos de nuestra cultura.
- El completo proceso intelectual desde la concepción de la idea basada en la inspiración, el conocimiento y la experiencia hasta su final realización técnica y comercial.

- La solución de problemas basada en la ciencia con sensibilidad social... una actividad de alto nivel intelectual.
- La parte creativa de la ingeniería.
- La actividad donde varios principios técnicos y científicos se emplean para tomar decisiones respecto a la selección de materiales y su ubicación para formar un sistema o aparato, que satisfaga un conjunto de requerimientos especificados o implícitos.
- El propósito esencial de la ingeniería.
- Un proceso iterativo de toma de decisiones para desarrollar sistemas o aparatos ingenieriles mediante el cual los recursos se convierten óptimamente en los fines deseados.

En resumen, el diseño ingenieril es la actividad de diseño bajo las constricciones de la ingeniería. Dentro del método ingenieril el proceso de diseño abarca las actividades y eventos que transcurren entre el reconocimiento de un problema y la especificación de una solución del mismo que sea funcional, económica y satisfactoria de algún modo. El diseño es el proceso general mediante el cual el ingeniero aplica sus conocimientos, aptitudes y puntos de vista a la creación de dispositivos, estructuras y procesos. Por tanto, es la actividad primordial de la práctica de la ingeniería.

Cualquier cosa que sea lo que diseñe un ingeniero lo realizará mediante el mismo proceso básico del diseño ingenieril cuyo foco central es el diseño, un arte que requiere del ejercicio del ingenio, la imaginación, el conocimiento, habilidades particulares, disciplina y criterio basado en la experiencia [15].

Seguidamente señalaremos algunas metodologías para obtener alternativas de diseño.

*Distribución de Pareto*, el tiempo en ingeniería es un recurso valioso; no hay que desperdiciarlo en problemas carentes de importancia. El empleo de la distribución de Pareto nos puede resultar muy útil en la detección de problemas que realmente valen la pena ponerles atención.

El trabajar en varios diseños en paralelo en lugar de uno a la vez, nos permite un mejor aprovechamiento del tiempo y quizás una mejoría importante en la calidad de la idea.

*La inspiración*, o investigación no estructurada es ciertamente una manera de plantear alternativas de diseño. Cuando se trata de resolver un problema, la mayoría de las veces nuestro panorama es estrecho. Es decir, frecuentemente rechazamos posibles soluciones por sólo suposiciones, que de considerarlas cuidadosamente resultan fácilmente solucionables.

Lo que se considera conveniente es proponer muchas soluciones posibles. Posteriormente se realizará un proceso de reducción para determinar las más viables. La inspiración está directamente relacionada con la creatividad. Aunque ésta no es única de la especie humana, es en nosotros donde se manifiesta con mayor fuerza. Los seres humanos usamos la creatividad cada vez que requerimos resolver un problema o enfrentarnos a situaciones nuevas

La creatividad está ligada al ingeniero aunque en muchas ocasiones el término creatividad se asocia a los términos patente o invención. En realidad, muy pocos son los casos en los que se espera que el ingeniero aporte regularmente nuevas ideas, algunas de ellas incluso patentables. Sin embargo, para la mayor parte de los

ingenieros el trabajo no es necesariamente éste, sino el resolver problemas concretos que aparecen en distintas situaciones. Pero, incluso en estos casos, todo problema requiere que alguien con una idea aporte una solución, por lo que el proceso de generar la idea también es creativo.

Toda persona es creativa en cierto grado. Normalmente la creatividad se asocia a la inteligencia, aunque se asocia también a otro término algo difuso como es la inspiración. Sin embargo, se suele decir que la inspiración les llega a aquellos que trabajan duro y que están bien preparados. Ya lo dijo Edison: «El genio se compone de 1% de inspiración y 99% de transpiración». Además de enfatizar la importancia de la constancia en el trabajo, se pueden distinguir una serie de pasos en el proceso creativo:

- Preparación y adquisición de conocimiento previo.
- Concentración.
- Incubación de la idea.
- Generación de la idea (inspiración).
- Verificación de su validez.

De manera ilustrativa diremos que «La creatividad es como una orquídea que será marchitada por la crítica», esto para resaltar la necesidad de evitar la crítica destructiva que es distinta a la evaluación [16].

Algunos sostienen que la participación inhibe el pensamiento creador. Es recomendable reunir los esfuerzos individuales de las personas manteniéndolas físicamente separadas, en vez de congregadas. Otros recomiendan las lluvias de ideas. En la lluvia de ideas, la regla de oro es no descartar ni evaluar ninguna de las opciones. Todas las opciones deben ser consideradas siempre y cuando sean remotamente posibles. Una vez determinadas todas las opciones, la evaluación se basa en las metas, en las restricciones y en el criterio de evaluación escogido (tiempo de implantación, costo, etc.).

En resumen, en la ingeniería hay una enorme necesidad de pensadores más originales (y en todos los campos también).

*Listas de verificación*, son una forma de investigación estructurada, pues muchos ingenieros piensan que tener un enfoque sistemático y no esperar que llegue la inspiración, es una mejor técnica de investigación.

Esta metodología de trabajo consiste en acudir a la experiencia, el conocimiento y la información, pues como lo dijo Kipling: “Cuento con seis servidores honestos que me enseñan todo lo que sé sus nombres son quién, qué, cuándo, por qué, dónde y cómo.»

La lista de verificación permite examinar varias áreas o puntos y concebir posibilidades, por ejemplo, para mejorar un mecanismo, se puede hacer la siguiente lista:

- Cómo puede usarse para otros fines.
- Cómo puede modificarse.
- Cómo puede reordenarse.
- Cómo cambiarse de tamaño.
- Cómo puede cambiarse de forma.
- Cómo puede hacerse más rápido.
- Cómo puede hacerse más liviano.

Y así sucesivamente.

