

# Una teoría general de análisis en el diseño de elementos de máquinas

---

La presentación tradicional dada al diseño de máquinas orienta en la mayoría de los casos al profesor y al estudiante hacia el estudio particular de los diferentes elementos que componen un sistema. Esta forma de trabajo es, sin lugar a dudas, un paso importante para la obtención de información de un proyecto. Pero el proceso de análisis no se puede quedar a nivel de elementos sueltos, sino que es necesario llevarlo a que se integre al nivel de conjunto de elementos que forman una máquina.

Este enfoque del problema brinda la oportunidad de desarrollar un análisis completo de comienzo a fin del sistema, retomando a su debido tiempo al elemento. En esta forma se desarrolla una amplia visión de análisis para el diseño de máquinas.

La apertura de esta forma de trabajo tiene sus fundamentos en la influencia de la transmisión de carga y/o movimiento sobre el diseño de la máquina.

---

**GUILLERMO GARCIA P.**  
Ingeniero Mecánico  
Profesor Asociado - Universidad Nacional  
Estudios de postgrado en diseño de productos  
Instituto Tecnológico de Illinois

Al diseñar una máquina se deben satisfacer especificaciones que establecen las condiciones técnicas del sistema. Estas especificaciones se refieren al peso, longevidad, velocidad, funcionamiento, tamaño, material y costo. En ciertos casos se formulan otras especificaciones, tales como trabajo silencioso, facilidad de transporte, facilidad de mantenimiento, etc.

Las decisiones que se toman durante el proceso de diseño se basan en el análisis de todos los factores involucrados en el proyecto. Sin embargo, algunos factores son decisivos para el correcto funcionamiento de la máquina y se deben tomar como criterios principales.

De acuerdo a lo anterior, un criterio importante a tener en cuenta es la comprobación de la capacidad de carga de los elementos encargados de transmitir fuerza. La forma geométrica de la pieza, sus dimensiones y el material, deben satisfacer ciertos requisitos de resistencia, rigidez y característica dinámica apropiada. Estos factores determinarán la capacidad de carga del elemento.

La técnica de la construcción de maquinaria se desarrolla más rápidamente cuando conocimientos científicos tienen mayor aplicación en las decisiones del proceso de diseño.

Las primeras generaciones de máquinas se caracterizaban por la robustez de sus secciones, por sus bajos rendimientos y por la baja velocidad de trabajo. Este último factor hizo que las condiciones de carga dentro del sistema se consideraran solamente del tipo estático, con lo cual, los cálculos se apoyaban únicamente en la resistencia clásica de los materiales. Sin embargo, con el aumento de la velocidad de trabajo surgió el problema de controlar las fuerzas dinámicas y fuerzas variables que se presentaban en los diferentes elementos de máquinas. Ante esta nueva situación los esquemas de análisis y de cálculo cambiaron sustancialmente hasta llegar al caso de considerar como secundarias las cargas estáticas en muchas aplicaciones.

Un fenómeno interesante de observar es ver cómo en el diseño de una máquina se pueden presentar diferentes niveles de tecnología y cómo la evolución general de las técnicas, hace que cada nivel se beneficie con cierto desfase cronológico de los descubrimientos tecnológicos procedentes del nivel inmediatamente superior. Para que esto suceda el diseñador deberá estar actualizándose a todo instante. De otro lado, se debe cumplir la condición de que el estado de desarrollo de dichas técnicas sea tal que satisfaga los criterios que la industria pertinente tiene en cuanto a ritmo de producción y costo de fabricación.

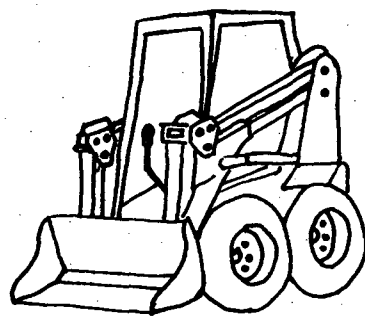
De todos modos la tendencia en el diseño de máquinas es a aumentar las prestaciones de servicio, ahorrar espacio, reducir peso, aumentar la seguridad y complejidad de la máquina, aumentando también los requisitos de fiabilidad y compacidad de los elementos.

El presente artículo está dirigido a analizar un poco más de cerca la influencia del sistema de transmisión de carga en el diseño de una máquina y a determinar y analizar los diferentes tipos de carga que actúan sobre la máquina. Además, es un complemento al artículo **Un proceso general de diseño en Ingeniería Mecánica**, publicado en la revista No. 10 de Ingeniería e Investigación — Universidad Nacional.

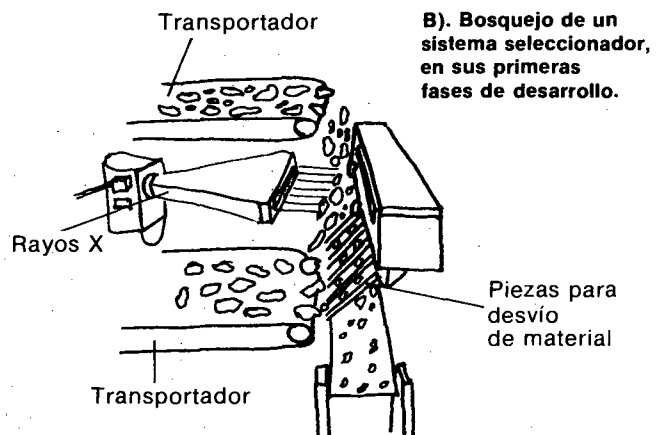
El propósito de estos dos artículos, es presentar aspectos teóricos en forma tal que ayuden al avance de la metodología en el diseño de máquinas en nuestro medio.

**CONSIDERACIONES BASICAS PARA EL ANALISIS**

La resolución de problemas de diseño parten de



**A). Bosquejo de un cargador, en sus primeras fases de desarrollo.**

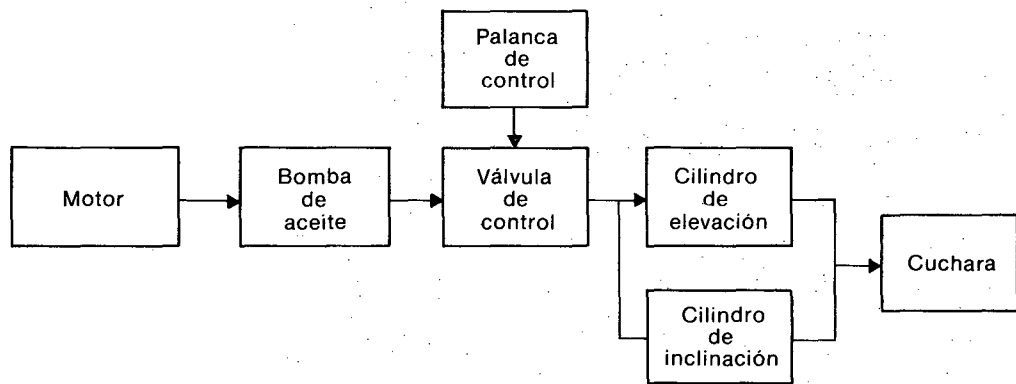


**B). Bosquejo de un sistema seleccionador, en sus primeras fases de desarrollo.**

**FIGURA 1. Ideas preliminares para el diseño de sistemas.**

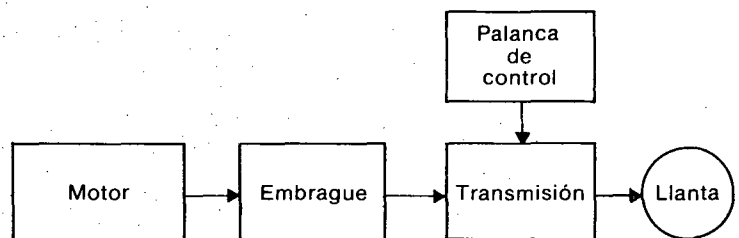
la definición de un problema y su desarrollo se apoya en la formulación y solución de una gran cantidad de preguntas.

