

**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**METODOLOGIA DE DISEÑO**

**ING. ALEJANDRO RAMIREZ REIVICH  
ING. LEOPOLDO A. GONZALEZ GONZALEZ  
ING. VICENTE BORJA RAMIREZ**

**PALACIO DE MINERIA**

## 1.1 DEFINICIONES SOBRE QUE ES DISEÑO

### a) Definición Etimológica.

Diseño: (Del Ital. Disegno) - Delineación de una figura.

### b) Definiciones de distintos autores.

El descubrimiento de los verdaderos componentes físicos de una estructura física. (Alexander 1963)

Una finalidad -un problema controlado- una actividad resuelta. (Archer, 1965).

La elaboración de una decisión, de cara a la incertidumbre con grandes penalizaciones para el error. (Asimow, 1962).

El esfuerzo consciente de imponer un orden significativo. (Victor Papanek).

El salto imaginativo desde la realidad presente a las posibilidades futuras. (Page, 1966).

Una actividad creativa que supone la consecución de algo nuevo y útil sin existencia previa. (Reswich, 1965).

Es el inicio de un cambio en las cosas hechas por el hombre. (Reswich, 1963).

El diseño reúne en el proceso interdisciplinario de la evolución de los productos, funciones e informaciones de las ciencias naturales y la técnica, de la economía y la sociología, de la fisiología y la medicina, de la psicología y la estética. (Erich Geyer, 1970).

Diseño, es esencia, es solución de un problema relacionado con una clase especial de problemas que la compañía, por tradición, confía al ingeniero. (Edward. Krich, 1962).

Simular lo que queremos construir (o hacer), antes de construirlo (o hacerlo), tantas veces como sea necesario para confiar en el resultado final. (Booker, 1964).

El factor que condiciona aquellas partes del producto que toman contacto con la gente. (Farr 1966).

El diseño técnico es la utilización de principios información técnica e imaginación en la definición de una

estructura mecánica, máquinas o sistema que realice funciones específicas con el máximo de economía y eficiencia. (Fielden, 1963).

La relación de un producto con su situación con objeto de satisfacerla. (Gregory, 1966).

La realización de un complejo acto de fe. (Jones, 1966).

La solución óptima de un conjunto de verdaderas necesidades en un particular conjunto de circunstancias. (Matchett, 1968).

Una actividad orientada a determinados fines, para la solución de problemas. (Bruce Archer).

El diseño es una disciplina común a muchos campos. En todos participa con características similares, cuya enumeración facilitará definirlo.

El diseño está ligado a la concepción, construcción o implementación de objetos, sistemas o dispositivos que no existen aún, o que existiendo requieren de modificaciones (rediseño) para cumplir con nuevos requerimientos.

Implica la toma de decisiones, frente a la incertidumbre causada por la falta de información o antecedentes.

El diseño es acción, actividad, romper el equilibrio, sin esto, no se iniciaría el proceso de diseño.

Es un proceso lógico.

## 1.2 DEFINICION SOBRE DISEÑO Y DISEÑO MECANICO

Tomando como apoyo las definiciones anteriores se expresará el diseño como:

"El proceso lógico que ordena y planea la actividad creativa, por medio de la cual se llega a dar forma a algo nuevo y útil, sin existencia previa".

El diseño mecánico será:

"El proceso lógico que ordena y planea la actividad creativa que, utilizando principios científicos, información técnica e imaginación, define estructuras mecánicas, máquinas o sistemas para realizar funciones específicas, con el máximo de economía y eficiencia".

### 1.3 OBJETIVOS DEL DISEÑO

Tradicionalmente se ha mencionado que el objeto del diseño es el de producir dibujos que interpreten las soluciones que el cliente o fabricante han creado. Existen sin embargo otros objetivos que se deben de incorporar.

Si el objetivo para el elemento que se dibuja es conseguir los cambios prescritos, los diseñadores deben tener capacidad para predecir los efectos fundamentales de sus diseños tanto como de especificar las acciones necesarias para la consecución de esos efectos. De esta manera, los objetivos del diseño están menos relacionados con el producto mismo y más con los cambios que fabricantes, distribuidores, usuarios y en definitiva la sociedad total, espera hacer para adaptarse y beneficiarse del nuevo producto.

El objetivo esencial del diseño es el de unir, a través de lo desconocido, los recursos disponibles y la satisfacción de las necesidades humanas.

### 1.4 ¿POR QUE ES DIFICIL EL DISEÑO?

La razón fundamental por la que el acto del diseño es difícil de conseguir y duro de describir es evidente si se considera el objetivo que se especificó anteriormente. El problema fundamental consiste en que el diseñador está obligado a utilizar una información actual para poder predecir una situación futura que no se posibilitará a menos que sus predicciones sean correctas. El resultado final del diseño tiene que ser conocido antes de que los medios de realización hayan sido explorados: el diseñador tiene que trabajar retrocediendo en el tiempo, desde un supuesto efecto deseado para el mundo, al principio de una cadena de sucesos cuyo final será el efecto buscado. Si como es probable, el acto de seguir las etapas intermedias expone a dificultades imprevista o sugiere mejores objetivos, el modelo del problema original puede cambiar tan drásticamente que el diseñador tenga que replantearlo de nuevo.

## 2 EL METODO DE DISEÑO

### 2.1 LA NECESIDAD DE UNA METODOLOGIA

El rasgo que parece ser el más característico de este siglo es la creación acelerada del desarrollo tecnológico. Los adelantos científicos que cada día se suceden con mayor frecuencia, repercuten en la sociedad creando cambios rápidos de la manera de vivir. Poco a poco se ha formado una sociedad que en lugar de esperar el surgimiento de nuevos cambios como en el

pasado, impone impacientemente el desarrollo de nuevos proyectos.

Las circunstancias actuales exigen mejoramientos más audaces y rápidos dentro de un campo de grandes riesgos técnicos repercutiendo en cuantiosas pérdidas o ganancias elevadas, hasta el grado de afectar intereses privados, sociales e incluso mundiales.

Cuando un nuevo proyecto es elaborado, basado en conocimientos e ideas nunca antes experimentadas, los resultados se ocultan en la incertidumbre del futuro y se vuelven confusos, debido a la complejidad de la tecnología; entonces, el riesgo de cometer errores es inmenso.

El desarrollar una actividad planeada es la mejor herramienta disponible para poder evitar posibles fracasos. El tratar de afrontar el desarrollo tecnológico sin ninguna estrategia es como meterse en una jaula con tigres y leones, contando sólo con un látigo o una silla, lo más seguro es que en unos minutos se termine entre sus fauces. En cambio, si se aplica un método como el que usa el domador cambiará la situación totalmente.

## 2.2 ¿TRADICIONALMENTE DE QUE MANERA EL DISEÑADOR HACE FRENTE A LA COMPLEJIDAD?

La manera tradicional de enfrentar un problema complejo es una operación sobre una única concepción del todo. Esto, encarnado en un dibujo a escala, es un medio para reducir drásticamente una serie inimaginable de decisiones a tomar, fijando la forma y posición de cada parte del diseño. Cuando esta estrategia falla en la producción de una nueva variante aceptable para un diseño existente, el diseñador transforma la concepción dibujada en una segunda con posibilidad de diferir radicalmente de la primera, esperando que este cambio resuelva el origen de la dificultad inicial. El período de experimentación e incubación que precede a este cambio, permite desarrollar un modelo exacto de sensibilidad y correspondencia de la situación del diseño hacia la introducción de cambios más importantes en el concepto. Consecuentemente, se puede concluir que en los métodos tradicionales de diseño se hace frente a las complejidades utilizando una solución experimental como un medio rápido para la exploración de la situación y de las relaciones entre los componentes.

## 2.3 OBJETIVO DE LA METODOLOGIA DE DISEÑO

Evitar la dificultad normal que existe en la pérdida del control del proceso de diseño.

## 2.4 ANALISIS DEL DESARROLLO DE DISTINTOS METODOS DE DISEÑO

El progreso y el desarrollo de la tecnología sigue un camino con dirección variable, con nuevas y distintas maneras de desarrollo en cada generación. Para poder entender y obtener el progreso, hay que seguir un laberinto entre caminos alternativos y rodeos laterales para evitar obstáculos y callejones sin salida y no un sólo camino recto que nos conecta con todas las etapas de evolución.

En cualquier comunidad, y en cualquier época, es probable que la tecnología sea utilizada en parte a atender las necesidades económicas y materiales. Pero asimismo sirve en parte a los ideales de la gente de esa comunidad, y también en parte para ampliar el poderío militar y social de ciertos grupos.

De igual manera que la presencia de una tecnología avanzada no es necesariamente sinónimo de civilización, la presencia de cualquier tipo de artefacto tecnológico no es necesariamente sinónimo de la actividad de diseño durante casi toda la historia de la humanidad no ha existido una clase de personas fácilmente reconocibles y considerados como diseñadores. Muchos artefactos complejos, hermosos, funcionales, o civilizadores han sido creados sin que nadie los diseñará en forma consciente.

Se puede clasificar en cuatro clases los distintos procesos que han existido en torno a la actividad creadoras:

### 2.4.1 PROCESO EVOLUTIVO

Es un proceso muy largo parecido al desarrollo por la evolución natural de los animales, donde existe un ajuste muy gradual de cualquier modificación. Este proceso evolutivo finalmente produce una forma para el objeto que es adecuado a sus requisitos funcionales, tal como la forma de un organismo está perfectamente adaptada a su medio ambiente.

Por siglos el hombre primitivo satisfacía sus instintos naturales usando los recursos que la naturaleza le daba. La única guía que tenía era sus experiencias previas en la realización de cualquier actividad. Por ejemplo al comer, sólo se valía de sus sentidos cometiendo errores que por lo general eran de fatales consecuencias. Poco a poco aprendió que su sobrevivencia dependía de su habilidad para pensar y actuar con base a un plan utilizando su imaginación y creatividad.

### 2.4.2 PROCESO INCONCIENTE

En los inicios de la humanidad los hombres de la edad de piedra, les toco vivir una lucha continua contra cuatro

glaciaciones. El contacto con la naturaleza fue la única ayuda que tenían a su disposición para defenderse de los factores adversos a su supervivencia.

Después de un tiempo de hallar y recoger utensilios hechos de forma natural, pasaron gradualmente a fabricarlos. Tras muchas generaciones de imitación cuidadosa y mejoras esporádicas surgieron objetos propios de la inventiva humana. Una muestra de esto es que se utilizó el hacha de piedra durante varios siglos. Poco a poco el hombre emerge del salvajismo una vez resuelto el problema de alimentación y comienza el período de asentamiento y cultivo.

Con las necesidades de alimentación no ocupaban todo el tiempo, pudieron disponer de temporadas de ocio y comenzar con actividades creativas o artesanales y de comercio.

Al existir excedentes mayores de alimentación para la población surgieron los artesanos especialistas en distintos trabajos como alfarería, tejidos y metalurgia.

A partir de esta época, la Mesolítica, hasta la fecha existirá el artesano que tendrá un método que tiene como principal característica estar basado en una larga experiencia de su oficio y no en un conocimiento abstracto. Produce diseños propios, pero frecuentemente sin ser capaz de explicar completamente su lógica. Puede ser capaz de juzgar a ojo, o por intuición, cual deber de ser el tamaño o la cantidad de un material en particular. Esta larga experiencia con los materiales lo califica en poder trabajar con ellos aunque sea un ignorante en toda teoría.

Con esta experiencia y habilidad en la práctica hacen que se diseñe en el mismo momento de estar construyendo algún objeto.

Durante cientos de años han existido distintas causas que influyen al artesano para imaginar o actuar de una manera particular. En ocasiones estaría sometido como esclavo y obligado a crear con ideas de sus opresores. En ocasiones tenía que guiarse por ideas tecnológicas.

Un ejemplo del proceso inconsciente fue la llamada regla de San Benito:

Durante el siglo XI existió una forma de vivir y de realizar las actividades diarias en Europa. Se tenía la creencia de que si se actuaba de una manera más simple y primitiva se podrían volver a reunir las características que existieron en el surgimiento del Cristianismo, y de esta manera podría nacer otro Cristo.

La regla de San Benito fue la que dio la pauta a seguir, se mencionaba que cada persona tenían que actuar en tres niveles: manual, intelectual y espiritualmente; lo que provocó la

obligación de pensar, rezar y trabajar manualmente. Al principio esto provocó a un atraso en el desarrollo, pero el pensar y trabajar manualmente ayudó para que se hicieran avances como la creación de un gran número de edificaciones, sistemas de bombeo, molinos de agua y gran número de mecanismos.

#### 2.4.3 PROCESO ARTESANAL

Se puede hablar del proceso utilizado por los artesanos alrededor del siglo XIX. El artesano por lo general trataba de resolver las necesidades de su vecindario, que podrían ser la construcción de una cabaña, un barril, un arado o una carreta.

Por ejemplo, en la construcción de las carretas para transportar productos de una granja, se conocía que la rueda era capaz de usarse como apoyo de una plataforma que sería movida por animales. Con las dimensiones que se le ocurriera al constructor. Se dice que incluso, la altura que debía de existir entre el piso y la plataforma, sería la suficiente para que un perro, Dálmata, que gustaba de acompañar al conductor y los caballos, pudiera pasar por debajo de la carreta durante el transcurso del viaje.

Otro factor que indujo a fijar dimensiones de los barriles o botes para navegar en los ríos, era la curvatura que debiera tener la parte exterior de la unión de la raíz y el tronco de un árbol.

En las granjas y en los mercados se discutían los detalles una y otra vez, y éstos eran reunidos, para tenerlos en cuenta en los talleres del pueblo, tanto los carpinteros como los herreros, los granjeros y constructores de carros utilizaron su pequeño conocimiento trasmitiéndolo de padres a hijos durante siglos.

Pero gran parte de los detalles se entendieron confusamente, el cuerpo total del conocimiento fue un misterio, el conocimiento residía en el pueblo aunque nunca totalmente en un individuo.

Ideas sobre el funcionamiento de la evolución artesanal del diseño.

- a) No dibujaban sus trabajos, ni daban razones sobre las decisiones que tomaban.
- b) Se modificaba la forma de un elemento por medio de los errores o aciertos usando un proceso de tanteo. Se producían por este método dos grandes extremos, había grandes errores y asombrosos aciertos.
- c) Cuando algo molestaba se cortaba el problema, produciendo características discontinuas.
- d) No se recuerda ninguna información por medio de símbolos.
- e) Toda la información esta intrínseca en la forma del producto, sin cambios excepto para corregir demandas.



Desde la revolución industrial (aproximadamente desde 1750 en Inglaterra), comienza poco a poco a surgir una nueva modalidad de acto productivo: el accionar técnico artesanal va cobrando cada vez más componentes científicos teóricos. A fines del siglo XIX aparece junto al fenómeno de concentración de capitales (el imperialismo) y la revolución industrial-financiera de las multinacionales poco después, la dimensión tecnológica. En este caso la acción tiene un componente racional cuya eficacia productora alcanza sorprendentes resultados, gracias a la formalización matemática de sus operaciones, al adelanto de las ingenierías, etc. El acto tecnológico se separa así del mero artesano tradicional. El ingeniero de construcciones se distingue abismalmente del experto albañil. La tecnología parte de las conclusiones científicas para aplicarlas a la resolución de problemas concretos que presenta el mundo industrial contemporáneo. El artesano continúa en sus prácticas tradicionales y, por ello, además de ser un trabajador perito o empírico, técnico o especializado, tiene igualmente en su acto productor un momento artístico popular.

En la actualidad el diseñador profesional y su mesa de dibujo son el centro del moderno proceso de diseño. El taller de dibujos es también una característica esencial en cualquier complejo industrial; tiene su propio lugar junto a todas las demás oficinas especializadas complementarias a la fábrica. Habitualmente, pues, el diseño parece ser una función integrada al proceso industrial; y el diseñador es un especialista, como cualquier otro empleado de las oficinas y como cualquier otro obrero de la producción.

Obviamente, el proceso de diseño en su familiar tablero de dibujo de hoy día ha reemplazado a los procesos "inconscientes", de igual forma que todas las demás características de la industrialización reemplazando a la artesanía. El desarrollo del moderno proceso de "diseño" es uno de los cambios organizacionales que acompañaron a los demás cambios en la tecnología durante la industrialización.

Veamos cómo el diseño, en cuanto proceso separado, encaja en el marco de la industrialización.

#### PRODUCCION DE FABRICA

La introducción del sistema de fábricas supuso que el artesano ya no fuera un agente independiente; ya no podría negociar y discutir con su cliente las características específicas del objeto que se le encargaba producir. Esta función de diseño, por lo tanto, debía pasar a manos de algún otro, que recibiera las instrucciones del cliente, las reformulara y las pasara al obrero de producción.

Cada tarea especializada produce sólo una parte del producto completo final. Por lo tanto, es necesario un método formalizado para, en primer lugar, dividir el producto entero en componentes y, en segundo lugar, garantizar que éstos componentes, cuando sean confeccionados, podrán incorporarse efectivamente en el producto final. Este método formalizado se encarna en los dibujos de diseño, en que cada componente puede especificarse de forma exacta, junto con su relación con los demás componentes.

#### ORGANIZACION CIENTIFICA DEL TRABAJO

La separación del diseño de la confección significa que cada uno de ellos se considera por separado. El "diseño" de un producto artesanal está contenido, en gran medida, en la forma en que lo hace el artesano: éste no sabe "por qué" tiene que tener una forma determinada, sino sólo "cómo" se hace. No obstante, en el proceso industrial de diseño, tanto la forma del producto como las operaciones que deban realizarse para dársela pueden considerarse desde un punto de vista "científico", y por lo tanto ser más eficaces.

#### MECANIZACION

La división formal del producto final en pequeños componentes no sólo facilita la división del trabajo y la organización científica, sino también allana el camino a la mecanización. Cada componente puede considerarse ahora en términos de cómo se lo puede fabricar mejor, y puede diseñarse para que se adapte al proceso de fabricación.

#### ECONOMIA A ESCALA

El nuevo proceso de diseño puede tomar en cuenta fácilmente nuevos criterios de diseño, como el proceso de fabricación (como el diseño para la mecanización), el proceso de distribución (diseño para facilitar el embalaje y el transporte), el proceso de ventas (diseño para la exposición), y las necesidades de la economía industrial y comercial (diseño para uso múltiple en los componentes están dar; diseño para la obsolescencia). El propio proceso de diseño, por supuesto, puede centralizarse en una oficina central, con las otras funciones de la empresa.

Parece, pues, que el proceso industrial de diseño tiene dos características muy acusadas que las hacen ser una parte esencial del marco general de la industrialización. Estas son:

- a) En sí mismo, separa el diseño de la confección. Esta separación socava la autonomía y autoridad en su trabajo que tuviera el artesano; es un aspecto necesario del sistema de fábrica y del desarrollo subsiguiente de ese sistema.

b) Al emplear dibujos, contiene un método formalizado para el estudio abstracto de la forma. Este método permite concebir nuevas formas y probarlas en un modelo antes del proceso de producción, e independientemente del mismo.

## METODOS MATEMATICOS

A partir del siglo XVI los métodos matemáticos fueron algunas veces aplicados a problemas prácticos por motivos enteramente idealistas. La gente estaba excitada por el racionalismo de las matemáticas y creía en ellas como una clase para la comprensión de la naturaleza.

En un principio no se obtuvo la ventaja práctica alguna del análisis matemático utilizado, era aun muy elemental, pero el resultado a largo plazo difícilmente podría haber sido mayor porque ese entusiasmo por el uso de las matemáticas en un contexto práctico ayudo eventualmente a crear el método y la disciplina básica de la tecnología moderna.

## METODO PROYECTUAL

Cualquier libro de cocina es un libro de metodología proyectual.

El método proyectual consiste simplemente en una serie de operaciones necesarias, dispuestas en un orden lógico dictado por la experiencia. Su finalidad es la de conseguir un máximo resultado con el mínimo esfuerzo.

Hay personas que frente al hecho de tener que observar reglas para hacer un proyecto, se sienten bloqueadas en su creatividad. ¿En qué queda entonces la personalidad?, se pregunta. ¿Nos estamos volviendo todos locos?, ¿Todos robots? ¿Todos nivelados, todos iguales?

Y empiezan desde cero a reconstruir la experiencia necesaria para proyectar bien. Les costará bastante llegar a entender que algunas cosas hay que hacerlas primero y otras después. Malgastarán mucho tiempo en corregir los errores que no habrían cometido de haber seguido un método proyectual ya experimentado.

El método proyectual para el diseñador no es algo absoluto y definitivo; es algo modificable si se encuentran otros valores objetivos que mejoren el proceso. Y este hecho depende de la creatividad del proyectista que, al aplicar el método, puede descubrir algo para mejorarlo. En consecuencia, las reglas del método no bloquean la personalidad del proyectista sino, que, al contrario, le estimulan a descubrir algo que, eventualmente, puede resultar útil también a los demás.

## METODO CARTESIANO

## Las cuatro reglas del método cartesiano:

La primera era no aceptar nunca nada como verdadero que no se hubiese dado pruebas evidentes de serlo: es decir, evitar cuidadosamente la precipitación y la prevención; y no incluir en los juicios nada más que lo que se presentase tan clara y distintamente a la inteligencia que excluyese cualquier posibilidad de duda.

La segunda era dividir cada problema en tantas pequeñas partes como fuese posible y necesario para resolverlo mejor.

La tercera, conducir con orden los pensamientos, empezando por los objetivos más sencillos y más fáciles de conocer, para ir ascendiendo poco a poco, como por peldaños, hasta el conocimiento de los más complejos; y suponiendo un orden también entre aquellos en que los unos no preceden naturalmente a los otros.

Por último, hacer en todo momento enumeraciones tan completas y revisiones tan generales que permitieran estar seguro de no haber omitido nada.

## METODO EXPERIMENTAL

Este método es la forma en que típicamente se aprende a resolver problemas, típicamente se tiene:

- a) Aprender-haciendo (resolviendo o enfrentando problemas).
- b) Generalizando la experiencia ganada al resolver problemas (lectura, reflexión y discusión).

El conocimiento humano de los procesos para resolver problemas, aún parece relativamente no científico. Por lo tanto el criterio obtenido de la experiencia, continua siendo valiosa para resolver problemas.

## ETAPAS DEL METODO EXPERIMENTAL.

- a) Delimitar y simplificar el objeto de la investigación o problema.
- b) Plantear una hipótesis del trabajo
- c) Elaborar un diseño experimental
- d) Realizar la experimentación
- e) Analizar los resultados
- f) Obtener conclusiones
- g) Elaborar un informe escrito

Este método se plantea para la realización de distintos trabajos de investigación en donde se requiere obtener resultados de experimentos hechos a partir de una hipótesis y según los

resultados -obtenidos se puede demostrar o no la existencia de la hipótesis.

Utilizando este método en el diseño se puede perder tiempo, dinero y esfuerzo. Ya que se tendría que esperar los resultados para saber si fue acertada la hipótesis planteada.

Thomas Alva Edison trabajo casi completamente con métodos experimentales en su intento de resolver la mejor manera de obtener una fuente de iluminación; investigó laboriosamente miles de fibras vegetales antes de encontrar un sistema de alumbrado eléctrico confiable.

A partir de estos experimentos en años recientes se han realizado estudios científicos y conocimientos avanzados acerca de este tema.

La desventaja de este método es:

Se ha dicho que en la milésima falla de uno de los proyectos experimentales de Thomas Alva Edison, un ayudante se desalentó y se quejó de no lograr progresos. Edison le contestó que habían hecho excelentes progresos porque ya conocían mil cosas que no servirían.

#### METODO AUXILIADO DEL DIBUJO

La diferencia que existe entre el método artesanal y el diseño mediante el dibujo, es la separación del método del tanteo del proceso de producción. Esto es, que las modificaciones del diseño se realizan sobre un "dibujo" a escala que representa el objeto a fabricar, recordemos que el artesano modifica o tantea durante el proceso de fabricación.

La separación entre concepción y elaboración del producto tiene importantes consecuencias:

a) La especificación de las dimensiones antes de la fabricación del producto hace posible dividir el trabajo de producción en diferentes partes, por lo que el trabajo se puede repartir entre varias personas. Se dice que esta división del trabajo es la fuerza y la debilidad de la sociedad industrial.

b) Inicialmente, la ventaja de dibujar antes de fabricar hizo posible la creación de elementos demasiado grandes para un único artesano. Tales como grandes edificios y barcos. Por esto, podemos considerar los dibujos a escala como un trabajo conjunto de partes aisladas del producto, con una imagen constantemente presente de él. Originalmente esto se registro en dimensiones físicas, recuerdos vagos, modelos a escala real y reglas

c) La división del trabajo hecha posible por los dibujos a escala, puede utilizarse para incrementar, no sólo el tamaño de los productos, sino también la productividad.

El resultado de este proceso dio lugar a invertir los papeles, trasladando toda la dificultad intelectual y de ingenio, a las personas encargadas de elaborar los dibujos. El diseño como profesión comienza su existencia.

La consecuencia de concentrar todos los aspectos geométricos de la fabricación en un dibujo nos da ciertas ventajas y desventajas que se detallan a continuación:

#### Ventajas:

- Mayor campo perceptual para manipular y concebir el diseño en conjunto.
- Menor costo en la alteración del diseño.
- Posibilidad de hacer cambios drásticos en diseño.
- Utilizando regla y compás rápidamente se imagina la trayectoria de las partes móviles.

#### Desventajas:

- Resulta frustrante hacer un replanteamiento antes de haber obtenido su diseño final.
- Se estudia cada diseño concreto en vez de comparar simultáneamente varias alternativas.
- La compatibilidad de un objeto con las situaciones concretas de su fabricación o utilización.
- Confiar de su memoria e imaginación para saber lo que puede o no puede hacer.
- El único juicio que tiene el diseñador para aprender sus fallos de su trabajo no es ni el mercado, ni la producción, sino los juicios de su jefe.
- El proyecto lo inicia una sola persona escogiendo escalas y situaciones que han de fijar el dibujo hasta que existan subproblemas o subsistemas se reparte el trabajo.

Puede existir esta pregunta: El mundo está lleno de elementos arquitectónicos y de ingeniería que demuestran los éxitos pasados del diseño mediante el dibujo, sin embargo, las situaciones que enfrenta el diseñador actualmente, requieren de una experiencia y del manejo de datos que difícilmente están contenidos en la cabeza de una sola persona. ¿Podrá este método seguirse usando exitosamente en estas circunstancias?

#### 3.1 INTRODUCCION

Todos los métodos de diseño tratan de hacer patente la manera de pensar del diseñador, ya que hasta los últimos años se mantenía en privado su actitud para resolver los problemas.

El proceso de diseño se ha explicado por medio de palabras, algunas veces mediante símbolos matemáticos y siempre, con un diagrama que representa las partes del problema y su relación entre ellas. La tendencia actual es convertir el diseño en un proceso más manejable para poderlo explicar a otras personas, que puedan seguirlo y contribuir con su experiencia y conocimientos a su mejoramiento.

A continuación se muestra una síntesis de la información recopilada de las estructuras generales de una metodología de diseño.

#### 3.2 ESTRUCTURAS GENERALES

Recordando el objetivo del diseño: "Es el unir a través de lo desconocido los recursos disponibles y la satisfacción de las necesidades humanas".

Siempre el punto de partida del proceso de diseño es un problema surgido de las necesidades humanas.

#### P R O B L E M A

El ser humano siempre se ha preocupado y motivado para trabajar en la solución de problemas que aquejan a su sociedad algunos de los problemas actuales más importantes son: alimentación, salud, habitación, población, ecología, educación, comunicación, fuentes de energía, recursos naturales, transportes, distracción, urbanismo, clima, muerte, armamentismo.

La culminación del proceso corresponde a la satisfacción de la necesidad que lo originó, lo cual significa la solución total o parcial de la situación problemática.

#### S O L U C I O N

Teniendo como fronteras el problema y la solución, se enmarca la región de actividades en las que el proceso de diseño se desarrollará

P

S

De ahora en adelante se explicaran de manera cronológica los pasos generales que se siguen durante el proceso de diseño.

Es una tendencia natural proponer de inmediato ideas para la solución del problema.

P

I D E A

S

Pero... Antes de desplegar cualquier intento de encontrar soluciones posibles con los medios disponibles para satisfacer una necesidad, se debe identificar y formular el problema. Es sorprendente cuán poderosa es la tentación de fijar en la mente, algún concepto falso que parece proporcionar una solución factible antes de que el problema real se comprenda totalmente, y tiempo después hacer enmendaduras en forma peligrosa a medida que las deficiencias en la solución comienzan a presentarse.

La definición del problema no lo resuelve por si misma, pero si contiene los elementos de información para su solución, hay que conocerlos y utilizarlos.

Por medio de la definición del problema se engloban todos los factores de información.

P

DEFINICION DEL PROBLEMA

I

S

Dentro del proceso de diseño el primer problema con el que se enfrenta el diseñador es el de descubrir cual es en realidad el problema a resolver.

Para reconocer el problema, se recomienda observar, experimentar, oír, sentir, preguntar, experimentar, ya que en la mayoría de los casos se deja al diseñador el investigar y descubrir la mejor manera de analizar el problema.

Muchos diseñadores sólo piensan en crear la idea que resuelva el problema pero al crearlas siempre surgen varias y distintas de éstas.



Aquí hay que decidirse por un tipo de solución ya que no es lo mismo una solución provisional o una solución definitiva, una solución puramente comercial, una solución que perdure con el tiempo, una solución técnicamente sofisticada o una solución sencilla o económica.

Con un planteamiento de objetivos se define mejor el tipo de solución que se quiera obtener para poder encauzar mejor todos los recursos.

P

DP

#### PLANTEAMIENTO DE OBJETIVOS

I

S

Cualquier problema puede ser descompuesto en sus elementos. Esta operación facilita el proceso porque tiende a descubrir los pequeños problemas particulares que se ocultan tras los subproblemas. Una vez resueltos los pequeños problemas particulares, de uno en uno se organizan de forma coherente a partir de todas las características funcionales de cada una de las partes

Una vez definido el problema hay que descomponerlo en sus elementos para conocerlo mejor.

P

DP

#### ELEMENTOS DEL PROBLEMA

PO

I

S

El análisis dentro del diseño es como una caja llena de valiosas herramientas las cuales ayudan a entender el comportamiento de los factores que intervienen en el problema. Las herramientas disponibles se pueden clasificar de la siguiente manera:

Herramientas Matemáticas: Aritmética, Geometría y Medición, Algebra, Trigonometría, Geometría Analítica, Cálculo Diferencial, Cálculo Integral, Ecuaciones Diferenciales, Cálculo Vectorial,

Análisis Dimensional, Teoría de los modelos, Método Numérico, Computadoras, Técnicas de Optimización.

Herramientas Materiales: Química, Metalurgia, Tecnología de Materiales, Herramientas Físicas, La mecánica (estática cinemática y dinámica), Resistencia de materiales, Procesos de fabricación, Teoría de máquinas, Termodinámica, Electricidad.

Herramientas varias: Economía, Psicología, Ciencias Sociales, Derecho.

Después de la descomposición del problema conviene recoger todos los datos necesarios para estudiar estos elementos, por lo que una recopilación de datos permitirá conocer el estado de recursos disponibles que existen en la actualidad para obtener mejores soluciones.

P

DP

EP

#### RECOPILACION DE DATOS

PO

I

S

En la actualidad la información técnica disponible para los ingenieros es prodigiosa y se aumenta diariamente. Esto se confirma ya que en una biblioteca o banco de información pueden existir miles de libros, cientos de publicaciones como revistas especializadas que se renuevan periódicamente, información comercial y numerosas patentes.

Luego de la recopilación de datos hará falta un análisis de estos, para obtener sugerencias sobre lo que debe o no debe hacer.

P

DP

EP

RD

### ANALISIS DE DATOS

PO

I

S

El análisis de los datos, exige la sustitución de la operación que al principio había sido definida como "idea" por otro tipo de operación que es definida como "creatividad" mientras la idea es algo que debería brindar la solución por arte de magia, la creatividad, antes de decidirse por una solución, considera todas las operaciones necesarias que se desprenden de análisis de datos.

P

DP

EP

RD

AD

PO

### CREATIVIDAD

S

La creatividad es el empeño o el esfuerzo que pone el ser humano en idear algo, ello presupone un entendimiento de las cosas y a partir de la experiencia, imaginación y de la habilidad propia se encuentran los medios para la solución.

El medio más importante para idear soluciones es la experiencia. Los conocimientos aprendidos por experiencia son los primeros que directamente producen resultados creativos.

También el leer, oír o especular para buscar una experiencia o conocimiento ayudan a la creatividad.

Los descubrimientos creativos ocurren más frecuentemente cuando se deja a la mente volar un tiempo y regresar con alguna idea que fue fabricada con la imaginación de esta manera podemos encontrar ideas que no sean producto de la experiencia. Si solamente se crearan de la experiencia las ideas, tendríamos un campo muy reducido, ya que si no hemos vivido tal experiencia será imposible desarrollar una idea.

La siguiente operación consiste en la creación de las distintas alternativas de solución que se pueden realizar con los recursos disponibles que se tienen.

P

DP

EP

RD

AD

PO

C

#### ALTERNATIVAS DE SOLUCION

S

Entre mayor número de alternativas, podemos obtener mayor número de posibilidad para encontrar la mejor solución.

Es ahora cuando el proyectista realizará una experimentación de los recursos y técnicas disponibles para realizar su proyecto. Muy a menudo los recursos son utilizados de una única forma o de muy pocas formas según la tradición, por lo que la experimentación permite descubrir nuevos usos de un material o de un instrumento.

P

DP

EP

RD

AD

PO

C

AS

## EXPERIMENTACION

S

Todavía no se ha hecho ningún dibujo, ningún boceto, nada que pueda definir la solución. Todavía no sabemos qué forma definitiva tendrá lo que hay que proyectar. Pero en cambio tenemos la seguridad de que el margen de posibles errores será muy reducido. Ahora podemos empezar a establecer relaciones entre los datos recogidos e intentar aglutinar los subproblemas y hacer un modelo para comprobar nuestra idea de solución.

P

DP

EP

RD

AD

PO

C

AS

E

## M O D E L O S

S

Este es el momento de llevar a cabo una verificación del modelo o de los modelos (puede ocurrir que las soluciones

posibles sean más de una).

Sobre la base de estos juicios se realiza un control del modelo para ver si es posible modificarlo; siempre que las observaciones posean un valor objetivo.

En base a todos estos datos se pueden empezar a preparar los dibujos constructivos a escala o a tamaño natural, con todas las medidas exactas y todas las indicaciones necesarias para la realización del prototipo.

P

DP

EP

RD

AD

PO

C

AS

E

M

#### VERIFICACION

S

Los dibujos constructivos tendrán que servir para comunicar a una persona que no esté al corriente de nuestros proyectos, toda la información útil para preparar un prototipo. Estos planos serán realizados de forma clara y legible, en cantidad suficiente para entender bien todos los detalles, y donde no lleguen los planos se hará un modelo al natural con materiales muy semejantes a los definitivos, con las mismas características, por lo que el realizador debe tener muy claro lo que se propone realizar.

P  
DP

EP

RD

AD

PO

C

AS

E

M

V

## COMUNICACION

S

### 4 FORMULACION DE UNA METODOLOGIA

#### 4.1 INTRODUCCION

El objetivo que se pretende alcanzar en este capítulo es el exponer de manera breve una metodología de diseño que pueda servir como guía en la preparación de una tesis que incluya el diseño y construcción de algún dispositivo que busca satisfacer una necesidad concreta.

La metodología de diseño que se formula está representada mediante un proceso de diseño, que a continuación se explica.

#### 4.2 PROCESO DE DISEÑO

A toda actividad que transcurre en un lapso de tiempo definido y que además evoluciona o se transforma progresivamente se le llama proceso.

El proceso de diseño se puede equiparar a un proceso industrial, que por medio de fases o pasos busca satisfacer una necesidad.

El proceso de diseño está formado de elementos que interactúan con un objetivo común. Esto es, todo proceso de diseño está integrado por objetos y actividades agrupados de tal manera que constituyan una unidad lógica y funcional. Cada elemento ó fase incluye distintos recursos tales como materiales, equipo, personal, información, conocimientos, etc. El proceso de diseño está rodeado normalmente por un ambiente de características físicas, sociales, políticas, económicas y técnicas que ejercen una gran influencia sobre él.

#### 4.3 CARACTERISTICAS DE LAS FASES DEL PROCESO DE DISEÑO

Las características de cada fase están dadas en función del tipo de necesidad que se quiera resolver.

El proceso de diseño será distinto si la necesidad es la de crear un sólo bien, como una máquina para una empresa determinada, pues aquí por ejemplo no intervienen las distribución ó la producción en serie. En cambio si el problema involucra la producción de relojes, el proceso de diseño abarca un mayor número de fases.

El considerar al proceso de diseño formado de tres períodos (el de planeación, el de realización y el de uso), es verlo desde un punto de vista muy general que agrupa cualquier proceso de diseño.

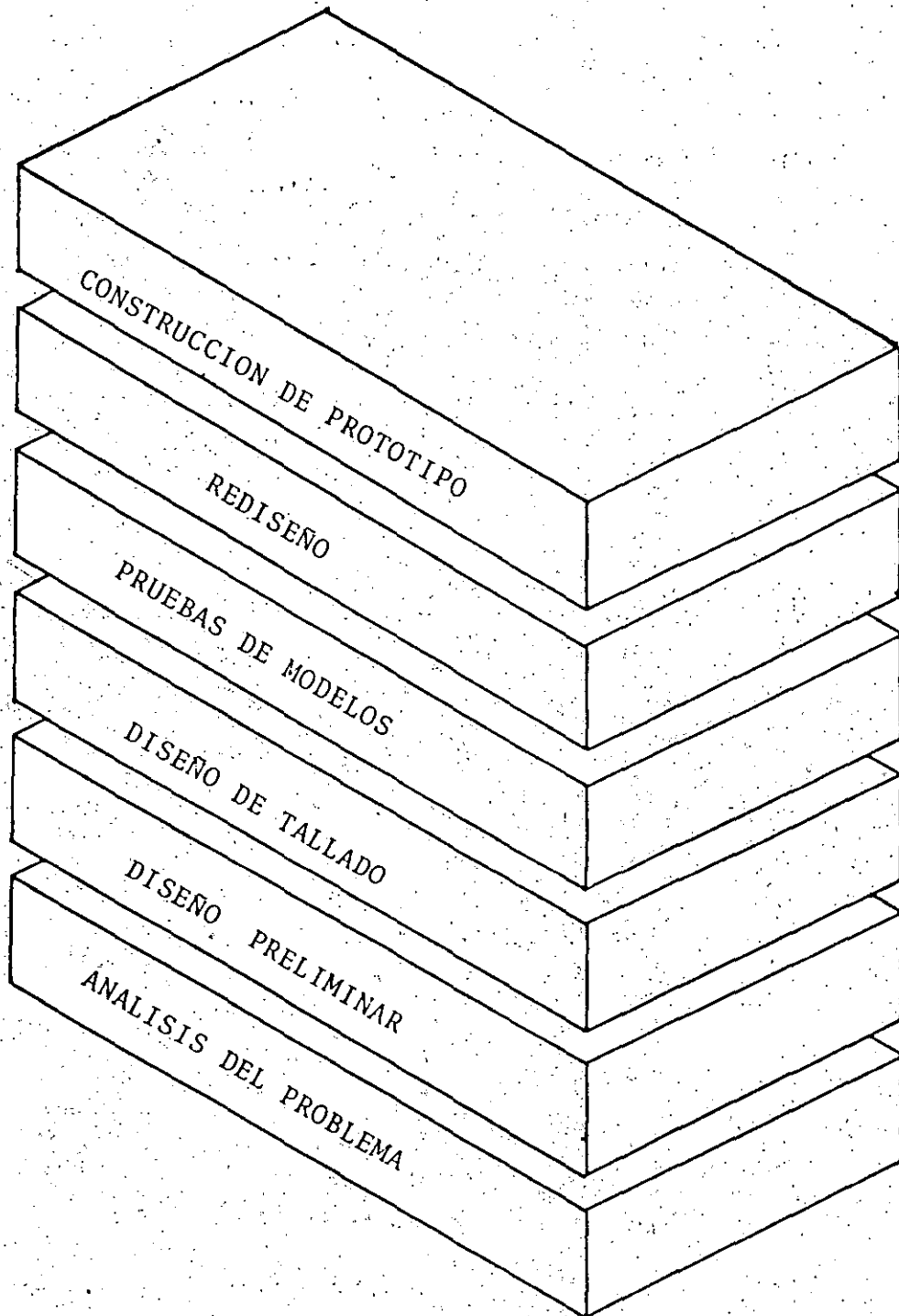
En el proceso de diseño se puede analizar la participación de dos distintas personalidades (el usuario y el diseñador). El usuario es el identificador o creador de la necesidad y también el que entrega parte de los recursos para llevar a cabo el proceso. El diseñador es quien, buscara satisfacer la necesidad del usuario analizando la información y organizando los recursos disponibles para obtener soluciones.

La planeación es el período inicial del proceso de diseño, durante el cual el usuario le comunica al diseñador toda la información de que se disponga sobre la necesidad que requiere satisfacer.