Dentro de esta modalidad tenemos la llamada lista de verificación SEARCH, cuyo significado es:

- S = Simplificar las operaciones individuales
- E = Eliminar el trabajo y los materiales innecesarios
- A = Alterar la secuencia
- R = Requerimientos
- C = Combinar las operaciones, los elementos y el equipo
- H = Hallar la frecuencia

Nada hay contra esta metodología, pero existe el peligro de que las soluciones tenderán a ser poco imaginativas si se confía demasiado en el conjunto de soluciones «en existencia» o rutinarias que se han acumulado en el curso de los años. El recurrir a esta fuente es tentador, pues es un camino de mínima resistencia y proporciona soluciones en las que puede tenerse una confianza razonable. En general, cuanto más se sepa acerca de una rama especializada del conocimiento, será mayor el número de soluciones rutinarias con que se estará familiarizado y tanto más fácil será confiar excesivamente en la fuente de soluciones de rutina. Hay demasiadas soluciones que son el producto de manuales o de prácticas tradicionales que no tienen más virtud que su longevidad. Muy pocas soluciones provienen de un pensamiento verdaderamente original. La inercia hace que se perpetúe una multitud de soluciones deficientes en el mundo que nos rodea, dejando grandes oportunidades para el solucionador de problemas que confía intensamente en su propia inventiva [17].

## 4.9 Seleccionar el diseño más promisorio

Así pues, se diseñan diversas alternativas, pues como se ha insistido, una de las distinciones principales entre ciencia e ingeniería es que en la primera sólo existe una solución, mientras que en la ingeniería hay varias soluciones posibles.

En la fase de selección del diseño más promisorio ya se han ampliado el número y la variedad de las soluciones posibles, es decir, de los diseños alternativos. Lo que se necesita ahora es un procedimiento de eliminación que reduzca estas alternativas a la solución preferible.

Mientras que el científico tiende a buscar la fórmula única que describa un criterio único de una situación; el ingeniero debe acomodar criterios múltiples, por lo general sin valores de intercambio satisfactorios. Inicialmente, las soluciones elegibles se expresan sólo en términos generales, quizá con palabras o croquis. Después que hayan sido eliminadas las alternativas obviamente deficientes o de inferior calidad, con frecuencia por procedimientos de evaluación relativamente rápidos y burdos, se añaden más detalles a las posibilidades restantes, las que se evaluarán mediante métodos más refinados. Este proceso de depuración en varias etapas continuará hasta que surja la solución preferible. A medida que se avanza se evalúan diferentes combinaciones de soluciones parciales para determinar la óptima.

Es evidente que se requiere aplicar criterios claros, de ser posibles cuantitativos, para evaluar las diversas propuestas de solución. Los criterios que se utilizan para seleccionar el mejor diseño deben identificarse durante el análisis del problema. Realmente, los criterios cambian muy poco de problema a problema; el costo de construcción o fabricación, la seguridad personal, la confiabilidad, la facilidad de

mantenimiento o conservación y otros semejantes se aplican casi en todos los casos. Pero lo que sí cambia significativamente es la importancia relativa de cada uno de estos criterios. De ahí que en la mayor parte de los problemas la tarea primordial del ingeniero con respecto a los criterios es conocer la importancia relativa asignada a varios de ellos por los funcionarios, clientes, ciudadanos y otras personas interesadas. Esta información es importante; el siguiente ejemplo ilustrará por qué. Supóngase que la seguridad personal ha de ser un criterio de gran peso en el diseño de un nuevo modelo de cortadora de césped rotatoria. Sabiendo esto, el proyectista o diseñador considerará un número mayor de diferentes materiales, mecanismos, tipos de cortadores, métodos de descarga, etc., que los que consideraría de ordinario en su investigación. Un criterio especialmente importante afectará a los tipos de soluciones que se destacan en la búsqueda de alternativas, y este hecho debe ser conocido antes que comience tal búsqueda.

## 4.10 Implementar un modelo matemático o físico

Una vez que se ha seleccionado el diseño más promisorio y de acuerdo con la magnitud del problema, se debe establecer un modelo matemático, virtual o físico que permita evaluar la solución antes de entrar a fabricarla.

La modelación matemática es un método para entender sistemas y procesos, para ello, conocidas las características de la solución promisoria, se crea un modelo matemático, es decir, un conjunto de ecuaciones que describe las características más importantes. En la actualidad estos algoritmos se manipulan, obviamente, en los computadores.

Sin embargo, lo anterior no debe confundirse con otros métodos como el “diseño asistido por computador” (Computer Aided Design, CAD) el cual podría definirse como un método de modelamiento de sistemas físicos en los computadores, que permite un análisis tanto iterativo como automático de las variantes del diseño, y la expresión de éste en una forma adecuada para su implementación real [18].

Esta definición incluye todos los tipos de trabajo que actualmente se conocen como CAD, en todas las varias áreas de aplicación; también implica que la simulación es una parte del CAD mucho más importante que la descripción del diseño. Esto es verdadero y la parte gráfica que proporcionan los computadores nada tiene que ver con el CAD, excepto como auxiliar del diseño, la simulación o la presentación.

Los computadores son cada vez más importantes en la ingeniería a medida que pasamos del CAD bidimensional al CAD tridimensional y finalmente a la Realidad Virtual (RV), la cual se usa en los PCs, en las estaciones de trabajo, en las “paredes de trabajo” y CAVes (Computer Automatic Virtual Environments). Por ejemplo, la General Motors usa demostraciones completas en un CAVE, donde los ingenieros descubren problemas potenciales antes de tener prototipos físicos. Los diseños propuestos los podremos enviar a todo el mundo para revisión y modificación en diferentes sitios antes de que empiece la producción.

La RV es una vivencia tridimensional generada por el computador en la cual el usuario puede navegar, con la cual puede interactuar y sumergirse en otro ambiente en tiempo real. La RV existe paralela a lo cotidiano y exhibe las siguientes características: es generada por los computadores y los sistemas informáticos; implica la creación de un mundo artificial; los usuarios tienen la impresión de estar en ese mundo artificial; además, es posible moverse y actuar en esos mundos virtuales, ya

sea directa o indirectamente. En resumen, la RV es un nuevo tipo de método científico, útil para observar, probar, experimentar y enseñar [19, 20].

En el caso de la ingeniería el proceso creativo depende de imágenes mentales, con la RV éstas pueden compartirse, lo que permite a los ingenieros elevar sus capacidades creativas, posibilitando llevar hasta límites no imaginados la simulación, clave del diseño en ingeniería; sin ella no hubiera sido posible el viaje a la luna, los transbordadores espaciales o el aeropuerto de Hong Kong. La NASA tiene un túnel de viento virtual que permite flujos de campo irregulares, generados numéricamente, que ha probado ser más versátil que un túnel con modelos físicos.

En ingeniería la RV es una forma de enseñar y aprender para las mentalidades del siglo XXI, se pueden simular todo tipo de situaciones, desde la estructura de un material, el comportamiento mecánico de un elemento, la cinética de un reactor, la respuesta de un circuito, hasta sistemas complejas donde se manejan materiales y energías. A pesar de los costos iniciales, los laboratorios virtuales son más versátiles y económicos a largo plazo, por ello el papel de la RV será cada vez mayor, con la posibilidad de compartir experiencias a distancia [21].