Un método de análisis se apoya en la experiencia. Esta forma de trabajo tiene la ventaja de que el diseño previo ha trabajado satisfactoriamente y ofrece un punto seguro de partida para el nuevo



**A) Sub-sistema de manipulación de carga.**

**B) Sub-sistema de transmisión de potencia.**



**FIGURA 2. Diagramas de bloque para analizar posibles relaciones entre partes de sub-sistemas.**

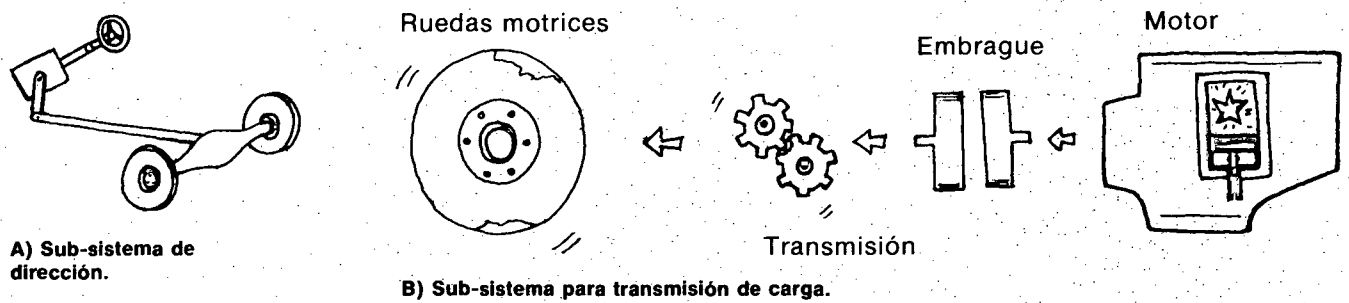


FIGURA 3. La utilización de bosquejos para relacionar diferentes elementos de sub-sistemas.

diseño. Tiene la desventaja de que bloquea cualquier pensamiento creativo.

Un segundo método está basado únicamente en cargas, permitiendo al diseñador usar su habilidad creativa completamente. Además, los métodos matemáticos utilizados para determinar fuerzas y sus efectos permiten determinar secciones más eficientes.

Según lo anterior, lo primero que hay que hacer es definir el trabajo que la máquina debe realizar. Una vez definido dicho trabajo se inicia la fase de análisis, la cual, en sus comienzos se puede

apoyar en ideas preliminares acerca del sistema y en la utilización de diagramas de bloque para explorar posibles relaciones entre las partes que en el momento se consideran más importantes para el diseño de la máquina; ver figuras 1 y 2.

Otra práctica común en esta parte del proceso es la utilización de bosquejos a mano alzada y la toma de notas; ver figura 3. Dependiendo del tipo de máquina que se está diseñando, se tiene que a una mayor complejidad del sistema, mayor será el número de bosquejos a utilizar.

Una forma creativa de trabajo para trazar dichos

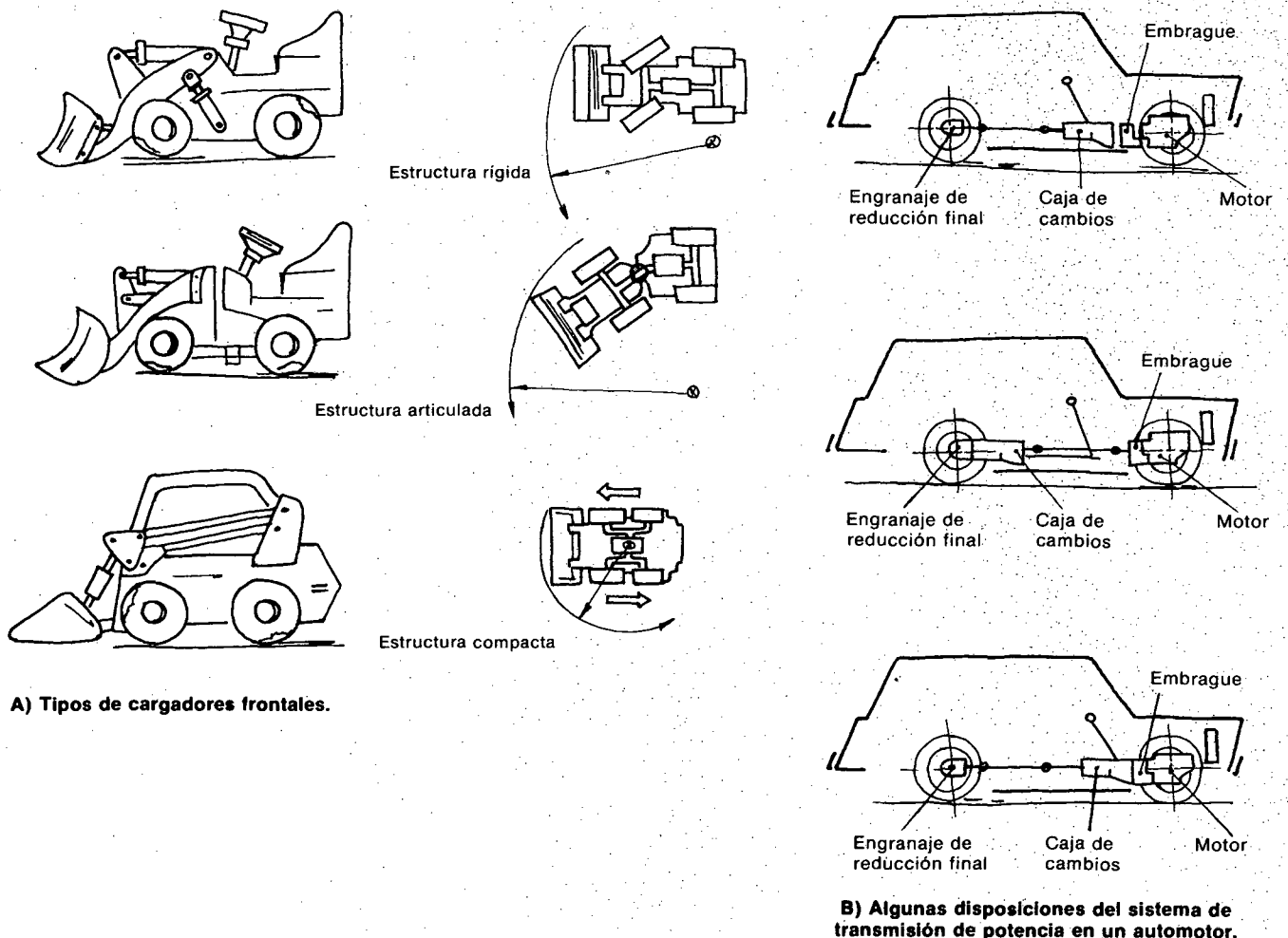


FIGURA 4. Alternativas de diseño para diferentes sistemas de acuerdo a las necesidades del momento.