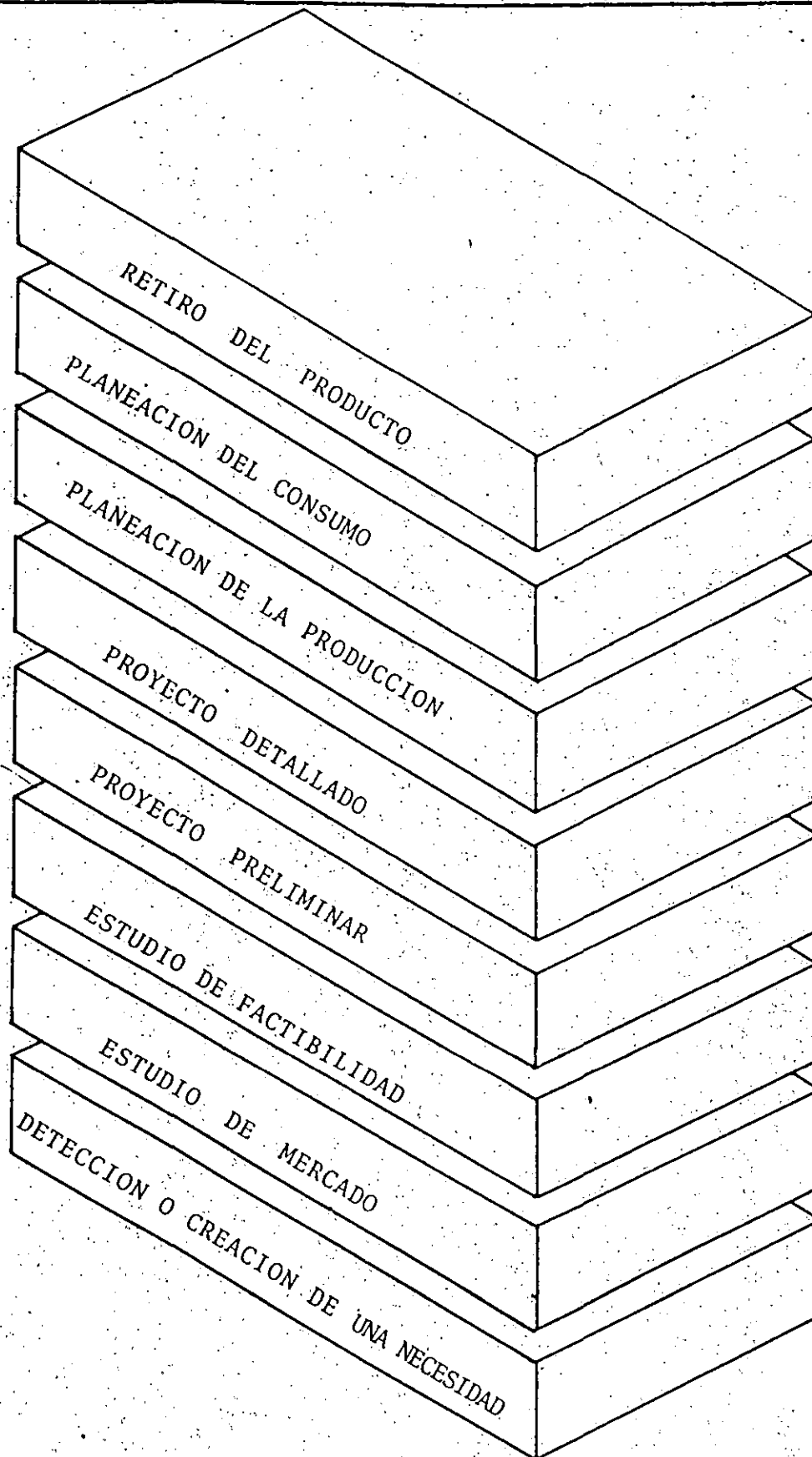
El diseñador tendrá que interpretar el significado de la información para poder realizar un plan de trabajo que le permita llegar de la mejor manera a la solución del problema. En este período las actividades que se presentan tienen una alta probabilidad de no terminarse inmediatamente, teniéndose que repetir el mismo trabajo varias veces hasta poder concluir con la fase. Esto quiere decir que el tener una sola entrevista con el usuario no implica el poder entender todas las necesidades que se tienen, hay que tener varias entrevistas y no solo en una oficina sino en el mismo lugar donde exista el problema. La información que se tiene disponible no es la suficiente para poder definir



DESARROLLO DE UN SOLO PRODUCTO



DESARROLLO DE UN PROYECTO EN SERIE



inmediatamente soluciones, se tienen que realizar varias actividades de las cuales algunas darán resultados exitosos y otras resultados negativos, por lo que el tipo de trabajo en este período requiere consumir pocos recursos económicos y grandes esfuerzos de trabajo intelectual que hacen muy pesada la actividad al inicio del proceso de diseño. Otra característica de este período es que el costo para realizar las actividades es muy poco en comparación con el resto del proceso, por lo que los errores al avanzar durante este período no tienen consecuencias graves si se detectan durante el mismo; con esta manera de planear el proyecto se está formando un equilibrio con todos los factores para poder terminar exitosamente el proceso.

El período de realización es principalmente cuando el diseñador tiene en sus manos el problema y la responsabilidad de resolverlo, en este período se tendrán que preparar todos los elementos de la solución para entregarlos funcionando en el siguiente período.

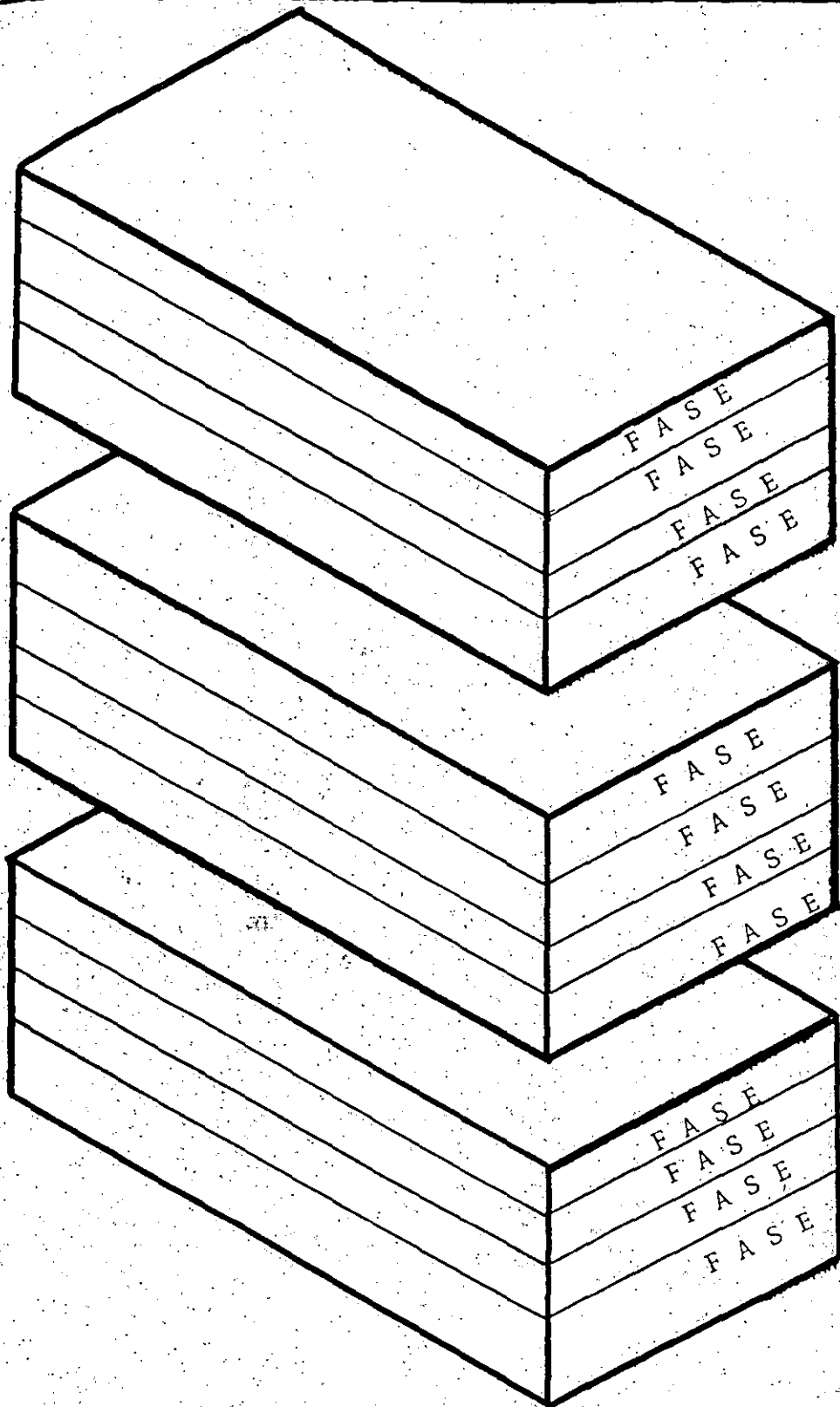
Durante el desarrollo del período de realización se tiene que reducir la posibilidad de cometer errores ya que estos progresivamente consumirían más recursos económicos y existirá menor tiempo para resolver el problema y consecuentemente se retrasara el paso al siguiente período.

El período de uso consiste de todas las actividades realizadas para operar y mantener la solución en condiciones óptimas de trabajo, incluyendo modificaciones o mejoras periódicas para poder extender su vida útil y satisfacer las nuevas necesidades que cambian con el tiempo. Principalmente este período es responsabilidad del usuario y puede surgir un nuevo proceso de diseño cuando el usuario capte una nueva necesidad.

El proceso de diseño no es solo la definición de las distintas fases, sino también la forma en la cual se debe de realizar cada fase, por lo que es importante comprender el significado de la linealidad e iteratividad dentro del mismo.

#### 4.4 PROCESO LINEAL Y PROCESO ITERATIVO DENTRO DEL PROCESO DE DISEÑO

El proceso de diseño se le puede comparar con un camino que hay que construir para atravesar una selva, este camino pretende unir al problema y la solución. Al pretender llegar a la solución que se localiza al final de la selva se pueden construir dos tipos de camino; el primero que sea una línea recta, que nos lleve inmediatamente a la solución, en la cual no se note ningún camino alternativo o un retroceso. El segundo camino lleno de curvas bajadas, caminos alternativos, retrocesos y donde se aprecie mayor trabajo y más tiempo en llegar a la solución.



PERIODO  
DE  
PLANEACION

PERIODO  
DE  
REALIZACION

PERIODO  
DE  
USO

PERIODOS DEL PROCESO DE DISEÑO

#### 4.4.1 PROCESO LINEAL

Al camino recto sin posibilidad de regreso y que aparenta ser el mejor camino a seguir, se asemeja al proceso lineal. Este tipo de proceso elimina las posibilidades de obtener un resultado exitoso, ya que no se tiene ningún medio de realimentación para conocer futuros resultados; la linealidad supone que todos los problemas críticos se pueden observar al comienzo del proceso, sin los riesgos de encontrarlos al final, donde los esfuerzos para solucionar los problemas inesperados son considerablemente más grandes que al inicio del proceso. La dificultad real para la creación de un proceso lineal es la predicción del comportamiento de las distintas partes de la solución que son desconocidas de un principio.

¡ES UN GRAVE ERROR PENSAR QUE EL DISEÑO SE PUEDA REALIZAR COMO UN PROCESO LINEAL!

#### 4.4.2 PROCESO ITERATIVO

Si al comenzar a caminar a través de la selva desconocida, se cuenta con un camino que permita analizar en que posición se está y poder regresar cuando se encuentre algún obstáculo insalvable, así como planear con anticipación posibles caminos alternativos, se tendrá mayor posibilidad de llegar al final de la selva.

El planear de esta forma significa dividir el camino en fases y cada fase en una serie de etapas. En cada una de éstas, se irán siguiendo los mismos pasos; como reconocer donde se está, hacia donde se quiere caminar, de cuantas formas se puede llegar, seguir los distintos caminos, escoger el mejor o crear uno nuevo, seleccionar el mejor y proseguir.

En cada fase que planeamos se irán repitiendo los mismos pasos de una manera iterativa.

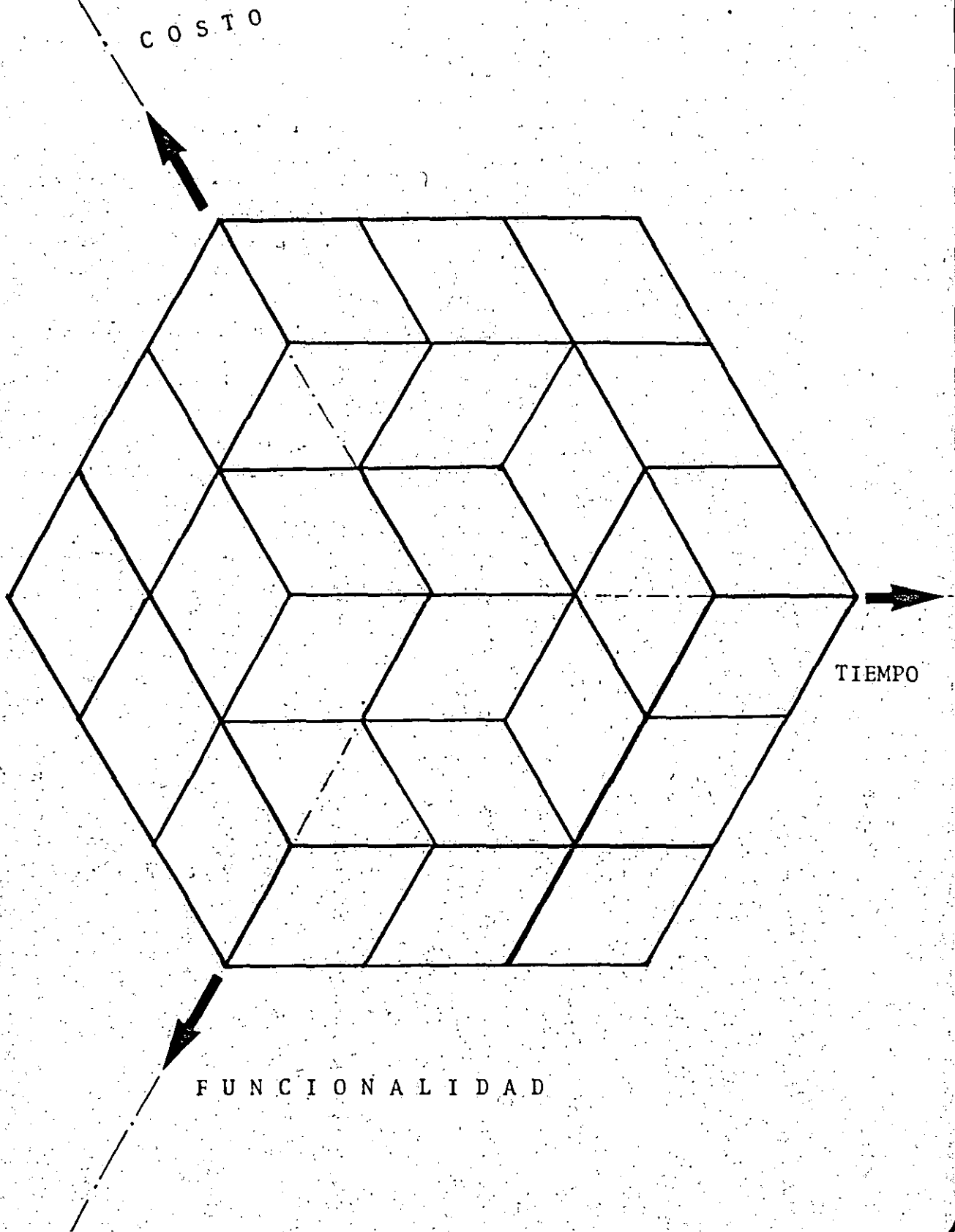
#### 4.5 DIMENSIONES DEL PROCESO DE DISEÑO

El trabajo durante todo el proceso de diseño se puede ubicar en un espacio tridimensional, que tiene dimensiones de funcionalidad, costo y tiempo.

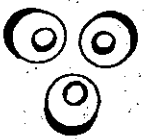
Las definiciones de estas dimensiones son las siguientes.

**Funcionalidad:** Contiene todos los atributos que tengan relación con la función que desempeña el objeto diseñado.

**Costo:** Contempla todos los factores económicos que intervienen en el diseño.



DIMENSIONES DEL PROCESO DE DISEÑO



Tiempo: Contempla todos los aspectos relacionados con el tiempo.

#### 4.6 ETAPAS DEL PROCESO DE DISEÑO

Cada fase se integra de varias actividades donde se trabaja para resolver los problemas que han surgido durante el proceso de diseño, cada problema es distinto de los demás, lo que hace pensar que se tendrá que resolver cada problema con una técnica diferente. Al introducir el concepto de etapa se pretende seguir un mismo principio para resolver cualquier tipo de problema. El proceso de diseño se podrá representar entonces por un conjunto de fases principales que estarán formadas por una serie de etapas.

Generalmente no se iniciará una etapa hasta que la precedente se ha complementado aun cuando en algunas ocasiones tengan que ser atendidos los detalles finales mientras la etapa siguiente está ya en proceso.

Las actividades que forman las etapas del proceso de diseño tienen los siguientes objetivos:

##### ANALISIS DE NECESIDADES

Conocer todos los deseos que se pretenden satisfacer durante el desarrollo de la etapa.

##### DEFINICION DE OBJETIVOS

Sintetizar la información recolectada del análisis de necesidades, declarando lo que ha de ser hecho, más que el cómo ha de hacerse.

##### ASENTAMIENTO DE ESPECIFICACIONES

Marcar el criterio que definirá cuando los objetivos de la etapa han sido alcanzados.

##### CREACION DE ALTERNATIVAS

Desarrollar todas las posibles ideas de solución.

##### ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

Reducir una larga lista de alternativas a una más corta, dejando solo aquellas cuyo desarrollo es posible.

##### SELECCION DE LA SOLUCION

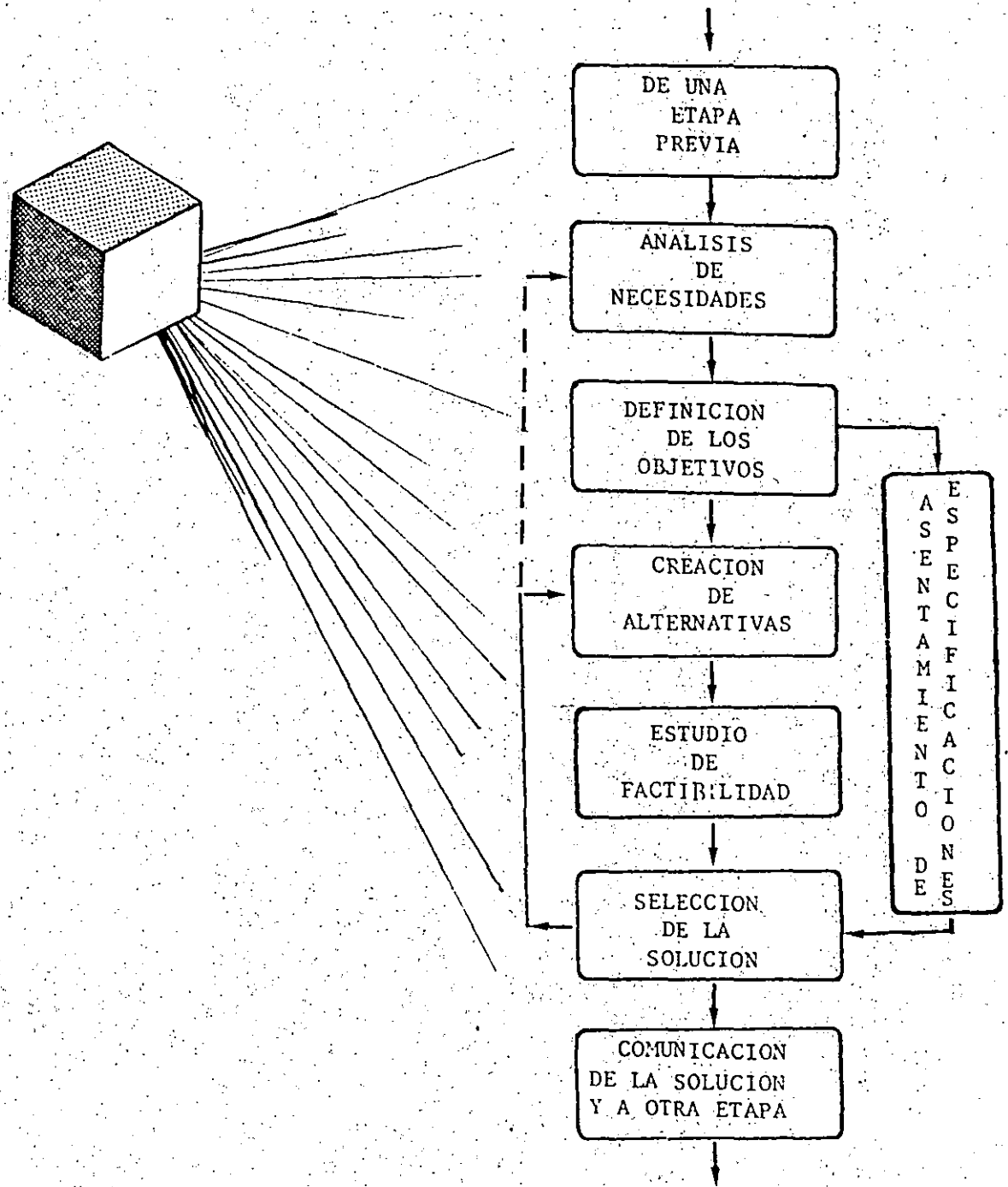
Escoger la mejor alternativa, que es elegida al satisfacer

en mayor grado los objetivos de la etapa.

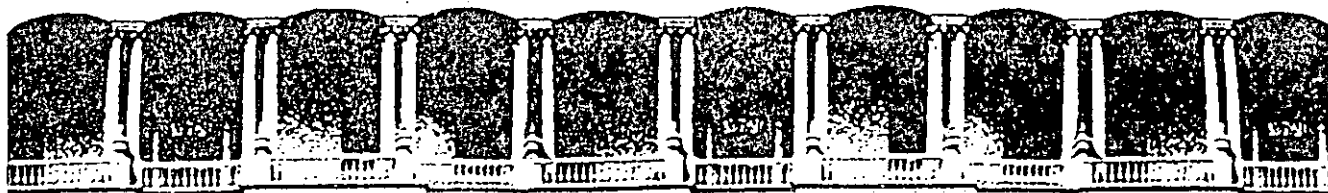
#### COMUNICACION DE LA SOLUCION

Entregar de manera efectiva el que, el como, el cuando y el cuanto al receptor que ejecutará la solución.





EXTRUCTURA DE UNA ETAPA



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**METODOS DE SOLUCION DE PROBLEMAS Y TOMA DE DECISIONES**

**ING. ADRIAN ESPINOSA BAUTISTA**

**PALACIO DE MINERIA**

## INTRODUCCION

En el caso de problemas en el diseño de máquinas, existe una metodología que auxilia y orienta para llegar a la solución de estos. El método de diseño tiene dentro de su proceso, particular para cada problema, una etapa de generación de opciones de solución. Es en esta etapa cuando se necesita hacer uso de la creatividad.

## CREATIVIDAD

**CREATIVIDAD:** Capacidad de producir cosas nuevas y valiosas.

La mayoría de las personas pasan la vida y se mueren sin haber desarrollado más del diez por ciento de sus capacidades. Una persona muy inteligente no tiene que ser la persona más creativa, aunque una muy creativa si puede ser muy inteligente. La creatividad es además de una cualidad, una actitud para resolver los problemas.

Se puede ser creativo en cualquier situación o aspecto de la vida, pero por lo general solo lo somos en determinados campos dependiendo de nuestros valores o actividades. Estos se clasifican en:

- La VERDAD (interés en conocer, entender las ciencias).
- La BELLEZA (interés en sentir, las bellas artes y la estética).
- La UTILIDAD (actuar sobre las cosas, la tecnología).
- La BONDAD (actuar sobre las personas, las relaciones humanas).

La creatividad se puede desarrollar por medio del juego como los niños, rompiendo el hábito que tenemos para realizar nuestras actividades, procurando vivir con menos formalidades, normas, etcétera.

Para llegar a soluciones creativas también existe una metodología similar a la del diseño.

- i. EL CUESTIONAMIENTO: Consiste en percibir algo como un problema. ej. James Watt observa los movimientos de la tapadera de vapor y descubre el principio de funcionamiento de la máquina de vapor.
- ii. EL ACOPIO DE DATOS: Procurarse de la información adecuada.
- ii. LA INCUBACIÓN: } Entendimiento, digestión inconsciente de las ideas.
- iii. LA ILUMINACIÓN: } Pensamiento lateral y pensamiento directo.
- iv. LA ELABORACIÓN: Llevar a cabo la solución del problema.
- v. LA COMUNICACIÓN: Darlo a conocer.

La personalidad creativa

CARACTERÍSTICAS  
COGNOSCITIVAS

Fineza de recepción: Da material para fineza de pensamiento, buen observador, concientizado.

Capacidad intuitiva: Captación completa, íntima de realidades complejas.

Imaginación: Elabora y remodela los materiales que entran a la psique por los sentidos, ligada a la realidad.

Capacidad crítica: Distingue entre la información y su fuente. Inteligente no necesariamente creativo.

Curiosidad intelectual: Apertura a la experiencia, flexibilidad de la mente, constante cuestionamiento.

CARACTERISTICAS  
AFECTIVAS

Soltura, libertad: Sin limitaciones.  
Pasión: Entusiasta, comprometido y luchador, energía vital, juventud.  
Audacia: Afrontar riesgos, rebeldia, descontento constructivo y valor.  
Profundidad: Profunda reflexión.  
Tenacidad: Constancia, esfuerzo, disciplina, trabajo arduo y lucha.  
Tolerancia a la frustración: Resistir, ambigüedad, y la indefinición, vivir en tensión.  
Capacidad de decisión: Moverse y definirse.

*Creatividad: integradora de la personalidad.*

La creatividad plastica: el cerebro y la mano creadora

Mano: reflejo del cerebro y cerebro reflejo de la mano.

En creatividad tambien son importantes los instrumentos, usar la tecnologia que se dispone. El trabajo manual, es la materialización de una idea, favorece la creatividad. Dibujo y artes plásticas, liberan, relajan, reequilibran. La mano tiene poder comunicador. La actividad manual es provechosa.

Como desarrollar la creatividad

Se puede desarrollar la creatividad, no es un don, sino una calidad humana. Vale la pena hacerlo por una vida productiva, interesante, plena y feliz.

Se tiene una influencia muy grande de:

EL MEDIO AMBIENTE:

Aspectos educativos en la infancia. El niño es creativo, se le debe educar para lograr una actitud creativa, tanto padres como maestros.

TECNICAS ESPECIFICAS:

- Estudio de modelos (personas creativas).
- Ejercicios de descripción.

# Aumento de la creatividad



- Detección de relaciones remotas.
- Descripción imaginaria de mejoras
- El psicodrama, sociodrama o role playing.
- Ejercicios para ver dificultad de percibir, educar y afinar la percepción.
- Ejercicios de transformación mental de las cosas.
- La lluvia de ideas || crítica
  - Problema o punto a tratar.
  - Designar moderador y registrar aportaciones a la vista de todos.
  - Producción de ideas.
  - Evaluación, crítica, viabilidad.
- La sinéctica, método para la estimulación de los fondos subconcientes para desarrollar la creatividad a través de la locura o de la poesía.
- Vivencia de un seminario de creatividad.

Facilitadores y obstáculos de la creación.

Unos han sabido educar la creatividad y otros la tienen atrofiada.

La creatividad se deriva de la herencia biológica en combinación dinámica con el medio ambiente, por lo tanto es importante conocer la integración con el medio y su influencia en 4 ordenes: físico, cognoscitivo, afectivo y sociocultural.

#### OBSTACULOS, BLOQUEOS

- a) De orden físico: Extremos en medio ambiente. muy tranquilo, hiperactivo.
- b) De orden cognoscitivo: Ambiente, prejuicios, dogmas, tradicionalismo, burocratismo, escepticismo crónico y rechazo sistemático.
- c) De orden afectivo: Inseguridad, límites auto impuestos, sentimientos vagos de culpa, hastio en el trabajo, presiones neuróticas.
- d) De orden sociocultural: Circulo social pasivo o perjudicial.

## FACILITADORES, IMPULSORES

- a) De orden físico: Alternar momentos de mucha estimulación con otros de calma. Ambiente relajante, contacto con la naturaleza. Tener un lugar propicio para el trabajo.
- b) De orden cognoscitivo: Padres cultos, creativos, abiertos y maestros similares.
- c) De orden afectivo: Espíritu de joven, seguro y consciente de sí mismo.
- d) De orden sociocultural: Vivir en sociedad inquieta, ambiciosa y creativa.

## Hábito v.s. Creatividad

El hombre es un ser de hábitos, permanecer en la rutina puede ser tan malo como no tener un orden y una disciplina para hacer nuestras actividades, existe sin embargo una comparación entre la creatividad y el hábito.

*El hábito es la repetición, la creatividad es cambio.*

*El hábito es lo conocido, la creatividad es lo nuevo.*

*El hábito es la seguridad, la creatividad es el riesgo.*

*El hábito es lo fácil, la creatividad es lo difícil.*

*El hábito es la inercia, la creatividad es el esfuerzo.*

## GENERACION DE OPCIONES DE SOLUCION

### Método de lluvia de ideas.

Es notable la técnica de lluvia o tormenta de ideas. En ésta se reúnen seis o más personas con el objeto de generar soluciones para un problema. El director el grupo describe el problema, y los participantes comienzan a sugerirle con ideas que va anotando en un pizarron. El objetivo es acumular muchas ideas, creando una atmósfera que incite a cada uno de los asistentes a aportar todas las soluciones que le vengan a la mente, por absurdas que le puedan parecer en ese momento.

Se penalizan las respuestas que tienden a ridiculizar o que



en alguna forma son negativas. Durante la sesión no se hace intento alguno para evaluar las ideas; esto valdrá más adelante. Después de obtener experiencia con esta técnica, un grupo puede lograr una afluencia muy grande de ideas que se transforma en un número y una variedad impresionantes de soluciones, lo que a menudo ocurre en 15 minutos o en menos tiempo. Las personas que participan en sesiones de lluvia de ideas pueden tener o no conocimientos sobre la materia, de hecho es deseable que no tengan mucha relación pues esto las libera de restricciones propias de estos conocimientos. El tiempo de duración debe fijarse entre 15 y 30 minutos. Lo importante es la cantidad, no la calidad de las ideas.

## TOMA DE DECISIONES

### Aspectos de comportamiento en toma de decisiones

Hay 5 aspectos con los que hay que enfrentarse al tomar una decisión:

- Adherencia inconflictiva.- Decidir continuar con una acción e ignorar la información sobre los riesgos de pérdidas.
- Cambio no conflictivo.- Asumir, no críticamente, que otra acción o curso es fuertemente recomendado.
- Evasión defensiva.- Evadir el conflicto aplasándolo, delegando la responsabilidad.
- Hiper vigilancia.- Buscar frenéticamente una solución inmediata al problema.
- Vigilancia.- Buscar esmeradamente la información relevante asumida sin prejuicios y analizarla cuidadosamente antes de tomar la decisión.

Solo el último es recomendable.

Ingredientes básicos para la toma de una decisión:

Ingredientes Básicos	Sustituto
Hechos	Información
Conocimiento	Consejo
Experiencia	Experimentación

Análisis

Juicio

Intuición

Ninguno

Hechos: Posibles preferencias, prejuicios, relevancia, identificar el hecho real, acciones de subordinados, opinión personal en interpretación.

Conocimiento: Se base en los hechos, los consejos son bases para la decisión final, depende de uno.

Experiencia: No necesariamente propia, dificultad de registrarla, apoyarse y apoyar la comunicación con departamentos y gente de experiencia.

Análisis: Poner hechos, conocimiento y experiencia juntos y hacer análisis. Si no hay tiempo entonces intuición.

Juicio: Más importante aspecto, deseado, basado en proceso mental de las personas.

Una decisión conduce a una acción. Una situación que requiere una acción tiene cuatro aspectos:

Acción

- Futuro
- Actual
- Debe
- Podría

Teoría de decisión.

Elementos de un modelo de toma de decisiones:

- 1.- Cursos alternativos de acción son denotados por  $a_1, a_2, \dots, a_n$ .
- 2.- Estados de la naturaleza, medio ambiente, condiciones fuera de control, son denotados por  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ .
- 3.- Salida es el resultado de una combinación de acciones y estados de la naturaleza.
- 4.- Objetivo es el estado que, quien toma la decisión desea alcanzar.
- 5.- Utilidad es la medida de satisfacción o valor asociado a la salida.
- 6.- Estado de conocimiento es el grado de conocimiento asociado al estado de la naturaleza. Es expresado en términos de probabilidad.

MATRIZ DE DECISIONES:

Una vez que se han generado las diferentes opciones de solución viene la evaluación y selección de la mejor opción. Esto es posible lograrlo a través de la matriz de decisiones.

En esta se asignan pesos a diferentes criterios que van a influir en el diseño, los valores que se asignen dependen de la importancia que juegue el criterio en el diseño. La suma de los valores debe sumar 1. Algunos de los criterios que se establecen como importantes son los siguientes:

- Costo de materiales
- Costo de fabricación
- Peso
- Mantenimiento requerido
- Durabilidad
- Confiabilidad
- etcétera.

Se le asignan calificaciones entre 0 y 10 a cada una de las opciones en cada una de las columnas de criterio, estas calificaciones se asignarán según cumplan o no con los objetivos.

- 10 Si la opción cumple satisfactoriamente con todos los objetivos.
- 9 Si la opción cumple los objetivos importantes.
- 7.5 Si la opción cumple con la mayoría de los objetivos.
- 5 Si cumple medianamente con los objetivos.
- 4 Si cumple con la menor parte de los objetivos.
- 2.5 Si cumple en forma mínims con los objetivos.
- 0 Si no cumple con ninguno de los objetivos.

De alguna forma la asignación de los valores de los criterios es subjetiva, sin embargo se van a evaluar con la misma subjetividad

todas las opciones. Una vez que se han calificado las opciones se obtiene el producto del valor del criterio por la calificación, este producto se sumará para cada opción y se obtendrá un valor que por comparación nos dirá cual es la mejor.

Ejemplo: Matriz de decisiones para seleccionar la mejor opción de solución para la articulación de una prótesis.

MATRIZ DE DECISIONES  
ARTICULACION

OPCIONES, ARTICULACION Y CRITERIOS	# FASRI/.13	PESO /.13	# MATER/.10	DURABIL/.09	MANTENI/.07	CONFIAB/.10	PRECISI/.07	P. COMER/.09	FUNCION/.09	HIGIENE/.13	1
UNION CARDAN	50 /6.5	50 /6.5	90 / 9	100 / 9	50 /3.5	90 / 9	100 / 7	90 /8.1	75 /6.8	25 /3.3	62.10
RESORTE EN "L"	50 /6.5	50 /6.5	75 /7.5	50 /4.5	50 /2.5	50 / 9	90 /6.3	100 / 9	50 /4.5	25 /3.3	54.05
ARTICULACION DE ESFERA	25 /3.3	50 /6.5	75 /7.5	90 /8.1	75 /5.3	90 / 9	25 /1.8	25 /2.3	90 /8.1	50 /6.5	54.95
MATERIAL RESILIENTE	90 /11.7	100 / 13	50 / 5	75 /6.8	100 / 7	100 / 10	100 / 7	75 /6.8	90 /8.1	50 /6.5	70.10
COMBINACION ARTICULACION-RESORTES	25 /3.3	25 /3.3	75 /7.5	90 /8.1	50 /2.5	90 / 9	90 /6.3	75 /6.8	90 /8.1	25 /3.3	55.75
PLEJES	90 /11.7	90 /11.7	90 / 9	75 /6.8	90 /6.3	75 /7.5	90 /6.3	100 / 9	25 /2.3	75 /9.8	68.55
RESORTES A TORSION Y ARTICULACION	50 /6.5	75 /3.8	75 /7.5	90 /8.1	75 /5.3	90 / 9	75 /5.3	75 /6.8	90 /8.1	75 /3.8	59.45

CALIFICACION DE ALTERNATIVAS

Porcentaje	Descripcion
100	Completa satisfaccion en todos los aspectos.
90	Satisfaccion en los objetivos importantes.
75	Considerable satisfaccion.
50	Satisfaccion moderada.
25	Satisfaccion menor.
10	Satisfaccion minima.
0	Nada de satisfaccion.

TECNICA DE JOHNSON

- 1.- Decidir sobre los atributos más importantes del diseño.
- 2.- Se hacen estimados de factores de atributos para cada alternativa.
- 3.- Una de las alternativas es seleccionada como referencia y los factores son normalizados respecto a la referencia (usualmente el diseño del que se conoce más es usado como referencia).

$$\text{Proporción del atributo comparado (P.C.)} = \frac{\text{Factor de atributo}}{\text{Factor de atributo para el diseño de referencia.}}$$

Ejemplo:

	Alternativa de diseño			
	A	B	C	D
Factor de desgaste	350	220	250	415
Proporción de comparación	1.25	1.0	1.0	0.75

Proporción (+) ó (-)

Elaboración de matriz

- A.- Obtener las proporciones de comparación de cada atributo.
- B.- Definir cuales son (+) o (-), si la matriz será positiva, se usarán los recíprocos de las proporciones de signo contrario.

Ejemplo:

	Alternativa de diseño			
	A	B	C	D
Características de movimiento	Excelente	Bueno	Bueno	Regular
	1.25	1.0	1.0	0.75

C.- Dar factor de peso a cada atributo (F.P.)

Factor	Descripción
10	Extrema importancia
8-9	Muy alta importancia
6-7	Sobre la mitad de importancia
5	Mitad o moderada importancia
3-4	Menor importancia
1-2	Poca importancia
0	Ninguna importancia

Ejemplo:

Alternativa de diseño	Desgaste PC x FP	Costo	Característica de movimiento	Total
A	$1.4 \times 8 = 11.2$	$.92 \times 10 = 9.2$	$0.8 \times 4 = 3.2$	23.6
B	$0.8 \times 8 = 7.0$	$.82 \times 10 = 8.2$	$1.0 \times 4 = 4.0$	19.2
C	$1.0 \times 8 = 8.0$	$1.0 \times 10 = 10$	$1.0 \times 4 = 4.0$	22.0
D	$1.66 \times 8 = 13.3$	$1.7 \times 10 = 17$	$1.33 \times 4 = 5.3$	35.6

De esta matriz y por comparación al igual que en la técnica de matriz de decisiones se ve que la alternativa D es la mejor.

Walt Disney un ejemplo de creatividad

Las empresas continuamente deben estar en constante actualización, un ejemplo de esto es Walt Disney en su manejo del personal, demostrando con esto que la creatividad es muy importante en cualquier tipo de actividad.

CONCLUSION

El Centro de Diseño tiene como uno de los objetivos, resolver los problemas de la industria a través del diseño de máquinas, aunque existe un método de diseño, cada problema se trata de forma diferente, en cada uno se aprenden nuevas cosas. cada proyecto puede tomar desde dos meses a dos años, en cada uno se revelan conocimientos, técnicas, actitudes y aptitudes nuevas.

## INDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> . . . . .	2
<b>CREATIVIDAD</b> . . . . .	2
<b>VALORES EN LOS QUE SE ES CREATIVO</b> . . . . .	2
<b>METODOLOGÍA DE LA CREATIVIDAD</b> . . . . .	2
<b>LA PERSONALIDAD CREATIVA</b> . . . . .	3
<b>CARACTERÍSTICAS COGNOSCITIVAS</b> . . . . .	3
<b>CARACTERÍSTICAS AFECTIVAS</b> . . . . .	3
<b>¿COMO DESARROLLAR LA CREATIVIDAD?</b> . . . . .	4
<b>FACILITADORES Y OBSTÁCULOS DE LA CREACIÓN</b> . . . . .	5
<b>HÁBITO V.S. CREATIVIDAD</b> . . . . .	6
<b>GENERACIÓN DE OPCIONES DE SOLUCIÓN</b> . . . . .	6
<b>TOMA DE DECISIONES</b> . . . . .	6
<b>INGREDIENTES BÁSICOS PARA LA TOMA DE UNA DECISIÓN</b> . . . . .	7
<b>TÉCNICAS PARA TOMA DE DECISIONES</b> . . . . .	7
<b>MATRIZ DE DECISIONES:</b> . . . . .	7
<b>TÉCNICA DE JOHNSON</b> . . . . .	8
<b>EMPRESAS QUE MUESTRAN CREATIVIDAD EN SU MANEJO DEL NEGOCIO</b>	10
<b>CONCLUSIÓN</b> . . . . .	10



## **APUNTES DEL TEMA MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE PROBLEMAS Y TOMA DE DECISIONES**

### **INTRODUCCIÓN**

En el caso de problemas de diseño de máquinas, existe una metodología que auxilia y orienta para llegar a la solución de estos.