Sin embargo, como afirman muchos viejos ingenieros, la simulación no es suficiente pues la realidad es dura, por eso en el trabajo de ingeniería muchas veces hay necesidad de hacer modelos físicos o prototipos que permitan probar las bondades y detectar los errores del diseño. Los ensayos pueden ser en el laboratorio o en el campo, de acuerdo con la complejidad del modelo.

## 4.11 Determinar la relación entre las dimensiones y los materiales del producto

Esto significa comprobar que los “materiales”, entendidos en sentido amplio como insumos, en sus características y posibilidades sí responderán plenamente a la magnitud del diseño.

Esto es muy importante en nuestros países, donde la disponibilidad de medios y materiales es tan restringida. Muchas veces no basta con saber qué materiales, componentes o sistemas son los adecuados de acuerdo con un buen diseño, hay que comprobar que sí estén disponibles en las cantidades, formas, dimensiones y acabados que se requieren.

Muy frecuentemente se confía en que, en el mercado globalizado, se puede conseguir todo, pero no es así, las cantidades que despachan a veces son una limitante. También lo es la fabricabilidad en el caso de materiales específicos, es posible que estos puedan obtenerse, pero en el medio no existen los equipos o experticia para adecuarlos al diseño especificado.

Entran en estas consideraciones temas como la tecnología apropiada, la recursividad del ingeniero y su capacidad para plantear soluciones autóctonas. Esto no solamente en los aspectos meramente físicos, lo mismo puede decirse de la legislación, de las organizaciones y en fin de la idiosincrasia que nos es propia y que en ningún momento puede perderse de vista cuando se quiere instaurar una solución realmente efectiva y acorde con el espacio y el tiempo en que se desempeñará [22].

Así pues la concordancia entre las dimensiones y los materiales no es simplemente un asunto de metrología en la obtención de un producto específico.



## 4.12 Optimizar el diseño

---

Las simulaciones con el modelo del diseño más promisorio y las comprobaciones de la concordancia entre las dimensiones y los materiales permiten optimizar el diseño seleccionado. Lo anterior se debe a que tales actividades permiten detectar cuándo se producen equivocaciones, fallas, accidentes, reparaciones y cambios si las decisiones se han basado en predicciones que no son precisas o son erróneas, o a que se necesitan altos factores de seguridad para prevenir tales condiciones adversas.

Siempre hay un grado óptimo para el refinamiento de un modelo. A largo plazo los errores originados por las predicciones hechas con el modelo tendrán un costo apreciable.

Es usual aplicar el concepto de optimización a las soluciones de problemas de ingeniería. El concepto también es aplicable a los métodos que emplea el ingeniero para alcanzar tales soluciones, por ejemplo, los sistemas de medición, los métodos de cálculo, los modelos, y el número y clases de técnicos que utiliza.

Lo anterior puede hacerse con herramientas matemáticas como las desarrolladas en la ingeniería de la optimización, que consiste en la maximización o minimización de funciones de variables reales con o sin constricciones. Para lograr estos se utilizan herramientas tradicionales como los métodos gráficos, programación lineal, programación integral, programación dinámica, métodos de búsqueda y construcción de modelos. Actualmente se usan métodos más complejos como los algoritmos genéticos o la inteligencia artificial, pues la ingeniería de la optimización se ha convertido en un fértil campo de trabajo e investigación [23, 24, 25, 26].

Aun sin recurrir a herramientas tan sofisticadas como las señaladas, los diseños se pueden optimizar teniendo presente que éstos deben ser tan simples como se pueda. A menudo una solución de ingeniería, que es especialmente simple en comparación con lo que realiza, se describe como elegante. Puesto que la complejidad es lo contrario de la sencillez, la elegancia es una regla de oro en el método ingenieril. Muchas veces la complejidad de una solución puede estimarse satisfactoriamente contando sus piezas o elementos (resistores, transistores, engranes, levas, etc.), pero la razón anterior que expresa la elegancia es difícil de cuantificar.

Otra actividad que se realiza en este contexto es el análisis de valor, que se aplica a los procedimientos lo mismo que a los productos, y su meta es reducir el costo excesivo en el diseño. El concepto básico es que muchos de los diseños propuestos se pueden mejorar notablemente, ya que el diseño original puede presentar costos excesivos, aunque no existe ninguna limitante para aplicar la técnica de análisis de valor desde la primera vez. Una manera de hacer este análisis es definir y evaluar la función. Hay que hacer una distinción entre valor y función, por ejemplo: dos clips uno para papel y el otro para corbata; los valores son muy diferentes aunque la función es la misma. El valor funcional es el mismo, pero el valor personal (prestigio, estimación) es diferente.

Al definir las funciones se deben expresar con un nombre y un verbo y dividir las de cada componente en primarias y secundarias. Esta cuidadosa definición de las funciones permitirá tener en cuenta las consideraciones ergonómicas y ambientales necesarias. Así con todas estas metodologías se puede optimizar el diseño en todos los sentidos y se estará en condiciones de avanzar al siguiente paso del método ingenieril.



## 4.13 Evaluar el diseño optimizado

Establecido el diseño (o solución) y sus posibilidades y realizada su optimización, es necesario evaluarlo de nuevo mediante análisis minuciosos del modelo matemático o por ensayo de los modelos físicos. Para llevar a cabo esto se pueden utilizar las técnicas indicadas en la sección 4.10 o llevar a cabo ensayos.

En el primer caso debe resolverse el modelo para las condiciones optimizadas y comparar estos resultados con los deseados.

Los ensayos deben llevarse de acuerdo con las normas que regulan el material, el aparato, el procedimiento o el sistema de que se trate. Este es el momento de conocer todas las regulaciones que gobiernan no solamente los ensayos sino también el futuro desempeño de la solución en cuestión. Aunque en el país existen las normas ICONTEC y hay poderosas organizaciones de normas como las ASTM o las DIN, lo normal será buscar conformidad con las normas internacionales ISO [27].

Además de los aspectos puramente técnicos o ambientales que codifican las normas, la evaluación detallada del diseño optimizado incluirá también los de rendimiento, eficiencia, eficacia, relación costo / beneficio y tasa de retorno.