**TABLA I**  
**Alternativas para la transmisión de potencia de un automóvil**

	Funciones de la transmisión			
	Transmitir el par motor desde el cigüeñal a las ruedas.	Desconectar las ruedas motrices del motor	Relación de velocidad diferente entre el motor y las ruedas	Repartir la potencia entre las ruedas de acuerdo a la locomoción exigida
Medios para obtener la función	Juntas universales	Embrague (por acomplamiento)	Sistema de engranajes (Transmisión mecánica)	Ruedas cónicas
	Transmisión entubada	Junta hidráulica (Variación oleo-dinámica)	Junta hidráulica y engranajes (Transmisión mixta)	Ruedas frontales
	—	Convertidor de par (Variación oleodinámica)	Convertidor de par y engranajes (Transmisión mixta)	—

bosquejos es comenzar con las ideas propias y después observar el diseño de máquinas que se encuentran en el mercado.

Tan pronto se tenga suficiente información a través de bosquejos y notas, se procede a describir las funciones de los principales componentes del sistema, se crean tablas de alternativas para los subsistemas y se trazan diagramas de secuencia de operaciones. Esta forma de trabajo permite establecer si todas las funciones de la máquina están dadas y correlacionadas. A partir de este análisis se sintetizan varias soluciones\*. Las alternativas encontradas muestran aquellas partes del sistema de mayor importancia para el momento; ver figura 4.

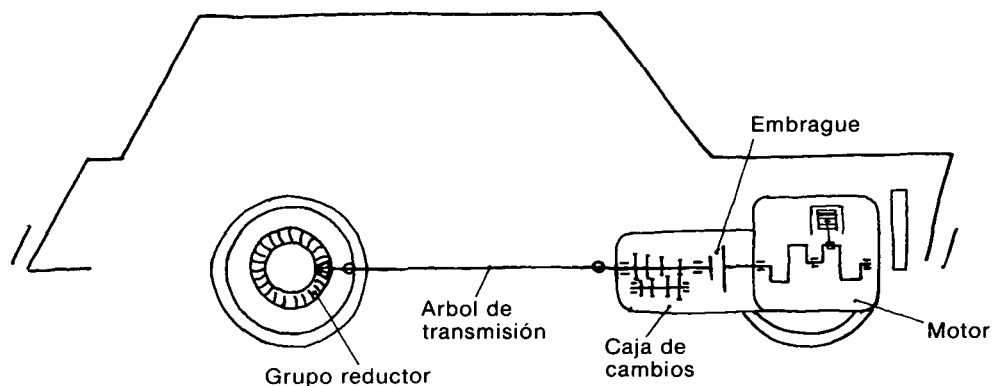
Una descripción de funciones para el caso de la transmisión de potencia de un automóvil podría ser como sigue: 1- Transmitir el par motor desde el cigüeñal a las ruedas del automóvil. 2- Desconectar mecánicamente las ruedas motrices del motor. 3- Conseguir una relación de velocidad diferente entre el motor y las ruedas. 4-

Repartir la potencia entre las ruedas en relación con las exigencias específicas de locomoción. Apoyados en esta descripción se puede elaborar la tabla de alternativas para el sub-sistema; ver tabla 1.

Basados en lo anterior y por ejemplo mediante velocidades obtenidas a partir de investigaciones de mercados se procede una vez más a sintetizar en forma estructural varias alternativas del sistema o subsistemas que conforman la máquina. Esta nueva síntesis está caracterizada por un mayor conocimiento de los componentes de la máquina.

Puesto que, en cualquier máquina uno de los subsistemas de mayor importancia es el correspondiente a la transmisión de potencia y/o movimiento. Una forma de trabajo para la elaboración de los primeros diagramas de dicho subsistema es mostrar en forma esquemática las partes más importantes de la unidad motriz, tales como motor, embrague, transmisión por engranajes, transmisión por cadenas, transmisión por correas acoples, ejes, mecanismos de trinquete, varillas de empuje, etc. Ver figuras 5 y 6. También se investiga la posibilidad de complementar parte de la transmisión mecánica con componentes

\* Ver Un proceso general de diseño en Ingeniería Mecánica. Revista Ingeniería e Investigación N° 10 - Universidad Nacional.



**FIGURA 5.** Diagrama de transmisión de potencia para un automotor.

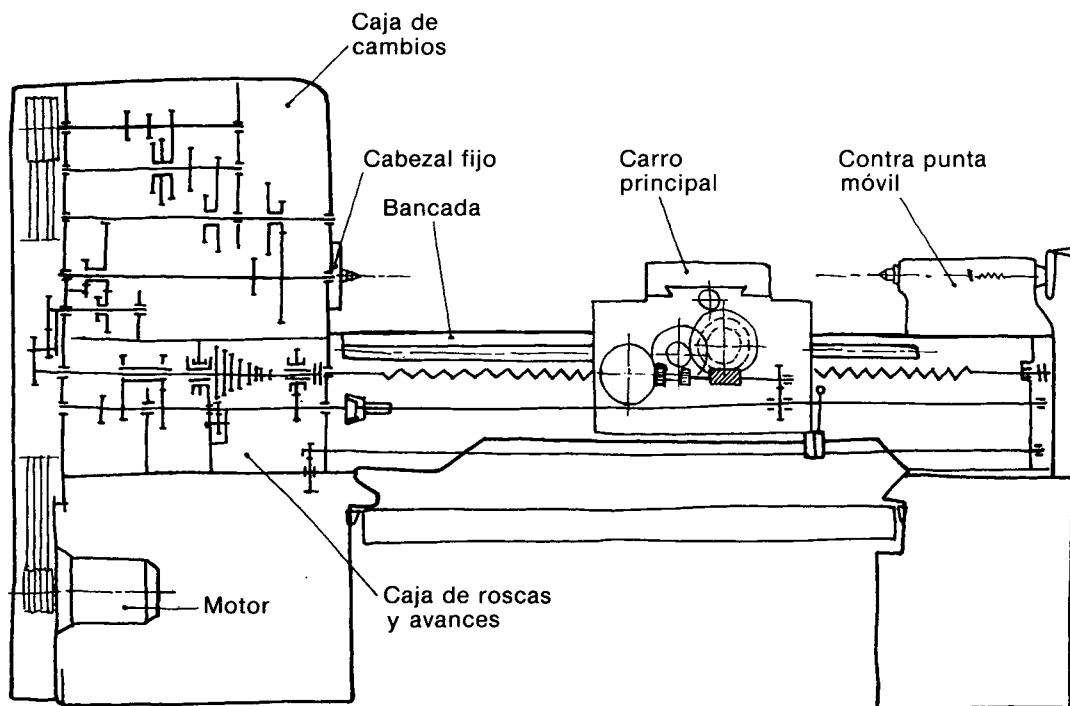


FIGURA 6. Diagrama de transmisión de potencia para un torno.

hidráulicos, neumáticos y eléctricos.