El método de diseño tiene dentro de su proceso, particular para cada problema, una etapa de generación de opciones de solución. Es en esta etapa cuando se necesita hacer uso de la creatividad.

### **CREATIVIDAD**

**CREATIVIDAD:** Capacidad de producir cosas nuevas y valiosas.

La mayoría de las personas pasan la vida y se mueren sin haber desarrollado más del diez por ciento de sus capacidades. Una persona muy inteligente no tiene que ser la persona más creativa, aunque una muy creativa si puede ser muy inteligente. La creatividad es además de una cualidad, una actitud para resolver los problemas.

### **VALORES EN LOS QUE SE ES CREATIVO**

Se puede ser creativo en cualquier situación o aspecto de la vida, pero por lo general solo lo somos en determinados campos dependiendo de nuestros valores o actividades. Estos se clasifican en:

- La **VERDAD** (interés en conocer, entender las ciencias).
- La **BELLEZA** (interés en sentir, las bellas artes y la estética).
- La **UTILIDAD** (actuar sobre las cosas, la tecnología).
- La **BONDAD** (actuar sobre las personas, las relaciones humanas).

La creatividad se puede desarrollar por medio del juego como los niños, rompiendo el hábito que tenemos para realizar nuestras actividades, procurando vivir con menos formalidades, normas, etcétera. Los adultos no deberían avergonzarse de jugar como niños, al contrario, deberían avergonzarse de no jugar.

### **METODOLOGÍA DE LA CREATIVIDAD**

Para llegar a soluciones creativas también existe una metodología similar a la del diseño.

- i. **EL CUESTIONAMIENTO:** Consiste en percibir algo como un

problema. ej. James Watt observa los movimientos de la tapadera de vapor y descubre el principio de funcionamiento de la máquina de vapor.

- ii. EL ACOPIO DE DATOS: Procurarse de la información adecuada.
- ii. LA INCUBACIÓN: Entendimiento, digestión inconsciente de las ideas.
- iii. LA ILUMINACIÓN: Pensamiento lateral y pensamiento directo.
- iv. LA ELABORACIÓN: Llevar a cabo la solución del problema.
- v. LA COMUNICACIÓN: Darlo a conocer.

#### LA PERSONALIDAD CREATIVA

Fineza de recepción: Da material para fineza de pensamiento, buen observador, concientizado.

Capacidad intuitiva: Captación completa, íntima de realidades complejas.

Imaginación: Elabora y remodela los materiales que entran a la psique por los sentidos, ligada a la realidad.

#### CARACTERÍSTICAS COGNOSCITIVAS

- Capacidad crítica: Distingue entre la información y su fuente. Inteligente no necesariamente creativo.
- Curiosidad intelectual: Apertura a la experiencia, flexibilidad de la mente, constante cuestionamiento.
- Soltura, libertad: Sin limitaciones.
- Pasión: Entusiasta, comprometido y luchador, energía vital, juventud.
- Audacia: Afrontar riesgos, rebeldía, descontento constructivo y valor.

#### CARACTERÍSTICAS AFECTIVAS

- Profundidad: Profunda reflexión.
- Tenacidad: Constancia, esfuerzo, disciplina, trabajo arduo y lucha.

Tolerancia a la frustración:	Resistir, ambigüedad, y la indefinición, vivir en tensión.
Capacidad de decisión:	Moverse y definirse.
Creatividad:	Integradora de la personalidad.
La creatividad plástica:	El cerebro y la mano creadora
Mano:	Reflejo del cerebro y cerebro reflejo de la mano.

En la creatividad también son importantes los instrumentos, usar la tecnología que se dispone. El trabajo manual, es la materialización de una idea, favorece la creatividad. Dibujo y artes plásticas, liberan, relajan, reequilibran. La mano tiene poder comunicador. La actividad manual es provechosa.

### ¿COMO DESARROLLAR LA CREATIVIDAD?

Se puede desarrollar la creatividad, no es un don, sino una calidad humana. Vale la pena hacerlo por una vida productiva, interesante, plena y feliz.

Se tiene una influencia muy grande de:

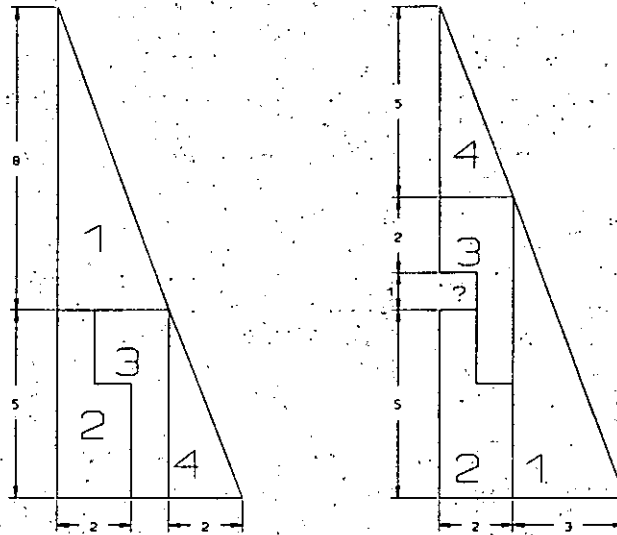
#### EL MEDIO AMBIENTE:

- Aspectos educativos en la infancia. El niño es creativo, se le debe educar para lograr una actitud creativa, tanto padres como maestros.

#### TÉCNICAS ESPECÍFICAS:

- Estudio de modelos (personas creativas).
- Ejercicios de descripción.
- Detección de relaciones remotas.
- Descripción imaginaria de mejoras
- El psicodrama, sociodrama o rol playing.
- Ejercicios para ver dificultad de percibir, educar y afinar la percepción.
- Ejercicios de transformación mental de las cosas.
- La lluvia de ideas
- Problema o punto a tratar.
- Designar moderador y registrar aportaciones a la vista de todos.
- Producción de ideas.
- Evaluación, crítica, viabilidad.
- La sinéctica, método para la estimulación de los fondos subconscientes para desarrollar la creatividad a través de la locura o de la poesía.
- Vivencia de un seminario de creatividad.

Problema:



¿ Donde está el cuadro que falta?

#### FACILITADORES Y OBSTÁCULOS DE LA CREACIÓN

Unos han sabido educar la creatividad y otros la tienen atrofiada. La creatividad se deriva de la herencia biológica en combinación dinámica con el medio ambiente, por lo tanto es importante conocer la integración con el medio y su influencia en 4 ordenes: físico, cognoscitivo, afectivo y sociocultural.

#### OBSTÁCULOS, BLOQUEOS

- De orden físico: Extremos en medio ambiente. muy tranquilo, hiperactivo.
- De orden cognoscitivo: Ambiente, prejuicios, dogmas, tradicionalismo, burocratismo, escépticismo crónico y rechazo sistemático.
- De orden afectivo: Inseguridad, límites auto impuestos, sentimientos vagos de culpa, hastío en el trabajo, presiones neuróticas.
- De orden sociocultural: Círculo social pasivo o perjudicial.

#### FACILITADORES, IMPULSORES

- De orden físico: Alternar momentos de mucha estimulación con otros de calma. Ambiente relajante, contacto con la naturaleza. Tener un lugar propicio para el trabajo.
- De orden cognoscitivo: Padres cultos, creativos, abiertos y maestros similares.
- De orden afectivo: Espíritu de joven, seguro y consciente de

- si mismo.
- d) De orden sociocultural: Vivir en sociedad inquieta, ambiciosa y creativa.

### **HÁBITO V.S. CREATIVIDAD**

El hombre es un ser de hábitos, permanecer en la rutina puede ser tan malo como no tener un orden y una disciplina para hacer nuestras actividades, existe sin embargo una comparación entre la creatividad y el hábito.

El hábito es la repetición, la creatividad es cambio.  
El hábito es lo conocido, la creatividad es lo nuevo.  
El hábito es la seguridad, la creatividad es el riesgo.  
El hábito es lo fácil, la creatividad es lo difícil.  
El hábito es la inercia, la creatividad es el esfuerzo.

### **GENERACIÓN DE OPCIONES DE SOLUCIÓN**

Método de lluvia de ideas.

Es notable la técnica de lluvia o tormenta de ideas. En esta se reúnen seis o más personas con el objeto de generar soluciones para un problema. El director del grupo describe el problema, y los participantes comienzan a sugerirle con ideas que va anotando en un pizarrón. El objetivo es acumular muchas ideas, creando una atmósfera que incite a cada uno de los asistentes a aportar todas las soluciones que le vengan a la mente, por absurdas que le puedan parecer en ese momento.

Se penalizan las respuestas que tienden a ridiculizar o que en alguna forma son negativas. Durante la sesión no se hace intento alguno para evaluar las ideas; esto vendrá más adelante. Después de obtener experiencia con esta técnica, un grupo puede lograr una afluencia muy grande de ideas que se transforma en un número y una variedad impresionantes de soluciones, lo que a menudo ocurre en 15 minutos. o en menos tiempo. Las personas que participan en sesiones de lluvia de ideas pueden tener o no conocimientos sobre la materia, de hecho es deseable que no tengan mucha relación pues esto las libera de restricciones propias de estos conocimientos. El tiempo de duración debe fijarse entre 15 y 30 minutos. Lo importante es la cantidad, no la calidad de las ideas.

### **TOMA DE DECISIONES**

Aspectos de comportamiento en toma de decisiones. Hay 5 aspectos con los que hay que enfrentarse al tomar una decisión:

- Adherencia inconflictiva. Decidir continuar con una acción e ignorar la información sobre los riesgos de pérdidas.
- Cambio no conflictivo. Asumir, no críticamente, que otra acción o curso es fuertemente recomendado.
- Evasión defensiva.- Evadir el conflicto aplastándolo, delegando la responsabilidad.
- Hipervigilancia. Buscar frenéticamente una solución inmediata al problema.
- Vigilancia. Buscar esmeradamente la información relevante asumida sin prejuicios y analizarla cuidadosamente antes de tomar la decisión.

Solo el último es recomendable.

### INGREDIENTES BÁSICOS PARA LA TOMA DE UNA DECISIÓN

<u>Ingredientes</u>	<u>Básicos</u>	<u>Sustituto</u>
	Hechos	Información
	Conocimiento	Consejo
	Experiencia	Experimentación
	Análisis	Intuición
	Juicio	Ninguno

**Hechos:** Posibles preferencias, prejuicios, relevancia, identificar el hecho real, acciones de subordinados, opinión personal en interpretación.

**Conocimiento:** Se base en los hechos, los consejos son bases para la decisión final, depende de uno.

**Experiencia:** No necesariamente propia, dificultad de registrarla, apoyarse y apoyar la comunicación con departamentos y gente de experiencia.

**Análisis:** Poner hechos, conocimiento y experiencia juntos y hacer análisis. Si no hay tiempo entonces intuición.

**Juicio:** Más importante aspecto, deseado, basado en proceso mental de las personas.

Una decisión conduce a una acción.

### TÉCNICAS PARA TOMA DE DECISIONES

#### MATRIZ DE DECISIONES:

Una vez que se han generado las diferentes opciones de solución viene la evaluación y selección de la mejor opción. Esto es posible lograrlo a través de la matriz de decisiones.

En esta se asignan pesos a diferentes criterios que van a influir en el diseño, los valores que se asignen dependen de la importancia que juegue el criterio en el diseño. La suma de los valores debe sumar

1. Algunos de los criterios que se establecen como importantes son los siguientes:

- Costo de materiales
- Costo de fabricación
- Peso
- Mantenimiento requerido
- Durabilidad
- Confiabilidad
- etcétera.

Se le asignan calificaciones entre 0 y 10 a cada una de las opciones en cada una de las columnas de criterio, estas calificaciones se asignarán según cumplan o no con los objetivos.

- 10 Si la opción cumple satisfactoriamente con todos los objetivos.
- 9 Si la opción cumple los objetivos importantes.
- 7.5 Si la opción cumple con la mayoría de los objetivos.
- 5 Si cumple medianamente con los objetivos.
- 4 Si cumple con la menor parte de los objetivos.
- 2.5 Si cumple en forma mínimos con los objetivos.
- 0 Si no cumple con ninguno de los objetivos.

De alguna forma la asignación de los valores de los criterios es subjetiva, sin embargo se van a evaluar con la misma subjetividad todas las opciones. Una vez que se han calificado las opciones se obtiene el producto del valor del criterio por la calificación, este producto se suma para cada opción y se obtendrá un valor que por comparación nos dirá cual es la mejor.

Ejemplo: Matriz de decisiones para seleccionar la mejor opción de solución para la articulación de una prótesis.

#### TÉCNICA DE JOHNSON

- 1.- Decidir sobre los atributos más importantes del diseño.
- 2.- Se hacen estimados de factores de atributos para cada alternativa.
- 3.- Una de las alternativas es seleccionada como referencia y los factores son normalizados respecto a la referencia (usualmente el diseño del que se conoce más es usado como referencia).

$$\text{Proporción de Comparación (P.C.)} = \frac{\text{Factor del diseño}}{\text{Diseño de referencia.}}$$

Ejemplo:

Alternativas de Diseño				
	A	B	C	D
Factor de desgaste	350	220	250	415
Proporción de Comparación	1.59	1.0	1.14	1.89
<b>Proporción (-)</b>	<b>0.63</b>	<b>1.0</b>	<b>0.88</b>	<b>0.53</b>

Alternativas de decisión				
	A	B	C	D
Características de movimiento	Excelente	Bueno	Bueno	Regular
Factor de comparación	1.25	1.0	1.0	0.75

Alternativas de decisión				
	A	B	C	D
Costo	15,500,000	17,000,000	13,000,000	9,000,000
F.C.	0.91	1.0	0.76	0.53
<b>Proporción (-)</b>	<b>1.10</b>	<b>1.0</b>	<b>1.32</b>	<b>1.89</b>

Diseño de referencia: B

#### Elaboración de matriz

- A.- Obtener las proporciones de comparación de cada atributo.
- B.- Definir cuales son (+) o (-); si la matriz ser positiva, se usarán los recíprocos de las proporciones de signo contrario.
- C.- Dar factor de peso a cada atributo (F.P.)



Factor	Descripción
10	Extrema importancia
8-9	Muy alta importancia
6-7	Sobre la mitad de la importancia
5	Mitad o moderada importancia
3-4	Menor importancia
1-2	Poca importancia
0	Ninguna importancia

Alternativas de Diseño	Desgaste	Movimiento	Costo	Total
A	$0.63 \times 7 = 4.41$	$1.25 \times 10 = 12.5$	$1.10 \times 8 = 8.80$	25.71
B	$1.0 \times 7 = 7.0$	$1.0 \times 10 = 10$	$1.0 \times 8 = 8.0$	25.00
C	$0.88 \times 7 = 6.16$	$1.0 \times 10 = 10$	$1.32 \times 8 = 10.56$	26.72
D	$0.53 \times 7 = 3.71$	$0.75 \times 10 = 7.5$	$1.89 \times 8 = 15.12$	26.33

De esta matriz y por comparación al igual que en la técnica de matriz de decisiones se ve que la alternativa C es la mejor.

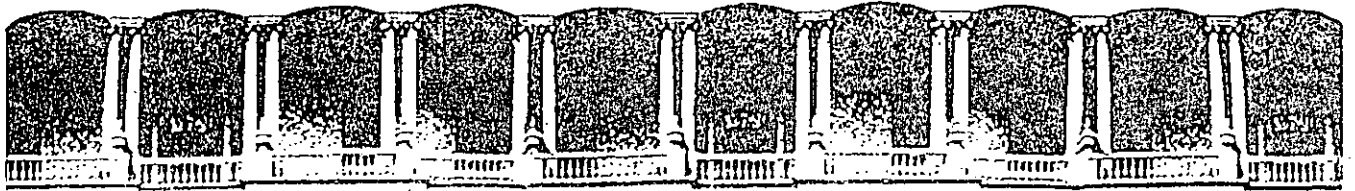
#### EMPRESAS QUE MUESTRAN CREATIVIDAD EN SU MANEJO DEL NEGOCIO

Walt Disney un ejemplo de creatividad

Las empresas continuamente deben estar en constante actualización, un ejemplo de esto es Walt Disney en su manejo del personal, demostrando con esto que la creatividad es muy importante en cualquier tipo de actividad.

#### CONCLUSIÓN

El Centro de Diseño tiene como uno de los objetivos, resolver los problemas de la industria a través del diseño de máquinas, aunque existe un método de diseño, cada problema se trata de forma diferente, en cada uno se aprenden nuevas cosas. cada proyecto puede tomar desde dos meses a dos años, en cada uno se revelan conocimientos, técnicas, actitudes y aptitudes nuevas.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**MODELADO DE ELEMENTOS DE MAQUINAS  
FUNDAMENTO DE RESISTENCIA DE MATERIALES  
CASO PRACTICO "RESORTES"**

**ING. SAUL SANTILLAN GÜTIERREZ**

**PALACIO DE MINERIA**

**MODELADO**

DEFINICIÓN: IDEALIZACIÓN DE LA REALIDAD, HERRAMIENTA PARA REPRESENTAR, VISUALIZAR, ANALIZAR O DETECTAR UN PROBLEMA.

HAY VARIAS CLASIFICACIONES, PARA VISUALIZARLOS FACILMENTE VAMOS A MANEJAR LA SIGUIENTE:

>ESTATICO

>PROBABILISTICO

>ICONICO

>DETERMINISTICO

>DINAMICO

>MATEMATICO

>GRAFICO

>SIMBOLICO

>ICONICO

>ANALOGICO

>DIGITAL

>ESTATICO

\* ESTATICO

NO VARIA CON EL TIEMPO

- \* ICONICO: SE PUEDEN OBSERVAR EN FORMA REAL, SE USAN GENERALMENTE PARA DESCRIBIR LAS CARACTERISTICAS ESTATICAS DEL SISTEMA.
- \* ANALOGICO: SU COMPORTAMIENTO PERMITE HACER ANALOGIAS (ES SIMILAR) AL DEL SISTEMA REAL CONOCIDO.

#### SIMBOLICO

ABSTRACCION CUANTIFICABLES DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA

#### MATEMATICO

CORRELACIONA LAS VARIABLES DE UN FENOMENO MEDIANTE FUNCIONES O HERRAMIENTAS MATEMATICAS

\*DINAMICO

SUS EFECTOS CAMBIAN CON EL TIEMPO

\* DETERMINISTICO

EL RESULTADO SE CONOCE CON CERTEZA

PROBABILISTICO

NO SE CONOCE CON CERTEZA EL  
RESULTADO

GRAFICO

REPRESENTA EN UN DOS DIMENSIONES EL  
COMPORTAMIENTO

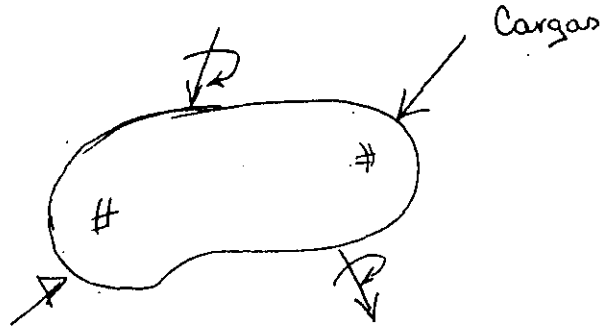
EL PROTOTIPO ES UN CASO ESPECIAL.

E.

AUXILIÁNDOSE DEL TEOREMA DE LAS  $\pi$  DE BUCKINGHAM  
TEOREMA DE RAYLEIGH

# FUNDAMENTOS DE RESISTENCIA DE MATERIALES

**ESFUERZO:** ES UN MODELO MATEMATICO O UNA CUANTIFICACION QUE NOS PERMITE CONOCER EL ESTADO DE RESISTENCIA INTERNA DE UN ELEMENTO DE MAQUINA, AL SER SUJETO A CARGAS DE DIVERSA NATURALEZA.



$$\begin{bmatrix} T_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & T_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & T_{zz} \end{bmatrix}$$

← TRANSFORMACION

ORIENTACION  
SENTIDO  
MAGNITUD

+

- CONDICIONES DE FRONTERA
- COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL



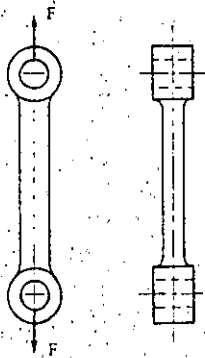
Fuerza Normal



Fuerza Cortante

# VIRTUD DEL DISEÑO DE ESTRUCTURAS, SU INDEPENDENCIA

## CARGA AXIAL



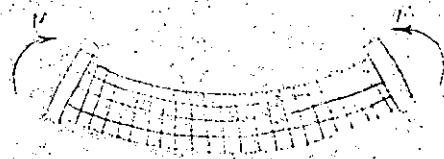
$$\sigma = F/A$$

$\sigma$ : Esfuerzo Axial

F: Fuerza

A: Area

## MOMENTO FLECTOR



$$\sigma = Mc/I$$

$\sigma$ : Esfuerzo Axial

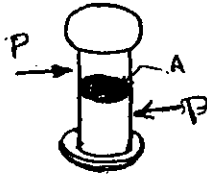
M: Momento

I: Momento de Inercia de la Sección

c: Distancia de la fibra de analisis al eje neutro



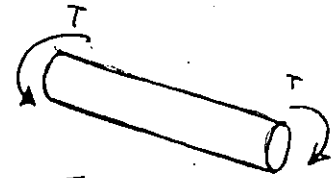
### CORTANTE PURO



$$\tau = P/A$$

- $\tau$ : Esfuerzo cortante
- P: Fuerza Cortante
- A: Area

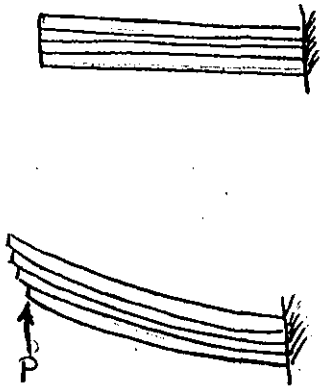
### CORTANTE POR TORSION



$$\tau = \frac{Tc}{J}$$

- $\tau$ : Esfuerzo Cortante
- T: Par
- J: Momento Polar de Inercia
- c: Distancia del punto de analisis al centro

### FLUJO CORTANTE

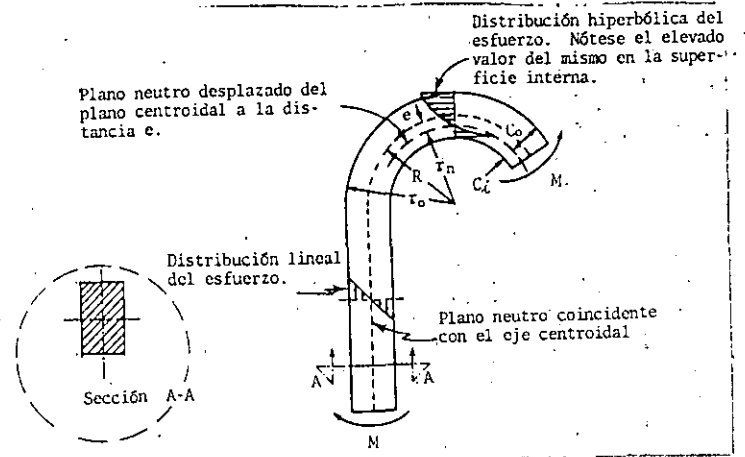


$$\tau = \frac{VQ}{Ib}$$

- V: Fuerza Cortante
- Q:  $A\bar{y}$
- A: Area sobre la fibra neutra
- $\bar{y}$ : Centroide del area
- I: Momento de Inercia
- b: distancia al centroide del centroide del area.

### ESFUERZO

#### CIRCUNFERENCIAL



$$\tau = \frac{N}{A} + \frac{M(R - R_i)}{AR_i(\bar{R} - R_i)}$$

$$R_i = \int \frac{dA}{r} \cdot \frac{1}{A}$$

- $\bar{R}$ : Centroide
- $R_i$ : Eje Neutro
- M: Momento
- A: Area
- N: Fuerza Normal

## RELACIONES ESFUERZO- DEFORMACION

LA RELACION LINEAL ENTRE LA CARGA Y LA DEFORMACION AXIAL ES LA MISMA QUE LA RELACION LINEAL ENTRE EL ESFUERZO Y LA DEFORMACION ANGULAR EN TORSION.

$$\tau = E \epsilon$$

E: Modulo de Young  
 $\epsilon$ : Deformacion axial

$$\gamma = G \theta$$

G: Modulo elastico a torsion  
 $\theta$ : Angulo de torsion  
 $\gamma$ : Deformacion angular

$$E = 2G(1 + \mu)$$

$\mu$ : Deformacion lateral  
Deformacion Axial

$$\mu = 0.3 \text{ (Acero)}$$

Rodillos, esteras.

Coefficiente de dilatacion termica

## ANALISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS

### TECNICAS PRINCIPALES:

#### FOTOELASTICIDAD

OBSERVAR CON MODELOS BIRREFRIGENTES LA DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS. SE INFIERE UN NIVEL DE ESFUERZOS PARTIENDO DE NUMEROS DE LINEAS O DEL COLOR DE LAS MISMAS

#### LACAS FRAGILES:

SE RECUBRE EL ELEMENTO O UN MODELO CON COEFICIENTES ELASTICOS CONOCIDOS, SE SOMETE A CARGAS Y SE DETECTAN ORIENTACIONES Y CONCENTRACIONES DE FRACTURAS

#### LINEAS DE MOIRE

SE TRAZAN SOBRE EL ELEMENTO O UN MODELO LINEAS, SE SOMETE A CARGA Y SE COMPARA, YA SEA MEDIANTE FOTOGRAFIA O EN FORMA DIRECTA.

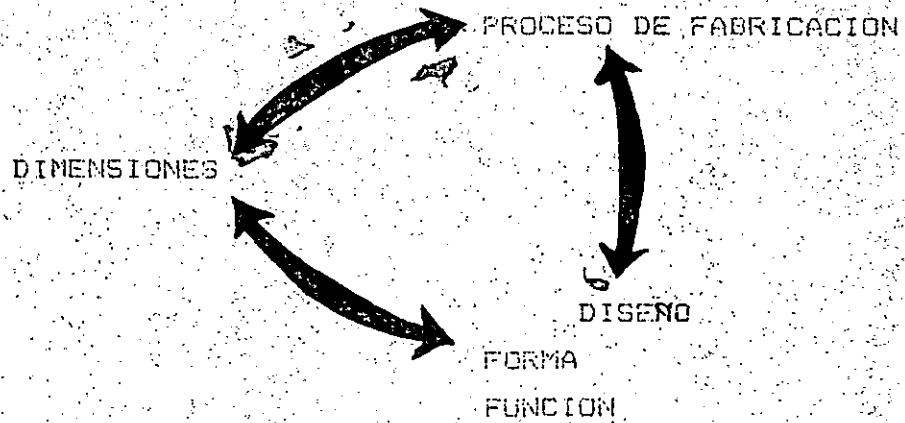
#### STRAIN GAGES ( DEFORMIMETROS )

SON RESISTENCIAS VARIABLES QUE SE COLOCAN EN PUNTOS DE INTERES Y CON DIVERSAS ORIENTACIONES, PARA MEDIR LAS VARIACIONES DE LA RESISTENCIA AL MEDIR DESPLAZAMIENTOS.

#### SIMULACION POR ELEMENTO FINITO

\* *Experimental Analysis, Stress and Strain*  
Dally  
McGraw Hill.

PARA LO CUAL SE ESTABLECE LA RELACION ENTRE:



EXISTEN ESTUDIOS Y TÉCNICAS MUY ESPECÍFICAS PARA EL DISEÑO DE LOS ELEMENTOS DE MÁQUINAS MÁS COMUNES, EN MUCHOS CASOS HAY TÉCNICAS, PARÁMETROS Y VALORES YA ESTABLECIDOS O NORMALIZADOS. PARA EL CASO GENERAL, SE PODRÍA APLICAR EL SIGUIENTE ALGORITMO:

DEFINIR LAS CONDICIONES  
DE TRABAJO DEL MATERIAL

HACER UN D.C.L.

SELECCIONAR EL  
CRITERIO DE DISEÑO

MODELAR EL ELEMENTO DE MAQUINA

PROPONER UNA DIMENSION

DEFINIR EL ESTADO  
DE ESFFUERZOS

SELECCIONAR EL MATERIAL

SELECCIONAR UN  
MATERIAL

DEFINIR EL ESTADO DE  
ESFUERZOS

DIMENSIONAR

VERIFICAR QUE LA COMBINACION RESISTA

Función: Cumplen en las máquinas la labor de elementos flexibles.  
Acumulan energía.

Clasificación:

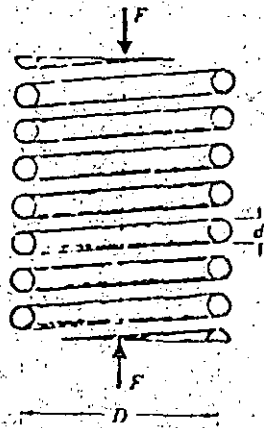
	- De tensión	De Sección
Helicoidales	- De Compresión	- Redonda o
		- Cuadrada

No Helicoidales

- Muelles o Ballestas
- Resortes de Cuerda
- Discoidales
- Belleville.

Dimensionamiento de Resortes HELICOIDALES

Nomenclatura de los Resortes Helicoidales.

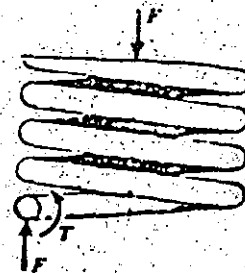


- D= Diámetro Medio
- d= Diámetro del Alambre
- N= Número de Espiras
- L= Longitud Libre del Resorte
- De= D+d= Diámetro Exterior
- Di= D-d= Diámetro Interior

Estado de Carga.

F = Fuerza de Carga

T = Parte de torsión sobre el alambre



Esfuerzos sobre el Alambre.

$\tau_{MAX} = \pm \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A}$  Los valores correspondientes a estas variables son:

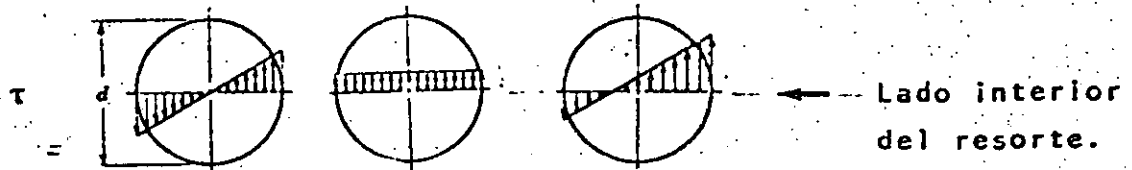
$r = \frac{FD}{2}$

$r = \frac{d}{2}$

$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2}$  (Esfuerzo en las fibras interiores del alambre.)

$J = \frac{\pi d^4}{32}$

$A = \frac{\pi d^2}{4}$



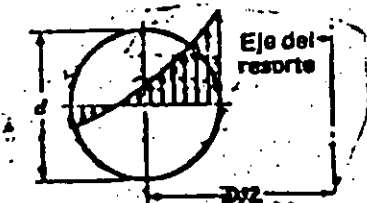
Por conveniencia para facilidad en el diseño se define la relación  $\frac{D}{d}$  como índice del resorte así:

$c = \frac{D}{d}$  Sus valores típicos 4 < c < 12

La ecuación del esfuerzo queda:

$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} \left(1 + \frac{0.5}{c}\right) = \frac{8FC}{\pi d^2} K_S$  donde  $K_S = \left(1 + \frac{0.5}{c}\right)$

Esta es la ecuación básica de diseño. En el caso de cargas estáticas, no se realiza corrección por el efecto de curvatura. En el caso de cargas dinámicas, el coeficiente de Wahl, para corregir por curvatura, se usa como coeficiente de corrección de Sé por concentración de esfuerzos.



$K = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c}$  Factor de Wahl.

## Deflexión en Resortes Helicoidales.

(3)

La consideración básica en este análisis es que, la energía suministrada al resorte al comprimirlo o estirarlo una distancia  $\delta$ , es igual a la que se requeriría para torcer el alambre del que está hecho el resorte, el mismo ángulo que se tuerce al deformarlo.

$$E_1 = \frac{F\delta}{2} \quad - \quad \text{Energía suministrada al resorte al deformarlo una longitud } \delta$$

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad - \quad \text{Angulo de torsión del alambre correspondiente a una deformación } \delta \text{ del resorte}$$

$$L = \frac{\pi DN}{\cos \alpha} \quad - \quad \text{Longitud del alambre en un resorte helicoidal.} \\ (\cos \alpha \approx 1 \quad \alpha < 5^\circ):$$

$$E_2 = \frac{T\theta}{2} \quad - \quad \text{Energía suministrada al alambre}$$

$$T = \frac{FD}{2} \quad - \quad \text{Par provocado por la fuerza } F \text{ al comprimir el resorte.}$$

Igualando  $E_1$  y  $E_2$  obtenemos.  $E_1 = E_2$  . . .

$$\delta = \frac{8FD^3 N}{Gd^4} = \frac{8FC^3 N}{Gd}$$

La constante del resorte resulta:

$$\frac{F}{\delta} = \frac{Gd}{8C^3 N}$$



④

Empleo de los resultados en el dimensionamiento de resortes helicoidales

Existe en el dimensionamiento del diámetro de alambre a usar el inconveniente de que el esfuerzo de tensión del material, varía con el diámetro de acuerdo con la relación:

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad \text{de donde obtenemos:} \quad S_{ut \text{ prom}} = \frac{S_{ut \text{ MAX}} + S_{ut \text{ MIN}}}{2}$$

los valores de A y m se obtienen de la tabla 8-2 pp 358 y que se usa en resortes sujetos a carga estática.

Asimismo se definen:

$$S_y = 0.75 S_{UT}$$

$$S_{sy} = 0.577 S_y$$

Con criterios de diseño a cargas estáticas, se tendrá

$$\tau_{MAX} = \frac{S_{sy}}{n}$$

Con criterios de falla para cargas de fatiga,

$$\tau_a = \frac{S_{se}}{n} \quad \tau_{MAX} = \tau_a + \tau_m = \frac{S_{sy}}{n} \quad (\text{Secc. 5-22})$$

En este caso de acuerdo con las investigaciones de R.P. Zimmerli:

$$S_{se} = 45 \text{ KPSI} = 310 \text{ MP}_a = 3164 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_{se} = 67.5 \text{ KPSI} = 465 \text{ MP}_a = 4746 \text{ kg/cm}^2$$

Para el diagrama S-N (Vida Finita) definimos el punto inicial S<sub>su</sub>.

$$S_{su} = 0.6 S_{ut}$$

Los resultados obtenidos por Zimmerli se deben corregir por confiabilidad, temperatura y concentración de esfuerzos (curvatura de Wahl).

$$S_{se} = k_c k_d k_e S_{se}$$

**FACTORES DE SEGURIDAD EN RESORTES;**

$$n_1 = \frac{S_{se}}{\tau_a} \text{ - Carga de fatiga}$$

$$n_2 = \frac{S_y}{\tau_a + \tau_M} \text{ - Carga estática}$$



ABOUT SPRINGS, CUSTOM METAL PARTS AND ASSEMBLIES

## Do's and Don't's for Designers

Mechanism designers want reliably functioning parts that are dependably procurable at the lowest installed cost. They can best achieve their needs by consultation with vendors and understanding custom-metal-part manufacturing and pricing.

Here is a check list to use after a spring design is reasonably well established. Some of the factors are obvious, but important enough to warrant a review.

### Don't's

Don't specify tolerances tighter than essential to mechanism functioning.

Don't specify every dimension as mandatory, mark non-critical ones as reference only.

Don't specify material that is too good (too expensive) for the service.

Don't specify material that is available only on special purchase unless there is no alternative. If in doubt, ask your vendor.

Don't specify load near free height, near solid, or at a deflection from the free position.

### Do's

Do leave adequate space in the mechanism for the spring.

Do design all springs to proper stress. An unnecessarily low design will require more material and more space than necessary. Therefore, it will be more expensive.

Do specify the Acceptable Quality Level (AQL) for the dimensions on loads to be tested. Identify dimensions as Major, Minor, or Reference.

Do leave some leeway in selecting

wire size. The springmaker may be able to use material on hand, speed delivery, and save special-purchase charges.

Do consider manufacturing economics. Helical-compression springs may not need ground ends if the wire size is under 0.020 in., the index is large, or if they work over a rod or in a hole. Use ends on extension or torsion springs that can be made without secondary operations. Consult your vendor's experienced design engineers.

Do consider the use of economical order quantities. Setups are costly.

Do consider the special packaging of parts to eliminate tangling or distortion, to facilitate handling, or to simplify your inventory control.

Do consider utilizing stock items when you need only a small quantity of parts. Your savings in design time, procurement costs, and delivery time may be appreciable.

Do realize that for small quantities of springs, the cost of raw material per pound is not important, material availability and minimum-quantity purchase restrictions are.

Do realize that for large-quantity purchase, the precise specification of raw material can be extremely important.

Do realize that the total cost of a custom metal part is not the purchase cost but the installed cost.

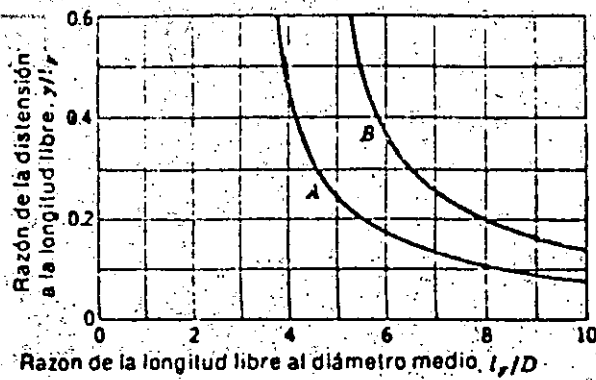
Do consider in your product reliability the relation between part cost, part reliability, and cost of replacement of a broken part.

For additional information write Associated Spring—Barnes Group Inc., Bristol, CT 06010.

AS2213

Associated Spring  BARNES GROUP INC.

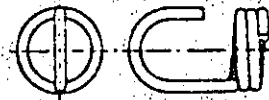
17



Curvas que indican cuándo puede producirse pandeo en resortes helicoidales de compresión. Ambas curvas son para resortes con extremos cerrados y aplanados. Para la curva A, un extremo del resorte se comprime contra una superficie plana y el otro contra una redondeada. Para la curva B ambos extremos del resorte se comprimen contra superficies planas y paralelas.



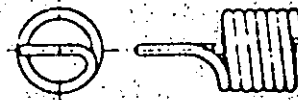
Media espira de máquina abierta



Gancho alzado

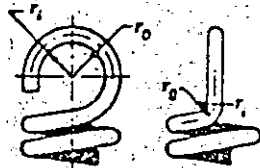


Espira torcida corta

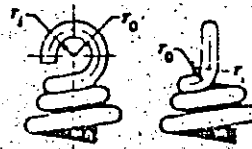


Espira torcida completa

Tipos de extremos usados en resortes de tensión. (Cortesía de la Associated Spring Corporation.)

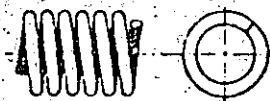


(a) Diseño usual

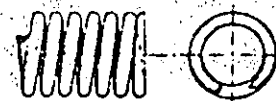


(b) Diseño mejorado

Extremos de resortes de tensión.