Si en este momento es necesario cambiar el modelo entonces se evalúa de nuevo y se investiga qué pasa si se hace el cambio correspondiente. Si es del caso se seleccionará otro diseño y se repetirán los pasos señalados desde la sección 4.9.

## 4.14 Comunicar las decisiones de diseño al personal de producción

Esta actividad, que se refiere al desarrollo y producción de elementos físicos o no, debe entenderse en sentido lato de que la solución adoptada debe comunicarse claramente a quienes deben adoptarla, sea el personal de producción o cualquier tipo de usuario. Debemos ser cuidadosos de expresar nuestras conclusiones de manera que puedan ser comprendidas por la persona común.

La mejora que la solución logre estará relacionada con la calidad del diseño multiplicada por la aceptación. Si «ellos» no lo «aceptan», nada sucede. Por la misma razón es importante que seamos capaces de aceptar modificaciones a nuestros diseños en aras de lograr la aceptación. Luchar por «todo o nada», normalmente termina en «nada».

La comunicación sobre la solución usualmente requerirá la preparación de informes, planos, manuales y demás especificaciones. A veces se incluyen además prototipos u otra clase de modelos físicos.

Hay que describir con los detalles suficientes los atributos físicos y las características de funcionamiento de la solución propuesta, de manera que las personas que deben aprobarla, los encargados de su construcción y quienes la manejarán y conservarán, puedan desempeñar satisfactoriamente sus funciones. El hecho de que alguien distinto de nosotros por lo general construya, opere y cuide nuestras obras, hace que adquiera especial importancia la presentación cuidadosa por escrito y la comunicación exacta de ellas [28, 29].



Las soluciones deben comunicarse al equipo de producción o a los usuarios.

## 4.15 Controlar la producción

---

Como se indicó en el párrafo anterior, por lo general es alguien distinto a nosotros quien construya, opere y mantenga nuestros diseños. Por ello el control de la producción es un ideal para un ingeniero solo, a menos que se trate de una pequeña empresa, pero es una posibilidad real para una organización grande y es el meollo de la filosofía de la llamada calidad total [30].

Esto es fundamental porque entre los diseños y prototipos y los productos reales puede haber grandes diferencias, bien porque no se siguen estrictamente las especificaciones de diseño, bien porque no se cuenta con los equipos adecuados para efectuar los procesos de fabricación y montaje, porque la habilidad y experiencia del personal encargado de esta fase no son suficientes, porque las condiciones reales de trabajo varían y, en casos extremos, por la combinación de varios de los anteriores factores.

## 4.16 Intervenir en las ventas y el servicio

---

Como en el caso anterior, a menos que se trate de una empresa pequeña o unipersonal es difícil que quienes diseñan participen en las ventas. Pero en las grandes organizaciones la función de los ingenieros que realizan las ventas y los servicios deben estar completamente coordinadas con las otras funciones.

Muchas excelentes soluciones de ingeniería fallan porque no se operan adecuadamente ya que quienes las entregan a los usuarios no los instruyen adecuadamente en su manejo y mantenimiento. Cuidado en la venta y la atención postventa son parte esencial del trabajo ingenieril bien hecho y así lo atestigua el éxito de las empresas que lo realizan a cabalidad y el fracaso de quienes descuidan esta parte final del proceso.

## 4.17 Analizar las fallas y retroalimentar el proceso de diseño

---

El análisis de fallas es una disciplina especializada para la que no todos los ingenieros están capacitados. Sin embargo los diseñadores, en general, deben estar en capacidad de apreciar las causas por las que su diseño falló. Si el ingeniero o grupo de trabajo puede realizar este análisis sería magnífico, en caso contrario habrá que asesorarse de los especialistas. En cualquier evento la determinación del porqué de una falla es fundamental para hacer las correcciones necesarias sea en el diseño, en el material utilizado, en el proceso de fabricación y montaje, en la operación o en el mantenimiento [31].

Como se ve, todas las causas de falla no son, de ninguna manera imputables al diseño. En el caso de los elementos y sistemas materiales, además de las causas señaladas el ambiente es fundamental y procesos como la oxidación, la corrosión, la degradación térmica el desgaste y otras causas, que a veces son del todo previsibles en el diseño, pueden ocasionar la falla.

En el caso de sistemas no materiales además de problemas de lenguaje y comprensión la naturaleza de las organizaciones sociales y su comportamiento lleva a veces

a variaciones y situaciones nuevas que cambian por completo el entorno para el que se propuso una solución. Obviamente que, de todas maneras, el estudio de estas fallas llevará al mejoramiento del diseño en todos los sentidos.

## 4.18 El equipo tecnológico: el ingeniero, el científico y el técnico

Como se comprende de lo que implica el método ingenieril, este gran trabajo debe ser realizado por un equipo que normalmente incluye científicos, ingenieros y técnicos. Es evidente que ciertos miembros del equipo tecnológico deben ser capaces de unificar los esfuerzos de los otros miembros en un enfrentamiento coordinado del problema y tomar decisiones en relación con las mejores soluciones. El más indicado para esta responsabilidad, obviamente, es el ingeniero, quien debe tener la comprensión del conocimiento del científico y de las habilidades del técnico. A él se le da la oportunidad de ejercer su interés y motivación para producir algo útil para el hombre, algo que satisfaga una necesidad de la humanidad [32].

El ingeniero debe comprender los intereses del científico, una persona que es feliz haciendo nuevos descubrimientos en cuya persecución está dispuesto a ser paciente, estudiar largas horas sobre el tema de su interés, comprobar sus ideas con experimentos y enfrentar los resultados descorazonadores. El científico debe ser académico, porque solamente con el estudio de los descubrimientos pasados y las investigaciones actuales puede esperar el éxito.

El ingeniero debe estar atento a los resultados del trabajo de la ciencia, puesto que es él quien debe buscar su aplicación ya que el científico no tiene esta actividad como objeto. Por ejemplo, Carothers descubrió el nylon en 1937, sin embargo, después de ello continuó estudiando los secretos de la materia. Más allá de las aplicaciones de esta fibra estaba su determinación de develar nuevo conocimiento sobre cómo estaban hechas las cosas naturales. Fueron los ingenieros de la Du Pont los que encontraron los múltiples usos que el nylon llegó a tener.