Ahora, se pueden dibujar los diagramas de flujo de fuerza y/o movimiento los cuales se trazan pieza a pieza de comienzo a fin de la transmisión; ver figura 7. A partir de estos diagramas se pueden identificar y evaluar las funciones y cargas principales provenientes del sistema de transmisión de potencia. El procedimiento anterior es aplicable a cualquier otro sub-sistema o al sistema total de la máquina.

Una forma práctica para elaborar dichos diagramas de flujo es mediante la utilización de diferentes colores. A cada carga ya sea principal o secundaria, así como a cada movimiento, se le asigna un color.

Con esta información se procede a realizar la distribución de fuerzas que en un momento dado se suman con los pesos muertos de los elementos. Posteriormente se determina qué condiciones de servicio pueden causar sobrecargas, cargas de impacto, fatiga o vibración.

La determinación correcta de la carga que actúa sobre un elemento es de vital importancia. Se debe considerar no solamente la condición en el momento inicial de la construcción sino los efectos posibles del uso. Un seguidor de leva, en el cuerpo de la leva produce una carga variable después de un tiempo relativamente corto de servicio, el desgaste en el camino de la leva origina a menudo una fuerte carga de impacto adicional. Frecuentemente se presentan condiciones de carga variable o carga de impacto donde solamente se había considerado carga estática.

Los constructores de maquinaria han ideado formas de trabajo para buscar puntos de partida en la determinación de cargas sobre el sistema y

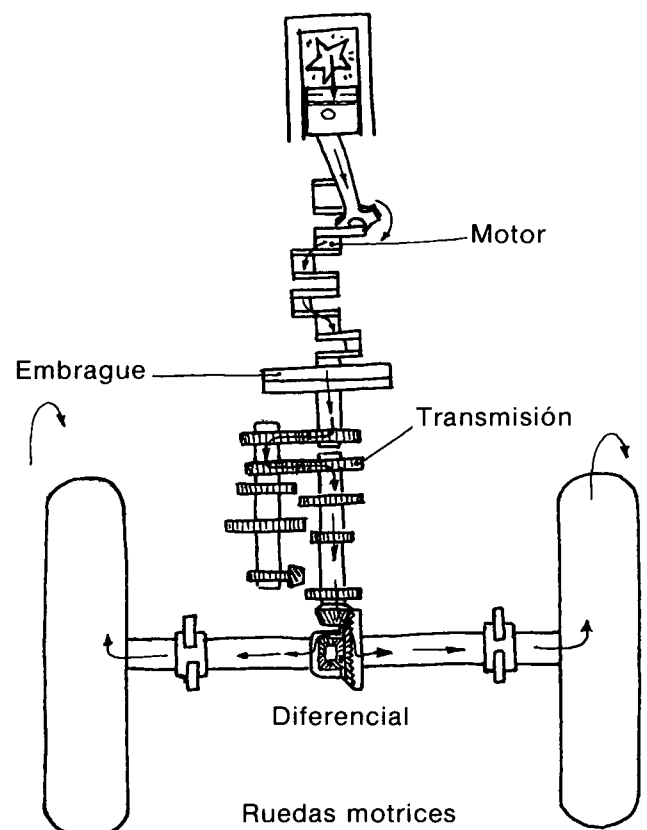


FIGURA 7. Flujo de carga pieza a pieza, través del sistema de transmisión de potencia para un automotor.

sobre los elementos individuales. Estas formas de trabajo tienen sus bases en la mecánica elemental y en el análisis apropiado de las condiciones actuales de servicio.

Algunos métodos pueden ser, por ejemplo, en el caso de máquinas herramientas, partir de las fuerzas de corte máximo para determinar la potencia del motor, mediante investigaciones del material que se va a procesar y del material utilizado por la herramienta de trabajo, determinar la velocidad de la máquina. Sobre una pala mecánica, por ejemplo, la resistencia máxima de cables críticos que han demostrado trabajar satisfactoriamente puede ser usada para determinar la carga sobre partes del sistema. En equipos como grúas, montacargas, etc. la carga máxima sobre los elementos se puede calcular a partir de la carga requerida para voltear la máquina. También la fuerza máxima requerida para cortar un elemento de seguridad puede ser usada como punto de partida.

La utilización de transductores mecánicos y electromecánicos son de ayuda en la evaluación de cargas sobre equipos existentes o sobre prototipos.

A menudo fórmulas y nomogramas han sido desarrollados para ayudar a la selección del equipo necesario para el sistema de transmisión de potencia requerido en la aplicación particular. También suministrarán información básica de carga requerida para el cálculo de la carga sobre elementos de la máquina.

Si no se puede encontrar un punto satisfactorio de partida, el diseño se puede basar sobre cargas asumidas que posteriormente se ajustan a partir de experiencias y pruebas.

Tomando los anteriores valores como punto de referencia y apoyados en los diagramas de transmisión de potencia, se pueden determinar todas las fuerzas sobre los elementos componentes de la máquina, lo mismo que fuerzas secundarias las cuales pueden originar un aumento en la potencia del motor requerido. Estas últimas fuerzas son del tipo rozamientos, inercia de elementos en movimiento, fuerzas rotacionales sobre rodamientos y sus alojamientos, energía de volantes, etc.

Una vez definidas las condiciones de carga sobre elementos el siguiente paso es escoger el material que económicamente da mejor respuesta a los requisitos del diseño. Enseguida, es necesario determinar valores de esfuerzo admisible en un diseño basado únicamente en resistencia o de flexión admisible, cuando el diseño está basado en rigidez. Esta escogencia se hace para toda la máquina y posteriormente se repasa a medida que se diseñan los diferentes elementos. Aquí es importante recordar que el proceso de diseño no se da estrictamente paso a paso, sino que posee un carácter iterativo.

En general, el diseñador está interesado en

obtener tanta resistencia y rigidez como económicamente sea posible. Sin embargo, la rigidez total de un elemento no es posible, pues, en teoría a una deformación cero corresponde un esfuerzo cero, lo cual significa que el elemento no podría llevar ninguna carga.

Todas las piezas situadas en el flujo de fuerza tienen que poseer una resistencia y rigidez suficientes. La resistencia y rigidez total del sistema tienen igual importancia.

Dependiendo de la aplicación particular, una cierta cantidad de flexibilidad en el elemento puede ser deseable. Por ejemplo algunas partes de implementos agrícolas deben tener cierta flexibilidad para garantizar su correcto uso durante el tiempo de servicio. Para que un elemento de máquina tenga la debida rigidez, la deformación admisible máxima es el factor determinante.

El siguiente paso es determinar, mediante cálculos, las dimensiones más importantes del elemento y de la máquina. Las dimensiones así obtenidas se deben ajustar a las normas de explotación. Estos cálculos en general son previos ya que se basan en los bosquejos simplificados citados anteriormente.

Un cálculo definitivo sólo es posible cuando la forma y dimensiones totales de la pieza son conocidas, así como otros datos que caracterizan su trabajo en el conjunto. Estos cálculos se realizan en función de la seguridad en las secciones peligrosas, de las deformaciones transversales y angulares, de las velocidades críticas, etc. Y se confrontan sus magnitudes con los valores tolerables. En los casos en que no se asegure la necesaria correspondencia entre estas magnitudes, conviene modificar el diseño, después de lo cual se hacen los cálculos de nuevo.