(a) Extremo simple, derecha



(c) Extremo escuadrado y esmerilado, izquierda



(b) Extremo escuadrado o cerrado, derecha



(d) Extremo simple, esmerilado, izquierda

Extremos de resortes de compresión.

la resta del número total de vueltas, dará el número aproximado de espiras activas:

Extremos sencillos: restar media espira

Extremos sencillos y aplanados: restar una espira

Extremos cerrados: restar una espira

Extremos cerrados y aplanados: restar dos espiras

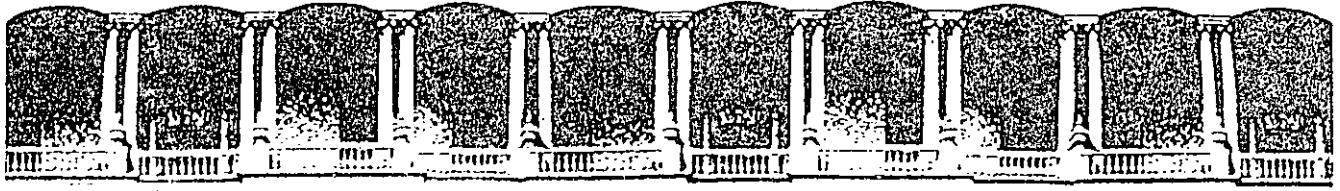
(17)

**EQUIVALENTES DECIMALES EN PULGADAS DE LOS CALIBRES DE  
ALAMBRE Y LAMINA METALICOS\***

Nombre del sistema	Brown & Sharpe o americano	Birmingham o Stubbs (alambre de hierro)	United States Standard	Manufacturers Standard	Alambre de acero o Washburn & Moen	Alambre de música	Stubs para alambre de acero	Brown & Salomónicas
Uso principal	Lámina, alambre y varilla no de hierro	Tubo, tira de hierro, alambre plano y acero para resortes	Lámina y plancha de hierro, 480 lb/plg <sup>2</sup>	Lámina de hierro	Alambre de hierro, excepto el de música	Alambre para instrumentos musicales	Varillas de acero para brocas	Brocas salomónicas y acero para brocas
7/0	—	—	0.500	—	0.4900	—	—	—
6/0	0.5800	—	0.468 75	—	0.461 5	0.004	—	—
5/0	0.516 5	—	0.437 5	—	0.430 5	0.005	—	—
4/0	0.4600	0.454	0.406 25	—	0.393 8	0.006	—	—
3/0	0.409 6	0.425	0.375	—	0.362 5	0.007	—	—
2/0	0.364 8	0.380	0.343 75	—	0.331 0	0.008	—	—
0	0.324 9	0.340	0.312 5	—	0.306 5	0.009	—	—
1	0.289 3	0.300	0.281 25	—	0.283 0	0.010	0.227	0.228 0
2	0.257 6	0.284	0.265 625	—	0.262 5	0.011	0.219	0.221 0
3	0.229 4	0.259	0.25	0.239 1	0.243 7	0.012	0.212	0.213 0
4	0.204 3	0.238	0.234 375	0.224 2	0.225 3	0.013	0.207	0.209 0
5	0.181 9	0.220	0.218 75	0.209 2	0.207 0	0.014	0.204	0.205 5
6	0.162 0	0.203	0.203 125	0.194 3	0.192 0	0.016	0.201	0.204 0
7	0.144 3	0.180	0.187 5	0.179 3	0.177 0	0.018	0.199	0.201 0
8	0.128 5	0.165	0.171 875	0.164 4	0.162 0	0.020	0.197	0.199 0
9	0.114 4	0.148	0.156 25	0.149 5	0.148 3	0.022	0.194	0.196 0
10	0.101 9	0.134	0.140 625	0.134 5	0.135 0	0.024	0.191	0.193 5
11	0.090 74	0.120	0.125	0.119 6	0.120 5	0.026	0.188	0.191 0
12	0.080 81	0.109	0.109 357	0.104 6	0.105 5	0.029	0.185	0.189 0
13	0.071 96	0.095	0.093 75	0.089 7	0.091 5	0.031	0.182	0.185 0
14	0.064 08	0.083	0.078 125	0.074 7	0.080 0	0.033	0.180	0.182 0
15	0.057 07	0.072	0.070 312 5	0.067 3	0.072 0	0.035	0.178	0.180 0
16	0.050 82	0.065	0.062 5	0.059 8	0.062 5	0.037	0.175	0.177 0
17	0.045 26	0.058	0.056 25	0.053 8	0.054 0	0.039	0.172	0.173 0
18	0.040 30	0.049	0.05	0.047 8	0.047 5	0.041	0.168	0.169 5
19	0.035 89	0.042	0.043 75	0.041 8	0.041 0	0.043	0.164	0.166 0
20	0.031 96	0.035	0.037 5	0.035 9	0.034 8	0.045	0.161	0.161 0
21	0.028 46	0.032	0.034 375	0.032 9	0.031 7	0.047	0.157	0.159 0
22	0.025 35	0.028	0.031 25	0.029 9	0.028 6	0.049	0.155	0.157 0
23	0.022 57	0.025	0.028 125	0.026 9	0.025 8	0.051	0.153	0.154 0
24	0.020 10	0.022	0.025	0.023 9	0.023 0	0.055	0.151	0.152 0
25	0.017 90	0.020	0.021 875	0.020 9	0.020 4	0.059	0.148	0.149 5
26	0.015 94	0.018	0.018 75	0.017 9	0.018 1	0.063	0.146	0.147 0
27	0.014 20	0.016	0.017 187 5	0.016 4	0.017 3	0.067	0.143	0.144 0
28	0.012 64	0.014	0.015 625	0.014 9	0.016 2	0.071	0.139	0.140 5
29	0.011 26	0.013	0.014 062 5	0.013 5	0.015 0	0.075	0.134	0.136 0
30	0.010 03	0.012	0.012 5	0.012 0	0.014 0	0.080	0.127	0.128 5
31	0.008 928	0.010	0.010 937 5	0.010 5	0.013 2	0.085	0.120	0.120 0
32	0.007 950	0.009	0.010 156 25	0.009 7	0.012 8	0.090	0.115	0.116 0
33	0.007 080	0.008	0.009 375	0.009 0	0.011 8	0.095	0.112	0.113 0
34	0.006 305	0.007	0.008 593 75	0.008 2	0.010 4	—	0.110	0.111 0
35	0.005 615	0.005	0.007 812 5	0.007 5	0.009 5	—	0.108	0.110 0
36	0.005 000	0.004	0.007 031 25	0.006 7	0.009 0	—	0.106	0.106 5
37	0.004 453	—	0.006 640 625	0.006 4	0.008 5	—	0.103	0.104 0
38	0.003 965	—	0.006 25	0.006 0	0.008 0	—	0.101	0.101 5
39	0.003 531	—	—	—	0.007 5	—	0.099	0.099 5
40	0.003 145	—	—	—	0.007 0	—	0.097	0.098 0

\* Reproducida por cortesía de Reynolds Metal Company. Se especifican la lámina, el alambre y la plancha enunciando el número de calibre, el nombre del sistema de calibres y el equivalente decimal, poniéndolos entre paréntesis.

† Refleja los pesos específicos medios de la lámina de acero.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**SELECCION DE MATERIALES**

**ING. ARMANDO ORTIZ PRADO**

**PALACIO DE MINERIA**

## SELECCIÓN DE MATERIALES EN DISEÑO

### FILOSOFÍA DEL DISEÑO.

Uno de los factores más importantes en la selección de los materiales a emplear en la construcción de un equipo, es establecer de antemano la filosofía de diseño que se seguirá.

Será la filosofía del diseño la que marcará la pauta en la selección de materiales que se usarán en casi todos los casos, salvo excepciones en que las condiciones de operación obliguen al uso de un material determinado debido a que solo con sus propiedades se cubren los requisitos de funcionalidad.

Resulta fácil apreciar, que la selección de materiales hecha por un Ingeniero que diseña componentes para ser usados en aeronaves, será totalmente distinta a la que hará un diseñador de equipo para la construcción. Las decisiones se toman en base a distintas filosofías de diseño.

### ECONOMIA VS CALIDAD

Debido a que las consideraciones que orientan al Ingeniero en la selección de materiales son muchas y con frecuencia son poco claras, este debe confiar en buena medida en su experiencia y tomar decisiones que implican riesgos y concilian intereses encontrados.

Probablemente el más común de los choques entre intereses, es el que se establece entre el costo del producto terminado y las consecuencias que tendría una falla prematura. La naturaleza de este compromiso proviene del carácter competitivo del mercado de consumo, y su medida se da en función de la economía y la calidad. Se definen en seguida los términos falla y calidad.

**FALLA** - Una falla puede implicar fractura, deformación excesiva, desgaste o corrosión. Sobre la parte del equipo más susceptible de fallar, descansa su integridad.

Existen otro tipo de fallas menos obvias que las anteriores, pero de consecuencias igualmente graves. En ellas están incluidas la obsolescencia, la selección de un estilo exterior fuera del gusto del consumidor, sobrediseño y otros. La consideración de las posibles formas en que el equipo pueda fallar es necesaria

en la selección de materiales.

CALIDAD. La medida real de la calidad de un producto se da en función de su comportamiento bajo las condiciones reales de operación. La medición directa de la calidad, se lleva a cabo con pruebas destructivas que establecen la integridad del equipo. El aspecto más apreciado de la calidad es su uniformidad. Es preferible una calidad uniforme que una perfección intermitente.

Las pruebas convencionales efectuadas a los materiales, sirven para obtener una idea preliminar de sus propiedades y son indicativos de su comportamiento. Rara vez establecen las propiedades exactas que se requiere conocer, por lo que se establecen criterios y teorías que permiten deducirlas de las conocidas. Es poco recomendable pagar por pruebas para conocer propiedades Extra buscando una calidad que podrá ser ostensible pero que distará de ser la que el producto terminado exhibirá en funcionamiento.

La calidad es resultado de un balance adecuado entre materiales y procesos de fabricación. Maquinabilidad, maleabilidad, soldabilidad, son características que afectan la calidad de un elemento y que pueden ser más determinantes que las propiedades mecánicas o el precio de un material en su selección.

#### FACTORES DE DISEÑO.

Forma - Quizás el más importante factor afectando el comportamiento de un material es la geometría (forma) de la pieza a la que constituye. La forma esta determinada por condiciones externas a la parte, que conciernen a su función. El diseñador debe asociar el comportamiento del material y la forma de la parte, desde las primeras etapas del diseño. Todos los materiales poseen propiedades inherentes que pueden ser aprovechadas en mayor o menor grado dependiendo de la forma de la parte a construir y las sollicitaciones externas sobre ella. Con frecuencia se encuentran serias dificultades para aplicar con todo rigor los principios de ingeniería al diseño de elementos mecánicos, debido a la compleja distribución de esfuerzos sobre ellos que ocasiona la intrincada geometría de los mismos. Debido a esto, los elementos de máquina son diseñados con una combinación de fórmulas ingenieriles, factores empíricos de corrección y experiencia.

ESFUERZOS - El esfuerzo es un concepto evasivo, ya que no puede ser medido de modo absoluto. Resulta de cargas estáticas, dinámicas o combinación de ambas. Si los esfuerzos son elásticos, existen fórmulas para diseñar basadas en la Teoría de la Elasticidad, estas parten de suposiciones tales como "deformaciones pequeñas", "materiales isotrópicos", y frecuentemente de condiciones de frontera rigurosas. \* El diseñador supone que dichas fórmulas son exactas, ignorando la anisotropía de algunos materiales y la frecuente poco concordancia entre la geometría de



de la parte a diseñar y la que se usó en la deducción de la fórmula. \*Con objeto de tener una idea con la cual inicializar el dimensionamiento de los elementos-- de máquina a diseñar.

FATIGA.- De forma distinta al comportamiento bajo cargas estáticas de los materiales, que son tolerantes a nuestra ignorancia conserniente a su comportamiento exacto, las propiedades de resistencia a la fatiga son extremadamente sensibles a nuestra ignorancia y varían ampliamente con pequeños cambios internos y del medio ambiente.

Las fallas por fatiga son más difíciles de predecir que las fallas por carga estática debido a las influencias externas que gobiernan dichas fallas. Muchos mecanismos están involucrados en ellas, entre otros, se incluyen la iniciación de una grieta y su propagación.

SENSIBILIDAD A LAS ENTALLADURAS. Caracterizar un material como sensible a las entalladuras, implica que el material se debilita notablemente con la presencia de ellas para las condiciones de carga particulares en que se prueba. La selección de un material puede ser determinada por la cantidad de debilitamiento que puede soportar la pieza que se diseña debido a ranuras, cambios de sección o entalladuras obligadas por las condiciones de funcionamiento. Sería muy útil al diseñador que se pudiera determinar la sensibilidad de un material con una sola prueba de laboratorio. Esto sin embargo, no puede hacerse ya que los factores que producen la sensibilidad son complejos e involucran el tipo de carga, la geometría y proporción de la pieza y aspectos metalúrgicos.

Para diseñar, se usa una aproximación que asocia la sensibilidad de un material con su fragilidad.

Otras características a considerar, como factores de diseño son la tenacidad, la ductilidad, la rigidez y la dureza, que, como ya se enunció anteriormente, pueden ser aprovechadas en mayor o menor grado en el diseño, dependiendo de la forma o geometría de la pieza.

#### FACTORES AMBIENTALES

TEMPERATURAS EXTREMAS - Con el progreso de la técnica se ha vuelto imprescindible dentro de numerosos procesos, el someter a temperaturas extremas, tanto elevadas como bajas, a algunos componentes mecánicos. Típicamente se podrían nombrar tuberías y recipientes a presión entre otros. Por esta causa, se ha intensificado la investigación de las propiedades que los materiales presentan en estas condiciones. En muchos campos el progreso depende de la comprensión del comportamiento bajo carga de materiales sometidas a temperaturas extremas.

CORROSION.- Otro factor ambiental de creciente importancia, es el comportamiento de los materiales en medios corrosivos. Cada atmósfera corrosiva representa un

conjunto de condiciones que han de evaluarse para cada material. Por ejemplo, un par de materiales estructuralmente aceptables, si son lo suficientemente disimilares en composición, pueden actuar como una celda electrolítica si se adiciona el electrolito. Una severa corrosión se presentará.

Existen dos aproximaciones a la solución del problema de la corrosión; modificar el medio corrosivo o seleccionar los materiales de forma que lo resistan. En muchos casos la segunda opción es la más práctica.

### FACTORES DE PROCESO

Maquinabilidad, formabilidad, soldabilidad son factores de proceso. El desarrollo de estas características se realiza con frecuencia a expensas de la resistencia -- del material. Los tratamientos térmicos y el trabajo en frío son procesos que generalmente afectan la resistencia del material directamente. El diseñador no solo debe prever los aspectos que ocasionen dificultad, sino que también debe analizar aquellos que ofrezcan ventajas.

### CONCLUSION.

Con todos los nuevos procesos que se están desarrollando así como las nuevas aleaciones que surgen, el hecho de que una pieza se haya estado fabricando por medio de un proceso particular y con un material dado, no es argumento para continuar usándolo sin el análisis de las posibilidades ofrecidas por procesos alternativos. El desarrollo ha hecho posibles procesos considerados anteriormente como imposibles.

Hay muchos factores que condicionan la selección de un material en diseño. Algunas están contenidas en las tablas que listan sus propiedades y composición, --- otros, tan válidos como los anteriores se evalúan de acuerdo a la experiencia y buen juicio del diseñador. Los requerimientos de servicio no pueden siempre ser establecidos en términos cuantitativos y consecuentemente, el criterio del diseñador es necesario para obtener un buen diseño.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**DESIGNACIONES AISI PARA ACERO DE HERRAMIENTAS**

**DESIGNACION ASTM**

**ACEROS MAS COMUNES**

**PROPIEDADES MECANICAS**

**DESIGNACION AI/SI/DGN PARA ACEROS AL CARBONO Y GRADO DE MAQUINARIA**

**ACEROS INOXIDABLES**

**COMPOSICION TIPICA DE FUNCIONES DE USO COMUN**

**ALEACIONES COMUNES DE ALUMINIO**

**COBRE Y SUS ALEACIONES**

**ING. ARMANDO ORTIZ PRADO**

**PALACIO DE MINERIA**

## Clasificación simplificada de los aceros para herramientas

Grupos mayores	Símbolo	Tipos
Aceros para herramientas de endurecimiento al agua	W	
Aceros para herramientas resistentes al impacto	S	
Aceros para herramientas para trabajo en frío	O	Temple en aceite
	A	Templado al aire, aleación mediana
	D	Alto carbono, alto cromo
Aceros para herramientas para trabajo en caliente	H	H10-H19, base de cromo H20-H39, base de tungsteno H40-H59, base de molibdeno
	T	Base de tungsteno
	M	Base de molibdeno
Aceros para herramientas para usos especiales	F	Carbono-tungsteno
	L	Bajo contenido de aleación
	P	Aceros para moldes
		P1-P19, bajo contenido de carbono
		P20-P39, otros tipos

\* Cada subdivisión tiene identificación adicional del tipo con un sufijo de número que sigue al símbolo con letra.



## ACEROS HERRAMIENTA

Los aceros herramienta usados comunmente han sido clasificados por el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) en siete grupos principales. A cada grupo o subgrupo

se ha asignado una letra del alfabeto. Para esta clasificación se han considerado métodos de temple, características especiales y aplicaciones particulares, como sigue:

GRUPO	SIMBOLO Y TIPO
De temple al agua	W
Resistentes al impacto	S
Para trabajo en frío	{ O Temple al aceite
	{ A Temple al aire, media aleación
	{ D Alto carbono-alto Cromo
Para trabajo en Caliente	H (H1 a H19 incl. Base cromo; H20 a H39 incl. Base tungsteno; H40 a H59 incl. Base molibdeno)
Alta Velocidad	{ T Base tungsteno
	{ M Base molibdeno
Usos misceláneos	{ L Baja aleación
	{ F Carbono-Tungsteno
Aceros para moldes.	P

La clasificación AISI para los aceros herramienta está dada en la tabla siguiente. Cada grupo principal, identificado por una letra, puede contener varios tipos individuales que se identifican por un número que sigue a la letra. Los porcentajes de los elementos mostrados en la tabla para cada tipo

no deben considerarse con los puntos medios de los intervalos de composición de los elementos. Aceros del mismo tipo fabricados por diferentes productores, pueden diferir en análisis de los valores enlistados y pueden contener elementos que no vienen en la lista.

## CLASIFICACION DE LOS ACEROS GRADO HERRAMIENTA

Designación AISI	COMPOSICION TIPICA, POR CIENTO								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co

### DE TEMPLE AL AGUA

W1	<sup>a</sup> 0.60/1.40	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
W2	<sup>a</sup> .60/1.40	.....	.....	.....	.....	.....	0.25	.....	.....
W4	<sup>a</sup> .60/1.40	.....	.....	.....	0.25	.....	.....	.....	.....
W5	1.10	.....	.....	.....	.50	.....	.....	.....	.....

### RESISTENTES AL IMPACTO

S1	0.50	.....	.....	1.50	.....	.....	2.50	.....	.....
S2	.50	.....	1.00	.....	.....	.....	.....	0.50	.....
S4	.55	0.80	2.00	.....	.....	.....	.....	.....	.....
S5	.55	.80	2.00	.....	.....	.....	.....	.40	.....
S6	.45	1.40	1.25	1.50	.....	.....	.....	.40	.....
S7	.50	.....	.....	3.25	.....	.....	.....	1.40	.....

### PARA TRABAJO EN FRIO TEMPLE AL ACEITE

O1	0.90	1.00	.....	0.50	.....	.....	0.50	.....	.....
O2	.90	1.60	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
O6	1.45	.....	1.00	.....	.....	.....	.....	0.25	.....
O7	1.20	.....	.....	.75	.....	.....	1.75	.....	.....

### PARA TRABAJO EN FRIO TEMPLE AL AIRE, MEDIA ALEACION

A2	1.00	.....	.....	5.00	.....	.....	.....	1.00	.....
A3	1.25	.....	.....	5.00	.....	.....	.....	1.00	.....
A4	1.00	2.00	.....	1.00	.....	.....	.....	1.00	.....
A5	1.00	3.00	.....	1.00	.....	.....	.....	1.00	.....
A6	0.70	2.60	.....	1.00	.....	.....	.....	1.00	.....
A7	2.25	.....	.....	5.25	.....	4.75	b1.00	1.00	.....
A8	.55	.....	.....	5.00	.....	.....	1.25	1.25	.....
A9	.50	.....	.....	5.00	1.50	1.00	.....	1.40	.....
A10	1.35	1.80	1.25	.....	1.50	.....	.....	1.50	.....

Designation AISI	COMPOSICION TIPICA POR CIENTO								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co

PARA TRABAJO EN FRIO – ALTO CARBONO ALTO CROMO

D1	1.00	.....	.....	12.00	.....	.....	.....	1.00	.....
D2	1.50	.....	.....	12.00	.....	.....	.....	1.00	.....
D3	2.25	.....	.....	12.00	.....	.....	.....	.....	.....
D4	2.25	.....	.....	12.00	.....	.....	.....	1.00	.....
D5	1.50	.....	.....	12.00	.....	.....	.....	1.00	3.00
D7	2.35	.....	.....	12.00	.....	4.00	.....	1.00	.....

PARA TRABAJO EN CALIENTE – BASE CROMO

H10	0.40	.....	.....	3.25	.....	0.40	.....	2.50	.....
H11	.35	.....	.....	5.00	.....	.40	.....	1.50	.....
H12	.35	.....	.....	5.00	.....	.40	1.50	1.50	.....
H13	.35	.....	.....	5.00	.....	1.00	.....	1.50	.....
H14	.40	.....	.....	5.00	.....	.....	5.00	.....	.....
H16	.55	.....	.....	7.00	.....	.....	7.00	.....	.....
H19	.40	.....	.....	4.25	.....	2.00	4.25	.....	4.25

PARA TRABAJO EN CALIENTE – BASE TUNGSTENO

H20	0.35	.....	.....	2.00	.....	.....	9.00	.....	.....
H21	.35	.....	.....	3.50	.....	.....	9.00	.....	.....
H22	.35	.....	.....	2.00	.....	.....	11.00	.....	.....
H23	.30	.....	.....	12.00	.....	.....	12.00	.....	.....
H24	.45	.....	.....	3.00	.....	.....	15.00	.....	.....
H25	.25	.....	.....	4.00	.....	.....	15.00	.....	.....
H26	.50	.....	.....	4.00	.....	1.00	18.00	.....	.....

PARA TRABAJO EN CALIENTE – BASE MOLIBDENO

H41	0.65	.....	.....	4.00	.....	1.00	1.50	8.00	.....
H42	.60	.....	.....	4.00	.....	2.00	6.00	5.00	.....
H43	.55	.....	.....	4.00	.....	2.00	.....	8.00	.....

ALTA VELOCIDAD – BASE TUNGSTENO

T1	0.70	.....	.....	4.00	.....	1.00	18.00	.....	.....
T2	.80	.....	.....	4.00	.....	2.00	18.00	.....	.....
T4	.75	.....	.....	4.00	.....	1.00	18.00	.....	5.00
T5	.80	.....	.....	4.00	.....	2.00	18.00	.....	8.00
T6	.80	.....	.....	4.50	.....	1.50	20.00	.....	12.00
T7	.75	.....	.....	4.00	.....	2.00	14.00	.....	.....
T8	.75	.....	.....	4.00	.....	2.00	14.00	.....	5.00
T9	1.20	.....	.....	4.00	.....	4.00	18.00	.....	.....
T15	1.50	.....	.....	4.00	.....	5.00	12.00	.....	5.00



Designación AISI	COMPOSICION TIPICA, POR CIENTO								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	W	Mo	Co

ALTA VELOCIDAD – BASE MOLIBDENO

M11	0.80			4.00		1.00	1.50	8.00	
M12	.80			4.00		2.00	6.00	5.00	
M13 <sup>c</sup>	1.05			4.00		2.40	6.00	5.00	
M13 <sup>d</sup>	1.20			4.00		3.00	6.00	5.00	
M14	1.30			4.00		4.00	5.50	4.50	
M16	0.80			4.00		1.50	4.00	5.00	12.00
M17	1.00			4.00		2.00	1.75	8.75	
M110	.85			4.00		2.00		8.00	
M115	1.50			4.00		5.00	6.50	3.50	5.00
M130	0.80			4.00		1.25	2.00	8.00	5.00
M133	.90			3.75		1.15	1.50	9.50	8.00
M134	.90			4.00		2.00	2.00	8.00	8.00
M135	.80			4.00		2.00	6.00	5.00	5.00
M136	.80			4.00		2.00	6.00	5.00	8.00
M141	1.10			4.25		2.00	6.75	3.75	5.00
M142	1.10			3.75		1.15	1.50	9.50	8.00
M143	1.25			3.75		2.00	1.75	8.75	8.25
M144	1.15			4.25		2.25	5.25	6.25	12.00

USOS MISCELANEOS – BAJA ALEACION

L1	1.00			1.25					
L2	<sup>a</sup> 0.50/1.10			1.00		0.20			
L3	1.00			1.50		.20			
L6	0.70			0.75	1.50			<sup>b</sup> 0.25	
L7	1.00	0.35		1.40				.40	

USOS MISCELANEOS – CARBONO TUNGSTENO

F1	1.00						1.25		
F2	1.25						3.50		
F3	1.25			0.75			3.50		

ACEROS PARA MOLDES

P1	0.10								
P2	.07			2.00	0.50			0.20	
P3	.10			0.60	1.25				
P4	.07			5.00					
P5	.10			2.25					
PC	.10			1.50	3.50				
P20	.35			1.25				0.40	
P21 <sup>e</sup>	.20				4.00				

<sup>a</sup>Pueden estar disponibles contenidos de carbono variables

<sup>b</sup>A opcion del fabricante

<sup>c</sup>Clase 1

<sup>d</sup>Clase 2

<sup>e</sup>Aluminio 1.20%



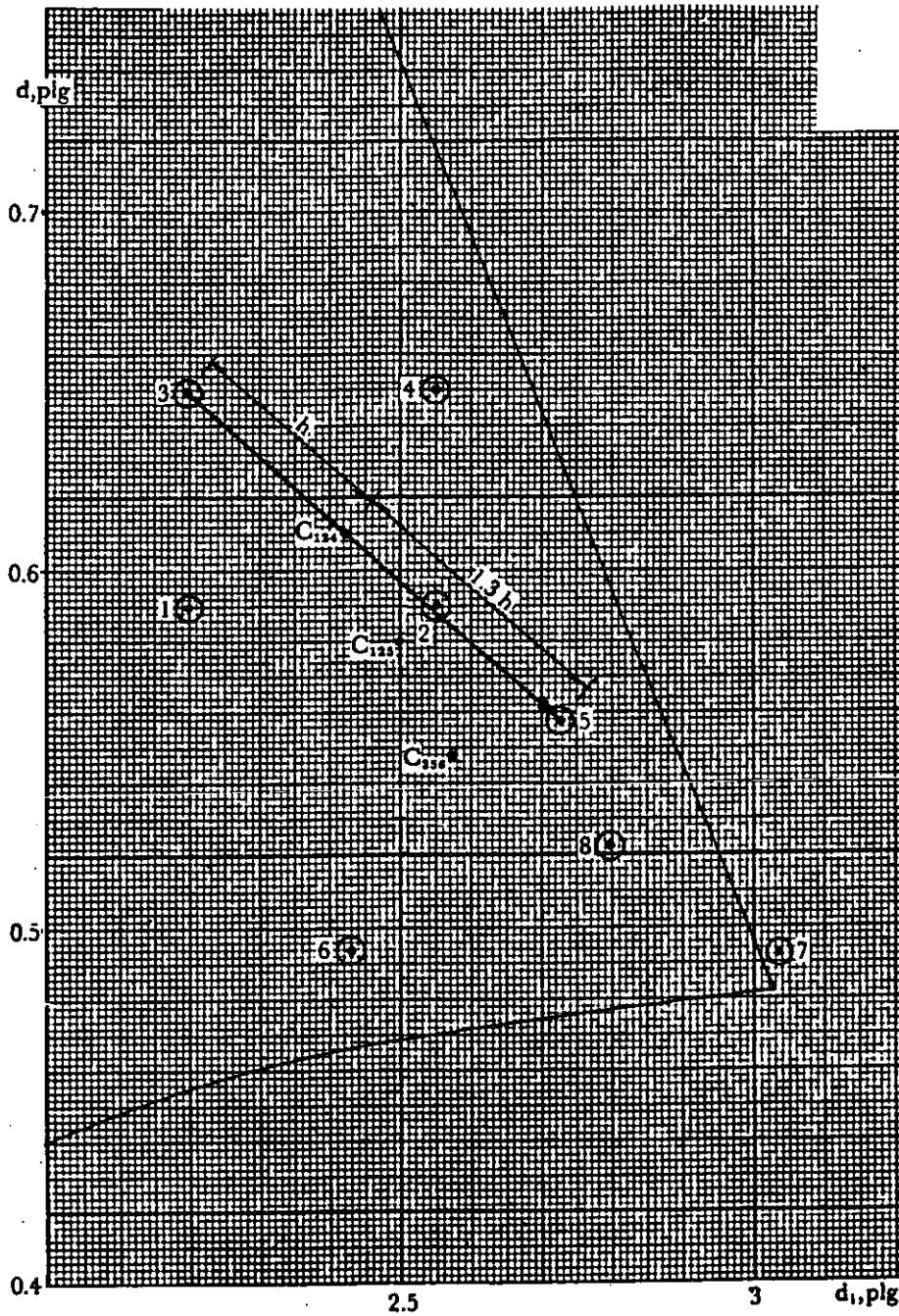


Figura 8. Ejemplo 3. Optimización por el método de Box.

nos limitaremos al uso del programa OPTIM del doctor L. B. Evans, del Instituto Tecnológico de Massachussetts, ver Apéndice 4.

OPTIM está basado en el método de Box, programado en FORTRAN, es sumamente flexible y de manejo muy sencillo.

Para introducir el método se examinará un ejemplo.

**Ejemplo 4**

Resolver el ejemplo 2 mediante OPTIM.

**Solución:**

Para comodidad del lector se repite aquí la formulación inicial

Tabla 11a. Propiedades mecánicas de algunos aceros para construcción\*

Designación ASTM	Gama de espesor, mm (pulg)	Punto de fluencia, min		Resistencia a la tracción		Alargamiento en 200 mm (8 pulg), min. %	Adecuado para soldar
		MPa	1 000 lb/pulg <sup>2</sup>	MPa	1 000 lb/pulg <sup>2</sup>		
Placas de acero al carbono estructural							
ASTM A77	Todos los espesores	228	33	414-517	60-75	21	No
ASTM A373†	Hasta 100 mm (4 pulg), incl.	221	32	400-517	58-75	21	Ve
ASTM A36	Hasta 100 mm (4 pulg), incl.	248	36	400-552	58-80	20	Si
Placas de acero al carbono de resistencia baja e intermedia a la tracción							
ASTM A283	(calidad estructural)						
Grado A	Todos los espesores	165	24	310	43	28	Si
Grado B	Todos los espesores	186	27	345	50	25	Si
Grado C	Todos los espesores	207	30	379	55	22	Si
Grado D	Todos los espesores	228	33	414	60	20	Si
Placas de acero al carbono-silicio para piezas de máquinas y construcción general							
ASTM A284							
Grado A	Hasta 305 mm (12 pulg)	172	25	345	50	25	Si
Grado B	Hasta 305 mm (12 pulg)	159	23	379	55	23	Si
Grado C	Hasta 305 mm (12 pulg)	145	21	414	60	21	Si
Grado D	Hasta 200 mm (8 pulg)	145	21	414	60	21	Si
Placas de acero al carbono para recipientes a presión							
ASTM A285							
Grado A	Hasta 50 mm (2 pulg)	165	24	303-379	44-55	27	Si
Grado B	Hasta 50 mm (2 pulg)	186	27	345-414	50-60	25	Si
Grado C	Hasta 50 mm (2 pulg)	207	30	379-446	55-65	23	Si
Acero estructural para locomotoras y carros (vagones)							
ASTM A113							
Grado A	Todos los espesores	228	33	414-496	60-72	21	No
Grado B	Todos los espesores	186	27	345-427	50-62	24	No
Grado C	Todos los espesores	179	26	331-400	48-58	26	No
Acero estructural para barcos							
ASTM A131							
Grado A	Hasta 13 mm (½ pulg)						
Grado B	Hasta 25 mm (1 pulg)						
Grado C	Hasta 50 mm (2 pulg)	221	32	400-490	58-71	21	No
Grado E	Hasta 50 mm (2 pulg)						
Grado CS	Hasta 50 mm (2 pulg)						
Grado R	Hasta 50 mm (2 pulg)						
Placas de acero de alta resistencia y bajo contenido de aleación							
ASTM A242	Hasta 19 mm (¾ pulg), incl.	345	50	485	70 mín	18	Si
ASTM A440	Más de 19 hasta 38 mm (¾ pulg a 1½ pulg), incl.	315	46	460	67 mín	18	No
ASTM A441	Más de 38 hasta 102 mm (1½ a 4 pulg), incl.	290	42	435	63 mín	18	Si
ASTM A588	Hasta 102 mm (4 pulg), incl.	345	50	485	70	18	Si

Los aceros HSLA, aplicados en la forma correcta, poseen características y propiedades que representan ahorros a los usuarios. Son mucho más fuertes y, en muchos casos, más tenaces que el acero estructural al carbono; empero, tienen sufi-

cientos ductilidad, formabilidad y soldabilidad para utilizarlos con éxito en la fabricación con los métodos usuales. Además, muchos aceros tienen mejor resistencia a la corrosión, con lo cual se logra la misma o mayor duración útil en secciones del-

Tabla 11a. Propiedades mecánicas de algunos aceros para construcción\* (Continúa)

08

Designación ASTM	Gamas de espesor, mm (pulg)	Punto de fluencia, min		Resistencia a la tracción		Alargamiento en 200 mm (8 pulg), min %	Adecuado para soldar
		MPa	1 000 lb/pulg <sup>2</sup>	MPa	1 000 lb/pulg <sup>2</sup>		
Placas de acero de aleación para construcción, con tratamiento térmico							
ASTM A514	Hasta 64 mm (2½ pulg), incl.	700	100	800-950	115-135	18%	Si
	Más de 64 hasta 102 mm (2½ pulg), incl.	650	90	750-950	105-135	17%	Si

\* Véase la documentación apropiada de ASTM para las propiedades de otras placas, formas, barras, alambre tubo, etc., de acero.  
 † Se incluye solo para comparación; ya no se usa para especificación.  
 ‡ Alargamiento en 50 mm (2 pulg), mínimo.

Tabla 11b. Especificaciones de ASTM y SAE para algunos aceros de alta resistencia y bajo contenido de aleación

Sociedad	Designación	Punto de fluencia, mínimo*		Resistencia a la tracción min		Espesor mínimo <sup>b</sup>	
		MPa	1 000 lb/pulg <sup>2</sup>	MPa	1 000 lb/pulg <sup>2</sup>	mm	pulg
SAE	J410b Grado 42X	290	42	414	60	9.5	¾
ASTM	A572 Grado 42	290	42	414	60	101.6	4
SAE	J410b Grado 945X	310	45	414	60	9.5	¾
ASTM	A572 Grado 45	310	45	414	60	38.1	1½
ASTM	A607 Grado 45	310	45	414	60	c	c
ASTM	A606	310	45	448	65	c	c
SAE	J410b Grado 945A, C <sup>d</sup>	310	45	448	65 <sup>e</sup>	12.7	½
SAE	J410b Grado 950X	345	50	448	65	9.5	¾
ASTM	A572 Grado 50	345	50	448	65	38.1	1½
ASTM	A607 Grado 50	345	50	448	65	c	c
SAE	J410b Grados 950A, B, C, D <sup>d</sup>	345	50	483	70	38.1	1½ <sup>f</sup>
ASTM	A242	345	50	483	70	19.1	¾ <sup>f</sup>
ASTM	A440 <sup>g</sup>	345	50	483	70	19.1	¾ <sup>f</sup>
ASTM	A441	345	50	483	70	19.1	¾ <sup>f</sup>
ASTM	A588	345	50	483	70	101.6	4 <sup>f</sup>
SAE	J410b Grado 955X	379	55	483	70	9.5	¾
ASTM	A572 Grado 55	379	55	483	70	38.1	1½
ASTM	A607 Grado 55	378	55	483	70	c	c
SAE	J410b Grado 960X	414	60	517	75	9.5	¾
ASTM	A572 Grado 60	414	60	517	75	25.4	1
ASTM	A607 Grado 60	414	60	517	75	c	c
SAE	J410b Grado 965X	448	65	552	80	9.5	¾
ASTM	A572 Grado 65	448	65	552	80	12.7	½
ASTM	A607 Grado 65	448	65	552	80	c	c
SAE	J410b Grado 970X	483	70	586	85	9.5	¾
ASTM	A607 Grado 70	483	70	586	85	c	c
SAE	J410b Grado 980X	552	80	655	95	9.5	¾

<sup>a</sup> Aceros SAE especifican resistencia mínima a la fluencia.  
<sup>b</sup> Se aplica a placas y barras; espesor aproximado de alma para estructurales.  
<sup>c</sup> ASTM A606 y A607 se aplican sólo a lámina y tira.  
<sup>d</sup> Los aceros SAE J410b Grados 945C y 950C y los ASTM A440 son aceros al

carbono-manganeso de alta resistencia, en vez de aceros de alta resistencia y bajo contenido de carbono.  
<sup>e</sup> Reducida a 34.5 MPa (5 000 lb/pulg<sup>2</sup>) para lámina y tira.  
<sup>f</sup> Disponible en espesor más grueso, con menores niveles de resistencia.

gadas que con cualquier elemento de acero estructural al carbono. Otras características de algunos aceros podrían ser buena resistencia a las cargas repetidas y a la abrasión durante el servicio. Aunque la alta resistencia es una característica común de todos los aceros HSLA, cualquier acero en particular podría incluir las otras propiedades ya citadas, sea individuales o combinadas.

Los aceros HSLA han encontrado amplia aceptación en muchos campos, entre los cuales se cuentan la construcción de furgones, camiones, remolques y autobuses; puentes de acero soldado; torres para televisión y transmisión de corriente y arbotantes para alumbrado; columnas en edificios de muchos niveles; recipientes portátiles para gas licuado de petróleo,

construcción naval, tanques para almacenar petróleo, equipo para acondicionamiento de aire y equipo agrícola y para movimiento de tierras.

**Aceros de bajo carbono, de aleación para construcción, entrafados por inmersión y templados** Estos aceros, que poseen resistencia a la fluencia al nivel de 689 MPa (100 000 lb/pulg<sup>2</sup>), están cubiertos por especificaciones ASTM A514, militares, y por el Código 1204 de ASME para aplicación en recipientes de presión. Están disponibles en placas, formas y barras y se sueldan con facilidad. Dado que reciben tratamiento térmico para obtener estructura martensítica templada, retienen una excelente tenacidad a temperaturas tan bajas como -45°C (-50°F). Se han logrado importantes ahorros en los costos al usar estos aceros

Propiedades mecánicas aproximadas de fleje ó tira de acero al carbono endurecido por deformación

Grado de endurecimiento por deformación en frío	Resistencia a la tracción MPa	Alargamiento en 50 mm ó 2 pulg para espesores de tira de 1.27 mm (0.050 pulg),%	Observaciones
No. 1 (duro)	621±69		Tira muy rígida laminada en frío destinada sólo para troquelado plano y no requiere capacidad para soportar formado en frío
No. 2 (semiduro)	448±69	10±6	Tira de rigidez moderada, laminada en frío destinada para dobléz limitado
No 3 (cuarto de dureza)	379±69	20±7	Tira de mediana blandura, laminada en frío para dobléz limitado, estirado poco profundo y estampado
No. 4 (blando)	331±41.4	32±8	Tira blanda, dúctil, laminada en frío para estirado profundo cuando no se permiten deformaciones del estirado ni acanaladuras
No. 5 (muy blando)	303±41.4	39±6	Tira blanda, dúctil, laminada en frío para estirado profundo cuando se permiten deformaciones del estirado o acanaladuras. También para extrusión



## ACEROS AL CARBONO Y BAJA ALEACION GRADO MAQUINARIA DESIGNACIONES NUMERICAS AISI Y SAE

Para facilitar la discusión de los aceros es conveniente familiarizarse con su nomenclatura. Se utiliza un índice numérico, auspiciado por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) y por el Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI), para identificar la composición química de los aceros grado maquinaria. En este sistema se utilizan series de 4 números para designar los aceros al carbono y de baja

aleación; se usan series de 5 números para designar ciertos tipos de aceros de baja aleación. Los primeros 2 dígitos indican el tipo de acero; el segundo dígito da generalmente, pero no siempre, la cantidad aproximada del principal elemento aleante. Los últimos dos (o tres) dígitos indican aproximadamente el punto medio del contenido de carbono. La designación de las series y tipos se resume a continuación.