De otro lado, el técnico tiene, hasta cierto punto, tanto la habilidad y destreza del artesano como el conocimiento fundamental del ingeniero y el científico. Le gusta estar cerca del trabajo, y es capaz de cierta cantidad de diseño original, estimación de costos, dibujo, ensayo, y otros trabajos de oficina y laboratorio. Generalmente traduce el lenguaje del ingeniero a un lenguaje que pueda ser entendido por artesanos y obreros. También traslada las ideas de éstos a aquel y él mismo da consejos y sugerencias. Se reúne con ingenieros y científicos para ayudar al equipo en la solución de problemas técnicos.

Dado que la ingeniería tiene una gran componente empírica, es fundamental que el ingeniero aprecie las contribuciones de los técnicos y aproveche su experiencia y la de los artesanos y obreros. Un gran respeto –aunque no ciego– por el conocimiento empírico es indispensable para el ingeniero que quiera llegar a detentar con merecimientos tan honroso título.

## 4.19 La interdisciplinariedad

El ingeniero no solamente tiene obligaciones con su equipo, con sus colegas, sus clientes o su empleador, sino con la sociedad en relación con su progreso técnico. En el siglo XXI habrá necesidad conocimientos tecnológicos relevantes; los ingenieros deberán plantearse muchos interrogantes. ¿Puede la tecnología ser contro-

lada y puesta al servicio de las necesidades y objetivos de la humanidad, en vez de convertirse en un fin en sí misma y de crear sus propias necesidades y exigencias? ¿Existe una manera de satisfacer las necesidades de la privacidad y espacio personal de la gente, pese a los altos niveles de comunicación y al gran número de personas que comparten el mismo planeta, físicamente limitado? ¿Puede este planeta soportar 8 millardos de personas o más, sin que su ecología se vea irreversiblemente dañada?.

Y, lo que es más crucial aún, ¿puede la gente compartir el planeta con tolerancia y respeto mutuo? La sociedad del futuro está destinada a ser diversa y pluralista. Podría también ser descentralizada y democrática. Esto significa un sistema con autonomía local y, al mismo tiempo, coordinación global, es decir, no basados en la cultura y racionalidad occidental. Implican a las ciencias naturales y a las sociales. Sociólogos, políticos, ecólogos, urbanistas, psicólogos, demógrafos, economistas, químicos, médicos, ingenieros. Ningún grupo actual puede encarar ese reto. Todo esto hace evidente que el ingeniero está obligado consigo mismo y con la sociedad a progresar continuamente como hombre y como ingeniero y que las bases de esa actitud se pueden y deben inculcar en la universidad. A primera vista, aquel piensa que la revolución científica y tecnológica es un fenómeno puramente técnico y que surge únicamente a partir de descubrimientos de las ciencias naturales, técnicas y matemáticas. Por el contrario, es un proceso universal en su forma y en su contenido, muy grande en cualquier momento dado, pero perceptible de una forma cada vez creciente desde el punto de vista cognoscitivo. No solamente está relacionado con la producción material sino que además se manifiesta en todos los demás sectores sociales: no es simplemente una cuestión de ciencia y tecnología sino al mismo tiempo una lucha, una política y una diplomacia, y tiene otros aspectos ideológicos, morales, pedagógicos, psicológicos, biológicos y de otra índole. Este conjunto abarca también el problema de las relaciones entre la revolución científica y tecnológica y las ciencias sociales, y la correlación entre ellas.

La interdisciplinariedad es fundamental en el quehacer del ingeniero y se entiende que las teorías integrales de la naturaleza y la sociedad construyen un conocimiento socialmente útil, al mismo que construyen buena ciencia. Un enfoque para llevar la interdisciplinariedad mucho más allá es la complejidad.

## 4.20 La complejidad

La complejidad es un nuevo enfoque para tratar los problemas que el ingeniero debe solucionar, antes de entrar a resumirlo es necesario hacer una introducción a lo que es la teoría del caos.

La teoría del caos se encuentra entre las ciencias más jóvenes y se supone que su área de estudio es el desorden, aunque en realidad el caos es la esencia misma del orden [33]. Hay dos enfoques para esto. En el primero se considera el caos como precursor y socio del orden y no como su opuesto. Aquí se concentra la atención en el surgimiento de espontáneo de autoorganizaciones que emergen del caos, o, en términos físicos, en estructuras disipativas que surgen en sistemas fuera de equilibrio, cuando la producción de entropía es alta. La comprensión de que los sistemas ricos en entropía facilitan en vez de impedir la autoorganización fue coyuntura decisiva para la revaluación contemporánea del caos. Figura central de esto es Prigogine [34, 35].

El segundo enfoque destaca el orden oculto que existe dentro de los sistemas caóticos. En este sentido caos difiere de aleatoridad, porque se puede demostrar que contiene estructuras profundamente codificadas, llamadas “atractores extraños”. El descubrimiento de que el caos posee dentro de sí profundas estructuras de orden es tanto más notable debido a la amplia gama de sistemas que demuestran este comportamiento.

Los dos anteriores enfoques difieren en que el orden a partir del caos tiene más filosofía que resultados, mientras que el de los atractores extraños tiene más resultados que filosofía. Pero en este último se destaca la capacidad de los sistemas caóticos para generar nueva información.

Si bien, en general, la teoría del caos establece que cambios diminutos pueden causar fluctuaciones gigantescas, uno de los conceptos más importantes de esta teoría es que aunque resulte imposible predecir el estado futuro de un sistema, es casi trivial modelar su conducta global. Mediante la iteración y la recursión se toma el resultado de una ecuación y se retroalimenta una y otra vez mientras se observa su desarrollo, esto permite descubrir conductas fascinantes. Al unirse los matemáticos con estos investigadores, contando con computadores poderosos, dieron origen a una nueva ciencia, la que a su vez cambió la manera en que ésta se hace. Se entiende que apenas ahora se pueda explorar el caos: sin computador, de hecho, no existiría manera de explorar el caos.

En las ecuaciones más deterministas (ecuaciones diferenciales lineales) había lugar para que existieran fenómenos tales como la turbulencia, la irregularidad y la imprevisibilidad, pero se suponía que esto no era más que un ruido que se producía como un efecto secundario a la manera como el mundo está estructurado. Se pensaba que este caos era el resultado de una complejidad que, al menos en teoría, se podía simplificar hasta llegar a descubrir un orden subyacente. Hoy se reconoce que ese supuesto es erróneo: el avance científico y tecnológico de los últimos años ha permitido observar que la mayoría de los sistemas biológicos y gran parte de los sistemas físicos son evidentemente discontinuos, no homogéneos e irregulares [36].