El diseñador debe tener en cuenta que en la mayoría de los casos los elementos de máquinas se calculan por unos esquemas que no reflejan plenamente las condiciones reales de servicio, debido a: 1- Ausencia de datos suficientes y seguros sobre la interacción de las piezas en el conjunto. 2- Rara vez se conoce el tipo exacto de carga aplicada o generada en cada parte del sistema. 3- Variaciones en las dimensiones dentro de los rangos de tolerancia permitidos debido a métodos de manufactura; dos juegos de componentes nominalmente idénticos no se ajustan exactamente en la misma forma. 4- Los materiales usados en la manufactura no se pueden producir en forma tal que garanticen una perfecta uniformidad y propiedades mecánicas invariables. 5- Aún con materiales de alta calidad cuyas propiedades son conocidas, sus reacciones a ciertos tipos de carga pueden ser impredecibles, y 6- Las concesiones hechas por el mal uso del sistema no se pueden prever completamente.

En función de la información anterior se desarrollan los dibujos de conjunto y el despiece (Ver: **Un proceso general de diseño en Ingeniería Mecánica;**

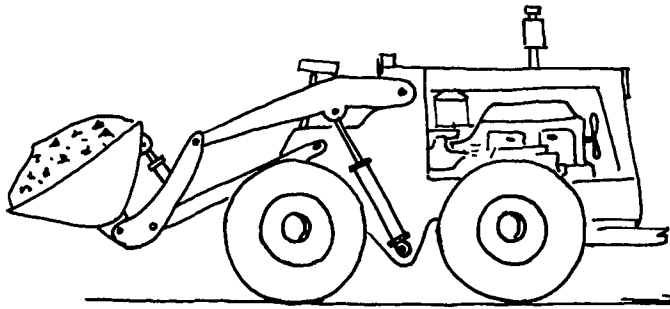


FIGURA 8. Pala mecánica.

Revista N<sup>o</sup> 10 de Ingeniería e Investigación) indicando todas las medidas, tolerancias, tratamientos, etc.

### PROBLEMAS DE DISEÑO

Los problemas que corrientemente se presentan en el diseño de un elemento de máquina están contenidos en uno de los siguientes grupos: 1- Escoger o diseñar un cierto elemento para que lleve una carga dada dentro de un esfuerzo o deformación admisible. 2- Encontrar una carga externa la cual puede ser colocada sobre un elemento dado para un esfuerzo o deformación admisible dado. 3- Encontrar el esfuerzo o deformación resultante causado por una carga externa sobre un elemento dado.

Según lo anterior, tres factores están siempre presentes al resolver un problema de diseño; carga, elemento y esfuerzo o deformación. Cada elemento debe ser diseñado para que lleve un cierto tipo de carga dentro de un cierto esfuerzo o deformación admisible.

Al diseñar dentro de estos admisibles, el diseñador debe escoger el material más eficiente y la sección más eficiente (tamaño y forma). La

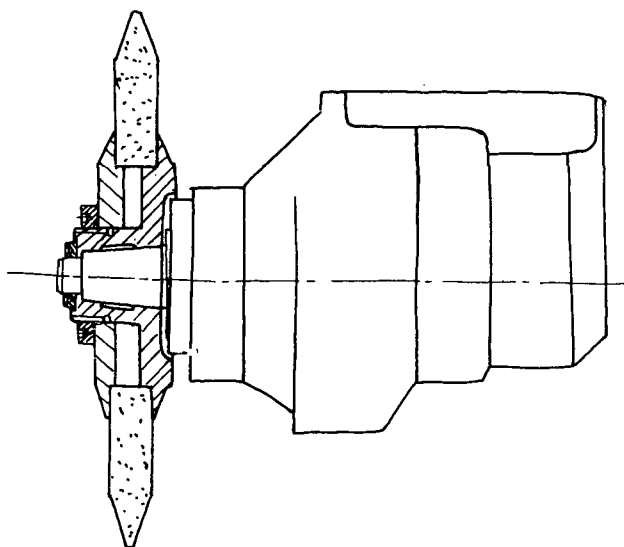


FIGURA 9. Rectificadora de roscas.

combinación de propiedades del material y propiedades de la sección, determina la habilidad del elemento para llevar una carga dada.

De acuerdo a las condiciones de carga que se presentan sobre una pieza mecánica se deben satisfacer ciertos requisitos de resistencia, rigidez y característica dinámica.

### DISEÑO POR RESISTENCIA

El diseño basado en resistencia exige ante todo, que se hayan determinado correctamente las condiciones de funcionamiento y de transmisión de carga y que se determinen lo más exactamente posible los esfuerzos admisibles. Cuando lo anterior no se cumple hay que determinar mediante ensayos, el valor de las cargas reales durante funcionamiento y la resistencia de las piezas en las condiciones de funcionamiento.

Sin embargo, para la mayoría de los elementos de máquinas el análisis de esfuerzos muy detallado es impráctico. Por ejemplo, muchos diseños se apoyan en la deformación plástica del elemento bajo carga para aliviar la concentración de esfuerzos la cual produciría la falla si persiste. En tales casos la distribución final de esfuerzos es relativamente difícil de calcular y el resultado no justifica el tiempo y problemas que se presentan.

Un diseño debe tener suficiente resistencia de modo que un elemento de máquina pueda resistir las cargas a que ha de estar sometido. De otro lado, el diseño suministra las dimensiones totales de la pieza para que pueda cumplir su función correctamente. Diseños por resistencia son comunes en maquinaria para carretera, implementos agrícolas, etc.; ver figura 8.

### DISEÑO POR RIGIDEZ

La rigidez es la capacidad del sistema de resistir la acción de las cargas externas dentro de las deformaciones admisibles sin alterar la capacidad de trabajo de la máquina. La falta de rigidez en los elementos del sistema, puede alterar la interacción de los mecanismos y el correcto engrane de las ruedas dentadas, producir elevadas presiones de borde, generar calentamiento o agarrotamiento en los cojinetes, producir corrosión por fricción en las uniones inmóviles, producir endurecimiento por deformación en frío y muchos otros efectos desfavorables.

En algunas aplicaciones, diseños basados únicamente en resistencia producirán secciones las cuales favorecerán una flexión excesiva del elemento cuando éste se encuentra cargado. En estos casos la sección debe hacerse todavía más pesada para obtener suficiente rigidez tanto como resistencia. Diseños por rigidez son comunes en máquinas herramientas; ver figura 9.

El concepto inverso de la rigidez es la elasticidad, es decir, la propiedad de un elemento de adquirir relativamente grandes deformaciones bajo la acción de las cargas exteriores. La elasticidad resulta ser una propiedad importante en piezas

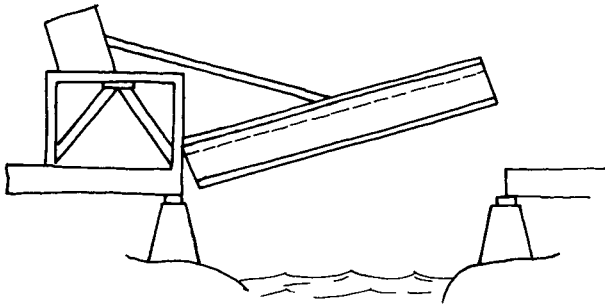


FIGURA 10. Puente levadizo.