Series	Tipos
10xx	Aceros al Carbono no resulturados
11xx	Aceros al Carbono resulturados (libre maquinado)
12xx	Aceros al Carbono refosforados y resulturados (libre maquinado)
13xx	1.75% de Manganeso
23xx	3.50% de Níquel
25xx	5.00% de Níquel
31xx	1.25% de Níquel y 0.65 ó 0.80% de Cromo
33xx	3.50% de Níquel y 1.55% de Cromo
40xx	0.25% de Molibdeno
41xx	0.50 ó 0.95% de Cromo y 0.12 ó 0.20% de Molibdeno
43xx	1.80% de Níquel, 0.50 ó 0.80% de Cromo y 0.25% de Molibdeno
44xx	0.40% de Molibdeno
45xx	0.52% de Molibdeno
46xx	1.55 ó 1.80% de Níquel y 0.20 ó 0.25% de Molibdeno
47xx	1.05% de Níquel, 0.45% de Cromo y 0.20 ó 0.25% de Molibdeno
48xx	3.50% de Níquel y 0.25% de Molibdeno.
50xx	0.25, 0.40 ó 0.50% de Cromo
51xx	0.80, 0.90, 0.95 ó 1.00% de Cromo
51xxx	1.00% de Carbono y 1.05% de Cromo
52xxx	1.00% de Carbono y 1.45% de Cromo
61xx	0.60, 0.80 ó 0.95% de Cromo y 0.10 ó 0.15% mínimo de Vanadio
86xx	0.55% de Níquel, 0.50% de Cromo y 0.20% de Molibdeno
87xx	0.55% de Níquel, 0.50% de Cromo y 0.25% de Molibdeno
88xx	0.55% de Níquel, 0.50% de Cromo y 0.35% de Molibdeno
92xx	0.85% de Manganeso y 2.00% de Silicio
93xx	3.25% de Níquel, 1.20% de Cromo y 0.12% de Molibdeno
94xx	0.45% de Níquel, 0.40% de Cromo, y 0.12% de Molibdeno
97xx	0.55% de Níquel, 0.17% de Cromo y 0.20% de Molibdeno
98xx	1.00% de Níquel, 0.80% de Cromo y 0.25% de Molibdeno



ACEROS AL CARBONO NO RESULTURADOS\*

No. AISI	C	Mn	P(max)	S(max)	No. AISI	C	Mn	P(max)	S(max)
*C 1005	0.06 max	0.35 max	0.040	0.050	C 1042	0.40/0.47	0.60/0.90	0.040	0.050
*C 1006	.08 max	0.25/0.40	.040	.050	C1043	.40/0.47	.70/1.00	.040	.050
C 1008	.10 max	.25/0.50	.040	.050	C 1044	.43/0.50	.30/0.60	.040	.050
C 1010	0.08/0.13	.30/0.60	.040	.050	C 1045	.43/0.50	.60/0.90	.040	.050
*C 1011	.08/0.13	.60/0.90	.040	.050	C 1046	.43/0.50	.70/1.00	.040	.050
C 1012	.10/0.15	.30/0.60	.040	.050	C 1048	.44/0.52	1.10/1.40	.040	.050
*C 1013	.11/0.16	.50/0.80	.040	.050	C 1049	.46/0.53	.60/0.90	.040	.050
C 1015	.13/0.18	.30/0.60	.040	.050	C 1050	.48/0.55	.60/0.90	.040	.050
C 1016	.13/0.18	.60/0.90	.040	.050	C 1051	.45/0.56	.85/1.15	.040	.050
C 1017	.15/0.20	.30/0.60	.040	.050	C 1052	.47/0.55	1.20/1.50	.040	.050
C 1018	.15/0.20	.60/0.90	.040	.050	C 1053	.48/0.55	.70/1.00	.040	.050
C 1019	.15/0.20	.70/1.00	.040	.050	C 1055	.50/0.60	.60/0.90	.040	.050
C 1020	.18/0.23	.30/0.60	.040	.050	*C 1059	.55/0.65	.50/0.80	.040	.050
C 1021	.18/0.23	.60/0.90	.040	.050	C 1060	.55/0.65	.60/0.90	.040	.050
C 1022	.18/0.23	.70/1.00	.040	.050	*C 1061	.55/0.65	.75/1.05	.040	.050
C 1023	.20/0.25	.30/0.60	.040	.050	*C 1064	.60/0.70	.50/0.80	.040	.050
C 1024	.19/0.25	1.35/1.65	.040	.050	*C 1065	.60/0.70	.60/0.90	.040	.050
C 1025	.22/0.25	0.30/0.60	.040	.050	*C 1066	.60/0.70	.85/1.15	.040	.050
C 1026	.22/0.25	.60/0.90	.040	.050	*C 1069	.65/0.75	.40/0.70	.040	.050
C 1027	.22/0.29	1.20/1.50	.040	.050	C 1070	.65/0.75	.60/0.90	.040	.050
C 1029	.25/0.31	0.60/0.90	.040	.050	*C 1072	.65/0.75	1.00/1.30	.040	.050
C 1030	.25/0.34	.60/0.90	.040	.050	*C 1074	.70/0.80	.50/0.80	.040	.050
*C 1034	.32/0.38	.50/0.80	.040	.050	*C 1075	.70/0.80	.40/0.70	.040	.050
C 1035	.32/0.38	.60/0.90	.040	.050	C 1078	.72/0.85	.30/0.60	.040	.050
C 1036	.30/0.37	1.20/1.50	.040	.050	C 1080	.75/0.88	.60/0.90	.040	.050
C 1037	.32/0.38	0.70/1.00	.040	.050	C 1081	.80/0.93	.60/0.90	.040	.050
C 1038	.35/0.42	.60/0.90	.040	.050	*C 1086	.80/0.93	.30/0.50	.040	.050
C 1039	.37/0.44	.70/1.00	.040	.050	C 1090	.85/0.98	.60/0.90	.040	.050
C 1040	.37/0.44	.60/0.90	.040	.050	C 1095	.90/1.03	.30/0.50	.040	.050
C 1041	.36/0.44	1.35/1.65	.040	.050					

ACEROS AL CARBONO RESULTURADOS<sup>b</sup>

No. AISI	C	Mn	P(max)	S	No. AISI	C	Mn	S	P(max)
C 1105	0.05/0.13	0.50/0.80	0.040	0.08/0.13	C 1137	0.32/0.39	1.35/1.65	0.040	0.08/0.13
C 1109	.05/0.13	.60/0.90	.040	.08/0.13	C 1139	.35/0.43	1.35/1.65	.040	.12/0.20
C 1110	.05/0.13	.30/0.60	.040	.08/0.13	C 1140	.37/0.44	.70/1.00	.040	.08/0.13
C 1116	.14/0.20	1.10/1.40	.040	.16/0.23	C 1141	.37/0.45	1.35/1.65	.040	.08/0.13
C 1117	.14/0.20	1.00/1.30	.040	.08/0.13	C 1144	.40/0.48	1.35/1.65	.040	.24/0.33
C 1118	.14/0.20	1.30/1.60	.040	.08/0.13	C 1145	.42/0.49	.70/1.00	.040	.04/0.07
C 1119	.14/0.20	1.00/1.30	.040	.24/0.33	C 1146	.42/0.49	.70/1.00	.040	.08/0.13
C 1132	.27/0.34	1.35/1.65	.040	.08/0.13	C 1151	.48/0.55	.70/1.00	.040	.08/0.13

ACEROS AL CARBONO RESULTURADOS<sup>c</sup> - BESSEMER ACIDO

ACEROS AL CARBONO REFORZADOS Y RESULTURADOS<sup>d</sup>

No. AISI	C	Mn	P	S	No. AISI	C	Mn	P	S
B 1111	0.13 max	0.60/0.90	0.07/0.12	0.08/0.15	C 1211	0.13 max	0.60/0.90	0.07/0.12	0.08/0.15
B 1112	.13 max	.70/1.00	.07/0.12	.16/0.23	C 1212	.13 max	.70/1.00	.07/0.12	.16/0.23
B 1113	.13 max	.70/1.00	.07/0.12	.24/0.33	C 1213	.13 max	.70/1.00	.07/0.12	.24/0.33
					C 1215	.09 max	.75/1.05	.04/0.09	.26/0.35
					**C 12L14	.15 max	.80/1.20	.04/0.09	.25/0.35

\*\*Plomo = 0.15/0.35 por ciento

## ACEROS DE BAJA ALEACION<sup>e</sup>

No. AISI	C	Mn	P(max)	S(max)	Si	Ni	Cr	Mo	V
1330	0.28/0.33	1.60/1.90	0.035	0.040	0.20/0.35				
1335	.33/0.38	1.60/1.90	.035	.040	.20/0.35				
1340	.38/0.43	1.60/1.90	.035	.040	.20/0.35				
1345	.43/0.48	1.60/1.90	.035	.040	.20/0.35				
*3140	.35/0.43	0.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	1.10/1.40	0.55/0.75		
E 3310	.05/0.13	.45/0.60	.025	.025	.20/0.35	3.25/3.75	1.40/1.75		
4012	.09/0.14	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35			0.15/0.25	
4023	.20/0.25	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35			.20/0.30	
4024	.20/0.25	.70/0.90	.035	0.035/0.050	.20/0.25			.20/0.30	
4027	.25/0.30	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35			.20/0.30	
4028	.25/0.30	.70/0.90	.035	.035/0.050	.20/0.35			.20/0.30	
4037	.35/0.40	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35			.20/0.30	
*4042	.40/0.45	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35			.20/0.30	
*4047	.45/0.50	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35			.20/0.30	
*4063	.60/0.67	.75/1.00	0.035	.040	.20/0.35			.20/0.30	
4116	.18/0.23	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35		0.40/0.60	.08/0.15	
4130	.28/0.33	.40/0.60	.035	.040	.20/0.35		.80/1.10	.15/0.25	
*4135	.33/0.38	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35		.80/1.10	.15/0.25	
4137	.35/0.40	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35		.80/1.10	.15/0.25	
4140	.38/0.43	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35		.80/1.10	.15/0.25	
4142	.40/0.45	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35		.80/1.10	.15/0.25	
4145	.43/0.48	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35		.80/1.10	.15/0.25	
4147	.45/0.50	.75/1.10	.035	.040	.20/0.30		.80/1.10	.15/0.25	
4150	.48/0.53	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35		.80/1.10	.15/0.25	
4161	.56/0.64	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35		.70/0.90	.25/0.35	
4320	.17/0.22	.45/0.65	.035	.040	.20/0.35	1.65/2.00	.40/0.60	.20/0.30	
*4337	.35/0.40	.60/0.80	.035	.040	.20/0.35	1.65/2.00	.70/0.90	.20/0.30	
E 4337	.35/0.40	.65/0.85	.025	.025	.20/0.35	1.65/2.00	.70/0.90	.20/0.30	
4340	.38/0.43	.60/0.80	.035	.040	.20/0.25	1.65/2.00	.70/0.90	.20/0.30	
E 4340	.38/0.43	.65/0.85	.025	.025	.20/0.35	1.65/2.00	.70/0.90	.20/0.30	
4419	.15/0.23	.45/0.65	.035	.040	.20/0.35			.45/0.60	
*4422	.20/0.25	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35			.35/0.45	
*4427	.24/0.29	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35			.35/0.45	
4615	.13/0.18	.45/0.65	.035	.040	.20/0.35	1.65/2.00		.20/0.30	
*4617	.15/0.20	.45/0.65	.035	.040	.20/0.35	1.65/2.00		.20/0.30	
4620	.17/0.22	.45/0.65	.035	.040	.20/0.35	1.65/2.00		.20/0.30	
4621	.18/0.23	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	1.65/2.00		.20/0.30	
4626	.24/0.29	.45/0.65	.035	.040	.20/0.35	.70/1.00		.15/0.25	
4718	.16/0.21	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.90/1.20	.35/0.55	.30/0.40	
4720	.17/0.22	.50/0.70	.035	.040	.20/0.35	.90/1.20	.35/0.55	.15/0.25	
4815	.13/0.18	.40/0.60	.035	.040	.20/0.35	3.25/3.75		.20/0.30	
4817	.15/0.20	.40/0.60	.035	.040	.20/0.35	3.25/3.75		.20/0.30	
4820	.16/0.23	.50/0.70	.035	.040	.20/0.35	3.25/3.75		.20/0.30	



## ACEROS DE BAJA ALEACION<sup>e</sup>

No AISI	C	Mn	P(max)	S(max)	Si	Ni	Cr	Mo	V
5015	0.12/0.17	0.30/0.50	0.035	0.040	0.20/0.35	.....	0.30/0.40	.....	.....
*5046	.43/0.50	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.....	.20/0.35	.....	.....
*5115	.13/0.18	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.....	.70/0.90	.....	.....
5120	.17/0.22	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.....	.70/0.90	.....	.....
5130	.28/0.33	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.....	.80/1.10	.....	.....
5132	.30/0.35	.60/0.80	.035	.040	.20/0.35	.....	.75/1.00	.....	.....
5535	.33/0.38	.60/0.80	.035	.040	.20/0.35	.....	.80/1.05	.....	.....
5140	.38/0.43	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.....	.70/0.90	.....	.....
5115	.43/0.48	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.....	.70/0.90	.....	.....
5147	.45/0.52	.70/0.90	.035	.040	.10/0.35	.....	.85/1.15	.....	.....
5150	.48/0.53	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.....	.70/0.90	.....	.....
5155	.50/0.60	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.....	.70/0.90	.....	.....
5160	.55/0.65	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.....	.70/0.90	.....	.....
*E 50100	95/1.10	25/0.45	.025	.040	20/0.35	.....	40/0.60	.....	.....
E 51100	95/1.10	25/0.45	.025	.025	20/0.35	.....	90/1.15	.....	.....
E 52100	95/1.10	25/0.45	.025	.025	20/0.35	.....	1.30/1.60	.....	.....
6115	.16/0.21	.50/0.70	.035	.040	.20/0.35	.....	.50/0.70	.....	0.10/0.15
*6120	.17/0.22	.70/0.90	.035	.040	.20/0.55	.....	.70/0.90	.....	.10 min
6150	.48/0.53	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.....	.80/1.10	.....	.15 min
*S115	.13/0.18	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	0.20/0.40	.30/0.50	0.08/0.15	.....
S615	.13/0.18	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S617	.15/0.20	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S620	.18/0.23	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S622	.20/0.25	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S625	.23/0.28	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S627	.25/0.30	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S630	.28/0.33	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S637	.35/0.40	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S640	.38/0.43	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S642	.40/0.45	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S645	.43/0.48	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
*S650	.48/0.53	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S655	.50/0.60	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
*S660	.55/0.65	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.15/0.25	.....
S720	.18/0.23	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.20/0.30	.....
*S735	.33/0.38	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.20/0.30	.....
S740	.38/0.43	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.20/0.30	.....
*S742	.40/0.45	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.20/0.30	.....
S822	.20/0.25	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.40/0.70	.40/0.60	.30/0.40	.....
9255	.50/0.60	.70/0.95	.035	.040	1.80/2.20	.....	.....	.....	.....
9260	.55/0.65	.70/1.00	.035	.040	1.80/2.20	.....	.....	.....	.....
*9262	.55/0.65	.75/1.00	.035	.040	1.80/2.20	.....	.25/0.40	.....	.....
*E 9310	.08/0.13	.45/0.65	.025	.025	.20/0.35	3.00/3.50	1.00/1.40	.08/0.15	.....
*9840	.38/0.43	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.85/1.15	.70/0.90	.20/0.30	.....
*9850	.48/0.53	.70/0.90	.035	.040	.20/0.35	.85/1.15	.70/0.90	.20/0.30	.....





**ACEROS AL BORO\***

Estos aceros deben tener un mínimo de 0.0005 por ciento de Boro.

No.AISI	C	Mn	P(max)	S(max)	Si	Ni	Cr	Mo	V
50B44	0.43/0.48	.075/1.00	0.035	0.040	0.20/0.35	.....	0.040/0.60	.....	.....
50B46	.43/0.50	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.....	.20/0.35	.....	.....
50B50	.48/0.53	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.....	.40/0.60	.....	.....
50B60	.55/0.65	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.....	.40/0.60	.....	.....
51B60	.55/0.65	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.....	.70/0.90	.....	.....
81B45	.43/0.48	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	0.20/0.40	.35/0.55	0.80/0.15	.....
94B17	.15/0.20	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.30/0.60	.30/0.50	.08/0.15	.....
94B30	.28/0.33	.75/1.00	.035	.040	.20/0.35	.30/0.60	.30/0.50	.08/0.15	.....

**ACEROS DE BAJA  
ALEACION - H  
(Con requisitos  
de templabilidad)**

No.AISI	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V
1330 H	0.27/0.33	1.45/2.05	0.20/0.35	.....	.....	.....	.....
1335 H	.32/0.38	1.45/2.05	.20/0.35	.....	.....	.....	.....
1340 H	.37/0.44	1.45/2.05	.20/0.35	.....	.....	.....	.....
3140 H	.37/0.44	0.60/1.00	.20/0.35	1.00/1.45	0.45/0.85	.....	.....
3310 H	.07/0.13	.30/0.70	.20/0.35	3.20/3.80	1.30/1.80	.....	.....
4027 H	.24/0.30	.60/1.00	.20/0.35	.....	.....	0.20/0.30	.....
4028 H	.24/0.30	.60/1.00	.20/0.35	.....	.....	.20/0.30	.....
4037 H	.34/0.41	.60/1.00	.20/0.35	.....	.....	.20/0.30	.....
4047 H	.44/0.51	.60/1.00	.20/0.35	.....	.....	.20/0.30	.....
4118 H	.17/0.23	.60/1.00	.20/0.35	.....	0.30/0.70	.08/0.15	.....
4130 H	.27/0.33	.30/0.70	.20/0.35	.....	.75/1.20	.15/0.25	.....
4137 H	.34/0.41	.60/1.00	.20/0.35	.....	.75/1.20	.15/0.25	.....
4140 H	.36/0.44	.65/1.10	.20/0.35	.....	.75/1.20	.15/0.25	.....
4142 H	.39/0.46	.65/1.10	.20/0.35	.....	.75/1.20	.15/0.25	.....
4145 H	.42/0.49	.65/1.10	.20/0.35	.....	.75/1.20	.15/0.25	.....
4147 H	.44/0.51	.65/1.10	.20/0.35	.....	.75/1.20	.15/0.25	.....
4150 H	.47/0.54	.65/1.10	.20/0.35	.....	.75/1.20	.15/0.25	.....
4161 H	.55/0.65	.65/1.10	.20/0.35	.....	.65/0.95	.25/0.35	.....
4320 H	.17/0.23	.40/0.70	.20/0.35	1.55/2.00	.35/0.65	.20/0.30	.....
4337 H	.34/0.41	.55/0.90	.20/0.35	1.55/2.00	.65/0.95	.20/0.30	.....
4340 H	.37/0.44	.55/0.90	.20/0.35	1.55/2.00	.65/0.95	.20/0.30	.....
E 4340 H	.37/0.44	.60/0.95	.20/0.35	1.55/2.00	.65/0.95	.20/0.30	.....
4419 H	.17/0.23	.35/0.75	.20/0.35	.....	.....	.45/0.60	.....
4620 H	.17/0.23	.35/0.75	.20/0.35	1.55/2.00	.....	.20/0.30	.....
4621 H	.17/0.23	.60/1.00	.20/0.35	1.55/2.00	.....	.20/0.30	.....
4626 H	.23/0.29	.40/0.70	.20/0.35	.65/1.05	.....	.15/0.25	.....
4718 H	.15/0.21	.60/0.95	.20/0.35	0.85/1.25	.30/0.60	.30/0.40	.....
4720 H	.17/0.23	.45/0.75	.20/0.35	0.85/1.25	.30/0.60	.15/0.25	.....
4815 H	.12/0.18	.30/0.70	.20/0.35	3.20/3.80	.....	.20/0.30	.....
4817 H	.14/0.20	.30/0.70	.20/0.35	3.20/3.80	.....	.20/0.30	.....
4820 H	.17/0.23	.40/0.80	.20/0.35	3.20/3.80	.....	.20/0.30	.....
5120 H	.17/0.23	.60/1.00	.20/0.35	.....	.60/1.00	.....	.....
5130 H	.27/0.33	.60/1.00	.20/0.35	.....	.75/1.20	.....	.....
5132 H	.29/0.35	.50/0.90	.20/0.35	.....	.65/1.10	.....	.....
5135 H	.32/0.38	.50/0.90	.20/0.35	.....	.70/1.15	.....	.....
5140 H	.37/0.44	.60/1.00	.20/0.35	.....	.60/1.00	.....	.....
5145 H	.42/0.49	.60/1.00	.20/0.35	.....	.60/1.00	.....	.....
5147 H	.45/0.52	.60/1.05	.20/0.35	.....	.80/1.25	.....	.....
5150 H	.47/0.54	.60/1.00	.20/0.35	.....	.60/1.00	.....	.....
5155 H	.50/0.60	.60/1.00	.20/0.35	.....	.60/1.00	.....	.....
5160 H	.55/0.65	.65/1.10	.20/0.35	.....	.60/1.00	.....	.....
6118 H	.15/0.21	.40/0.80	.20/0.35	.....	.40/0.80	.....	0.10/0.15
6150 H	.47/0.54	.60/1.00	.20/0.35	.....	.75/1.20	.....	.15 mn.
8617 H	.14/0.20	.60/0.95	.20/0.35	0.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8620 H	.17/0.23	.60/0.95	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8622 H	.19/0.25	.60/0.95	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8625 H	.22/0.28	.60/0.95	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8627 H	.24/0.30	.60/0.95	.20/0.35	.35/0.65	.35/0.65	.15/0.25	.....
8630 H	.27/0.33	.60/0.95	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8637 H	.34/0.41	.70/1.05	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8640 H	.37/0.44	.70/1.05	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8642 H	.39/0.46	.70/1.05	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8645 H	.42/0.49	.70/1.05	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8655 H	.50/0.60	.70/1.05	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.15/0.25	.....
8720 H	.17/0.23	.60/0.95	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.20/0.30	.....
8740 H	.37/0.44	.70/1.05	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.20/0.30	.....
8822 H	.19/0.25	.70/1.05	.20/0.35	.35/0.75	.35/0.65	.30/0.40	.....
9260 H	.55/0.65	.65/1.10	1.70/2.20	.....	.....	.....	.....

# ACEROS AL BORO-H

(Con requisitos de templabilidad)

Estos aceros deben tener un mínimo de 0.0005 por ciento de Boro

AISI	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V
50B40 H	0.37/0.44	0.65/1.10	0.20/0.35	.....	0.30/0.70	.....	.....
50B44 H	.42/0.49	.65/1.10	.20/0.35	.....	.30/0.70	.....	.....
50B46 H	.43/0.50	.65/1.10	.20/0.35	.....	.13/0.43	.....	.....
50B50 H	.47/0.54	.65/1.10	.20/0.35	.....	.30/0.70	.....	.....
50B60 H	.55/0.65	.65/1.10	.20/0.35	.....	.30/0.70	.....	.....
51B60 H	.55/0.65	.65/1.10	.20/0.35	.....	.60/1.00	.....	.....
81B45 H	.42/0.49	.70/1.05	.20/0.35	0.15/0.45	.30/0.60	0.08/0.15	.....
94B17 H	.14/0.20	.70/1.05	.20/0.35	.25/0.65	.25/0.55	.08/0.15	.....
94B30 H	.27/0.33	.70/1.05	.20/0.35	.25/0.65	.25/0.55	.08/0.15	.....

\* Aceros estándar para alambros únicamente

\*\* Contenido de azufre de 0.035/0.050 por ciento.

\* Silicio: Cuando se requiera especificar el silicio, se usan generalmente los siguientes límites:

Designaciones de aceros	Límites de Silicio
Hasta C 1015 excl.	0.10% max.
C 1015 a C 1025 incl.	0.10% max., 0.10/0.20% , ó 0.15/0.30%
Arriba de C 1025	0.10/0.20% ó 0.15/0.30%

Cobre: Cuando se requiera, el cobre se especifica como un elemento agregado a un acero estándar.

Plomo: Cuando se requiera, el plomo se especifica como un elemento agregado a un acero estándar.

\* Silicio: Cuando se requiera especificar el silicio, se usan generalmente los siguientes límites:

Designaciones de aceros	Límites de Silicio
Hasta C 1110 incl.	0.10% max.
Arriba de C 1110	0.10% max., 0.10/0.20% , ó 0.15/0.30%

Plomo: Cuando se requiera, el plomo se especifica como

un elemento agregado a un acero estándar.

\* Silicio: Debido a la naturaleza tecnológica del proceso, los aceros bessemer ácidos no se producen con un contenido de silicio especificado.

Plomo: Cuando se requiera, el plomo se especifica como un elemento agregado a un acero estándar.

\* Silicio: No es práctica común producir estos aceros con límites de silicio especificados.

Plomo: Cuando se requiera, el plomo se especifica como un elemento agregado a un acero estándar.

\* Los grados mostrados en la lista con el prefijo E se fabrican generalmente por el proceso de horno eléctrico básico. Todos los demás se fabrican normalmente por el proceso de horno de hogar abierto básico, pero pueden fabricarse en horno eléctrico básico con ajustes en los contenidos de fósforo y azufre.

Las limitaciones de fósforo y azufre para cada proceso de aceración son como sigue:

Proceso	Por ciento máximo	
	P	S
Horno eléctrico básico	0.025	0.025
Horno de hogar abierto básico	0.035	0.040
Horno eléctrico ácido	0.050	0.050
Horno de hogar abierto ácido	0.050	0.050



El contenido mínimo de silicio para aceros de baja aleación en horno de hogar abierto ácido u horno eléctrico ácido es de 0.15 por ciento.

Pequeñas cantidades de ciertos elementos que no están especificados ni requeridos se encuentran presentes en los aceros de baja aleación. Estos elementos se consideran como

residuales y pueden estar presentes en las siguientes cantidades máximas: Cobre 0.35% ; níquel 0.25% ; cromo 0.20% ; Molibdeno 0.06% .

Cuando se muestran contenidos mínimos y máximos de azufre, esto indica aceros resulturados.

Tabla 9. Aplicaciones de los aceros al carbono

Porcentaje C	Aplicaciones
0.05-0.10	Lámina, tira, tubos, clavos de alambre o puntas de París
0.10-0.20	Remaches, tornillos, partes para cementarse o templarse superficialmente.
0.20-0.35	Acero estructural, placa o palastro, piezas forjadas tales como eje de levas.
0.35-0.45	Acero de maquinaria (árboles, ejes, vástagos de conexión, etc.)
0.45-0.55	Piezas grandes de forja (cigüeñales, engranajes para trabajo pesado, etc.)
0.60-0.70	Matrices para cabezas de pernos y para estampación; rieles, tornillos opresores o prisioneros.
0.70-0.80	Cuchillas para tijeras o cizallas, cortafríos o cinceles, martillos, picos, sierras de cinta.
0.80-0.90	Matrices y punzones de corte para preparar discos base, barrenas o perforadores para roca, cinceles de mano.
0.90-1.00	Resortes, escariadores, brochaladoras, punzones pequeños y matrices o dados.
1.00-1.10	Resortes pequeños, herramientas para torno, cepilladora, limadora y ranuradora o mortajadora.
1.10-1.20	Brocas salomónicas, machos de roscar pequeños, dados para cortar rosca o cojinetes de terraja, cuchillería, herramientas pequeñas de torno.
1.10-1.30	Limas, asientos o jaulas para bolas, mandriles, hileras para estirado o trefilado, hojas para afeitar.

Tipo de acero y tratamiento térmico para resortes grandes, planos, de hojas o ballestas y helicoidales formados en caliente

Acero AISI No.	Temp. de normalización*		Temp. de temple por inmersión†		Tem. de revenido	
	°C	°F	°C	°F	C	F
1090	860-885	1575-1625	800-830	1475-1525	455-565	850-1050
6150	870-900	1600-1650	870-900	1600-1650	455-565	850-1050
9260	870-900	1600-1650	870-900	1600-1650	455-565	850-1050
5160	870-900	1600-1650	800-830	1475-1525	455-565	850-1050
8650	870-900	1600-1650	870-900	1600-1650	455-565	850-1050

\*Estas temperaturas de normalización se deben usar como temperaturas de conformación siempre que sea posible.

†Enfriamiento por inmersión de aceite a 45 a 60°C (110 a 140°F).



## ACEROS INOXIDABLES

DESIGNACION DE SERIES	CLASES
2xx	ACEROS AL CROMO-NIQUEL-MANGANESO; NO TEMPLABLES, AUSTENITICOS Y NO MAGNETICOS.
3xx	ACEROS AL CROMO-NIQUEL; NO TEMPLABLES, AUSTENITICOS Y NO MAGNETICOS.
4xx	ACEROS AL CROMO; TEMPLABLES, MARTENSITICOS Y MAGNETICOS.
4xx	ACEROS AL CROMO; NO TEMPLABLES, FERRITICOS Y MAGNETICOS.
5xx	ACEROS AL CROMO; BAJO CROMO Y RESISTENTES AL CALOR.
6xx	ACEROS DE ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACION.

## ACEROS INOXIDABLES CLASIFICACION

Los aceros inoxidable se pueden clasificar en tres clases o grupos:

- 1o.— ACEROS MARTENSITICOS (ADMITEN EL TEMPLE).
- 2o.— ACEROS FERRITICOS (NO TEMPLABLES).
- 3o.— ACEROS AUSTENITICOS. (NO TEMPLABLES).

### 1er. GRUPO - MARTENSITICOS (templables)

TIPO		TIPO	
AISI	SOLAR	AISI	SOLAR
403	(AISI)	431	Mercurio XI
410	Mercurio VII	440 A	(AISI)
416	Mercurio IV	440 B	(AISI)
420	Mercurio V	440 C	(AISI)
420 F	Mercurio IX	440 F	(AISI)

### USOS TIPICOS

Válvulas      Resortes      Tornillos      Tuercas      Remaches      Cuchillería      Uniones de Aviones  
Bujes y Baleros      Partes para Bombas      Partes de avión.

Los aceros inoxidable **MARTENSITICOS** se fabrican principalmente con Cromo, cuyo contenido varía del 11.5% al 18 % , junto con cantidades cuidadosamente controladas de Carbono para impartir a estos aceros la propiedad de endurecerse por tratamiento térmico.

Conforme se aumenta el contenido de Carbono en estos aceros, se aumentan también las propiedades mecánicas que

pueden obtenerse por tratamiento térmico. Sin embargo al aumentar el Carbono, mayor número de carburos de Cromo son formados y por lo tanto baja el contenido de Cromo disponible para resistir la corrosión. De acuerdo con esto, junto con cualquier incremento de Carbono debe aumentarse el contenido de Cromo, de tal manera que se obtenga una resistencia a la corrosión similar a la de los tipos martensíticos de bajo carbono.

Los aceros Martensíticos muestran una excelente resistencia a la corrosión a medios ligeramente corrosivos tales como: ácidos débiles, vapor, agua fresca, medio ambiente, etc.

La máxima resistencia a la corrosión en estos aceros, se obtiene cuando son templados a su máxima dureza. Los aceros de esta clase, particularmente los tipos de más bajo contenido de carbono, son usados para altas temperaturas. Resisten la oxidación a temperaturas hasta de 650° C y tienen buenas

características de resistencia mecánica a temperaturas hasta de 540° C.

Los aceros de este primer grupo son Ferro-Magnéticos, se forjan y trabajan en caliente fácilmente, generalmente se pueden trabajar en frío sin dificultad y pueden maquinarse satisfactoriamente. Pueden ser soldados; sin embargo, debido a su propiedad de templarse al aire, deberán tomarse precauciones para evitar que se agrieten en las áreas soldadas.

## 2o. GRUPO – FERRITICOS (no templables)

TIPO		TIPO	
AISI	SOLAR	AISI	SOLAR
405 430	(AISI) (AISI)	430 F 446	Mercurio VIII (AISI)

### USOS TIPICOS

Cambiadores de Calor, Tubos de calderas, Partes de hornos, Utensilios domésticos, Molduras ornamentales para automóviles, Tornillos, tuercas y Remaches; Equipo de procesos industriales, Envases para productos químicos y alimenticios.

Los aceros inoxidables FERRITICOS son aceros fabricados con 12% a 27% de Cromo, con el carbono controlado al más bajo porcentaje práctico, para disminuir su efecto nocivo en la resistencia a la corrosión. Estos aceros prácticamente no se endurecen por tratamiento térmico.

Estos aceros son Ferro-Magnéticos y pueden endurecerse moderadamente por trabajo en frío. Son menos resistentes a elevadas temperaturas que los del primer grupo, sin embargo este grupo tiene mejor resistencia a la corrosión y a la formación de cascarrilla que el primero.

Los aceros Ferríticos pueden ser forjados y trabajados en

caliente algo más fácil que los aceros martensíticos y pueden ser enfriados al aire después de trabajarlos en caliente sin el peligro de que se agrieten.

La maquinabilidad de este grupo es en general igual a la del primero bajos en carbono. Estos aceros también pueden ser soldados fácilmente, sin embargo, los aceros con más alto contenido de Cromo son susceptibles al crecimiento del grano y por esta razón hacerse frágiles en la zona afectada por el calor de la soldadura. Consecuentemente, normalmente deben recocerse después de soldados, para restituir su ductilidad.





### 3er. GRUPO – AUSTENITICOS (no templebles)

TIPO		TIPO	
AISI	SOLAR	AISI	SOLAR
301	(AISI)	310	Mercurio X
302	Mercurio O	314	(AISI)
303 Se	Mercurio I	316	Mercurio III
304	Mercurio II	317	(AISI)
305	(AISI)	321	(AISI)
308	(AISI)	347	(AISI)
309	Mercurio VI	348	(AISI)

### USOS TÍPICOS

Los usos de los aceros Austeníticos son prácticamente ilimitados y encuentran una amplia aplicación como se puede ver a continuación.

Industria Aeronáutica, Artículos del Hogar, Industria Lechera, Industria papelera, Procesos de alimento, Industria Textil, Industria de Transportación, Artículos Farmacéuticos, Ornamentos Arquitectónicos, Equipo de proceso Químico, etc.

Los aceros inoxidable austeníticos son aceros fabricados con altos contenidos de Cromo y Níquel en las siguientes proporciones 16% a 26% de Cromo y 6% a 22% de Níquel y como en los aceros ferríticos, el carbono se encuentra presente como elemento residual y es controlado al límite más bajo posible.

Estos aceros no se endurecen por tratamiento térmico, pero pueden ser trabajados en frío para dar altos niveles de resistencia. Los aceros Austeníticos tienen considerablemente mejor resistencia a la corrosión que los aceros Martensíticos y Ferríticos y se caracterizan por su excelente resistencia mecánica y resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas.

Estando recocidos, estos aceros no son magnéticos pero llegan a hacerse parcialmente magnéticos después de trabajarse en frío. Los aceros austeníticos son notables por su excepcional tenacidad y ductilidad y son particularmente apropiados para operaciones difíciles de formado en frío.

Estos aceros pueden ser trabajados en caliente por forjado o laminado sin mucha dificultad y también como los aceros ferríticos, pueden ser enfriados al aire después del trabajo en caliente sin el peligro de que se agrieten.

Para la maquinabilidad de los aceros austeníticos generalmente se requieren cortes mas gruesos y velocidades mas bajas que los empleados en los aceros martensíticos y ferríticos.

Una característica de la mayoría de los aceros de este grupo es su susceptibilidad a la corrosión intergranular después de prolongados calentamientos dentro del intervalo de temperaturas de 400° a 900° C. Cuando estos aceros se calientan a temperaturas dentro de este intervalo crítico el cromo se precipita en los límites de grano en forma de carburos de cromo, con lo que se reduce considerablemente la resistencia a la corrosión en los bordes de los granos. Consecuentemente, es aconsejable recocer los aceros austeníticos a una temperatura entre 1000 y 1100° C y enfriarlos rápidamente en agua.

El problema de la corrosión intergranular puede ser evitado por el uso de los tipos 321 y 347, que son aceros estabilizados con Titanio y Columbium, respectivamente. Estos elementos se combinan con el carbono formando carburos de Titanio y Columbium, en lugar de carburos de Cromo.

Este grupo de aceros puede soldarse fácilmente, obteniéndose soldaduras fuertes y tenaces; sin embargo, al calentar el área soldada no se puede evitar que pase por las temperaturas críticas en las cuales precipitan los carburos de cromo. De ahí que en estos casos es necesario recocer como ya se indicó antes, después de efectuar la soldadura.

Cuando no es práctico el recocido después de soldar, deberán usarse aceros estabilizados como lo son el 321 y 347 ya que, como antes se dijo, son menos susceptibles a la corrosión intergranular.



# CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Tipo AISI	C	Mn (max)	P (max)	S (max)	Si (máx)	Cr	Ni	Mo	Cu	Se	Ti	Cb-Ta	Ta	Al	N	
201	0.15 máx	b5.50/7.50	0.060	0.030	1.00	16.00/18.00	3.50/ 5.50									0.25 máx
202	.15 máx	b7.50/10.00	.060	.030	1.00	17.00/19.00	4.00/ 6.00									.25 máx
301	.15 máx	2.00	.045	.030	1.00	16.00/18.00	6.00/ 8.00									
302	.15 máx	2.00	.045	.030	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00									
321H	.15 máx	2.00	.045	.030	b2.00/3.00	17.00/19.00	8.00/10.00									
303	.15 máx	2.00	.045	.030	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00	a 0.60 máx								
303Se	.15 máx	2.00	.045	.030	1.00	17.00/19.00	8.00/10.00			0.15 mín						
304	.08 máx	2.00	.045	.030	1.00	16.00/20.00	8.00/12.00									
304L	.03 máx	2.00	.045	.030	1.00	16.00/20.00	8.00/12.00									
305	.12 máx	2.00	.045	.030	1.00	17.00/19.00	10.00/13.00									
306	.08 máx	2.00	.045	.030	1.00	19.00/21.00	10.00/12.00									
309	.20 máx	2.00	.045	.030	1.00	22.00/24.00	12.00/15.00									
309S	.05 máx	2.00	.045	.030	1.00	22.00/24.00	12.00/15.00									
310	.25 máx	2.00	.045	.030	1.50	24.00/26.00	19.00/22.00									
310S	.05 máx	2.00	.045	.030	1.50	24.00/26.00	19.00/22.00									
314	.25 máx	2.00	.045	.030	b1.50/3.00	23.00/26.00	19.00/22.00									
316	.08 máx	2.00	.045	.030	1.00	16.00/18.00	10.00/14.00	2.00/3.00								
316L	.03 máx	2.00	.045	.030	1.00	16.00/18.00	10.00/14.00	2.00/3.00								
317	.05 máx	2.00	.045	.030	1.00	18.00/20.00	11.00/15.00	3.00/4.00								
321	.08 máx	2.00	.045	.030	1.00	17.00/19.00	9.00/12.00				5 a C mín					
347	.08 máx	2.00	.045	.030	1.00	17.00/19.00	9.00/13.00					10 a C mín				
348	.08 máx	2.00	.045	.030	1.00	17.00/19.00	9.00/13.00		0.20 máx			10 a C mín	0.10 máx			
403	.15 máx	1.00	.040	.030	0.50	11.50/13.00										
405	.05 máx	1.00	.040	.030	1.00	11.50/14.50										
410	.13 máx	1.00	.040	.030	1.00	11.50/13.50										0.10/0.30
414	.15 máx	1.00	.040	.030	1.00	11.50/13.50	1.25/2.50									
416	.15 máx	1.25	.060	.15 mín	1.00	12.00/14.00		a 0.60 máx								
416 Se	.15 máx	1.25	.060	.060	1.00	12.00/14.00				0.15 mín						
420	.15 máx	1.00	.040	.030	1.00	12.00/14.00										
430	0.12 máx	1.00	.040	.030	1.00	14.00/18.00										
430F	.12 máx	1.25	.060	.15 mín	1.00	14.00/18.00		a .60 máx								
430F Se	.12 máx	1.25	.060	.060	1.00	14.00/18.00				0.15 mín						
431	.20 máx	1.00	.040	.030	1.00	15.00/17.00	1.25/2.50									
440A	b0.075	1.00	.040	.030	1.00	16.00/18.00		.75 máx								
440B	.75/0.95	1.00	.040	.030	1.00	16.00/18.00		.75 máx								
440C	.95/1.20	1.00	.040	.030	1.00	16.00/18.00		.75 máx								
442	.20 máx	1.00	.040	.030	1.00	18.00/23.00										
446	.20 máx	1.50	.040	.030	1.00	23.00/27.00										.25 máx
501	0.10 mín	1.00	.040	.030	1.00	4.00/ 6.00		40/0.65								
502	0.10 máx	1.00	.040	.030	1.00	4.00/ 6.00		40/0.65								

- a A opción del fabricante; se reporta únicamente cuando se agrega intencionalmente.
- b Límites de composición.

## ACEROS INOXIDABLES DE ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACION

TIPO	C(max)	Mn(max)	P(max)	S(max)	Si (max)	Cr	Ni	Cu	Cb-Ta	Al
*15-5 PH	.07	1.00	.04	.03	1.00	14.00/15.50	3.50/5.50	2.50/4.50	.15/.45	
*17-4 PH	.07	1.00	.04	.03	1.00	15.50/17.50	3.00/5.00	3.00/5.00	.15/.45	
**17-7 PH	.09	1.00	.04	.03	1.00	16.00/18.00	6.50/7.75			.75/1.50

- \* Martensítico.
- \*\* Semiaustenítico.