Lo más curioso de estos sistemas es que parecen encontrarse justo en medio del caos y el orden por lo que, tanto su estructura como su conducta, resultan ser tan complicadas y variables que se cruzan de una a otra frontera imprevisiblemente.

La perspectiva más ampliamente aceptada en la actualidad es que el caos y el orden no son más que diferentes facetas de una misma realidad, pero lo que ya no resulta tan intuitivo es que el mismo universo no sea un ámbito de orden en donde el caos se encuentre oculto sino todo lo contrario: un sitio caótico donde hay contadas zonas aisladas de orden que son extremadamente pequeñas y raras. Esta perspectiva ha permitido demostrar que las leyes del caos pueden explicar muchos, si no es todos, de los fenómenos que llaman la atención tanto por su regularidad como por su irregularidad, mejor que las leyes del orden. Ello ha obligado a que los especialistas en muchas áreas deban adoptar un visión holística o globalizadora de lo que es la ciencia y así, por ejemplo, los matemáticos estudian biología para desarrollar modelos de vida, los físicos estudian neurofisiología para descubrir los mecanismos de la memoria y los neurofisiólogos estudian matemáticas para crear una teoría que explique la cognición.

Formalmente la teoría del caos se define como el estudio de los sistemas dinámicos no lineales y complejos. Un sistema complejo es el que está compuesto por muchas partes y, de hecho, el campo de las matemáticas que se conoce como teoría de la

complejidad, está integrado por una gran cantidad de temas complementarios que se traslapan entre sí; se podría decir que es un sistema con muchos grados de libertad no equivalentes entre sí y, a diferencia del caos que es el estudio de cómo los sistemas simples pueden generar conductas complicadas, la complejidad es el estudio de cómo los sistemas complejos pueden generar conductas sencillas, lo que quedaría ejemplificado por la sincronización de los sistemas biológicos desde las luciérnagas hasta las neuronas [37].

Se hace breve introducción a la teoría del caos por la irrupción de una serie de resultados, teorías y planteamientos que abren nuevas posibilidades y maneras de entender la realidad –la inorgánica al igual que la orgánica–, y que afectarán sin duda a la ingeniería del futuro.

Ha comenzado una revolución paradigmática. Una revolución orientada, evidentemente, hacia la complejidad. Se puede plantear el problema en tres planos: ciencias físicas, ciencias del hombre (o del conocimiento del hombre) y el de la política. Tal parece que la ingeniería del siglo XXI será la de los sistemas complejos pues la emergencia es la característica de la complejidad. De acuerdo con muchos analistas estamos a punto de salir de un universo de determinismos simples, mecanicistas, para entrar en un mundo de complejidad en el que la incertidumbre, la estrategia, la innovación y la cultura, aparecen fuertemente vinculadas. Pero su imbricación sigue siendo altamente enigmática [38].

Se han propuesto varias definiciones de complejidad, pero la mayoría de ellas incluye conceptos como entropía, aleatoriedad e información y todas tienen limitaciones. El descubrimiento de que el procesamiento universal de información está en equilibrio entre el orden y el caos en los sistemas dinámicos es importante en sus analogías con las transiciones de fase del mundo físico. Sería muy interesante que los sistemas complejos adaptativos estuvieran inevitablemente situados en el límite del caos.

Se entiende que el caos es un subconjunto de la complejidad. Es un análisis del comportamiento de sistemas dinámicos continuos o discretos que muestran características recurrentes y una alta sensibilidad a las condiciones iniciales, de manera que cambios mínimos en dichas condiciones iniciales pueden hacer que el sistema se comporte de una manera distinta. Un cambio infinitesimal en las condiciones iniciales conduce a diferentes caminos en la evolución del sistema, como es el caso del famoso efecto mariposa. Estos caminos se denominan trayectorias y pueden ser divergentes o convergentes.

Hay sistemas complejos que parecen haber evolucionado aprendiendo a equilibrar convergencia y divergencia, de manera que se instalan entre el caos y el orden.

En este punto es adecuado indicar que un sistema conservativo es aquel que puede describirse con una ecuación diferencial lineal y es determinístico y previsible como el péndulo, un oscilador armónico o la propagación de luz en el vacío. De otro lado un sistema disipativo se describe con una ecuación no lineal como es el caso de los sistemas mecánicos donde hay rozamiento. Sin embargo, como se explicará más adelante, el término “disipativo” tiene una connotación especial.

Así pues la complejidad se ha relacionado con la capacidad de poder pasar de un comportamiento a otro cuando cambian las condiciones del entorno. La flexibilidad y adaptabilidad consecuencia de dicha capacidad conducen a su vez al concepto de elección entre diversas posibilidades que se ofrecen. Esto se lleva a cabo a

través de la dinámica de fluctuaciones y exige la participación de sus dos manifestaciones antagónicas: la aleatoriedad de corto alcance, como elemento innovador, para que pueda explorar el espacio de estados; y el orden de gran alcance, para que el sistema pueda mantener un régimen colectivo en áreas macroscópicas del espacio y a lo largo de intervalos temporales macroscópicos.

Suposición necesaria para todos estos fenómenos es una dinámica no lineal que, cuando hay las limitaciones adecuadas, conduce a inestabilidad del movimiento y bifurcaciones, es decir a cambios de comportamiento. Y esto ocurre en varios campos de la ingeniería.

Vistas así las ciencias de la complejidad constituyen un terreno de reflexión interdisciplinaria, un esfuerzo por comprender cómo ciertos patrones de comportamiento complejos pueden ser el fruto de los efectos colectivos de las interacciones entre múltiples elementos individualmente simples. De esto se han desarrollado dos consecuencias cruciales.

En primer lugar el reconocimiento de que el enfoque reduccionista tradicional de la ciencia, donde el comportamiento global de un sistema complejo se intenta explicar consecuencia inmediata de la forma como se relaciona con sus componentes, resulta inadecuado para estudiar sistemas complejos. Esto ocurre debido a que los comportamientos observados aparecen con una riqueza, complejidad y estructura, mucho mayores de lo que las reglas de interacción de los componentes individuales sugieren a una primera mirada.

En segundo lugar, la convicción de que existen muchos sistemas complejos cuyos comportamientos globales comparten características entre sí a pesar de las diferencias que puede haber entre sus componentes individuales, es decir, que tiene sentido hablar de las reglas de la complejidad.

La finalidad de estas propuestas teóricas sería intentar dilucidar dichas reglas, con el ánimo de realizar afirmaciones de carácter explicativo y aun predictivo acerca de muchos sistemas complejos encontrados en la naturaleza.