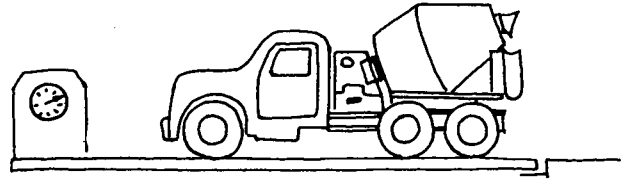


FIGURA 11. Camión mezclador en balanza de pesaje.

tales como muelles, ballestas, etc.

Algunas partes de máquinas están sujetas a condiciones mínimas de carga, con lo cual pierden vigencia los requerimientos de resistencia y rigidez.

### EL FACTOR CARGA EN EL DISEÑO DE UN ELEMENTO

Puesto que, la identificación y evaluación de las condiciones de carga son esenciales para el correcto funcionamiento de la máquina, al diseñar una pieza es necesario reconocer el tipo de carga, método de aplicación y su valor. Esto es válido tanto si el diseño está basado sobre un modelo previo como si lo está sobre el cálculo de cargas.

La carga puede ser impuesta por el peso muerto de los elementos, por el trabajo realizado por la máquina, o por una combinación del peso muerto y del trabajo. La especificación precisa de la carga es difícil de dar en muchas aplicaciones.

Los tipos de carga que se pueden presentar sobre un elemento son: Tracción, compresión, corte, flexión, torsión, carga combinada. La aplicación de la carga sobre un elemento puede ser estática, de impacto o variable.

#### CARGA ESTÁTICA

La carga estática se aplica lentamente y su valor permanece aproximadamente constante con respecto al tiempo, por ejemplo el peso muerto de una estructura sobre sus soportes; ver figura 10.

#### CARGA DE IMPACTO

La carga de impacto puede ser cualquier aplicación repentina de la carga y no necesariamente envuelve movimiento de una masa a través de una gran distancia. Esta carga puede ocurrir en cualquiera de las siguientes formas: 1- Aplicación repentina de la carga, sin que se presente choque, por ejemplo, cuando un camión cargado se mueve sobre la balanza de pesaje; ver figura 11. 2- Un impacto directo, usualmente por un elemento moviéndose a gran velocidad como en una prensa troqueladora. 3- La inercia de un elemento resistiendo altas aceleraciones o desaceleraciones tal como se presenta en balancines oscilantes bajo ciertas condiciones de carga.

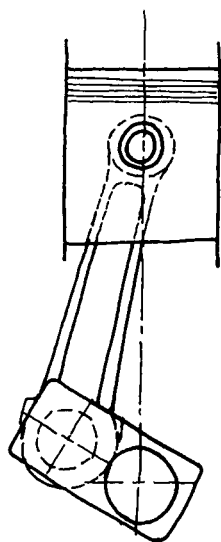
En muchos casos es muy difícil determinar la fuerza de impacto sobre un elemento debido a que no se sabe que tan bien el elemento absorberá esta energía. Sin embargo, existen dos métodos generales para el diseño de elementos que deben soportar cargas de impacto: 1- Estimar la fuerza máxima ejercida por el cuerpo en movimiento sobre el elemento resistente aplicando un factor de impacto, luego considerar esta fuerza como carga estática y usarla en las fórmulas de diseño. 2- Estimar la energía que absorbe el elemento resistente y con este valor, determinar los esfuerzos o deformaciones mediante fórmulas para carga de impacto.

La energía máxima que puede absorber un elemento está afectada por sus dimensiones. Para que un elemento absorba máxima energía se debe tener el máximo volumen de material sujeto al máximo esfuerzo admisible.

La selección del material juega un papel importante en el diseño de elementos sometidos a carga de impacto. Las propiedades del material que indican su resistencia a dichas cargas son: 1- El módulo de resiliencia del material que es la energía que este puede absorber por unidad de volumen cuando se somete a un esfuerzo hasta el límite de proporcionalidad. 2- La última energía resistente del material que indica su tenacidad o habilidad para resistir fractura bajo cargas de impacto.

Algunos criterios para el diseño de elementos sometidos a cargas de impacto son los siguientes: 1- Someter en la medida en que sea posible la longitud total del elemento al máximo esfuerzo. 2- Para cualquier sección transversal del elemento, tener la máxima área sujeta al esfuerzo máximo admisible. 3- Reducir al mínimo la concentración de esfuerzos y evitar cambios bruscos de sección. 4- Utilizar materiales con mayor resistencia a la fluencia. 5- Seleccionar materiales con suficiente ductilidad para aliviar esfuerzos en áreas de alta concentración de esfuerzos. 6- Utilizar elementos de mínimo peso, rigidez apropiada y suficiente momento de inercia. 7- Proteger elementos contra fuerzas de inercia causadas por movimientos rápidos debido a fuerzas externas. Disminuir en lo posible aceleraciones o desaceleraciones del elemento mediante algún tipo de soporte





**FIGURA 12. Máquina alternativa de un solo cilindro.**

flexible. 8- El uso de elementos tales como resortes, almohadillas de caucho, colchones hidráulicos, etc., absorberán parte de la energía cinética reduciendo así la energía absorbida por el elemento.

### CARGA VARIABLE

Las cargas variables se aplican en varias formas, pero en cada caso el valor de la fuerza es variable. En algunos casos la carga está constantemente variando, como en las bielas de un motor, ver figura 12. Una condición extrema es el caso de un eje en rotación el cual experimenta un cambio completo de carga en cada ciclo.

Sobre un período prolongado de tiempo un elemento puede soportar bastante menos esfuerzo bajo severas condiciones de carga variable. Como una medida del máximo esfuerzo unitario que un material puede soportar indefinidamente bajo carga variable, se establece su límite de endurancia el cual substituirá la resistencia última en las fórmulas de diseño.

El límite de endurancia es el esfuerzo máximo al cual el material puede estar sujeto para una vida dada de servicio. Para valores altos de carga, el modo de carga variable o de fatiga reduce la resistencia última efectiva del material como el número de ciclos aumenta.

Se debe tener cuidado al seleccionar el límite de endurancia, pues existen diferentes pruebas de fatiga, tipos de carga y tipos de probetas. Teóricamente los valores de fatiga utilizados por el diseñador deberían ser determinados en un ensayo que duplique exactamente las condiciones reales de servicio.

Un problema de fatiga ocurre si las siguientes tres situaciones están presentes simultáneamente: 1- El esfuerzo es alto. 2- El esfuerzo fluctúa sobre un amplio rango. 3- El servicio anticipado se extiende para un mayor número de ciclos.