## 290 Transformaciones de los aceros inoxidable y resistentes al calor

## — Aceros inoxidable martensíticos

Designación		Correspondencia con DIN		Composición Química								
UNE Numérica	Simbólica	AISI	No. Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Otros
	X10Cr13		1.4006	0.08 0.12	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	12.00 14.00	-	-	-
F-3401	X12Cr13	410		0.09 0.15	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	11.50 14.00	-	1.00 máx	-
	X15Cr13		1.4024	0.12 0.17	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	12.00 14.00	-	-	-
F-3402	X20Cr13	420	1.4021	0.16 0.25	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	12.00 14.00	-	1.00 máx	-
F-3403	X30Cr13	420	1.4028	0.26 0.35	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	12.00 14.00	-	1.00 máx	-
F-3404	X40Cr13	420	1.4034	0.36 0.45	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	12.50 14.50	-	1.00 máx	-
	X15CrMo13		1.4119	0.12 0.17	1.00 máx	1.00 máx	0.030 máx	0.030 máx	12.00 14.00	1.00 1.30	-	-
	X20CrMo13		1.4120	0.17 0.22	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	12.00 14.00	0.90 1.30	1.00 máx	-
	X55CrMo14		1.4110	0.50 0.60	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	13.00 15.00	0.50 0.60	-	-
	X100CrMo13		1.4108	1.00 1.10	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	12.00 14.00	0.40 0.60	-	-
	X38CrMo16		1.4122	0.33 0.43	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	15.50 17.50	1.00 1.30	1.00 máx	-
F-3423	X46CrMo16			0.42 0.50	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	15.50 17.50	1.00 1.50	1.00 máx	V=0.20 máx
F-3427	X15CrNi16	431	1.4057	0.10 0.20	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	15.00 18.00	-	1.50 3.00	-
	X65CrMo17	440A		0.60 0.75	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	16.00 18.00	0.75 máx	-	-
	X85CrMo17	440B		0.75 0.95	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	16.00 18.00	0.75 máx	-	-
	X105CrMo17	440C		0.95 1.20	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	16.00 18.00	0.75 máx	-	-
	X90CrMoV18		1.4112	0.85 0.95	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	17.00 19.00	0.90 1.30	-	V=0.07-0.12
	X90CrCoMoV17		1.4535	0.85 0.95	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	15.50 17.50	0.40 0.60	-	Co=1.20-1.80 V=0.20-0.30
	X105CrCoMoV18-02		1.4528	1.00 1.10	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	16.50 18.50	1.00 1.50	-	Co=1.30-1.80 V=0.07-0.12

**Aceros inoxidables martensíticos de fácil mecanización**

<i>Designación</i>		<i>Correspondencia con</i>		<i>Composición Química</i>								
	<i>Simbólica</i>	<i>AISI</i>	<i>DIN No Werkstoff</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Otros</i>
F-3411	X12CrS13	416		0.08 0.15	1.00 máx	1.50 máx	0.060 máx	0.15 0.35	12.00 14.00	0.60 máx	1.00 máx	-
	X12CrSe13	416Se		0.15 máx	1.00 máx	1.25 máx	0.060 máx	0.060 máx	12.00 14.00	-	-	Se=0.15 mín
	X35CrS13	420F		0.30 0.40	1.00 máx	1.25 máx	0.060 máx	0.15 mín	12.00 14.00	0.60 máx	-	-
	X12CrMoS17		1.4104	0.10 0.17	1.00 máx	1.50 máx	0.045 máx	0.15 0.35	15.50 17.50	0.20 0.30	-	-

En este grupo quedan incluidos todos los aceros inoxidables martensíticos en cuya composición intervienen elementos favorecedores de la maquinabilidad, como el azufre, el selenio, etc. en cantidades superiores al 0.15%.

**Aceros inoxidables ferríticos**

Designación		Correspondencia con		Composición Química								
UNE Numérica	Simbólica	AISI	DIN No. Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Otros
F-3110	X6Cr13		1.4000	0.08 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	11.50 14.00	—	0.50 máx	—
F-3111	X6CrAl13	405	1.4002	0.08 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	11.50 14.00	—	0.50 máx	Al=0.10-0.30
	X6CrTi11	409	1.4512	0.08 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.045 máx	0.045 máx	10.50 11.75	—	0.50 máx	6xC<Ti≤0.75
F-3113	X8Cr17	430	1.4016	0.10 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	16.00 18.00	—	0.50 máx	—
F-3114	X8CrTi17	430Ti	1.4510	0.10 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	16.00 18.00	—	0.50 máx	5xC<Ti≤0.80
	X8CrNb17	430Cb	1.4511	0.10 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	16.00 18.00	—	0.50 máx	Nb>8xC
	X6CrMo17-01		1.4113	0.08 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	16.00 18.00	0.90 1.20	0.50 máx	—

**Aceros Inoxidables ferríticos de fácil mecanización (\*\*)**

F-3117	X10CrS17	430F	—	0.12 máx	1.00 máx	1.50 máx	0.060 máx	0.15 0.35	16.00 18.00	0.60 máx	0.50 máx	—
	X10CrSe17	430FSe	—	0.12 máx	1.00 máx	1.50 máx	0.060 máx	0.060 máx	16.00 18.00	—	0.50 máx	Se>0.15

\*\* En este grupo quedan incluidos todos los aceros inoxidables ferríticos en cuya composición intervienen elementos favorecedores de la maquinabilidad, como el azufre, el selenio, etc. en cantidades superiores al 0.15%.

Aceros inoxidables austeníticos

Designación		Correspondencia con		Composición Química								
UNE Numérica	Simbólica	AISI	DIN No. Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Otros
F-3503	X2CrNi19-10	304L	1.4306	0.03 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 20.00	-	8.00 12.00	-
F-3504	X6CrNi19-10	304	1.4301	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 20.00	-	8.00 10.50	-
	X6CrNiN19-10	304N		0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 20.00	-	8.00 10.50	N=0,10-0,16
F-3507	X10CrNi18-09	302	1.4304	0.12 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	17.00 19.00	-	8.00 10.00	-
F-3513	X8CrNi18-12	305	1.4303	0.10 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	17.00 19.00	-	11.00 13.00	-
F-3517	X12CrNi17-07	301	1.4310	0.15 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 18.00	-	8.00 8.00	-
F-3523	X6CrNiTi18-11	321	1.4541	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	17.00 19.00	-	9.00 12.00	5xC<Ti<0.80
F-3524	X6CrNiNb18-11	347	1.4550	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	17.00 19.00	-	9.00 12.00	10xC<Nb<1.00
F-3533	X2CrNiMo17-12-03	316L	1.4404	0.03 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 18.00	2.00 3.00	10.00 14.00	-
F-3534	X6CrNiMo17-12-03	316	1.4401	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 18.00	2.00 3.00	10.00 14.00	-
	X6CrNiMoN17-12-03	316N		0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 18.00	2.00 3.00	10.00 14.00	N=0,10-0,16
F-3535	X6CrNiMoTi17-12-03	316Ti	1.4571	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 18.00	2.00 3.00	10.00 14.00	5xC<Ti<0.80
	X6CrNiMoNb17-12-03	316Cb	1.4580	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 18.00	2.00 3.00	10.00 14.00	Nb>8xC
	X6CrNiMo19-13-04	317	1.4438	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	18.00 20.00	3.00 4.00	11.00 15.00	-
	X12CrNiMn17-05-07	201		0.15 máx	1.00 máx	5.50 7.50	0.060 máx	0.030 máx	16.00 18.00	-	3.50 5.50	N<0.25
	X12CrNiMn18-05-09	202	1.3965	0.15 máx	1.00 máx	7.50 10.00	0.060 máx	0.030 máx	17.00 19.00	-	4.00 6.00	N<0.25
	X6CrNi13-13		1.4307	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	12.00 14.00	-	12.00 14.00	-

## Aceros inoxidables austeníticos de fácil mecanización (\*\*\*)

Designación		Correspondencia con		Composición Química								
UNE Numérica	Simbólica	AISI	DIN No. Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Otros
F-3508	X10CrNiS18-09	303	1.4305	0.12 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.20 máx	0.15 0.35	17.00 19.00	0.60 máx	8.00 10.00	-
	X10CrNiSe18-09	303Se		0.12 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.20 máx	0.060 máx	17.00 19.00	-	8.00 10.00	Se ≥ 0.15
	X6CrNiMoS17-12-02	316F	1.4427	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.20 máx	0.15 mín	16.00 18.00	1.75 2.50	10.00 14.00	-

\*\*\* En este grupo quedan incluidos todos los aceros inoxidables austeníticos en cuya composición intervienen elementos favorecedores de la maquinabilidad, como el azufre, el selenio, etc. en cantidades superiores al 0.15%.

## Aceros resistentes al calor (refractarios)

Designación		Correspondencia con		Composición Química								
UNE Numérica	Simbólica	AISI	DIN No. Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Otros

## Martensíticos \*\*\*\*

	X12CrMo5	502	1.7373	0.15 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	4.00 6.00	0.40 0.65	-	
	X22CrNiMoVW12	422	1.4935	0.20 0.25	0.75 máx	1.00 máx	0.025 máx	0.025 máx	11.00 13.00	0.75 1.25	0.50 1.00	V=0.15-0.30 W=0.75-1.25

## Ferríticos \*\*\*\*\*

	X10CrSi13		1.4722	0.12 máx	1.90 2.40	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	12.00 14.00	-	-	-
	X10CrAl13		1.4724	0.12 máx	0.70 1.20	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	12.00 14.00	-	-	Al=0.70-1.20
	X10CrSi18		1.4741	0.12 máx	1.90 2.40	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	17.00 19.00	-	-	-
	X10CrAl18		1.4742	0.12 máx	1.00 1.50	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	17.00 19.00	-	-	Al=0.70-1.20
	X10CrAl24		1.4762	0.12 máx	1.00 1.50	1.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	23.00 25.00	-	-	Al=1.20-1.70
	X15Cr27		1.3810	0.25 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	23.00 30.00	-	-	-

## Austeníticos

	X6CrNi23-13	309S	1.4833	0.08 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	22.00 24.00	-	12.00 15.00	-
	X15CrNi23-13	309	1.4829	0.20 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	22.00 24.00	-	12.00 15.00	-
	X6CrNi25-20	310S	1.4335	0.08 máx	1.50 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	24.00 26.00	-	19.00 22.00	-
	X20CrNi25-20	310	1.4841	0.25 máx	1.50 máx	2.00 máx	0.045 máx	0.030 máx	24.00 26.00	-	19.00 22.00	-
	X10CrNiWTi17-13-03		1.4962	0.07 0.12	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	16.00 18.00	-	12.00 14.00	W=2.50-4.00 Ti=0.40-0.60
	X6CrNi18-36	330RA	1.4333	0.08 máx	1.00 1.50	2.00 máx	0.030 máx	0.030 máx	18.00 20.00	-	34.50 37.00	Cu=0.50 máx Sn=0.025 máx Pb=0.005 máx

\*\*\*\* En la mecanización de los aceros refractarios martensíticos se aplicarán los valores indicados para los aceros inoxidable martensíticos.

\*\*\*\*\* En la mecanización de los aceros refractarios ferríticos se aplicarán los valores indicados para los aceros inoxidable ferríticos.



## Aceros para válvulas (refractarios)

Designación		Correspondencia con		Composición Química								
UNE Numérica	Simbólica	AISI	DIN N° Werkstoff	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Otros
	X45CrSi9-03		1.4718	0.40 0.50	2.75 3.75	0.80 máx	0.040 máx	0.030 máx	7.50 9.50	-	-	-
	X40CrSiMo10-02		1.4731	0.35 0.45	2.00 3.00	0.80 máx	0.040 máx	0.030 máx	9.00 11.00	0.80 1.30	-	-
	X80CrSiNi20-02		1.4747	0.75 0.85	1.75 2.75	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	19.00 21.00	-	1.00 1.75	-
	X52CrMnNiN21-09		1.3967	0.48 0.58	0.25 máx	8.00 10.00	0.045 máx	0.035 máx	20.00 22.00	-	3.25 4.50	N=0.38-0.50 C+N=0.92-1.00
	X45CrNiW18-09		1.4873	0.40 0.50	2.00 3.00	0.80 1.50	0.045 máx	0.030 máx	17.00 19.00	-	8.00 10.00	W=0.80-1.20

## Aceros austeno-ferríticos

	X8CrNiMo27-05	329	1.4460	0.10 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	25.00 30.00	1.00 2.00	3.00 6.00	-
	X4CrNiMoCu21-08			0.06 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	20.00 22.00	2.20 2.80	7.00 9.00	Cu=1.00-2.00

## Aceros endurecibles por precipitación

	X5CrNiCuNb17-04-04	324	1.4548	0.07 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	15.50 17.50	-	3.00 5.00	Cu=3.00-5.00 Cb+Ta=0.15-0.45
	X7CrNiMoAl15-07-03		1.4532	0.09 máx	1.00 máx	1.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	14.00 16.00	2.00 3.00	6.50 7.75	Al=0.75-1.50
	X5CrNiMoTiV15-25			0.07 máx	1.00 máx	2.00 máx	0.040 máx	0.030 máx	14.50 16.00	1.00 1.60	24.00 26.00	Ti=1.80-2.30 V=0.20-0.40

\*\*\*\* En la mecanización de los Aceros Refractarios Martensíticos se aplicarán los valores indicados para los Aceros Inoxidables Martensíticos.

\*\*\*\*\* En la mecanización de los Aceros Refractarios Ferríticos se aplicarán los valores indicados para los Aceros Inoxidables Ferríticos.

# PROPIEDADES TIPICAS DE

Tipo AISI	Composición Típica (%)	Forma (1)	PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL RECOCIDO, A TEMPERATURA AMBIENTE				PROPIEDADES NOMINALES DEL MATERIAL RECOCIDO, A BAJAS TEMPERATURAS						
			Resistencia a la tracción, 1000 Psi	Límite de Fluencia (0.2 %), 1000 Psi	Alargamiento en 2", %	Dureza	Temperatura, °C	Resistencia a la Tracción, 1000 Psi	Límite de Fluencia, 1000 Psi	Alargamiento en 2", %	Reducción de Área, %	Resistencia al Impacto, 1200 Ft Lb	
Auténticos (1)													
201	18-18 Cr, 3-5.5 Ni, 0.15 C, 8.5-9 Mn, 1.0 Si, 0.060 P, 0.030 S, 0.25 N	Lamina Cinta Tubería	115 115 115	55 55 55	55 55 55	Rb 90 Rb 90 Rb 90	+ 21 - 184	— —	— —	— —	— —	110-120 38-70	
202	17-18 Cr, 6-8 Ni, 0.15 C, 7.5-10.0 Mn, 1.0 Si, 0.060 P, 0.030 S, 0.25 N	Lamina Cinta Tubería	105 105 105	55 55 55	55 55 55	Rb 90 Rb 90 Rb 90	+ 21 - 73 - 184 - 253	100 145 200 220	55 85 150 170	55 38 15 5	—	110-120 — 42-120	
301	18-18 Cr, 6-8 Ni, 0.15 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Plancha Lamina Cinta Tubería	105 110 110 105	40 40 40 40	55 60 60 50	Bhn 165 Rb 85 Rb 85 Rb 85	+ 21 0 - 40 - 82 - 184	105 155 180 195 270	40 43 41 50 75	60 53 42 40 30	70 84 83 82 87	100 110 110 110 110	
302	17-18 Cr, 8-10 Ni, 0.15 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Barra Plancha Lamina Cinta Tubería Alambre	85 90 90 90 85 90	35 35 40 40 35 35	60 60 50 50 50 60	Bhn 150 Rb 80 Rb 85 Rb 85 Rb 85 Rb 83	+ 21 0 - 40 - 62 - 196 - 253	94 122 145 161 219 230	37 40 48 50 80 125	68 65 60 57 45 41	78 76 73 70 70 55	110 110 110 110 110 —	
302B	17-18 Cr, 8-10 Ni, 0.15 C, 2.0 Mn, 2.0-3.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Barra Plancha Lamina Cinta Tubería	90 90 95 95 85	40 40 40 40 35	50 50 55 55 50	Rb 85 Rb 85 Rb 85 Rb 85 Rb 85	+ 21	No se aplica. Se dio agrado a tipo 302 para dar resistencia a la oxidación.					80
303	17-18 Cr, 8-10 Ni, 0.15 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.20 P, 0.15 S máx, 0.80 Mn (aproxim.)	Barra Tubería Alambre	90 80 90	35 38 35	50 53 50	Bhn 160 Rb 76	+ 21 0 - 40 - 62 - 196 - 269	100 114 148 182 225 267	40 40 40 40 60 64	67 61 45 40 38 30	87 85 82 80 52 37	85 80 100 100 175 —	
303 S <sub>2</sub>	17-18 Cr, 8-10 Ni, 0.15 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.20 P, 0.06 S, 0.15 Se máx	Barra Tubería Alambre	90 80 90	35 38 35	50 53 50	Bhn 160 Rb 76	+ 21 0 - 40 - 62 - 196 - 269	100 114 148 182 225 267	40 40 40 40 60 64	67 61 45 40 38 30	87 85 82 80 52 37	85 80 100 100 175 —	
304	18-20 Cr, 8-10 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Barra Plancha Lamina Cinta Tubería Alambre	85 82 84 85 84 90	35 35 47 42 42 35	60 60 55 50 50 60	Bhn 148 Bhn 148 Rb 80 Rb 80 Rb 80 Rb 83	+ 21 0 - 40 - 62 - 196 - 283	95 130 155 170 221 243	35 34 34 45 60 70	65 55 47 39 40 40	71 68 64 63 55 50	110 110 110 110 110 110	
304L	18-20 Cr, 8-13 Ni, 0.03 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.048 P, 0.030 S	Plancha Lamina Cinta Tubería	78 81 81 78	33 38 39 34	60 55 55 55	Bhn 143 Rb 76 Rb 76 Rb 76	+ 21 0 - 40 - 62 - 196 - 283	95 130 155 170 221 243	35 34 34 45 60 70	65 55 47 39 40 40	71 68 64 63 55 50	110 110 110 110 110 110	
305	17-18 Cr, 10-13 Ni, 0.15 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Plancha Lamina Cinta Tubería Alambre	85 85 85 80 85	35 38 38 36 34	55 50 50 56 60	Rb 80 Rb 80 Rb 80 Rb 80 Rb 77	+ 21	—	—	—	—	110	
306	19-21 Cr, 10-13 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Barra Plancha Lamina Cinta Tubería Alambre	85 85 85 85 85 95	30 35 35 35 35 60	55 50 50 50 50 50	Rb 80 Bhn 150 Rb 80 Rb 80 Rb 80 —	+ 21	—	—	—	—	110	
309	22-24 Cr, 12-16 Ni, 0.20 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Barra Plancha Lamina Cinta Tubería Alambre	95 95 90 90 90 108	40 40 48 48 48 70	45 45 45 45 45 35	Rb 83 Bhn 170 Rb 85 Rb 85 Rb 85 Rb 90	+ 21	—	—	—	—	110	
309S	22-24 Cr, 12-16 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Barra Plancha Lamina Cinta Tubería Alambre	95 95 90 90 90 108	40 40 48 48 48 70	45 45 45 45 45 35	Rb 83 Bhn 170 Rb 85 Rb 85 Rb 85 Rb 90	+ 21	—	—	—	—	110	
310	24-26 Cr, 19-22 Ni, 0.25 C, 2.0 Mn, 1.5 Si, 0.045 P, 0.030 S	Barra Plancha Lamina Cinta Tubería Alambre	95 95 95 95 95 105	45 45 45 45 45 75	50 50 45 45 45 30	Rb 95 Bhn 170 Rb 85 Rb 85 Rb 85 Rb 95	+ 21 0 - 40 - 62 - 100 - 150 - 253	85 85 85 100 100 152 178	37 32 39 40 40 74 108	65 64 67 55 55 64 58	70 78 78 75 75 64 61	110 110 110 110 110 85 —	
310S	24-26 Cr, 19-22 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.5 Si, 0.045 P, 0.30 S	Barra Plancha Lamina Cinta Tubería Alambre	95 95 95 95 95 105	45 45 45 45 45 75	50 50 45 45 45 30	Rb 95 Bhn 170 Rb 85 Rb 85 Rb 85 Rb 95	+ 21 0 - 40 - 62 - 100 - 150 - 253	85 85 85 100 100 152 178	37 32 39 40 40 74 108	65 64 67 55 55 64 58	70 78 78 75 75 64 61	110 110 110 110 110 85 —	

(1) Los valores de las propiedades mecánicas de este grupo de aleaciones se dan en forma de rangos. Las formas listadas son únicamente aquellas para las cuales se dan las propiedades mecánicas. La mayoría de los tipos estar disponibles en muchas formas de aleaciones. Se endurecen por trabajo en frío, o se endurecen por tratamientos térmicos, parciales. No se endurecen por tratamiento térmico ni por trabajo en frío. Las aleaciones de esta familia se caracterizan por tener un alto límite de fluencia y una alta resistencia a la tracción. (2) Debido a su estructura cristalina, el límite de fluencia de estas aleaciones es sensible a la temperatura. (3) El límite de fluencia de estas aleaciones es sensible a la temperatura y al tiempo de recocido. (4) El límite de fluencia de estas aleaciones es sensible a la temperatura y al tiempo de recocido. (5) El límite de fluencia de estas aleaciones es sensible a la temperatura y al tiempo de recocido.



# LOS ACEROS INOXIDABLES

Propiedades Mecánicas a Temperatura Elevada					Temperatura de Oxidación		TRATAMIENTO TERMICO				Tipo AISI	Características y Aplicaciones
Esfuerzo de Fluencia en Caliente (Creep Strength)					Temperatura Máxima de Servicio Continuo en Aire, °C	Temperatura Máxima de Servicio Intermittente en Aire, °C	Temperatura Inicial de Forja, °C	Temperatura de Recocido, °C (d)	Temperatura de Recocido de Alivio de Esfuerzos, °C	Intervalo de Temperaturas de Fusión, °C		
Carga para un Alargamiento de 1% en 10,000 hrs., 1000 Psi												
540 °C	590 °C	650 °C	700 °C	815 °C								
—	—	—	—	—	845	790	1150-1230	1010-1120	—	—	201	Alta velocidad de endurecimiento por trabajo en frío, equivalente con base níquel del tipo 301.
—	—	—	—	—	845	790	1150-1230	1010-1120	—	—	202	Equivalente con base níquel del tipo 302 para su uso normal.
19	12.5	8	2.5	1.8	900	815	1150-1260	1010-1120	200-400	1400-1420	301	Alta velocidad de endurecimiento por trabajo en frío; se usa en aplicaciones estructurales donde se requieren alta resistencia y alta ductilidad, en carros de ferrocarril, curvas de tracción y estructuras en aeronaves.
20	12.5	7.5	4.5	1.5	900	815	1150-1260	1010-1120	200-400	1400-1420	302	Acero inoxidable austenítico de usos diversos para maquinaria, equipo para manejo de alimentos, ornatos, resortes, uso arquitectónico y utensilios de cocina.
		7	4.5	1	955	870	1120-1230	1010-1120	—	1370-1400	302B	Más resistente a la formación de escoria que el tipo 302. Se usa en partes para hornos, revestimiento de combustores y elementos calentadores.
16.5	11.5	6.5	3.5	0.7	900	760	1150-1290	1010-1120	200-400	1400-1420	303	Modificación para maquinado del tipo 302 para caros más pesados. Se usa en partes roscadas fabricadas en tornos, frezadoras, etc.
					900	760	1150-1290	1010-1120	200-400	1400-1420	303B	Modificación para maquinado del tipo 303 para caros más pesados y en donde pueda requerirse trabajo en caliente o cabeceado en frío.
20	12	7.5	4	1.5	900	845	1150-1260	1010-1120	200-400	1400-1455	304	Modificación con base carbono del tipo 302 para restringir la precipitación de carburos durante la soldadura. Se usa en equipo para manejar sustancias químicas y materia de investigación y en estructuras.
					900	845	1150-1260	1010-1120	200-400	1400-1455	304L	Modificación en base carbono del tipo 304 para restringir la precipitación de carburos durante la soldadura.
19	12.5	8	4.5	2	900		1150-1260	1010-1120	—	1400-1455	305	Baja velocidad de endurecimiento por trabajo en frío. Se usa para tornillos, resortes, arandelas profundas, cabeceado en frío y forja.
					925	845	1150-1260	1010-1120	—	1400-1420	305	Acero de más alto contenido de níquel, mayor resistencia a la corrosión y al calor. Se usa principalmente como metal de aporte en soldadura para compensar la pérdida de elementos aleantes durante la soldadura.
16.5	12.5	10	6	3	1065	1010	1120-1230	1040-1120	—	1400-1455	309	Por su resistencia a altas temperaturas y su resistencia a la formación de escoria se usa en soldadura para metalurgia, equipo para tratamientos térmicos, revestimiento en hornos de recocido y en partes para hornos.
											309B	Modificación con base carbono del tipo 309 para estructuras soldadas.
22	22	16	10	3	1120	1040	1100-1230	1040-1150	200-400	1400-1455	310	Mayor resistencia a elevadas temperaturas y a la formación de escoria que el tipo 309. Se usa en cambiadores de calor, partes para hornos, cámara de combustión y como metal de aporte en soldadura.
											310B	Modificación con base carbono del tipo 310 para estructuras soldadas.

1. La composición del tipo 310 para todos los ligeros de los valores AISI.  
 \* Con un recocido de alivio de esfuerzos después del estirado.

# PROPIEDADES TÍPICAS DE

Tipo AISI	Composición Típica, % (a)	Forma (b)	PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL RECOCIDO, A TEMPERATURA AMBIENTE				PROPIEDADES NOMINALES DEL MATERIAL RECOCIDO, A BAJAS TEMPERATURAS						
			Resistencia a la tracción, 1000 Psi	Límite de Fluencia (OHset de 0.2 %), 1000 Psi	Alargamiento en 2", %	Dureza	Temperatura, °C	Resistencia a la Tracción, 1000 Psi	Límite de Fluencia, 1000 Psi	Alargamiento en 2", %	Reducción de Área, %	Resistencia al Impacto, Izod Ft Lb	
Autenticados (C)													
314	23.25 Cr, 19.22 Ni, 0.25 C, 2.0 Mn, 1.5-8.0 Si, 0.045 P, 0.030 S	Barra Plancha Lámina	100 100 100	80	45 45 40	Bhn 180 Bhn 180 Rc 85	No se aplica. Alto Sincio agregado a tipo 310 para aumentar la resistencia a la carburización.						
316	16-18 Cr, 10-14 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S, 2.0-3.0 Mo	Barra	80	30	60	Rc 78	+ 21 0 - 40 - 62 - 196 - 253	85 80 104 118 185 210	37 38 41 44 75 84	65 60 59 57 59 62	75 75 78 72 78 60	110 110 110 110 110 —	
		Plancha	82	35	55	Bhn 148							
		Lámina	84	42	50	Rc 78							
		Cinta	84	42	50	Rc 78							
		Tubería	85	35	50	Rc 78							
Alambre	80	30	60	Rc 78									
316L	16-18 Cr, 10-14 Ni, 0.03 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S, 2.0-3.0 Mo	Plancha	81	34	55	Bhn 148	—	—	—	—	—	—	
		Lámina	81	42	50	Rc 78							
		Cinta	81	42	50	Rc 78							
		Tubería	80	35	55	Rc 78							
317	18-20 Cr, 11-15 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S, 3.0-4.0 Mo	Barra	85	40	50	Bhn 180	Igual que el tipo 316.						
		Plancha	85	40	50	Bhn 180							
		Lámina	90	40	45	Rc 85							
		Cinta	90	40	45	Rc 85							
		Tubería	85	35	40	Rc 85							
321	17-19 Cr, 9-12 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S (Ti, NbC máx.)	Barra	85	35	55	Bhn 180	+ 21	89	37	62	76	110	
		Plancha	85	30	55	Bhn 180	0	89	38	58	73	110	
		Lámina	90	35	45	Rc 80	- 40	117	44	60	70	115	
		Cinta	90	35	45	Rc 80	- 62	130	45	57	68	117	
		Tubería	85	35	50	Rc 80	- 196	208	64	44	57	110	
Alambre	95	65	40	Rc 89	- 253	238	82	38	—	—			
347	17-19 Cr, 9-12 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S (Co + Ta, 10xC máx.)	Barra	90	35	50	Bhn 180	+ 21	93	38	65	69	110	
		Plancha	90	35	50	Bhn 180	0	108	42	63	72	110	
		Lámina	95	40	45	Rc 85	- 40	117	44	63	71	117	
		Cinta	95	40	45	Rc 85	- 62	130	45	57	70	110	
		Tubería	85	35	45	Rc 85	- 196	200	47	43	65	98	
Alambre	100	70	40	Rc 95	- 253	228	65	38	63	60			
348	17-19 Cr, 9-13 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.030 S (Co + Ta, 10xC máx. para 0.10 Ta máx.), 0.20 Co	Tubería	85	35	45	Rc 85	- 196	200	47	43	65	98	
		Alambre	100	70	40	Rc 95	- 253	228	65	38	63	60	
384	15-17 Cr, 17-19 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.03 S	Alambre	75	35	65	Rc 70	—	—	—	—	—	—	
385	11.50-13.50 Cr, 14-16 Ni, 0.08 C, 2.0 Mn, 1.0 Si, 0.045 P, 0.03 S	Alambre	72	30	55	Rc 65	—	—	—	—	—	—	
Ferríticos (C)													
405	11.5-14.5 Cr, 0.08 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S, 0.1-0.3 Al	Barra Plancha Lámina Tubería Alambre	70 65 65 65 60	40 40 40 40 75	30 30 25 25 15	Bhn 150 Bhn 150 Rc 75 Rc 80	+ 21	Aproximadamente igual que el tipo 410 en estado recocido.					
429	14-18 Cr, 0.12 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.04 P, 0.03 S	Barra Plancha	71 70	45 40	30 30	Bhn 155 Bhn 155	—	—	—	—	—	—	
430	16-18 Cr, 0.12 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S	Barra	75	45	30	Bhn 155	+ 21	68	38	37	73	35	
		Plancha	75	40	30	Bhn 150	0	89	40	37	72	20	
		Lámina	75	40	25	Rc 85	- 40	78	41	36	72	70	
		Cinta	75	40	25	Rc 85	- 62	81	44	36	70	5	
		Tubería	75	40	25	Rc 80	- 196	90	87	2	6	2	
Alambre	70	40	25	Rc 82	—	—	—	—	—	—	—		
430F	16-18 Cr, 0.12 C, 1.25 Mn, 1.0 Si, 0.050 P, 0.18 S máx., 0.60 Mo (opcional)	Barra	80	55	25	Bhn 170	+ 21	—	—	—	—	5 30	
Alambre	95	65	10	Rc 92	- 72 - 184	—	—	—	—	—	4 1		
430 F5e	16-18 Cr, 0.12 C, 1.25 Mn, 1.0 Si, 0.060 P, 0.060 S, 0.15 Se máx.	Barra	80	55	25	Bhn 170	+ 21	—	—	—	—	5 30	
Alambre	95	65	10	Rc 92	- 72 - 184	—	—	—	—	—	4 1		
434	16-18 Cr, 0.12 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.04 P, 0.03 S, 0.75-1.25 Mo	Lámina	77	53	23	Rc 83	—	—	—	—	—	—	
		Cinta	77	53	23	Rc 83	—	—	—	—	—	—	
		Alambre	79	60	33	Rc 90	—	—	—	—	—	—	

(a) Los valores dados son máximos, excepto cuando se indica otra cosa. (b) Las formas enlistadas con tratamientos especiales para los cuales se dan las propiedades mecánicas. La mayoría de los tipos están recocidos. Los otros están recocidos, austeníticos. Se endurecen por enfriamiento en frío, no se endurecen por tratamiento térmico. Ferríticos. No se endurecen por tratamiento térmico ni por enfriamiento en frío. Se endurecen por tratamiento térmico. (c) Se debe de enfriamiento rápido. T es temperatura de temple. R es temperatura de revenido. (d) Temperatura de estabilización, 845 a 900 °C. (e) En el estado recocido.



# LOS ACEROS INOXIDABLES

Propiedades Mecánicas a Temperaturas Elevadas					TRATAMIENTO TÉRMICO						Tipo AISI	Características y Aplicaciones
Esfuerzo de Fluencia en Caliente (Creep Strength)					Temperatura de Calentamiento		Temperatura Inicial de Forja, °C	Temperatura de Recocido, °C (a)	Temperatura de Recocido de Alivio de Esfuerzos, °C	Intervalo de Temperaturas de Forja, °C		
Carga para un Alargamiento de 1% en 10,000 hrs., 1000 Psi					Temperatura Máxima de Servicio Continuo en Aire, °C	Temperatura Máxima de Servicio Intermittente en Aire, °C						
660 °C	680 °C	690 °C	700 °C	816 °C								
16	18	7.0	8	2.0	—	—	1040-1120	1180	—	—	316	Más resistente a la formación de escoria que el tipo 316. Se usa para calderas en frío o formadas en frío sucesivas.
20	17.4	11.0	7.8	2.4	900	848	1180-1260	1010-1120	300-400	1370-1400	316	Menor resistencia a la corrosión que los tipos 302 y 304; alta resistencia a la fluencia en caliente (creep strength). Se usa en equipos para el manejo de productos químicos y gases, equipos para laboratorios isotérmicos y equipos para el manejo de alimentos.
											316L	Modificación en el tipo 316 para estructuras soldadas en donde debe evitarse la precipitación intergranular de carburos.
22	16.8	11.2	8.0	2.0	820	870	1180-1260	1010-1120	—	1370-1400	317	Menor resistencia a la corrosión y a la fluencia en caliente que el tipo 316 (creep strength).
18	17	9	9	1.8	900	848	1180-1260	950-1120	200-400 (a)	1400-1420	321	Estabilizado para secuencias súbitas a altas temperaturas corrosivas y para servicios entre 425 y 870 °C. Se usa en múltiples de escape en aeronáutica, partes de caldera, equipos de proceso y partes de maquinaria.
32	23	10	10	2	900	848	1180-1260	1010-1120	200-400 (a)	1400-1420	347	Similar al tipo 321 con mayor resistencia a la fluencia en caliente (creep strength).
											348	Similar al tipo 321 con mayor resistencia a la fluencia en caliente (creep strength). Se usa para aplicaciones en energía nuclear debido a su baja retención de neutrones.
—	—	—	—	—	—	—	1180-1230	1040-1180	—	1400-1450	304	Se usa en calderas en frío o formadas en frío sucesivas. Menor resistencia de endurecimiento por trabajo en frío que el tipo 304L. Usado en partes, tornillos, tornillos y partes de instrumentos.
—	—	—	—	—	—	—	1180-1170	900-1000	—	1400-1450	305	Se usa para embutidos, calderas en frío y formadas en caliente sucesivas. Menor resistencia de endurecimiento por trabajo en frío que el tipo 304.
6.4	—	—	—	—	700	700	1065-1120	Recocido tipo 730-815	—	1400-1450	406	Grado no templable para montaje en donde los tipos de temple al aire (A10 o A03) no son recomendables.
—	—	—	—	—	—	—	1040-1120	700-845	—	1450-1510	429	Menor resistencia que el tipo 429. Para usar en equipos para ácido nítrico y para lección de nítrógeno.
6.5	6.7	2.6	1.4	—	845	900	1040-1120	Recocido tipo 700-815	—	1425-1510	430	Tipo al carbono, no templable, para usos generales. Se usa para objetos decorativos, tanques de ácido nítrico y carcasas de recocido.
6.6	6.6	1.9	1.2	—	815	870	1065-1160	Recocido tipo 675-700	—	1475-1510	430F	Modificación libre maquinada del tipo 430 para partes más pesadas y para partes recocidas fabricadas en caliente.
											430 FSA	Modificación libre maquinada del tipo 430 para partes más ligeras y en donde puede recocerse también en caliente o enfriado en frío.
—	—	—	—	—	—	—	1040-1120	—	—	1425-1510	434	Modificación del tipo 430 de calado para usos de maquinaria de automoción para reducir la corrosión atmosférica.

Nota: (a) Recocido completo, seguida de enfriamiento lento; (b) Recocido base; (c) No se recomienda el recocido entre 425 y 500 °C debido a que reducen propiedades de impacto bajo y oxidación y se reduce la resistencia a la corrosión. El tiempo a temperatura y las temperaturas pueden variar dependiendo del tamaño de la pieza; (d) Enfriamiento controlado y recocido.

# PROPIEDADES TIPICAS DE

Tipo AISI	Composición Típica, % (a)	Forma (b)	PROPIEDADES MECANICAS DEL MATERIAL RECOCIDO A TEMPERATURA AMBIENTE				PROPIEDADES NOMINALES DEL MATERIAL RECOCIDO, A BAJAS TEMPERATURAS					
			Resistencia a la Tracción, 1000 Psi	Límite de Fluencia (Offset de 0.2 %), 1000 Psi	Alargamiento en 2", %	Dureza	Temperatura, °C	Resistencia a la Tracción, 1000 Psi	Límite de Fluencia, 1000 Psi	Alargamiento en 2", %	Reducción de Área, %	Resistencia al Impacto, Irod. Ft-Lb
<b>Ferrosos (C)</b>												
436	18-18 Cr, 0.12 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.04 P, 0.03 S, 0.75-1.25 Mo, (Cb+Ta+Ti) máx., 0.70 max.	Lámina Cinta	77 77	53 53	23 23	Rb 82 Rb 82	—	—	—	—	—	—
442	18-23 Cr, 0.20 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S	Barra	80	45	20	Rb 90	+ 21	—	—	—	—	5-15
448	23-27 Cr, 0.20 C, 1.5 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S, 0.25 N	Barra Plancha Lámina Cinta Tubería Alambre	80 85 80 80 80 88	50 55 50 50 50 60	25 25 20 20 25 15	Rb 86 Rb 84 Rb 83 Rb 82 Rb 84 Rb 87	+ 21	—	—	—	—	2-10
<b>Martensíticos (C)</b>												
403	11.5-13.0 Cr, 0.18 C, 1.0 Mn, 0.5 Si, 0.040 P, 0.030 S	Barra Lámina Cinta Tubería Alambre	75 70 70 75 95	40 43 45 40 50	35 25 25 35 15	Rb 82 Rb 80 Rb 80 Rb 80 Rb 82	Igual que el tipo 410.					
410	11.5-13.5 Cr, 0.15 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S	Barra Plancha Lámina Cinta Tubería Alambre	75 70 70 70 75 75	40 35 45 45 40 40	35 30 25 30 30 30	Rb 82 Snn 150 Rb 80 Rb 80 Rb 82 Rb 82	+ 21 0 - 40 - 62 - 184	110 115 122 128 158	87 88 90 94 148	21 24 23 23 19	68 69 64 60 11	85 40 25 25 5
414	11.5-13.5 Cr, 1.25-2.50 Ni, 0.15 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S	Barra Plancha Lámina Cinta Alambre	115 115 120 120 135*	90 90 108 108 115*	20 20 15 15 10*	Snn 235 Snn 235 Rb 80 Rb 86 Rc 29*	+ 21	—	—	—	—	40-80
416	12-14 Cr, 0.15 C, 1.25 Mn, 1.0 Si, 0.060 P, 0.15 S máx., 0.60 Mo (opcional)	Barra Tubería Alambre	75 75 75	40 40 40	30 30 20	Rb 82 Rb 82 Rb 82	+ 21 - 73 - 184	—	—	—	—	20-64 12-25 3
416Se	12-14 Cr, 0.15 C, 1.25 Mn, 1.0 Si, 0.060 P, 0.060 S, 0.15 Se máx.	Alambre	75	40	20	Rb 82	- 184	—	—	—	—	10 10 6 7
420	12-14 Cr, 0.15 C máx., 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S	Barra Alambre	85 95	60 60	25 20	Rb 82 Rb 82	+ 21 0 - 40 - 62	—	—	—	—	—
420F	12-14 Cr, 0.15 C, 1.25 Mn, 1.0 Si, 0.06 P, 0.15 S máx., 0.60 Mo máx. (opcional)	Barra Alambre	85 100*	65 60*	22 15*	Snn 220 Rb 99*	—	—	—	—	—	—
421	15-17 Cr, 1.25-2.50 Ni, 0.20 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S	Barra Alambre	125 125	95 115	20 10	Snn 260 Rc 29	+ 21 0 - 40 - 62	—	—	—	—	80 60 30 17
440A	16-18 Cr, 0.60-0.75 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S, 0.75 Mo	Barra Alambre	108 108	60 60	20 18	Rb 85 Rb 85	—	—	—	—	—	—
440B	16-18 Cr, 0.75-0.95 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S, 0.75 Mo	Barra Alambre	107 107	62 62	18 18	Rb 86 Rb 86	—	—	—	—	—	—
440C	16-18 Cr, 0.95-1.20 C, 1.0 Mn, 1.0 Si, 0.040 P, 0.030 S, 0.75 Mo	Barra Alambre	110 110	65 65	14 13	Rb 87 Rc 37	—	—	—	—	—	—

(a) Los valores dados son máximos. Excepcionalmente cuando se indique otro caso. (b) Las formas enlistadas son únicamente aquellas para las cuales se dan las propiedades mecánicas. La mayoría de los tipos están disponibles en muchas formas. (c) Austeníticos. Se endurecen por trabajo en frío. No se endurecen por tratamiento térmico. Ferríticos. No se endurecen por tratamiento térmico ni por trabajo en frío. Martensíticos. Se endurecen por tratamiento térmico. (d) Seguido de un número cuando T es temperatura de temple. R es temperatura de revenido. (e) Temperatura de estabilización. 845 a 900° C. (f) Entrenamiento por soldadura. (g) Recocido completo. (h) Recocido suave. (i) No se recomiendan o no se dan entre 425 y 595° C debido a que resultan propiedades de impacto bajas y entenas y se reduce la resistencia a la corrosión. El temple a temperatura y las temperaturas de revenido están dependientes de tamaño de la pieza. (j) Entrenamiento por soldadura y recocido.