Hay que valorar las contribuciones igualmente fundamentales de aquellos que se atreven a dar lo que se llama “vistazo a la totalidad”. Esto porque es común que las personas tengan cierto estilo de pensamiento. Nietzsche introdujo la distinción entre “apolíneos”, aquellos que dan preferencia a la lógica, la aproximación analítica y el peso desapasionado de la evidencia, como somos los ingenieros, y “dionisiacos”, aquellos más inclinados a la intuición, la síntesis y la pasión. Estos rasgos se suelen correlacionar de forma burda con el uso preferente de los hemisferios cerebrales izquierdo y derecho, respectivamente. Los ingenieros actuales deberían pertenecer a otra categoría: los “odiseicos”, que combinan las dos predilecciones en su búsqueda de conexiones con ideas. Estos ingenieros ideales estarían especialmente equipados para utilizar las herramientas de la complejidad en su trabajo [39].

## 4.21 La ingeniería concurrente

Todas las consideraciones anteriores permiten comprender la importancia de la ingeniería concurrente, que es una metodología integrada en la cual los procesos de diseño, de fabricación y de servicio se mezclan desde el primer momento y se desarrollan en forma paralela durante todo el ciclo de vida del producto [40]. En sentido amplio, bajo la denominación de ingeniería concurrente se comprende el

conjunto de herramientas, metodologías y cambios organizacionales necesarios para realizar un desarrollo integrado de productos y servicios. La ingeniería concurrente está constituida por tres elementos clave: la colaboración, la tecnología de la información y el proceso.

En este contexto colaboración significa trabajar en equipo. Sin embargo, colaboración y equipos de trabajo son cosas distintas. Los equipos de trabajo industriales pueden operar sin colaboración deliberada entre sus miembros. Pueden ser simplemente una colección de individuos con una causa común. Cada persona, con el fin de tener éxito, sigue su propia agenda y sus criterios de medida de acuerdo como los establece su función individual. Este comportamiento no colaborativo ha llevado a muchas fallas y no es problema trivial en las empresas.

Cuando se usa apropiadamente, la colaboración efectiva ocurre más allá del equipo e incluye todas las funciones u organizaciones dentro de la empresa, así como los proveedores, clientes, consultores, revendedores, distribuidores y, en algunos casos, colaboración con otras compañías para el desarrollo de un producto o una tecnología. Tal es el caso cuando se contrata una firma de diseño industrial, su experticia en entender el atractivo, los factores humanos y la funcionalidad en el ambiente de los usuarios, lleva a que se logren diseños exitosos y al éxito de los productos mejorados en el mercado.

Así pues, al establecer un ambiente de ingeniería concurrente es clave la infraestructura que conduzca el cambio de comportamiento hacia la colaboración. La infraestructura, como los sistemas de estímulos, establecimiento de metas, reconocimientos, medidas funcionales, etc. son de la mayor importancia en el soporte del ambiente colaborativo. Los individuos y su voluntad para colaborar tanto en la compañía como fuera de ella, son el principal factor que determina el éxito del proceso de la ingeniería concurrente.

La tecnología de la información en el proceso de diseño normalmente se refiere al CAD y la CAE (computer aided engineering), pero en realidad la tecnología de la información incluye las simulaciones, la posibilidad de compartir datos e imágenes, las redes de computadores, las bases de datos, las conexiones a otras entidades, las estaciones de trabajo, etc. Así pues, la tecnología de la información proporciona las bases que posibilitan el proceso de la ingeniería concurrente.

El proceso incluye tanto el nivel más amplio del ciclo de desarrollo total, como el nivel detallado de procesos específicos y metodologías específicas de diseño. Además, identifica los pasos detallados detrás de la naturaleza concurrente del desarrollo del producto y el proceso [41].

Para el buen funcionamiento del equipo de trabajo se deben desarrollar valores como la cooperación, la confianza y el compartir e intercambiar conocimientos e información, pues el principio básico de la ingeniería concurrente es el trabajo en equipo multidisciplinario. Este equipo incluye personal de diferentes áreas relacionadas con el desarrollo de productos y servicios: diseño, manufactura, mercadeo, finanzas y otros, en general todas las actividades que integren el proceso de un producto, desde su concepción intelectual hasta su desecho, figura 4.2.

En la ingeniería convergente se forman grupos de desarrollo que tienen la habilidad de resolver problemas con mucha mayor eficacia que expertos individuales. El trabajo en equipo multidisciplinario (que debería llegar a ser interdisciplinario) permite



producir más innovaciones y el logro de nuevas ideas de una manera más fácil y rápida que con otros esquemas de diseño.

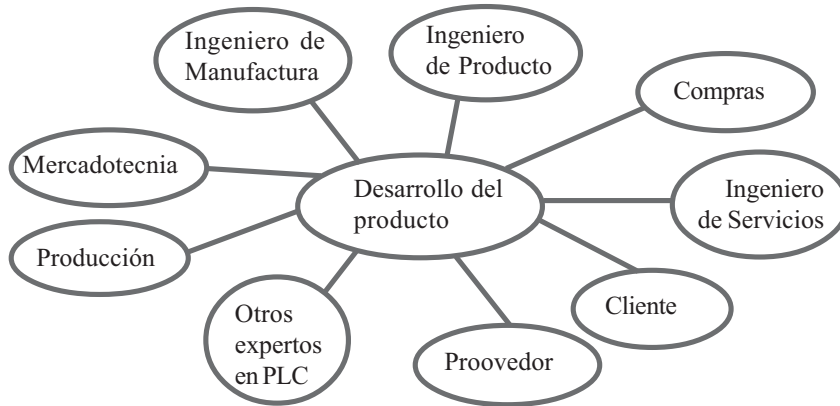


Figura 4.2. El equipo de trabajo en la ingeniería concurrente [42].

En resumen, la ingeniería concurrente es una metodología sistemática para el desarrollo integrado de productos, que hace énfasis en dar respuesta a las expectativas de los usuarios y se fundamenta en los valores de trabajo en equipo de cooperación, confianza mutua y participación, de tal manera que el proceso de toma de decisiones procede con grandes intervalos de trabajo en paralelo por parte de todas las perspectivas consideradas en el ciclo de vida, sincronizado por medio de breves intercambios con el fin de alcanzar el consenso [43].