Algunos criterios para el diseño de elementos sometidos a carga variable son los siguientes:

- 1- En general una máquina está sometida a esfuerzos máximos únicamente durante un pequeño porcentaje de su vida de fatiga. Para la mayor parte de la vida de fatiga, la máquina está sometida a esfuerzos mucho más bajos y no a su máxima capacidad; luego la mayor parte de la carga de fatiga no es tan severa como ésta puede aparecer. Según lo anterior se debe considerar el esfuerzo real en lugar del esfuerzo promedio. Reduzca si es posible el rango de esfuerzos.
- 2- Considere una fabricación cuidadosa y cambios de sección apropiados.
- 3- Evite uniones y taladros en sitios de mayor esfuerzo, en igual forma evite esquinas agudas.
- 4- Evite esfuerzos biaxiales y triaxiales.
- 5- Evite cargas excéntricas las cuales pueden causar flexión adicional.
- 6- Considere la introducción de esfuerzos de compresión, estos esfuerzos reducirán el esfuerzo de tracción debido, por ejemplo, a flexión.

### FACTOR DE SEGURIDAD

Para que un elemento de máquina tenga suficiente resistencia, el esfuerzo unitario máximo debe limitarse a algún valor menor que la resistencia a la fluencia del material o resistencia última. Para conseguir este esfuerzo se debe incluir en los cálculos un factor de seguridad, permitiendo así que el elemento soporte mayores fuerzas, las cuales pueden resultar de variaciones en el material, fallas en los procesos de fabricación, variaciones en las cargas reales, como cuando se sobrecarga un gancho de levante, errores en los cálculos de diseño, etc.

El diseñador debe estar completamente seguro de las incertidumbres que él está considerando cuando calcula el factor de seguridad o cuando basa su diseño en dicho factor. El incorrecto uso de un factor de seguridad puede resultar en un desperdicio de material o en otros casos, en fallas funcionales o físicas.

Una vez se han establecido las proporciones del elemento, el esfuerzo unitario admisible puede ser trasladado a carga admisible. Generalmente el esfuerzo admisible, deberá ser relativo a la resistencia a la fluencia del material. En la mayoría de los elementos de máquinas la deformación permanente que resulta de exceder la resistencia a la fluencia puede afectar seriamente el funcionamiento del elemento. Sin embargo, éste no siempre es el caso y si un grado de deformación permanente puede ser tolerado, un diseño basado sobre la resistencia última podrá ser hecho a menor costo.

Para que un elemento de máquina tenga suficiente rigidez, la deformación admisible máxima es el factor determinante. Una vez se ha establecido la máxima deformación admisible, el correspondiente esfuerzo se puede obtener, puesto que esfuerzo y deformación tienen una relación proporcional dentro del rango elástico.

Cualquier regla del pulgar para determinar el

factor de seguridad en carga estática deberá aumentarse tanto para cargas variables como para cargas de impacto. Al asignar un factor de seguridad bajo carga estática, por lo general se ignora la presencia de concentradores de tensión. Sin embargo, bajo cargas de impacto o variables, estos esfuerzos concentrados desempeñan un papel vital en la reducción de los esfuerzos admisibles máximos.

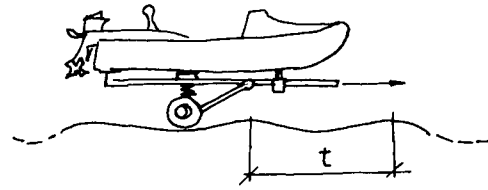
Altas concentraciones de esfuerzos se presentan en cambios fuertes de sección, puntos de contacto entre elementos, puntos de contacto entre un elemento y su soporte o entre un elemento y su carga aplicada.

El esfuerzo unitario admisible se obtiene dividiendo el correspondiente esfuerzo del material por un determinado factor de seguridad. A veces es más simple aplicar el factor de servicio como multiplicador para la carga calculada sobre el elemento, obteniéndose de este modo la carga admisible para ser usada en los cálculos en lugar del esfuerzo admisible.

Para muchos elementos de máquinas, el factor de seguridad ya no es tan crítico en el cálculo. Esto se debe principalmente a la amplia adopción de controles para sobrecargas del tipo eléctrico e hidráulico, embragues de deslizamiento, bases de alivio, por ejemplo en prensas, pasadores de corte más confiable, etc. sin embargo, los aparatos para sobrecarga a menudo conducen a paradas de la máquina. El diseño debe balancear el aumento en costos de tiempo productivo perdido, contra una mayor reducción de costos en la construcción de maquinaria gracias a la reducción del factor de seguridad.

La naturaleza crítica del factor de seguridad se minimiza con el uso de materiales más confiables y mayor control de manufactura. Dependiendo del tipo de maquinaria y de la aplicación particular se han establecido normas de tensiones admisibles y de grados de seguridad. Muchas de esas normas se reglamentan mediante códigos o requisitos de contratos como por ejemplo, el código de la ASME para tanques de presión o como en el caso de piezas y mecanismos de elevadores, tales como cables, ganchos, frenos, etc. Sin embargo, en la mayoría de los casos el diseñador no dispone de tales normas y necesita establecer por su cuenta los valores de tensiones admisibles.

La selección correcta de un factor de seguridad depende bastante de los conocimientos técnicos, de la experiencia acumulada por el ingeniero o la industria y de los experimentos realizados sobre la construcción. De acuerdo a lo anterior se puede decir que la determinación del factor de seguridad tiene un tratamiento más empírico que científico.



**FIGURA 13.** Pequeño remolque moviéndose sobre carretera ondulada.

## VIBRACIONES

Cada uno de los elementos de una máquina tiene una cierta frecuencia natural. Si un elemento se golpea, éste vibrará naturalmente a una frecuencia dada. Sin embargo, un elemento también puede ser forzado a vibrar en cualquier frecuencia cuando se golpea repetidamente, en este último caso la frecuencia se llama forzada.

Todas las veces que la frecuencia forzada iguala a la frecuencia natural el elemento entra en resonancia y la amplitud de la vibración crece rápidamente a valores muy altos. Es decir, la frecuencia de resonancia aparece a un número crítico de revoluciones de la máquina y se alcanza cuando la fuerza de vibración es igual o múltiple de la frecuencia natural del elemento.

La resonancia es una vibración lineal, la cual se caracteriza por un funcionamiento del sistema con sacudidas. Esta se puede desarrollar aún cuando todos los elementos del sistema funcionen con suavidad. Por ejemplo, en el caso de la transmisión de potencia de un vehículo, las condiciones que determinan el grado en que se presenta la resonancia proveniente del funcionamiento del conjunto, son las frecuencias en que vibran los diferentes componentes del sistema.

El funcionamiento normal del motor hace que el mismo motor vibre con una determinada frecuencia. Las partes del motor, sus accesorios y las otras partes de la transmisión y del vehículo, vibran también en alguna frecuencia dependiendo de su función, peso y colocación en el conjunto. El sistema trabaja bien mientras las frecuencias de vibración de los diferentes componentes sean distintas. Por el contrario, cuando una masa en vibración posee una frecuencia natural de funcionamiento idéntica a otra masa dentro de la máquina, la vibración resultante aumenta drásticamente.

Sin embargo, puesto que la vibración es generalmente considerada un efecto indeseable dentro del sistema, ésta rara vez controla el diseño preliminar de la máquina. Como se vio anteriormente, la forma de trabajo es diseñar primero para cumplir funciones principales y posteriormente analizar condiciones de carga, factores de impacto, fatiga y vibración.