# LOS ACEROS INOXIDABLES

Propiedades Mecánicas a Temperaturas Elevadas					Temperatura de Oxidación		TRATAMIENTO TERMICO				Tipo AISI	Características y Aplicaciones
Esfuerzo de Fluencia en Caliente (Creep Strength)					Temperatura Máxima de Servicio Continuo en Aire, °C	Temperatura Máxima de Servicio Intermitente en Aire, °C	Temperatura Inicial de Forja, °C	Temperatura de Recocido, °C (d)	Temperatura de Recocido de Alivio de Esfuerzos, °C	Intervalo de Temperatura de Fusión, °C		
Carga para un Alargamiento de 1% en 10,000 hrs., 1000 Psi												
540 °C	590 °C	650 °C	700 °C	815 °C								
—	—	—	—	—	—	—	1040-1120	790-845	—	1425-1510	436	Similar a los tipos 430 y 434. Se usa en donde se requieren bajas propiedades mecánicas.
8.5	5	1.8	1	0.6	990	1040	870-1150	700	—	1425-1510	442	Acero de alta Creep. Usado principalmente en partes que deben resistir altas temperaturas en servicio sin formación de escoria. Partes para hornos, boquillas, cámaras de combustión.
8.4	2.9	1.4	0.6	0.4	1065	1120	1065-1120	790-870	—	1425-1510	446	Alta resistencia a la corrosión y a la formación de escoria a temperaturas elevadas, especialmente en servicio intermitente. Se usa a menudo en componentes que contienen acúfina.
11	4.5	2	1.4	—	700	790	1090-1200 (f)	815-900 (g) 650-760 (h)	7925-1010 (d) R200-760 (i)	1480-1530	403	Grado "caliente fuerte" para usos de turbina de vapor y otras partes sujetas a esfuerzos elevados.
11.5	4.3	2	1.3	—	700	790	1090-1200 (f)	815-900 (g) 650-760 (h)	7925-1010 (d) R200-760 (i)	1480-1530	410	Tipo templable para usos generadores, partes para motores, flechas para bombas.
—	—	—	—	—	700	790	1150-1200	650-700 (h)	7990-1040 (d) R200-700 (i)	—	414	Acero de mayor templabilidad para resortes, partes para máquinas.
11	4.6	2	1.2	—	675	760	1150-1260 (f)	815-900 (g) 650-760 (h)	7925-1010 (d) R200-760 (i)	1480-1530	416	Modificación libre maquinada del tipo 410, para cortes más duros.
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	418	Modificación libre maquinada del tipo 410, para cortes más ligeros y en donde puede necesitarse temple en caliente o recocido en frío.
9.2	4.2	2	1	—	650	760	1090-1200 (f)	845-900 (g) 730-790 (h)	7990-1040 (d) R150-370	1455-1510	420	Modificación de más alta dureza del tipo 410, usada a menudo para cuchillería, instrumentos quirúrgicos, válvulas y otras partes resistentes al desgaste.
—	—	—	—	—	—	—	1120-1230	845-900 (f)	7990-1040 (d) R150-370	1455-1510	420F	Modificación libre maquinada del tipo 420.
9.6	3.6	—	—	—	615	670	1150-1230 (f)	820-885 (h)	7990-1040 (d) R200-690 (i)	—	431	Acero templable para usos especiales, usado en donde se requieren propiedades mecánicas superiores a las de los aceros para herramientas, flechas para mezcladoras, maquinaria para la industria papera, flechas para sarda, etc.
—	—	—	—	—	760	815	1040-1200 (f)	845-900 (g) 730-790 (h)	71010-1065 (d) R150-425	1370-1510	440A	Templable a más alta dureza que el tipo 420, con buena resistencia a la corrosión. Se usa en cuchillería, partes, instrumentos quirúrgicos.
—	—	—	—	—	760	815	1040-1175 (f)	845-900 (g) 730-790 (h)	71010-1065 (d) R150-425	1370-1510	440B	Grado para cuchillería, para los tipos más finos de cuchillería inoxidable, partes para válvulas y otras partes resistentes al desgaste y con alta dureza.
—	—	—	—	—	760	815	1040-1150 (f)	845-900 (g) 730-790 (h)	71010-1065 (d) R150-425	1370-1510	440C	Acero de más alta dureza de los aceros inoxidables templables. Se usa en partes y piezas de sarda.

\*Con un recocido de alivio de esfuerzos después del temple.

## COMO IDENTIFICAR ACEROS INOXIDABLES

Desde luego, el método más seguro y exacto para la identificación de los aceros inoxidable en sus distintos tipos es el análisis químico, pero considerando que no todos los talleres o plantas que hacen uso de aceros inoxidable disponen de Laboratorios Químicos adecuados y que necesitan a menudo identificarlos, describimos a continuación algunas pruebas mecánicas y químicas de fácil aplicación que permiten la identificación de los principales tipos de Aceros Inoxidables.

**PRUEBA MAGNETICA:** Un sencillo imán nos sirve para separar los aceros Austeníticos (al Cromo-Níquel) serie 300 de los aceros Martensíticos y Ferríticos (al Cromo) serie 400. Los aceros inoxidable austeníticos **NO SON MAGNETICOS** en su estado recocido, los **MARTENSITICOS Y FERRITICOS SON MAGNETICOS**, no importando el estado en que se encuentren.

**PRUEBA DE CHISPA:** La prueba de chispa es un método mecánico muy rápido para identificar aceros, pero se requiere de personal bastante experimentado; sin embargo, con muestras de aceros que pueden utilizarse como patrones, se tendrá una guía efectiva para su identificación.

Los aceros de tipo 302, 303 y 316 producen chispas cortas de color rojizo y con pocas explosiones.

Los tipos 308, 309, 310 y 446 emiten pocas chispas cortas de color rojo, con una que otra explosión.

La chispa de los aceros tipo 410, 414, 416, 430 y 431, es abundante, larga y blanca, con poca explosión.

Los de tipo 420, 440A, 440B y 440C, producen chispas largas que van del Blanco al Rojo con bastantes explosiones.

**PRUEBA DE DUREZA AL TEMPLE:** Los aceros austeníticos (Serie 300) trabajados en frío, adquieren un ligero magne-

tismo; por lo tanto, para estos casos el ensayo magnético no es conclusivo. Los aceros austeníticos calentados a 1000/1100° C y enfriados en agua, pierden el magnetismo ocasionado por trabajo en frío y al mismo tiempo su dureza es inferior a 165 Brinell (85 Rb Aprox.). Los aceros Ferríticos calentados a 950/1000° C y enfriados en aceite, adquieren durezas inferiores a 250 Brinell (24 Rc. Aprox.). Los aceros Martensíticos 410, 414, 416 y 431 tratados en la misma forma, toman durezas entre 340 y 400 Brinell (36-43 Rc); y los Martensíticos 420, 420F, 440A, 440B y 440C sometidos al mismo tratamiento toman durezas de 500-600 Brinell (52-60 Rc).

**PRUEBAS CON ACIDOS:** En todas estas pruebas es recomendable comparar las reacciones con muestras cuya composición sea conocida.

**Acido Sulfúrico:** Esta prueba sirve para diferenciar los aceros, 302, 304, 316 y 317. La superficie del metal se prepara limándola o esmerilándola. Se aplican unas gotas de Acido Sulfúrico al 20% en volumen (1.84 peso específico). Los aceros 302 y 304 se atacan rápidamente oscureciéndose la superficie hasta tomar un color Marrón o negro y formando pequeños cristales verdosos. El acero 316 es atacado lentamente tomando la superficie un color bronceado que oscurece hasta transformarse en color Marrón formando también pequeños cristales verdosos. El acero 317 se comporta de la misma manera que el 316, pero por ser más resistente a la corrosión, su reacción es más lenta.

**Acido Clorhídrico:** Esta prueba sirve para separar los aceros por su contenido de Cromo, así como los que contengan Selenio o Azufre.

Disolviendo muestras iguales en peso en Acido Clorhídrico al 50% se notará que el color verdoso de la solución aumenta con el contenido de Cromo; en esta forma es posible separar los tipos 403, 410, 416 y 420, bajos en cromo, de los tipos 430, 431, 440 y 446. También es posible separar los aceros austeníticos, ya que el níquel cambia la coloración





del cromo verde a verde azulado.

Los aceros que contienen Selenio producirán al estarse atacando un olor a ajo.

Los aceros que contienen azufre producirán al estarse atacando un olor a huevo podrido.

**Acido Nítrico:** Esta prueba nos permite separar los aceros inoxidable de otros aceros, ya que los inoxidable no son atacados por el ácido nítrico y los demás aceros sí lo son. Sin embargo, deberá cuidarse de no confundir los grados 420 y 440 que si pueden ser atacados.

**Sulfato de Cobre:** Esta prueba al igual que la anterior nos permite distinguir los aceros inoxidable de los aceros comunes. La superficie deberá limpiarse muy bien con lija y desengrasarse perfectamente.

Si se aplican unas gotas de solución de Sulfato de Cobre al

5 ó 10% en agua, la superficie que corresponda a los aceros inoxidable no se alterará; en cambio, la superficie de aceros comunes se cobrizará en pocos segundos.

**Acido Fosfórico:** Esta prueba, nos permite diferenciar los aceros austeníticos al Cromo-Níquel, de los aceros austeníticos al Cromo-Níquel-Molibdeno.

Al ácido fosfórico concentrado se le agrega 0.5 a 1% de Fluoruro de Sodio y se calienta a 60-65° C. Se sumergen las muestras. Los aceros 316 y 317 no reaccionan y los aceros 302, 304, etc., reaccionan con producción de burbujas.

**PRUEBA DE MECANIZADO:** Los aceros que contienen Selenio o Azufre pueden ser separados de los que no contienen estos elementos.

Se colocan las muestras en un torno para obtener viruta, la cual será corta y quebradiza para los aceros que contienen Selenio o Azufre; los otros aceros producirán viruta larga y tenaz.

## ACEROS INOXIDABLES ELEMENTOS DE ALEACION

"Aceros Inoxidables".— Nombre utilizado comunmente para referirse a los aceros o aleaciones que resisten diversos tipos de corrosión.

Corrosión se define como el ataque de carácter Químico o Electroquímico que sufren los cuerpos por la acción del aire, humedad, atmósferas Industriales o Marinas, por la acción de los ácidos fríos o calientes, de Sales o por el calentamiento a elevadas temperaturas. La corrosión siempre aparece en la superficie de los cuerpos y progresa hacia su interior.

La resistencia a la corrosión que presentan los aceros inoxidable es debida a la formación superficial de una capa de óxido de Cromo, muy fina y compacta, que impide que el ataque o corrosión penetre del exterior al interior; esta propiedad podría entenderse como pasividad.

No podemos admitir que exista algún Acero del tipo inoxidable que resista a todos los tipos de corrosión u oxidación vistos con anterioridad; sin embargo, existen aceros que resisten perfectamente la acción de ciertos agentes corrosivos pero son oxidados y corroídos por otros agentes o en determinadas circunstancias.

Los elementos de aleación son un tanto responsables de estas propiedades, interviniendo también en ellas su tratamiento térmico.

Influencia que ejercen los elementos de aleación en los Aceros Inoxidables.

**CARBONO:** es un elemento virtualmente inevitable y frecuentemente adicionado en forma intencional. Si el carbono es mantenido en solución mediante tratamiento térmico adecuado, el acero no sufrirá pérdidas considerables en sus propiedades anticorrosivas. Sin embargo, si el carbono se mantiene precipitado en forma de carburos, su resistencia a la corrosión será grandemente afectada.

El contenido de Carbono en los aceros inoxidable no interfiere en sus propiedades de maquinado, salvo dos casos excepcionales:

Los aceros altos en carbono como los 440, que contienen gran cantidad de carburos libres, son abrasivos a las herramientas de corte, mientras que los de muy bajo contenido de carbono, son de maquinabilidad muy baja debido a que son aceros muy suaves y al mismo tiempo muy correosos.

**CROMO:** El cromo es un elemento básico en los aceros inoxidable y su presencia promueve la adquisición de "pasividad" en los mismos.

El cromo ejerce una influencia muy favorable cuando se encuentra en solución en la martensita, ferrita o austenita; pero cuando forma carburos no sirve para aumentar la resistencia a la corrosión en los aceros, siendo con frecuencia precisamente los carburos los principales causantes de la corrosión.

Al aumentar el porcentaje de cromo aumenta su resistencia a la corrosión. Esta resistencia es específicamente desarrollada en los medios oxidantes.

Los agentes fuertemente reductores, como son los ácidos Clorhídrico y Fluorhídrico destruyen la pasividad y corroen estos aceros.

El contenido de cromo estandarizado para los aceros inoxidable rolados en caliente va del 12 al 28% ; porcentajes mayores tienden a hacer poco dúctiles a los aceros.

Las variaciones de Cromo dentro de los intervalos especificados no influyen en las propiedades de maquinabilidad.

**NIQUEL:** Este elemento podría decirse que es el elemento que ocupa el segundo lugar en importancia dentro de los aceros inoxidable. El Níquel se encuentra en los aceros



inoxidables en cantidades no menores de 6%, siendo la suma de cromo y Níquel no menor de 24%.

Se ha comprobado que la presencia de Níquel en los aceros inoxidables, además de favorecer la formación de Austenita estable, ejerce también un efecto muy notable sobre la resistencia a la corrosión, reforzando la influencia del cromo.

Estos tipos de aceros resisten el ataque de los ácidos reductores. El Níquel mejora ciertas propiedades mecánicas, de los aceros inoxidables y hace que sea posible soldarlos; sin embargo, al aumentar el Níquel disminuye su maquinabilidad ya que estos Aceros tienen la propiedad de endurecerse con el trabajo en frío y al mismo tiempo hacerse más coherosos.

**MANGANESO:** En general todos los Aceros Inoxidables contienen Manganeseo y sus efectos son parecidos a los del Níquel. La cantidad de Manganeseo está limitada a un máximo de 2%. Dentro de este intervalo no tiene efecto sobre la facilidad de maquinado; sin embargo es beneficioso al trabajar en caliente los aceros libre maquinado de alto contenido en Azufre.

**SILICIO:** Lo mismo que el manganeseo, todos los Aceros Inoxidables contienen Silicio como resultado de usarlo como agente desoxidante en los hornos eléctricos.

El Silicio en algunos aceros es menor del 1% y no tiene

efectos de consideración en sus propiedades. En otros Aceros es mayor de 1%, con lo cual imparte resistencia a la oxidación a altas temperaturas y aumenta la resistencia a la corrosión de Soluciones fuertemente corrosivas de Acido Sulfúrico.

**MOLIBDENO:** Hace que la pasividad adquirida por la adición de cromo sea efectiva, en casos donde el cromo solo no es suficiente. Particularmente cuando se requiere resistencia a la corrosión de Soluciones de Acido Sulfúrico, ácido Sulfuroso, soluciones neutras de Cloro y Agua de Mar.

**AZUFRE Y SELENIO:** Los aceros inoxidables, como se ha indicado con anterioridad, presentan cierta dificultad al maquinado; sin embargo, se ha encontrado que adicionándoles Azufre o Selenio su maquinabilidad mejora considerablemente. Normalmente se adicionan con un contenido de 0.15/0.35 % cuando son utilizados para estos casos.

El azufre y el Selenio no aumentan la resistencia a la corrosión; pero sí ayudan a evitar ésta indirectamente, ya que hacen posible obtener superficies más lisas, las cuales resisten más el ataque corrosivo.

Los aceros que contienen Azufre o Selenio son llamados Aceros de Libre Maquinado y la diferencia que existe entre las propiedades que imparte el Azufre y el Selenio son pocas pero de bastante importancia ya que están en función de su maquinabilidad, Ductilidad, forjabilidad y Resistencia a la corrosión.

TABLAS DE INFORMACION UTIL

ANALISIS TIPICOS DE PIEZAS DE FUNDICION

Tipo de pieza	Composición, %								
	Carbono total	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo
<b>1) Piezas de hierro gris</b>									
Cilindros de automóvil	3.30	2.10	0.60	0.12	0.10			0.30	
	3.25	2.00	0.65	0.12	0.10	0.75		0.50	
Cilindros para camión y tractor	3.25	2.00	0.65	0.12	0.10		0.75	0.40	0.40
	3.25	2.00	0.65	0.12	0.10			0.40	
Tambores para frenos de automóvil	3.40	2.00	0.70	0.20	0.10				
Discos para embrague de automóvil	3.25	2.20	0.60	0.20	0.10				
Cigüeñales para motor de automóvil	2.80	2.50	0.80	0.15	0.10	0.50		0.50	0.50
<b>Piezas para maquinaria agrícola</b>									
Ligeras	3.40	2.40	0.65	0.60	0.10				
Medianas	3.30	2.20	0.60	0.50	0.12				
Pesadas	3.15	1.80	0.65	0.35	0.12				
<b>Piezas para maquinaria en general</b>									
Medianas	3.50	2.50	0.50	0.30	0.10				
Ligeras	3.30	2.00	0.60	0.30	0.12				
Pesadas	3.15	1.50	0.65	0.25	0.12				
Muy pesadas	3.10	1.25	0.70	0.20	0.14				
<b>Tubería para agua</b>									
Colada en foso	3.50	1.60	0.50	0.65	0.10				
De Lavaud	3.60	1.65	0.35	0.70	0.10				
Colada en arena y centrifugada	3.60	1.10	0.45	0.65	0.10				
Planchas para estufa de cocina	3.60	2.40	0.50	0.80	0.12				
Radiadores para calefacción	3.50	2.30	0.60	0.50	0.12				
Barras para parrillas	3.25	2.00	0.60	0.40	0.10			1.00	
Potería, usos cáusticos	3.50	0.70	0.60	0.15	0.10	2.50		0.40	
<b>2) Piezas con endurecimiento superficial y de hierro blanco</b>									
Ruedas para carro de ferrocarril (templadas)	3.60	0.55	0.60	0.30	0.12				
Rejas para arado (templadas)	3.40	1.40	0.60	0.40	0.12				
Tarimas para moldes (templadas)	3.50	0.80	0.60	0.30	0.12				
Moldes para vidrio (templadas)	3.50	2.20	0.60	0.20	0.10	1.00		0.30	
Cojinetes de hierro blanco (agricultura)	3.40	0.75	0.70	0.25	0.12		1.00	1.00	
Muelas de quebradora, hierro blanco	3.30	0.60	0.60	0.15	0.10	4.50		1.50	
<b>3) Piezas de hierro martillado</b>									
Secciones delgada y mediana	2.60	1.40	0.45	0.15	0.14				
Secciones gruesas	2.35	0.95	0.40	0.15	0.12				

		Composición en %				
Clase de pieza		C	Si	Mn	P	S
Piezas de maquinaria	Espesor pequeño	3.25	2.25	0.50	0.25	0.10
	Espesor medio	3.25	1.75	0.50	0.25	0.10
	Espesor grande	3.25	1.25	0.50	0.25	0.10
Piezas de ornamentación		3.50	2.75	0.50	1.00	0.10
Tubos	Grandes	3.40	1.75	0.50	0.80	0.08
	Medianos	3.60	2.00	0.50	0.80	0.08
Segmentos		3.50	3.00	0.45	0.50	0.06
Camisas de cilindros		3.25	3.25	0.65	0.75	0.08
Pistones de motor explosión		3.35	2.25	0.65	0.15	0.10
Zapatillas de freno		3.10	1.70	0.50	0.15	0.10
Piezas dobladas de alta resistencia		2.75	2.25	0.80	0.10	0.09
Lingoteras		3.50	1.00	0.90	0.20	0.07
Piezas blandas de máquinas		3.40	2.60	0.65	0.30	0.10
Ruedas		3.35	0.65	0.60	0.35	0.12
Resistentes al calor		3.50	1.15	0.80	0.10	0.07

Composición de algunas piezas de fundición de uso corriente

## Composición en %

Clase de pieza		C	Si	Mn	P	S
Piezas de maquinaria	Espesor pequeño	3,25	2,25	0,50	0,25	0,10
	Espesor medio	3,25	1,75	0,50	0,25	0,10
	Espesor grande	3,25	1,25	0,50	0,25	0,10
Piezas de ornamentación .....		3,50	2,75	0,50	1,00	0,10
Tubos	Grandes .....	3,40	1,75	0,50	0,80	0,08
	Medianos .....	3,60	2,00	0,50	0,80	0,08
Segmentos .....		3,50	3,00	0,65	0,50	0,06
Camisas de cilindros .....		3,25	2,25	0,65	0,75	0,08
Pistones de motor explosión .....		3,35	2,25	0,65	0,15	0,10
Zapatillas de freno .....		3,10	1,70	0,50	0,15	0,10
Piezas delgadas de alta resistencia		2,75	2,25	0,80	0,10	0,09
Lingoteras .....		3,50	1,00	0,90	0,20	0,07
Piezas blandas de máquinas .....		3,40	2,60	0,65	0,30	0,10
Ruedas .....		3,35	0,65	0,60	0,35	0,12
Resistente al calor .....		3,50	1,15	0,80	0,10	0,07

Composición de algunas piezas de fundición de uso corriente

## Composición en %

**43**

Clase de pieza		C	Si	Mn	P	S
Piezas de maquinaria	Esesor pequeño	3,25	2,25	0,50	0,25	0,10
	Esesor medio	3,25	1,75	0,50	0,25	0,10
	Esesor grande	3,25	1,25	0,50	0,25	0,10
Piezas de ornamentación .....		3,50	2,75	0,50	1,00	0,10
Tubos	Grandes .....	3,40	1,75	0,50	0,80	0,08
	Medianos .....	3,60	2,00	0,50	0,80	0,08
Segmentos .....		3,50	3,00	0,65	0,50	0,06
Camisas de cilindros .....		3,25	2,25	0,65	0,75	0,08
Pistones de motor explosión .....		3,35	2,25	0,65	0,15	0,10
Zapatillas de freno .....		3,10	1,70	0,50	0,15	0,10
Piezas delgadas de alta resistencia		2,75	2,25	0,80	0,10	0,09
Lingoteras .....		3,50	1,00	0,90	0,20	0,07
Piezas blandas de máquinas .....		3,40	2,60	0,65	0,30	0,10
Ruedas .....		3,35	0,65	0,60	0,35	0,12
Resistente al calor .....		3,50	1,15	0,80	0,10	0,07

Composición de algunas piezas de fundición de uso corriente

APENDICE II

TABLAS DE INFORMACION UTIL

ANALISIS TÍPICOS DE PIEZAS DE FUNDICION

24

Tipo de pieza	Composición, %								
	Carbono total	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Mo
<b>1) Piezas de hierro gris</b>									
Cilindros de automóvil .....	3.30	2.10	0.60	0.12	0.10			0.30	
Cilindros para camión y tractor .....	3.25	2.00	0.65	0.12	0.10	0.75		0.50	
Tambores para frenos de automóvil .....	3.25	2.00	0.65	0.12	0.10		0.75	0.40	0.40
Discos para embrague de automóvil .....	3.40	2.00	0.70	0.20	0.10				
Cigüeñales para motor de automóvil .....	3.25	2.20	0.60	0.20	0.10				
Piezas para maquinaria agrícola	2.80	2.50	0.80	0.15	0.10	0.50		0.50	0.50
Ligeras .....	3.40	2.40	0.55	0.60	0.10				
Medianas .....	3.30	2.20	0.60	0.50	0.12				
Pesadas .....	3.15	1.80	0.65	0.35	0.12				
<b>Piezas para maquinaria en general</b>									
Medianas .....	3.50	2.50	0.50	0.30	0.10				
Ligeras .....	3.30	2.00	0.60	0.30	0.12				
Pesadas .....	3.15	1.50	0.65	0.25	0.12				
Muy pesadas .....	3.10	1.25	0.70	0.20	0.14				
<b>Tubería para agua</b>									
Colada en foso .....	3.50	1.60	0.50	0.65	0.10				
DeLevaud .....	3.60	1.65	0.35	0.70	0.10				
Colada en arena y centrifugada .....	3.60	1.10	0.45	0.65	0.10				
Planchas para estufa de cocina .....	3.50	2.40	0.50	0.80	0.12				
Radiadores para calefacción .....	3.50	2.30	0.50	0.50	0.12				
Barras para parrillas .....	3.25	2.00	0.60	0.40	0.10			1.00	
Potería, usos cáusticos .....	3.50	0.70	0.50	0.15	0.10	2.50		0.40	
<b>2) Piezas con endurecimiento superficial y de hierro blanco</b>									
Ruedas para carro de ferrocarril (templadas) ...	3.60	0.55	0.50	0.30	0.12				
Rejas para arado (templadas) .....	3.40	1.10	0.60	0.40	0.12				
Tarimas para moldes (templadas) .....	3.50	0.80	0.60	0.30	0.12				
Moldes para vidrio (templados) .....	3.50	2.20	0.60	0.20	0.10	1.00		0.30	
Cojinetes de hierro blanco (agricultura) .....	3.40	0.75	0.70	0.25	0.12		1.00	1.00	
Muelas de quebradora, hierro blanco .....	3.30	0.60	0.60	0.15	0.10	4.50		1.50	
<b>3) Piezas de hierro maleable</b>									
Secciones delgada y mediana .....	2.50	1.40	0.45	0.15	0.14				
Secciones gruesas .....	2.35	0.95	0.40	0.15	0.12				

Table 5-5 Nominal Composition of Some Wrought and Cast Aluminum Alloys

Number	%Cu	%Si	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Fe	%Ti
<b>Wrought</b>								
1100	Commercially pure—99.2% Al minimum							
2014	4.4	0.8	0.8	0.4	0.1	0.25	1.0	0.15
3003	0.2	0.6	1.2	—	—	0.1	0.7	—
5052	0.10	low	0.1	2.5	0.25	0.10	low	—
6061	0.25	0.6	0.15	1.0	0.25	0.25	0.7	0.15
7075	1.6	0.5	0.30	2.5	0.3	5.6	0.7	0.20
7178	2.0	0.50	0.3	2.7	0.3	6.8	0.7	0.20
<b>Cast</b>								
43	—	5.0	—	—	—	—	—	—
195	4.5	0.8	—	—	—	—	—	—
220	—	—	—	10	—	—	—	—
356	—	7.0	—	0.3	—	—	—	—

heat-treated 7178 alloy. Alloy 5052 exhibits the highest strength of non-heat-treatable alloys. Number 7178 is one of the highest strength heat-treatable alloys utilized in aircraft and aerospace applications.

Aluminum alloys lose strength rapidly when exposed to temperatures of 350°F and higher. Aluminum shows excellent mechanical properties at cryogenic temperatures because it is a face-centered cubic material.

**5-10 Magnesium and Its Alloys** Magnesium is one of the lightest commercial metals, specific gravity 1.74. It is utilized in trucks, automobile engines, ladders, portable saws, luggage, aircraft, and missiles because of its light weight and also good strength when alloyed. However, it is one of the least corrosion resistant and is accordingly used as sacrificial anodes for cathodic protection (Chap. 3) and dry-cell batteries. It is generally anodic to most other metals and alloys and must be insulated from them.

Magnesium exhibits good resistance to ordinary inland atmospheres due to the formation of a protective oxide film. This protection tends to break down (pits) in air contaminated with salt, and protective measures are required. These include coatings and "chrome" pickling, which also provides a good base for the coating. Corrosion resistance generally decreases with impurities and alloying. Alloys are quite susceptible to stress corrosion and must be protected. Presence of dissolved oxygen in water has no significant effect on corrosion. The metal is susceptible to erosion corrosion. Magnesium is much more resistant than aluminum to alkalis. It is attacked by most acids except chromic and hydrofluoric. The corrosion product in HF acts as a protective film.



Table 5-8 Nominal Mechanical Properties  
of Aluminum Alloys

Number	Temper*	Tensile strength, lb/in. <sup>2</sup>	Yield strength, lb/in. <sup>2</sup>	Elongation, %	Brinell hardness
Wrought					
1100	O	13,000	5000	40	23
1100	H14	18,000	17,000	15	32
2014	O	27,000	14,000	18	45
2014	T6	70,000	60,000	13	135
3003	O	16,000	6000	35	28
3003	H14	22,000	21,000	12	40
5052	O	28,000	13,000	27	47
5052	H34	38,000	31,000	12	68
6061	O	18,000	8000	27	30
6061	T6	45,000	40,000	15	95
7075	O	33,000	15,000	16	60
7075	T6	83,000	73,000	11	150
7178	O	33,000	15,000	15	—
7178	T6	88,000	78,000	10	—
Cast					
43	Sand cast	19,000	8000	8	40
43	Die cast	33,000	16,000	9	—
195	Sand, T6	36,000	24,000	5	75
220	—	46,000	25,000	14	—
356	Sand, T6	33,000	24,000	3.5	70

\* O indicates annealed and H hardened by cold work. Strength and hardness increase with cold work; full cold work (H18) increases tensile strength of 1100 to 24,000 lb/in.<sup>2</sup> 1100, 3003, and 5052 not heat-hardenable. T indicates quench and age heat treatment.

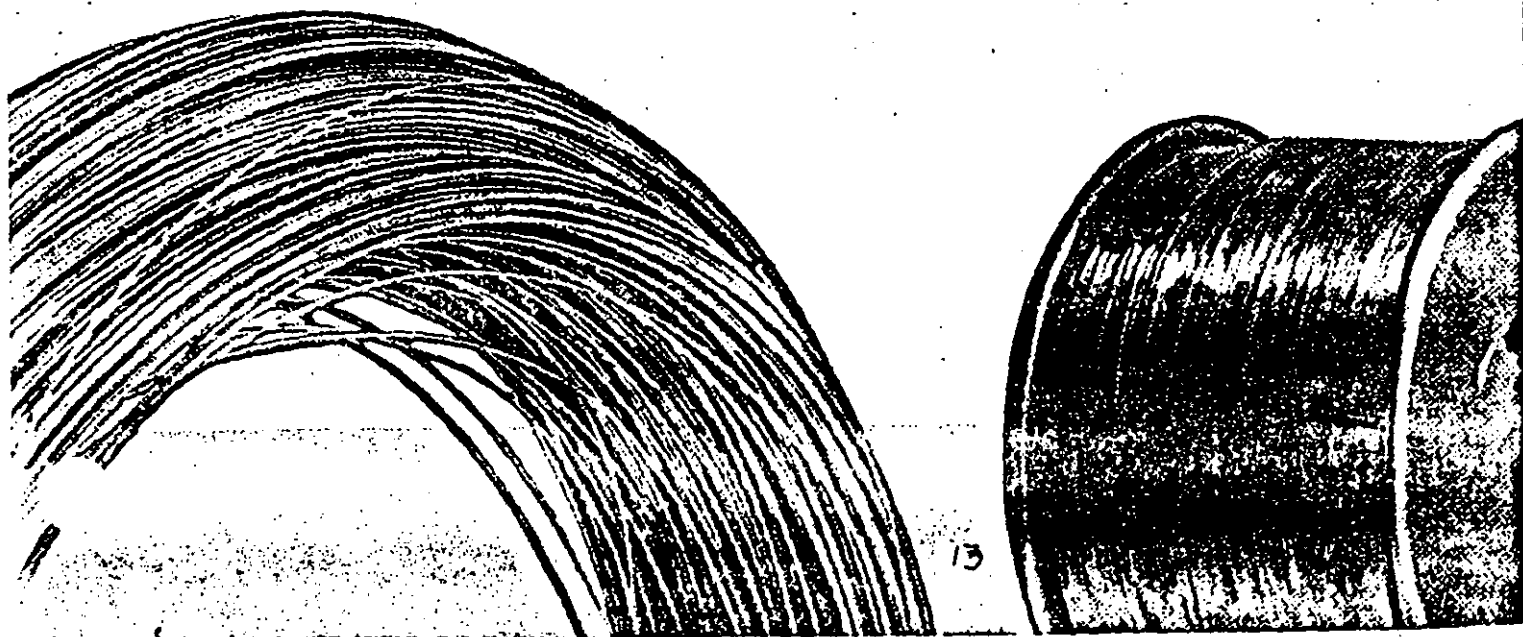
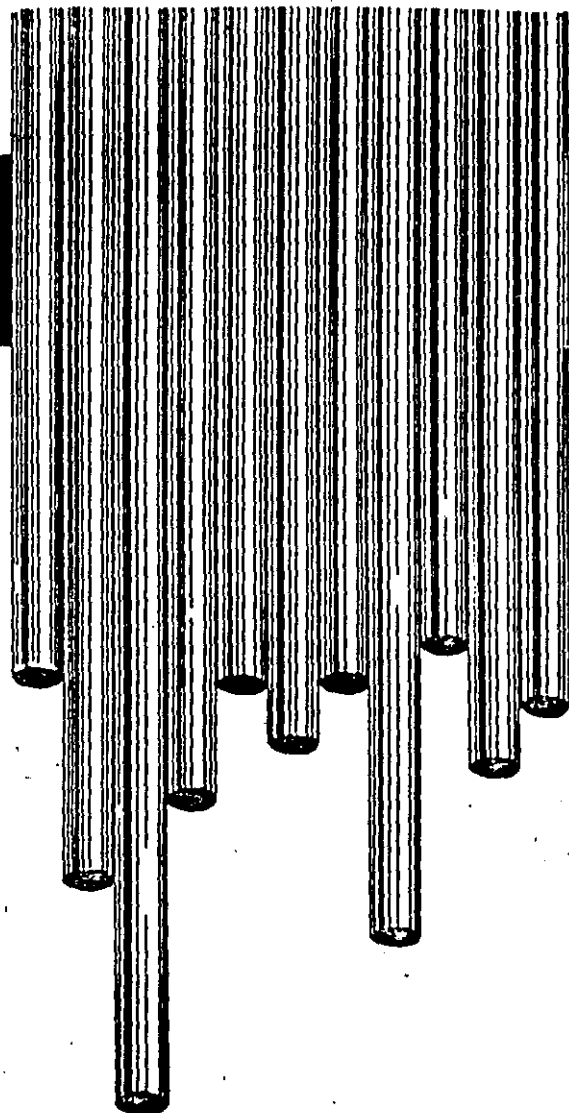
Magnesium and its alloys are available in a variety of wrought forms and die castings. Tensile strengths in the approximate range 15,000 to 50,000 lb./in.<sup>2</sup> are obtainable.\*

\* For a comprehensive discussion of magnesium and its alloys see "Metals Handbook," 8th ed., vol. 1, pp. 1067-1112, American Society for Metals, 1961.

**BRONCE FOSFORADO  
ALTA RESISTENCIA**

---

BARRAS	( P-8 B )
ALAMBRONES	( P-8 A )
ALAMBRES	( P-8 W )
CINTAS	( P-8 C )



# COMPOSICION Y PROPIEDADES

18

## COMPOSICION Y PROPIEDADES DE ALEACIONES ST

ALEACION		COMPOSICION QUIMICA NOMINAL %						NORMA ASTM	TEMPLES REGIDOS RESISTENCIA A LA T (miles de lbs./Pulg <sup>2</sup> ) Y DUREZA					
NUM.	NOMBRE	COBRE Cu	ZINC Zn	ESTANO Sn	PLOMO Pb	FOSFORO P	OTROS		resist. tracción	1/8 Duro.	1/4 Duro.	1/2 Duro.	3/4 Duro.	Duro.
110	COBRE ELECTROLITICO	99.90**						B-152	resist. tracción dureza	32-40 F 54/82	34-42 F 60/84	37-46 F 77/89	41-50 F 82/91	43-52 F 86/93
114	COBRE PLATA	99.90**					Ag** 0.034	B-152	resist. tracción	32-40	34-42	37-46	41-50	43-52
122	COBRE DESOXIDADO CON FOSFORO	99.9**				0.027		B-152	resist. tracción dureza	32-40 F 54/82	34-42 F 60/84	37-46 F 77/89	41-50 F 82/91	43-52 F 86/93
1601	COBRE CADMIO	99.9**					Cd 0.1							
220	BRONCE COMERCIAL	90.0	10.0					B-36	resist. tracción dureza		40-50 B 27/56	47-57 B 50/66	52-62 B 59/71	57-66 B 65/77
230	LATON ROJO	85.0	15.0					B-36	resist. tracción dureza		44-54 B 33/62	51-61 B 56/71	57-67 B 66/76	63-72 B 72/80
260	LATON CARTUCHO	70.0	30.0					B-36	resist. tracción dureza		49-59 B 40/65	57-67 B 60/77	64-74 B 72/82	71-81 B 79/86
274	LATON AMARILLO	63.0	37.0					B-36	resist. tracción dureza		49-59 B 40/65	56-66 B 57/76	63-73 B 71/81	70-80 B 76/84
3563	LATON ALTO PLOMO	60.5	37.5		2.0			B-121	resist. tracción		49-59 B 40/65	55-65 B 57/74		68-78 B 76/84
464	LATON NAVAL	60.5	38.75	0.75				B-171	resist. tracción	50 min**				
505	BRONCE FOSFORADO	99.5**		1.35		0.19		B-508						
5090	BRONCE FOSFORADO	99.5**		4.0		0.05		B-103	resist. tracción dureza			58-73 B 60/85		76-91 B 84/93

\* Cobre (Plata Incluye)  
 \*\* 0.034% Ag. = 10 Onzas Troy/Ton.  
 \*\* Cobre + Estano + Fosforo

\*\* Valor sólo para rolado en caliente  
 \*\* Temple de aplicación más comun  
 (no aparece en el ASTM)

**PRODUCTOS LAMINADOS NACOBRE  
ESTÁNDAR DE FABRICA.**

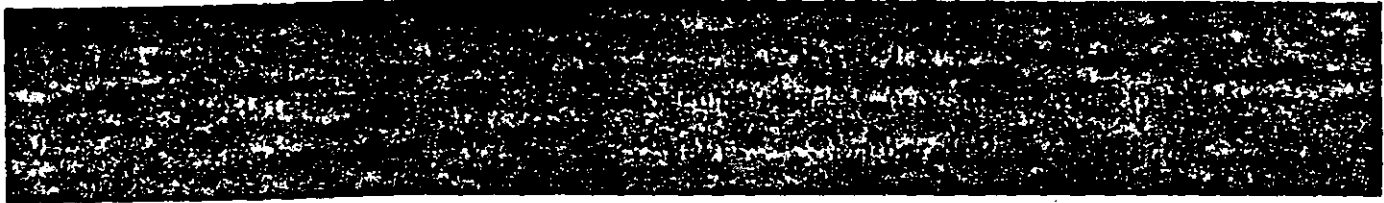
SECCION			Dureza aproximadas en temple blandos para embutido profundo						Densidad	Conductividad Eléctrica	USOS Y APLICACIONES MAS COMUNES
Extra tubo.	Resorte	Extra resorte	TAMAÑOS DE GRANO (mm)						los/pulg <sup>3</sup>	% IACS a 68 F '6	
			0.015	0.025	0.035	0.050	0.070	0.120			
7-56	50-58	52 min				F 30/75			0.322	101	usos arquitectónicos, contactos interruptores, terminales eléctricas, forro de cable, tanques de fumigación, equipo eléctrico.
88-95	F 91/97	F 92 min				F 30/75			0.322	100	paneles de radiador
7-56	50-58	52 min				F 30/75			0.322	85	válvulas, flotadores, partes embutidas y troqueladas, recipientes de destilación
88-95	F 91/97	F 92 min				F 30/75			0.322	85	válvulas, flotadores, partes embutidas y troqueladas, recipientes de destilación
9-57											paneles de radiador
4-72	69-77	72-80							0.318	44	usos arquitectónicos, joyería, ornamentación, cerrajería cartuchera
72-79	B 76/81	B 78/83	F 62/75	F 58/70	F 54/64	F 50/60			0.318	44	usos arquitectónicos, joyería, ornamentación, cerrajería cartuchera
7-80	78-86	82-90							0.316	37	cápsulas y estuches para cosméticos, tapas de plumas, joyería, usos eléctricos.
78-85	B 82/87	B 84/89	F 62/79	F 60/72	F 58/66	F 56/63	F 53/60		0.316	37	cápsulas y estuches para cosméticos, tapas de plumas, joyería, usos eléctricos.
13-92	91-100	95-104							0.308	28	cartuchera, tanques para radiador terminales eléctricas, cerrajería, artesanía, piezas de embutido extraprofundo
85-91	B 89/93	B 91/95	F 72/85	F 67/79	F 65/76	F 61/73	F 52/67	F 50/62	0.308	28	cartuchera, tanques para radiador terminales eléctricas, cerrajería, artesanía, piezas de embutido extraprofundo
31-91									0.305	26	cabezillos para radiador, piezas troqueladas.
82-89				F 67/79	F 65/76				0.305	26	cabezillos para radiador, piezas troqueladas.
79-89	86-95	90-99							0.307	26	piezas de relojería, llaves para cerraduras
83-99	B 87/92	B 89/93		F 67/79	F 65/76	F 61/73	F 54/67		0.307	26	piezas de relojería, llaves para cerraduras
									0.304	26	partes de condensadores, evaporadores e intercambiadores de calor, espejos para condensador
									0.320		usos eléctricos
8-103	95-110	100-114							0.320	15	usos eléctricos
89-96	B 92/98	B 94/99							0.320	15	usos eléctricos

Nota:  
F = dureza en escala rokwell F  
B = dureza en escala rokwell B  
\*6 para todos los casos el valor dado es para material recocido

Nota:  
los valores marcados en esta tabla fueron tomados del ASTM 1976 parte 6

## BRONCES AL ESTAÑO

ALEACION ALMENA	A S T M	SAE	Cu	Sn	Pb	Zn	P	Aplicaciones
P-5	B-159 (A)	81	Resto	4.2/5.8	.05Max	.30Max	0.03/0.35	Engranajes, guías, placas de deslizamiento, cojinetes de servicio pesado, alambres para mallas, resortes, soldadura, cepillos, vástagos, flechas, etc.
P-8	B-159 (C)	77C	Resto	7/9	.05Max	.20Max	0.03/0.35	
P-10	B-159 (D)	-	Resto	9/11	.05Max	.70Max	0.03/0.35	
P-444	B-139 (B2)	-	Resto	3.5/4.5	3.5/4.5	1.5/4.5	0.01/0.50	



BARRAS	Para entrega inmediata en medidas normales y longitudes de 3 a 4 metros. En medidas menores a 1" -- (25.4 mm), sobre pedido.
ALAMBRES	En diámetros hasta 0.5 mm. como medida menor, entregándose en rollos de 50 a 100 kg. sobre pedido.
CINTAS	Para entrega sobre pedido específico del cliente.