Lo anterior implica que la implantación de la ingeniería concurrente implica dos elementos básicos: una transformación de la empresa, un cambio de su cultura interior, una disposición de la empresa misma a aceptar los principios y prácticas enmarcados bajo este concepto y el desarrollo de una infraestructura de comunicaciones que pueda servir de soporte a los procesos de colaboración y coordinación.

## 4.22 Conclusión

Se ha esbozado muy sucintamente la manera como trabaja la ingeniería, cómo es el método ingenieril y cómo el diseño es la actividad central de la ingeniería. A pesar de las diversas ramas especializadas que tiene esta profesión, sin duda su método, común a todas, es lo que las identifica y hace que la ingeniería sea una sola, a pesar de sus múltiples manifestaciones.

# Referencias

1. “Engineering”, Encyclopaedia Britannica, Multimedia Edition, 1998.
2. Dieter, George Ellwood, Engineering design: a materials and processing approach, McGraw-Hill, New York, 1991.
3. Koen, Billy Vughn, El método de ingeniería, U. del Valle – ACOFI, Bogotá, 2000.
4. Wright, Paul H., Introducción a la ingeniería, Addison Wesley, Wilmington, Del., 1994.
5. Krick, E.V., Introducción a la ingeniería y al diseño en la ingeniería, Limusa, México, 1997.
6. Munich, L. y Ernesto Ángeles, Métodos y Técnicas de investigación para administración e ingeniería, Trillas, México, 1988.
7. Grech, Pablo, Introducción a la Ingeniería. Pearson Educación, Bogotá, 2001.
8. Baeza-Yates, Ricardo et al., Modern Information Retrieval, ACM Press, New York, 1999.
9. Schenk, Margaret T. and James K. Webster, What Every Engineer Should Know About Engineering Information Resources, Marcel Dekker, New York, 1984.
10. Suthersan, Sutahn S., Remediation Engineering Design Concepts, CRC Press, New York, 1999.
11. Ulrich, Karl T. and Steven D. Eppinger, Product Design and Development, McGraw-Hill, New York, 1999.
12. Norman, Donald, The Design of Everyday Things, MIT Press, Boston, 2001.
13. Sheldon, Cheney, Art and the Machine. An account of industrial design in 20th - century America, Books on Design, Philadelphia, 1992.
14. Erden, Abdülkadir, Engineering Design, Lecture Notes, METU Publications, Ankara, 1998.
15. Dixon, John R., Diseño en ingeniería: inventiva, análisis y toma de decisiones Limusa-Wiley, México, 1970.
16. Middendorf, William, What Every Engineer Should Know About Inventing, Marcel Dekker, New York, 1996.
17. Krick, Edwrd V., Fundamentos de ingeniería. Métodos, conceptos y resultados, Limusa, México, 1999.
18. Holtz, W. Bradley, CAD Rating Guide: A Tool for the Evaluation of Computer-Aided Design Systems, PennWell Corp, Pittsburgh, 1997.
19. Echeverría, J., Un mundo virtual, Plaza y Janés, Barcelona, 2000.
20. Ossa M., B. E. et al, La realidad virtual al servicio de la educación, Proyecto de grado, Ingeniería de Sistemas, U. de A., Medellín, 1996.
21. Valencia, Asdrúbal, “¿Nos incluirá el futuro?”, Memorias XXII Reunión de ACOFI, Cartagena, 2002.
22. Dickson, David, Tecnología Alternativa, Ediciones Orbis, Barcelona, 1985.
23. Reklaitis, G. V., A. Ravindran and K. M. Ragsdell, Engineering Optimization: Methods and Applications, John Wiley, London, 1983.

24. Rao, Singiresu S., *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley, New York, 1996.
25. Onwubiko, Chinyere, *Introduction to Engineering Design Optimization*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 2000.
26. Belegundu, Ashok D. and T.R. Chandrupatla, *Optimization Concepts and Applications In Engineering*, Prentice Hall, N. J., Englewood Cliffs, 1999.
27. <http://global.ihs.com/>
28. Jansen, Detlev E., "Intercultural Communications in Engineering", *World Transactions on Engineering and Technology Education*, Vol. 1, No. 1, 2002.
29. Stevenson, Susan et al. *Strategies for Engineering Communication*, John Wiley, New York, 2002.
30. Goetsch, David L. and Stanley Davis, *Quality Management: Introduction to Total Quality Management for Production, Processing, and Services*, Prentice Hall, Upper Sadle Rivr, N. J, 2002.
31. Valencia, Asdrúbal, *Comportamiento Mecánico de los Materiales. Notas de Clase*, Universidad de Antioquia, Medellín, 2000.
32. Spalding, Albert, "The engineer, a professional", *Student's engineering manual*, George A. Hawkins (ed.), McGraw-Hill, New York, 1968, p. 539.
33. Mainzer, K, *Thinking in Complexity: The Complex Dynamics of Matter, Mind and Mankind*, Springer-Verlag, Munich, 1994.
34. Prigogine, Ilya. "La lectura de lo complejo", *¿Tan solo una ilusión?*, Tusquets, Barcelona, 1993, p. 45.
35. Prigogine, Ilya. "La evolución de la complejidad y las leyes de la naturaleza", *¿Tan solo una ilusión?*, Tusquets, Barcelona, 1993, p. 221.
36. Hayles, N. Katherine, *La evolución del caos*, Gedisa, Barcelona, 1993.
37. Monroy Olivares, César, *Teoría del caos*, Alfaomega, México, 1997.
38. Jones, Mervyn E., "Retos en paradigmas cambiantes para la educación en ingeniería", *Conferencia Mundial sobre educación en ingeniería y líderes de la industria*, París, 1996, ACOFI, Bogotá, 1997, p. 89.
39. Valencia, Asdrúbal, "Sobre la complejidad", *Revista Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*, No 18, Sept. 1999, p. 144.
40. Lleras R., Juan A., "Ingeniería concurrente: hacia un proceso de enseñanza -aprendizaje", *Revista Escuela de Administración de Negocios*, No. 41, Sept. 2000. p. 19.
41. Salomone, Tomas A., *What every engineer should know about concurrent engineering*, Marcel Dekker, New York, 1995.
42. Kalleward, V. y A. Al-Saab, "Introducción e implementación de la ingeniería concurrente", *Scientia et Técnica*, No 13, Julio, 2000, p. 103.
43. Londoño, Félix, "Ingeniería concurrente: hacia un desarrollo integrado de productos y servicios", *Revista Universidad Eafit*, No 96, Octubre, 1994, p. 7.