Puesto que los mayores problemas de la vibración se presentan en resonancia, el diseñador está interesado en controlar las velocidades críticas

en el diseño lo cual se consigue mediante: 1- El cambio de frecuencia forzada preferiblemente a frecuencias menores. Esto, usualmente significa un cambio en el motor o velocidad de operación. 2- El cambio de la frecuencia natural del elemento preferiblemente a frecuencias mayores, lo cual se puede lograr mediante:

a- El aumento del momento de inercia del elemento.

b- El uso de materiales con mayor módulo de elasticidad.

c- La reducción del área de la sección transversal del elemento, y

d- La reducción de la longitud no soportada del elemento mediante, por ejemplo, la adición de apoyos. Con este procedimiento se mueve la frecuencia natural lejos de la frecuencia de operación. 3- Mediante el uso de diseños eficientes. Tales diseños pueden incluir balanceo de piezas, el uso de partes recíprocantes lo más ligeras posibles, el arreglo de componentes de modo que las fuerzas de inercia se anulen, o el uso de absorbedores de vibración. 4- Mediante el uso de materiales con mayor capacidad de amortiguación y mayor resistencia a la fatiga. 5- Cambiando la orientación de los componentes con respecto a la excitación, etc. En aquellos casos en donde las frecuencias críticas no se pueden modificar satisfactoriamente, o las velocidades de trabajo superan velocidades críticas, se deben incluir en el sistema controles de velocidad o dar recomendaciones para evitar el uso de velocidades de operación en las zonas de resonancia. En aplicaciones en donde las velocidades de trabajo superan la velocidad crítica, el paso por dicha zona debe ser rápido y mejor si se introducen en el sistema, amortiguadores de oscilación, en esta forma se logra que por ejemplo, en el caso de un eje de marcha rápida, su pandeo tienda a su valor final lográndose el autoequilibrio del mismo.

En general, la vibración lineal se puede corregir eliminando: Montajes incorrectos, mala alineación, desbalanceo, resonancia, desajustes, etc.

El desgaste y tolerancias excesivas en los cojinetes, las correas sobretensadas, los árboles o engranajes desalineados, las bases desniveladas, etc., son ejemplos que favorecen la vibración. En un generador por ejemplo, la falta de alineación del rotor puede originar una vibración excesiva del conjunto.

## EL ANALISIS APLICADO AL DISEÑO DE UN ELEMENTO DE MAQUINA

### Definición del problema

Se requiere determinar el tamaño y configuración del eje principal "x" para garantizar su correcto funcionamiento dentro del sistema "y".

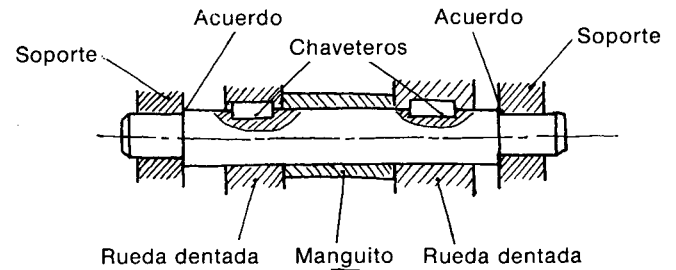


FIGURA 14. Bosquejo detallado del eje "X".

### Análisis

Debido a que no se tiene una teoría satisfactoria para predecir la falla sin acudir a situaciones experimentales, la solución comprende el cálculo de un esfuerzo teórico el cual se debe comparar a una resistencia del material determinada experimentalmente. Para poder comparar estos dos valores, las condiciones para resistencia y para esfuerzo deben ser equivalentes en todas las formas significantes o alguna corrección deberá incluirse para ajustar las variaciones.

El desarrollo del trabajo se puede llevar en la siguiente forma: 1- Del diagrama de transmisión de potencia correspondiente al sistema "y", se aísla el eje principal "x". 2- Puesto que por lo general el eje se representa en forma convencional en el diagrama de transmisión de potencia, es necesario ahora, hacer un dibujo detallado de dicho eje mostrando todos los cambios de sección, entallas, etc. que se crean son necesarios para el diseño final. 3- Especificar los elementos que van montados sobre el eje, tales como engranajes, embragues, frenos, etc. 4- Estimar las dimensiones axiales y relaciones de diámetros para todos los pasos que ocurran sobre el eje, ver figura 14. 5- Determinar las condiciones de carga sobre el elemento. 6- Encontrar esfuerzos y deformaciones. 7- Hacer las correcciones por concentración de esfuerzos, factores de choque, factores de fatiga, etc. 8- Determinar los valores máximos de esfuerzo o deformación. 9- Convertir esfuerzos a cargas. Estas cargas deberán ser equivalentes a las existentes cuando se determinaron experimentalmente los valores de resistencia. 10- Comparar los valores de resistencia determinados experimentalmente, con los valores máximos de esfuerzo de trabajo mediante el uso de factores de seguridad, los cuales deben ser consistentes con la información de diseño, la definición del problema y las consideraciones hechas. 11- Realizar los dibujos del eje según normas, dando la información necesaria. 12- Dar recomendaciones para las velocidades de operación de la máquina basados sobre las velocidades críticas del eje.

### CONCLUSION

Los métodos analíticos o experimentales orientan al diseñador, pero la respuesta definitiva y la

confirmación de las decisiones del proyecto se obtienen durante la explotación de la máquina. Las buenas construcciones se basan en la recopilación de experiencias y en las modificaciones sucesivas. El estudio teórico, aunque a veces no ofrece una solución exacta, por lo menos

enseña los factores que influyen en el comportamiento del elemento. Toda la incertidumbre almacenada en el factor de seguridad tiene que ser aclarada o comprobada por los experimentos de laboratorio.

---

### BIBLIOGRAFIA

1. DUBBEL, H. **Manual del constructor de máquinas**. Tomos I y II. Editorial Labor S.A. 1965.
2. ROTHBART. **Mechanical design and systems handbook**. Mc. Graw-Hill. 1964.
3. MYATT, Donald J. **Machine Design**. Mc. Graw-Hill Book Company. 1962.
4. TWEEDDALE, J. G. **Practical Mechanical Design**. London Iliffe Books Ltd. 1963.
5. SCHAFFER, Dejan Radulovic. **Transporte Automotor de carga**. Ediciones Colatina, Bogotá. 1983.
6. SANZ GONZALEZ, Angel. **Tecnología de la Automoción**. Ediciones Don Bosco - Paseo San Juan Bosco, 62 Barcelona 17, 1981.
7. BLODGETT, OMER W. **Design of Weldments**. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation. Cleveland, Ohio. 1963.
8. **Procedure Handbook of Arc Welding Design and Practice**. The Lincoln Electric Co. Eleventh edition. 1967.
9. **Estructuras básicas de un montacargas**. Vol. I. Toyota motor sales Co., LTD.
10. **Introducing the Skid Steer Loader**. Part. I. Toyota motor corporation.
11. NIEMANN, G. **Tratado teórico práctico de elementos de máquinas**. Editorial Labor. S.A. 1973.
12. JOHNSON, Olaf A. **Diseño de máquinas herramienta**. Editorial Roble. 1973.
13. **Power trains**. John Deere Service Publications. Moline, I11. Second edition. 1972.
14. CROUSE, William H. **Automotive Engines**. Fourth edition. Mc. Graw-Hill Book Company. 1971.
15. **Vibración**. Training communications department. Cummins Engine Company Inc. Columbus, Indiana. U.S.A.