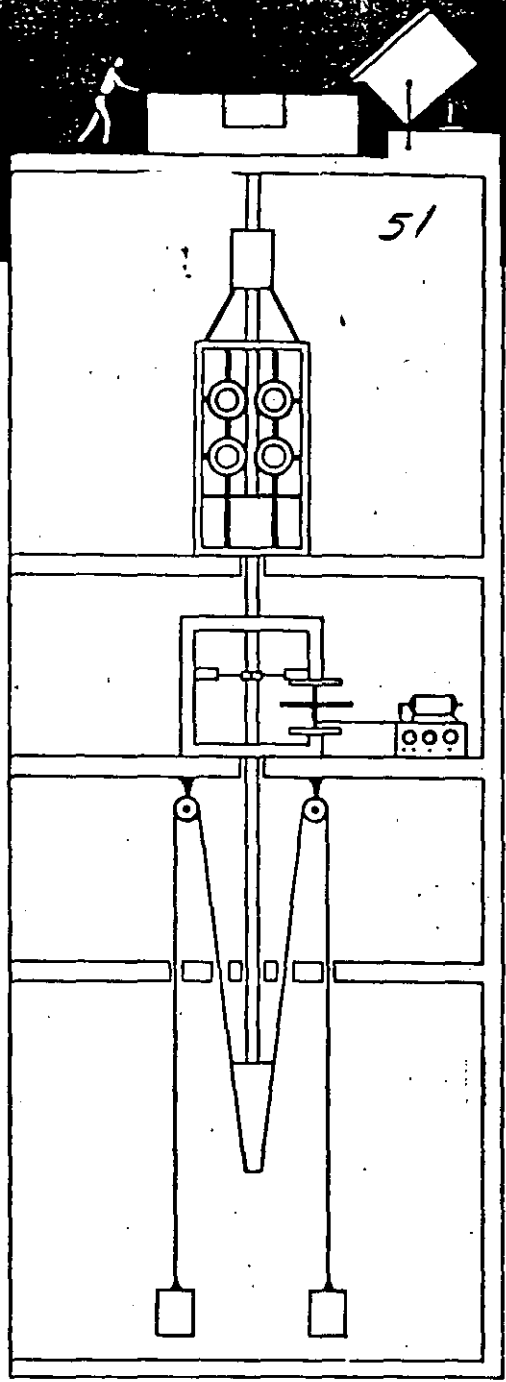
Medidas normales en barras (Diámetro)	
Pulgadas	Centímetros
1"	2.54
1 ¼	3.2
1 ½	3.5
1 ¾	3.8
1 ⅝	4.15
1 ¾	4.45
2"	5.1
2 ¼	5.4
2 ½	5.7
2 ¾	6.35
2 ⅝	7.
3"	7.6
3 ¼	8.25
3 ½	8.9
3 ¾	9.55

# BUJES Y BARRAS

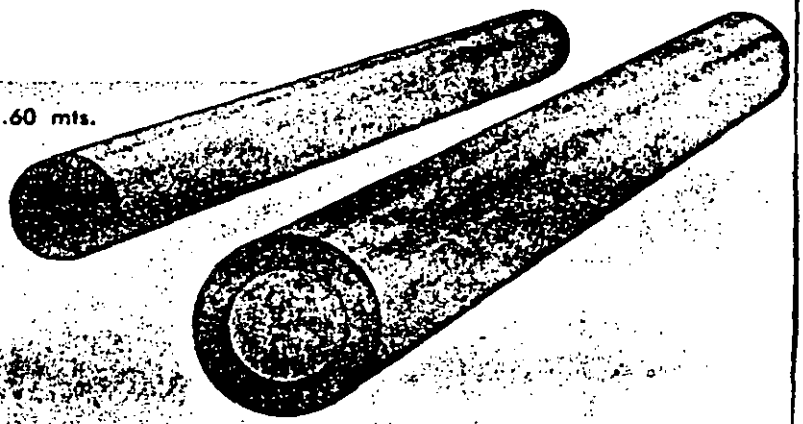
Composición	Cobre 83 % Estaño 7 % Plomo 7 % Zinc 3 %
Resistencia a la tensión	2463 Kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento en 5.08 cm.	18.90%
Reducción de área	23.44%
Dureza Brinell	79.6

**Aplicaciones**  
 Para uso general donde se requiera un magnífico bronce antifricción, compacto y uniforme; casquillos y cojinetes para altas velocidades. Pequeños engranes, prensa estopas, asientos de válvulas, etc. Muy poco desgaste en condiciones normales de lubricación.

El proceso único Almendra de Solidificación Continua le ofrece calidad a toda prueba y ventajas determinantes sobre el sistema de fundición a la arena centrifugado

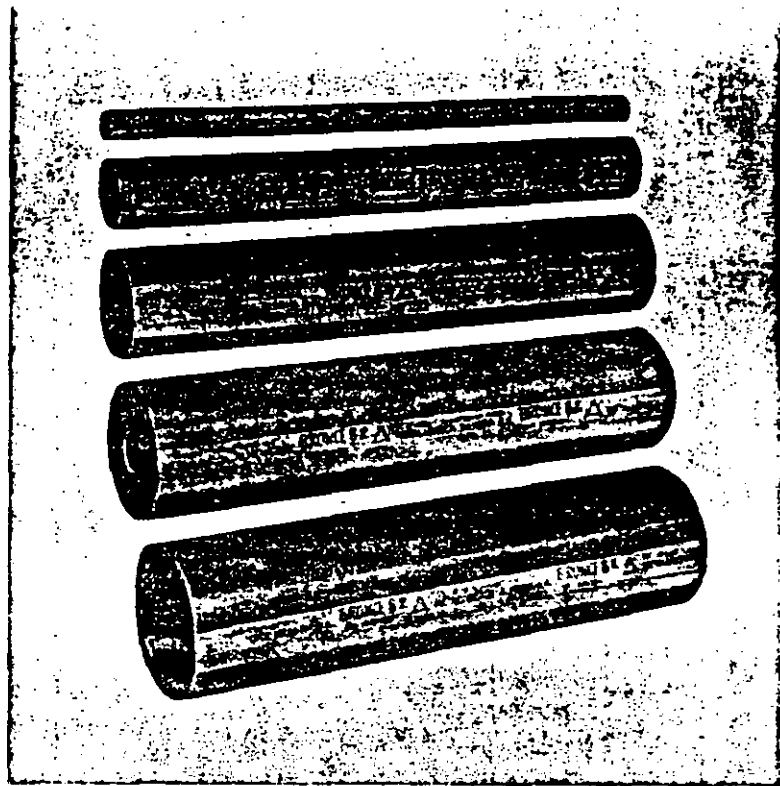


- \* Existencias Continuas en longitudes hasta de 3.60 mts.
- Medidas mas exactas
- Dureza Uniforme
- Ausencia absoluta de porosidad
- Mejores propiedades físicas
- \* Sobre pedido se pueden entregar longitudes hasta de 5.40 m. (18')



# CHUMACERAS y COJINETES

SOBRE PEDIDO



Denominación

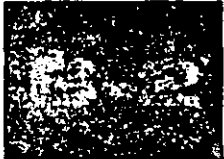
Equivalencia  
con Normas  
Internacionales

**ALMENA**

## APLICACIONES

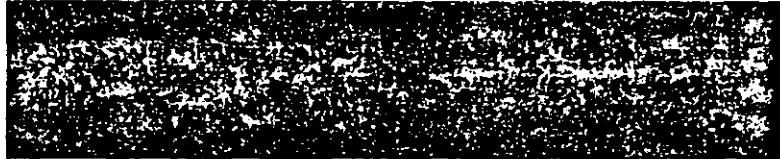


S.A.E. 64  
A.S.T.M. B-144 (3A)

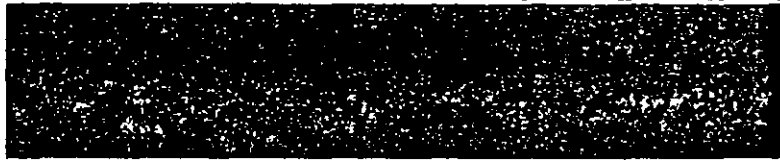


\*

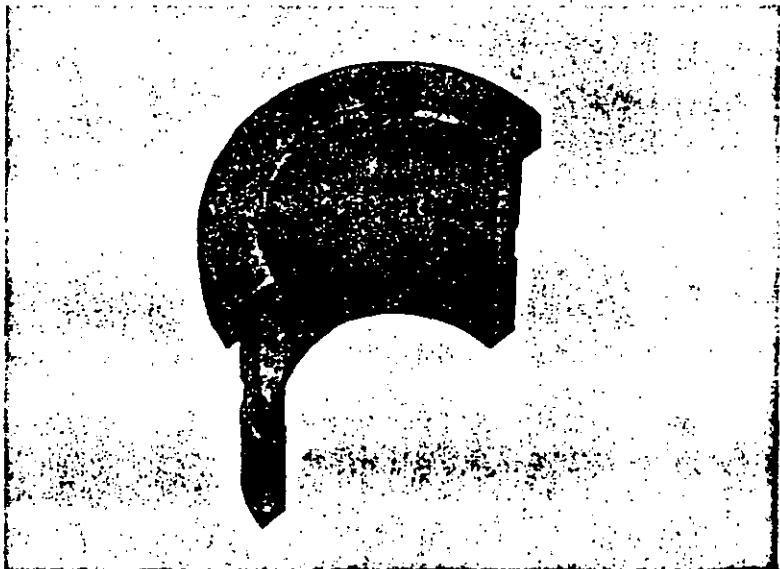
S.A.E. 660  
A.S.T.M. B-144 (3B)



S.A.E. 62  
A.S.T.M. B-143 (1A)



\*-Para diámetros de 10.16 mm (4") o menores, pedir SalmenoC 773.



# BRONCES PARA BUJES Y BARRAS

Fundición a la arena

53

Elementos Componentes (%)

Elementos	A-2 A.S.T.M. B-144 (3A) S.A.E. 64		B-2 A.S.T.M. B-144 (3B) S.A.E. 660		C A.S.T.M. B-143 (1A) S.A.E. 62	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
COBRE *	78	82	81	85	86	89
ESTAÑO	9	11	6.25	7.5	9	11
PLOMO	8	11	6	8	—	0.30
ZINC	—	0.75	2	4	1	3
NIQUEL	—	0.75	—	0.5	—	1
HIERRO	—	0.15	—	0.2	—	0.15
ANTIMONIO	—	0.55	—	0.35	—	—
FOSFORO	—	0.05	—	0.15	—	0.05-
IMPUREZAS	—	—	—	—	—	—

\* Se considera como Cobre Mínimo, la suma de Cobre y Níquel.

PROPIEDADES	A-2	B-2	"C"
Resist. a la tensión (Kg/cm <sup>2</sup> )	1760	2110	2812
Punto de cedencia (Kg/cm <sup>2</sup> )	845	985	1265
% alargamiento en 5.08 cm.	8-12	12-20	20-35
Dureza Brinell (500 Kg.)	55-70	55-65	57-74
Densidad	8.95	8.80	8.75

**METALURGICA ALMENA, S. A.**

PROLONGACION CALLE 18 No. 226, SAN PEDRO DE LOS PINOS MEXICO 18, D. F. TEL. 5-15-52-50 CON CINCO LINEAS DIRECTAS



# SalmenaC 3106

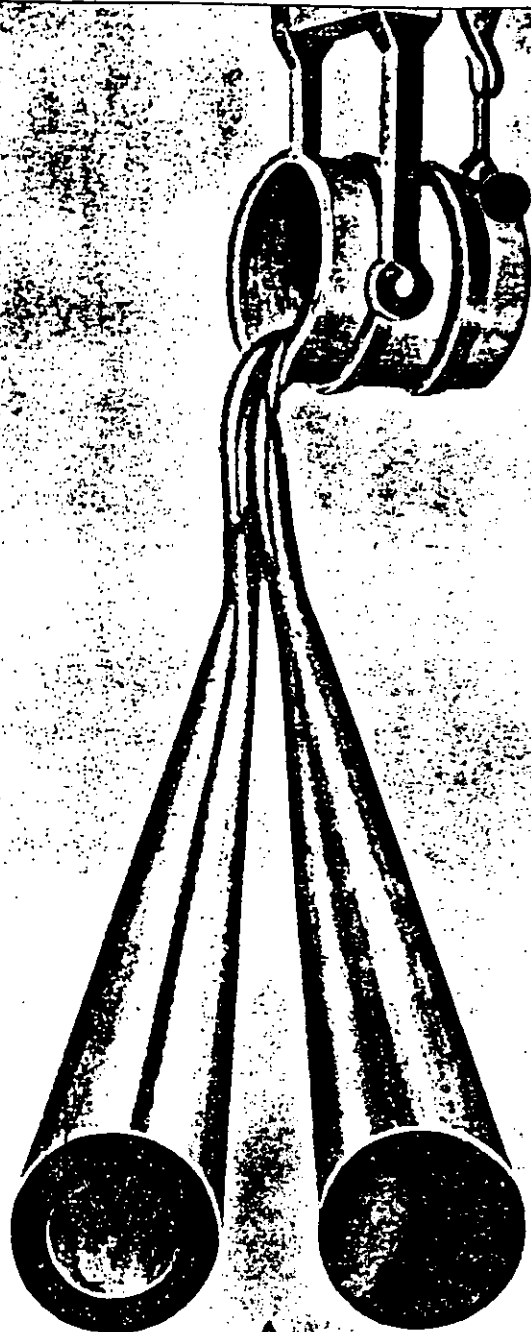
## BUIES Y BARRAS

Composición	Cobre 81 %
	Estaño 3 %
	Plomo 10 %
	Zinc 6 %
Resistencia a la tensión	2100 Kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento en 5.08 cm	25 %
Reducción de área	30 %
Dureza Brinell	65
Aplicaciones	Para uso general, cargas medias, altas velocidades. Magnifico bronce al plomo, para usarse donde se requiera un buen metal antifricción.

El proceso único Almena de Solidificación Continua le ofrece calidad a toda prueba y ventajas determinantes sobre el sistema de fundición o la arena o centrifugado.

- \* ■ Existencias continuas en longitudes hasta 3.60 mts. (12').
- Medidas mas exactas.
- Dureza Uniforme
- Ausencia absoluta de porosidad
- Mejores propiedades físicas.

\* Sobre pedido se pueden entregar longitudes hasta 5.40 mts. (18').



**ALMENA**

PESO APROXIMADO EN KG. DE BARRAS Y BUJES DE 3600 mm. (12') DE LONGITUD

## 55 EN BRONCE SALMENAC 3106

DIAMETRO INTERIOR

DIAMETRO EXTERIOR	PULGADAS		DIAMETRO INTERIOR														
	mm	mm	0"	1/2"	3/8"	3/4"	7/8"	1"	1 1/4"	1 1/2"	1 3/4"	2"	2 1/4"	2 1/2"	3"	4"	
+1/16" EXCESO	mm	0.3	12.7	15.9	19.0	22.2	25.4	31.7	38.1	44.4	50.8	57.1	63.5	76.2	101.8		
3/8"	11.1	3.12															
1/2"	14.3	5.22															
5/8"	17.5	7.80															
3/4"	20.7	11.1															
7/8"	23.8	14.4															
1"	27.0	18.4	14														
1 1/8"	30.2	22.9	18.8	16.7													
1 1/4"	33.4	28.0	24	21.3	20.3	15.4											
1 3/8"	36.5	33.6	29.6	27.4	24.2	21.2											
1 1/2"	39.7	39.6	34.4	33.3	30.5	27	23.2										
1 5/8"	42.9	44.2	42.1	37.9	35.1	32	30.4										
1 3/4"	46.1	53.6	48.4	47.3	44.5	41	37.2	28.5									
2"	52.4	68.9	65	62.5	60	56.6	52.5	43.7	32								
2 1/8"	55.6	77.9	74	71.5	69	65.6	62.3	52.4	41.3								
2 1/4"	58.7	87.6			78.5	75.4	71.2	62.5	50.7	38							
2 3/8"	65.3	106.5				94.6	90.1	81.4	70	57	42						
2 3/4"	71.5	124.3				117.8	114.5	104	93	80.5	63.0	47.6					
3"	77.8	152.4					136	127	116	102	86	70	52				
3 1/4"	84.1	174					159	149	138	125	110	92	74				
3 1/2"	90.5	208					191	181	169	157	140	124	106				
3 3/4"	96.8	236					220	210	199	187	171	154	136				
4"	103.2	267					252	242	230	218	202	185	167	120			
4 1/2"	115.9	316							305	293	276	260	241	194			
5"	128.5	420								384	370	355	337	320	272		
5 1/2"	141.3	507									443	425	407	360			
6"	154	603										520	503	455	340		

**METALURGICA ALMENA, S. A.**

PROLONGACION CALLE 18 No. 276, SAN PEDRO DE LOS PINOS MEXICO 18, D. F. TEL. 15-52-50 CON 5 LINEAS DIRECTAS



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**ANALISIS DINAMICO DE MAQUINARIA**

**DR. ANGEL ROJAS SALGADO**

**PALACIO DE MINERIA**

AWIAC, sept. 88

### SINTESIS EXACTA DE CONDUCCION DE CUERPO RIGIDO MEDIANTE POLINOMIOS

Angel A. Rojas Salgado  
Divisiones de Ingeniería Mecánica-Eléctrica y de Posgrado  
Facultad de Ingeniería, UNAM.  
Apdo. Postal 70-256  
04510 México, D.F.

#### ABSTRACT

A different, unified treatment to obtain the exact synthesis for rigid body guidance of a RRRR plane-linkage is presented. This is a new solution for rigid body guidance through four and five specified positions. The synthesis problem is reduced to the solution of a polynomial, whose grade depends on the number of positions to satisfy. The polynomial roots lead to multiple solutions of the same problem.

#### RESUMEN

Se presenta un tratamiento diferente en forma unificada, en la obtención de la síntesis exacta de mecanismos planos RRRR, para conducción de cuerpo rígido satisfaciendo cuatro y cinco posiciones. El problema de síntesis se resuelve por medio de un polinomio cuyo grado depende de las posiciones a satisfacer, las raíces de este polinomio conducen a varias soluciones de un mismo problema.

#### INTRODUCCION

Se conoce que el número máximo de configuraciones que pueden ser especificadas en la síntesis exacta para conducción de cuerpo rígido es cinco [1]. Cada configuración consiste en la ubicación de un punto y la orientación que tiene una línea fija al cuerpo. La forma en que puede obtenerse la solución es en forma gráfica [2] o bien, en forma analítica por medio de un proceso iterativo [3]. Los métodos gráficos requieren gran cuidado al trazar los diagramas y al calcular las variables que se necesitan en el proceso, así como, al realizar las curvas de punto circular para la obtención de los segmentos curvos que darán las posiciones deseadas. Esta técnica basada en la síntesis de Burmeister [4], aunque puede adaptarse numéricamente, resulta compleja. Más sencillo resulta el método iterativo en el que se plantean cuatro funciones de síntesis que contienen los cinco puntos a satisfacer, uno de los puntos se toma como referencia. El método que emplea Angeles [3] en su solución es el de Newton-Raphson, proporciona gran exactitud pero tiene la desventaja que requiere los puntos iniciales cerca de la solución, para que exista convergencia. En este último método no se conoce a priori el número de soluciones.

El tratamiento que se emplea en este artículo obtiene un conjunto de soluciones por medio de un polinomio de cuarto orden que no requiere puntos iniciales; se obtienen como máximo 6 mecanismos diferentes para cuatro configuraciones más la de referencia.

En el caso de darse una configuración menos, se cuenta con la libertad de elegir un parámetro de tal forma que de como resultado un mecanismo libre de bifurcación [5]. En este caso se tiene la libertad de combinar diferentes soluciones, que se obtienen con dos parámetros no idénticos, formándose como máximo en este caso, 15 mecanismos solución diferentes para el problema.

#### Ecuaación de síntesis

La obtención de la ecuación de síntesis para conducción de cuerpo rígido se basa en la invariabilidad de las longitudes del mecanismo RRRR plano, tanto el eslabón conductor AB como el conducido A\*B\* que se muestran en la fig. 1, están formados por diadas, una diada consiste de un eslabón con dos pares cinemáticos. El punto A (o A\*) se conoce como punto circular y cambia de posición al girar el eslabón AB, se indicará A<sub>0</sub> (o A<sub>0</sub>\*) a la configuración de referencia y A<sub>j</sub> (o A<sub>j</sub>\*) a la nueva posición j. El punto B es un punto central y es invariable al movimiento. Introduciendo vectores para obtener la ecuación de síntesis para conducción de cuerpo rígido, se tiene que a, a\*, b y b\* son vectores que ubican los puntos A, A\*, B y B\* respectivamente. En la Fig. 2 el punto R corresponde a un punto de la barra acopladora, este punto pertenece a una línea del cuerpo rígido y tiene una orientación θ, de tal forma que R y θ satisfacen un conjunto de valores especificados dados por (R<sub>j</sub>(x<sub>j</sub>, y<sub>j</sub>), θ<sub>j</sub>)<sub>0</sub>.

Haciendo referencia a la fig. 2 y considerando que r<sub>j</sub> sea el vector asociado con el punto R<sub>j</sub>, la ecuación de síntesis puede ser escrita como:

$$\begin{aligned} |a_0 - b|^2 - |a_j - b|^2 - |z_j + r_j - b|^2 \\ = |Q(a_0 - r_0) + r_j - b|^2 \end{aligned} \quad (1)$$

donde

$$\begin{aligned} a_j &= r_j + z_j \\ z_j &= Q z_0 = Q(a_0 - r_0) \end{aligned}$$

$$Q = \begin{bmatrix} c\beta_j & -s\beta_j \\ s\beta_j & c\beta_j \end{bmatrix}$$

$$\beta_j = Q_j - \theta_0$$

#### Polinomio para cinco configuraciones

Para obtener el polinomio necesario para la síntesis, se desarrolla la ec. (1) considerando

$$\underline{a}_0^T = (a_x, a_y)$$

$$\underline{b}_0^T = (b_x, b_y)$$

obteniéndose la función de síntesis para cada configuración como:

$$f_j = a_{j1}a_x + a_{j2}a_y + a_{j3}b_x + a_{j4}b_y + b_j' + (a_y b_x - a_x b_y) c_j' + (a_y b_y + a_x b_x) d_j' = 0 \quad j=1,2,3,4 \quad (2)$$

donde

$$a_{j1} = \cos \beta_j x_j + \sin \beta_j y_j - x_0$$

$$a_{j2} = \cos \beta_j y_j - \sin \beta_j x_j - y_0$$

$$a_{j3} = \cos \beta_j x_0 - \sin \beta_j y_0 - x_j$$

$$a_{j4} = \cos \beta_j y_0 + \sin \beta_j x_0 - y_j$$

$$b_j' = \frac{x_0^2 + y_0^2 + x_j^2 + y_j^2}{2} - \cos \beta_j (x_0 x_j + y_0 y_j) - \sin \beta_j (x_0 y_j - y_0 x_j)$$

$$c_j' = \sin \beta_j$$

$$d_j' = 1 - \cos \beta_j$$

Las ecs (2) constituyen un sistema algebraico no lineal de cuarto orden, cuya solución puede ser obtenida usando el método de Newton-Raphson [3]. Dada la naturaleza cuadrática de las ecs (2), de cualquier modo, algunas simplificaciones pueden ser introducidas que permitan que la solución sea obtenida directamente, o sea, sin iteraciones. De hecho, las ecuaciones de síntesis pueden ser reescritas en forma matricial como:

$$\underline{A}x + \underline{b}' + (\underline{a}_y b_x - \underline{a}_x b_y) \underline{c}' + (\underline{a}_y b_y + \underline{a}_x b_x) \underline{d}' = 0 \quad (3)$$

$$\text{con } \underline{x}^T = (a_x, a_y, b_x, b_y)$$

Si la matriz  $\underline{A}$  es invertible, la ec (3) puede plantearse como

$$\underline{x} + \underline{A}^{-1} \underline{b}' + \lambda \underline{A}^{-1} \underline{c}' + \mu \underline{A}^{-1} \underline{d}' = 0 \quad (4)$$

donde se definen como constantes

$$\lambda = \frac{a_y b_x - a_x b_y}{a_y a_x - a_x a_y} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{a_y b_y + a_x b_x}{a_y a_y + a_x a_x} \quad (6)$$

La solución, aplicando el principio de superposición, puede ser reescrita como:

$$x_j = - (b_j + \lambda c_j + \mu d_j) \quad (7)$$

en donde se considera a  $b_j$ ,  $c_j$  y  $d_j$  como las componentes  $j$  de los vectores  $\underline{A}^{-1} \underline{b}'$ ,  $\underline{A}^{-1} \underline{c}'$ ,  $\underline{A}^{-1} \underline{d}'$ . Esta solución al ser sustituida en las ecs. (5) y (6) conduce a

$$r_1 \mu^2 + \mu (r_2 + \lambda r_3) + \lambda^2 r_4 + \lambda r_5 + r_6 = 0 \quad (8)$$

$$\delta_1 \mu^2 + \mu (\delta_2 + \lambda \delta_3) + \lambda^2 \delta_4 + \lambda \delta_5 + \delta_6 = 0 \quad (9)$$

donde

$$r_1 = d_3 d_2 - d_1 d_4$$

$$r_2 = b_2 d_3 + d_2 b_3 - b_1 d_4 - d_1 b_4$$

$$r_3 = c_2 d_3 + c_3 d_2 - c_1 d_4 - d_1 c_4$$

$$r_4 = c_2 c_3 - c_1 c_4$$

$$r_5 = b_2 c_3 + c_2 b_3 - b_1 c_4 - c_1 b_4 - 1$$

$$r_6 = b_2 b_3 - b_1 b_4$$

$$\delta_1 = d_1 d_3 + d_2 d_4$$

$$\delta_2 = b_1 d_3 + d_1 b_3 + b_2 d_4 + d_2 b_4 - 1$$

$$\delta_3 = d_1 c_3 + c_1 d_3 + c_2 d_4 + d_2 c_4$$

$$\delta_4 = c_1 c_3 + c_2 c_4$$

$$\delta_5 = b_1 c_3 + c_1 b_3 + b_2 c_4 + c_2 b_4$$

$$\delta_6 = b_1 b_3 + b_2 b_4$$

Las ecs. (8) y (9) pueden considerarse como ecuaciones de compatibilidad, las cuales deben tener idéntica solución para  $\mu$ , para lograrlo se aplica la eliminación dialítica de Sylvester [6], que conduce a la siguiente restricción para los coeficientes, esta restricción esta dada por el determinante:

$$\begin{vmatrix} r_1 & r_2 + \lambda r_3 & \lambda^2 r_4 + \lambda r_5 + r_6 & 0 \\ 0 & r_1 & r_2 + \lambda r_3 & \lambda^2 r_4 + \lambda r_5 + r_6 \\ 0 & \delta_1 & \delta_2 + \lambda \delta_3 & \lambda^2 \delta_4 + \lambda \delta_5 + \delta_6 \\ \delta_1 & \delta_2 + \lambda \delta_3 & \lambda^2 \delta_4 + \lambda \delta_5 + \delta_6 & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad (10)$$

que desarrollado conduce al siguiente polinomio:

$$\alpha_5 \lambda^4 + \alpha_4 \lambda^3 + \alpha_3 \lambda^2 + \alpha_2 \lambda + \alpha_1 = 0 \quad (11)$$

donde

$$\alpha_5 = 2r_1 \delta_1 r_4 \delta_4 + r_1 \delta_3 r_3 \delta_4 - r_1 \delta_3 r_4 - r_1 \delta_4^2 - \delta_1 r_3 \delta_4^2 - \delta_1^2 r_4^2 + \delta_1 r_3 \delta_3 r_4$$

$$\alpha_4 = 2r_1 [\delta_1 (\delta_4 r_5 + \delta_5 r_4) - \delta_2 \delta_3 r_4 - r_1 \delta_4 \delta_5] + r_1 \delta_2 r_3 \delta_4 + r_1 \delta_3 (r_2 \delta_4 + r_3 \delta_5 - \delta_3 r_5) - \delta_1 r_4 (2\delta_1 r_5 - r_2 \delta_3) + \delta_1 r_3 (r_3 \delta_5 + 2r_2 \delta_4 - \delta_2 r_4 - \delta_3 r_5)$$

$$\alpha_3 = 2r_1 [\delta_1 (\delta_4 r_6 + r_5 \delta_5 + \delta_6 r_4) - \delta_2 \delta_3 r_5 - r_1 \delta_4 \delta_6] + r_1 \delta_2 [r_2 \delta_4 + r_3 \delta_5 - \delta_2 r_4] + r_1 \delta_3 (r_2 \delta_5 + r_3 \delta_6 - \delta_3 r_6) - \delta_1 r_2 (r_2 \delta_4 + 2r_3 \delta_5 - \delta_2 r_4 - \delta_3 r_5) - \delta_1 r_3 (r_3 \delta_6 - \delta_2 r_5 - \delta_3 r_6) - r_1 \delta_5^2 - \delta_1^2 (2r_4 r_6 + r_5^2)$$

$$\alpha_2 = 2r_1 (\delta_1 \delta_5 r_6 + \delta_1 \delta_6 r_5 - \delta_3 \delta_2 r_6 - r_1 \delta_5 \delta_6) + r_1 \delta_3 r_2 \delta_6 + r_1 \delta_2 (r_2 \delta_5 + r_3 \delta_6 - \delta_2 r_5) - \delta_1 (2\delta_1 r_5 r_6 - r_3 \delta_2 r_6) - \delta_1 r_2 (r_2 \delta_5 + 2r_3 \delta_6 - \delta_2 r_5 - \delta_3 r_6)$$

$$\alpha_1 = 2r_1 \delta_1 \delta_6 r_6 + r_1 (\delta_2 r_2 \delta_6 - \delta_2^2 r_6 - r_1 \delta_6^2) - \delta_1 (r_2^2 \delta_6 + \delta_1 r_6^2 - r_2 r_6 \delta_2)$$

la ec. (11) puede tener en principio cuatro raí

ces reales, dos reales y dos complejas o bien cuatro complejas. Con cada raíz real de  $\lambda(\lambda_j, j=1,2,3,4)$ , se calculan los valores de  $\mu(\mu_i, i=1,2)$  dados por las ecs. (8) y (9). De las raíces que se obtienen de cada ecuación se seleccionan las que tengan valores idénticos, con el valor de  $\lambda_j$  y  $\mu_i$  se obtiene una diada al sustituir en la ec. (7) estos valores. Puede darse el caso que el coeficiente  $\alpha_5$  sea cero para algunas configuraciones, teniéndose así una o tres diadas diferentes. Resumiendo, la ec. (11) puede producir 0,1,2,3 ó 4  $BA_0$  diadas.

Polinomio para cuatro configuraciones

En este caso se proporciona un parámetro del punto central o circular, aquí se supone como dato  $b_x$ . La ecuación de síntesis dada por la ec. (2) se agrupa en la siguiente forma

$$f_j = a_{j1}x + a_{j2}y + a_{j3}b_j + b'_j + a_x b_j c'_j + a_y b_j d'_j = 0 \quad j=1,2,3 \quad (12)$$

donde

$$\begin{aligned} a_{j1} &= b_x(1-\cos\beta_j) + \cos\beta_j x_j + \sin\beta_j y_j - x_0 \\ a_{j2} &= (b_x - x_j)\sin\beta_j + \cos\beta_j y_j - y_0 \\ a_{j3} &= \cos\beta_j y_0 + \sin\beta_j x_0 - y_j \\ b'_j &= (x_0^2 + y_0^2 + x_j^2 + y_j^2) / 2 - \cos\beta_j (x_0 x_j + y_0 y_j) - \sin\beta_j (x_0 y_j - y_0 x_j) + b_x (\cos\beta_j x_0 - \sin\beta_j y_0 - x_j) \\ c'_j &= -\sin\beta_j \\ d'_j &= 1 - \cos\beta_j \end{aligned}$$

Reescribiendo la ec. (12) de síntesis en forma matricial se tiene:

$$\underline{Ax} + \underline{b} + \underline{a}_y \underline{b}_y \underline{c}' + \underline{a}_y \underline{b}_y \underline{d}' = 0$$

donde

$$\underline{x}^T = (a_x, a_y, b_y)$$

Si  $\underline{A}$  es invertible, al aplicar el principio de superposición, la solución puede escribirse como

$$\underline{x} = -(\underline{b} + \underline{a}_x \underline{b}_y \underline{c}' + \underline{a}_x \underline{b}_y \underline{d}') \quad (13)$$

donde

$$\begin{aligned} \underline{b} &= \underline{A}^{-1} \underline{b}' \\ \underline{c} &= \underline{A}^{-1} \underline{c}' \\ \underline{d} &= \underline{A}^{-1} \underline{d}' \end{aligned}$$

Eliminando los productos  $a_x b_y$  y  $a_y b_y$  del sistema expresado en la ec. (13), se obtiene la siguiente ecuación cúbica:

$$\beta_4 b_y^3 + \beta_3 b_y^2 + \beta_2 b_y + \beta_1 = 0 \quad (14)$$

con

$$\begin{aligned} \beta_4 &= c_1 d_2 - c_2 d_1 \\ \beta_3 &= c_1 (b_3 d_2 - b_2 d_3) + b_1 (d_3 c_2 - d_2 c_3) + d_1 (c_3 b_2 - b_3 c_2) + c_1 + d_2 \\ \beta_2 &= 1 + b_3 d_2 - b_2 d_3 + b_3 c_1 - b_1 c_3 \\ \beta_1 &= b_3 \end{aligned}$$

Por lo tanto para un valor dado de  $b_x$ , la ec. (14) puede tener 0,1,2,3 raíces diferentes, que junto con las coordenadas

$$a_y = \frac{c_2 b_y + b_3 c_2 - c_3 b_2}{c_3 - b_y (d_3 c_2 - d_2 c_3)}$$

$$a_x = \frac{d_1 b_y + b_3 d_1 - b_1 d_3}{d_3 - b_y (c_3 d_1 - c_1 d_3)}$$

forman hasta tres diadas diferentes  $\overline{AB}_0$ . Si  $b_y^*$  es dado independientemente de  $b_x$ , una ecuación cúbica análoga a la ec. (14) puede ser obtenida para producir 0,1,2,3,  $B^*A_0$  diadas. Suponiendo que el problema de síntesis produce  $q$   $BA_0$  diadas y  $q^*$   $B^*A_0$  diadas, para valores dados de  $b_x$  y  $b_x^*$ , ellas pueden ser combinadas para producir  $qq^*$  mecanismos diferentes, cuando  $q=q^*=3$  se tienen 15 mecanismos diferentes.

Ejemplo

El punto R de un cuerpo rígido satisface las posiciones sucesivas  $R_j(0,1,2,3,4)$  y una de sus líneas cumple la inclinación  $\theta_j(0,1,2,3,4)$  como se dan a continuación

$x_0=0.000$	$y_0=8.700$	$\theta_0=0.000^\circ$
$x_1=0.8135$	$y_1=9.504$	$\theta_1=-16.88^\circ$
$x_2=2.800$	$y_2=11.125$	$\theta_2=-40.62^\circ$
$x_3=7.500$	$y_3=11.600$	$\theta_3=-79.24^\circ$
$x_4=9.600$	$y_4=11.250$	$\theta_4=-90.00^\circ$

Determinar el mecanismo RRRR plano cuya barra acopladora guíe el cuerpo rígido a través de las configuraciones dadas.

Siguiendo el proceso descrito para obtener el polinomio de cuarto grado, ec. (11), se obtiene que

$$\begin{aligned} \alpha_5 &= 9.8776644 \times 10^{-10} \\ \alpha_4 &= 4.1165071 \times 10^{-8} \\ \alpha_3 &= -2.1686090 \times 10^{-7} \\ \alpha_2 &= -4.1145892 \times 10^{-6} \\ \alpha_1 &= -9.3729103 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

cuyas raíces son:

$$\lambda_1 = -3.006836$$

$$\lambda_2 = -5.949137$$

$$\lambda_3 = -11.891142$$

$$\lambda_4 = -44.610072$$

Al sustituir  $\lambda_1$  en las ecuaciones (8) se obtiene

$$\mu_1 = 53.080292$$

$$\mu_2 = -1431.684795$$

y en la ec. (9), las raíces son:

$$\mu_1 = 53.080292$$

$$\mu_2 = 73.668134$$

con los valores idénticos de  $\mu_1$ ,  $\lambda_1$  se obtiene la primera solución como:

$$a_x = -(b_1 + \lambda_1 c_1 + \mu_1 d_1) = 5.985831$$

$$a_y = -(b_2 + \lambda_1 c_2 + \mu_1 d_2) = 4.664752$$

$$b_x = -(b_3 + \lambda_1 c_3 + \mu_1 d_3) = 5.273538$$

$$b_y = -(b_4 + \lambda_1 c_4 + \mu_1 d_4) = 4.611988$$

En forma análoga con  $\lambda_2$  y  $\mu_2 = 70.118024$  se obtiene la solución

$$a_x = 7.070352$$

$$a_y = 5.471740$$

$$b_x = 5.795171$$

$$b_y = 5.326298$$

con  $\lambda_3$  y  $\mu_3 = 90.904989$  se obtiene ahora

$$a_x = 6.159465$$

$$a_y = 6.894449$$

$$b_x = 7.510128$$

$$b_y = 6.475734$$

y con  $\lambda_4$  y  $\mu_4 = 97.520602$

$$a_x = 12.351674$$

$$a_y = 6.075981$$

$$b_x = 4.926567$$

$$b_y = 6.035117$$

con las soluciones obtenidas se pueden formar 6 mecanismos diferentes, satisfaciendo las configuraciones deseadas. El mecanismo que se muestra en la fig. 3 corresponde las soluciones 1 y 3.

### CONCLUSIONES

De la discusión para ambos casos, tres y cuatro configuraciones más la de referencia, se observa claramente que al asignar más posiciones a satisfacer es más restringido el número de soluciones y más factible que no exista solución. Por el método expuesto esto se determina en forma inme

diata, no así por el método iterativo. Este método requiere que se tome el mayor número de dígitos, por lo que una calculadora programable es adecuada para no cometer errores de redondeo excesivos.

### BIBLIOGRAFIA

1. Bottema O. y Roth B. Theoretical Kinematics North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 1979, pp 249-255.
2. Waldron K.J., "Graphical Solution of the Branch and Order Problems of Linkages Synthesis for Multiply Separated Positions", Trans. ASME, Journal Engineering Industry, serie B, No. 99, pp. 591-597, 1977.
3. Angeles J., Análisis y Síntesis Cinemáticas de Sistemas Mecánicos, Limusa, México, D.F., Cap. 3 y Apéndice A., 1978.
4. Freudenstein F. y Sandor G., "On the Burmester Points of a Plane", Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, marzo, 1961, pp. 41-49.
5. Angeles J. y Rojas A., "An Optimisation Approach to the Branching Problem of Plane Linkage Synthesis", Proceedings of the VI World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, New Delhi, India, pp. 120-123, 1983.
6. Aitken A.C., Determinantes y Matrices, Ed. Dossat, S.A., Madrid-Buenos Aires, 1965.

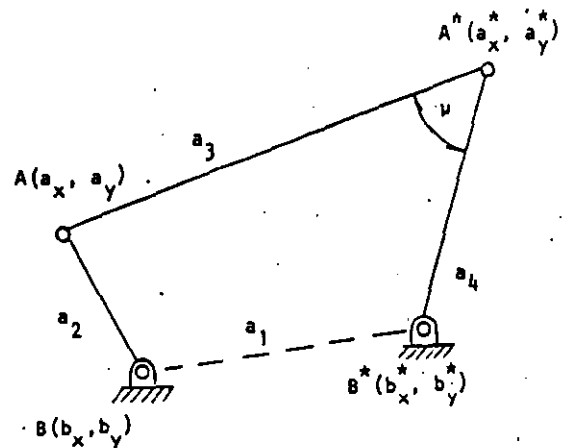


Fig. 1 Nomenclatura para el mecanismo plano

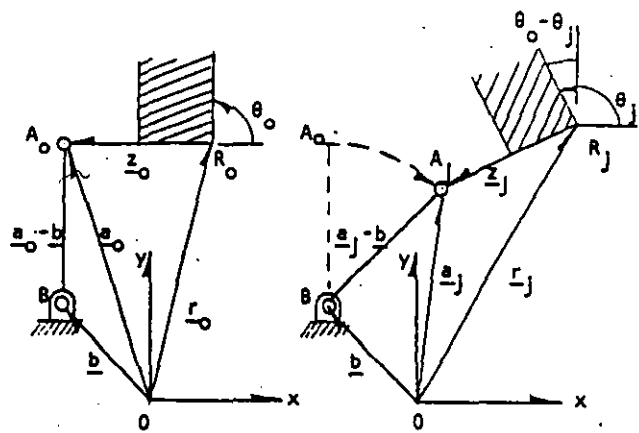


Fig. 2 Diada  $\bar{BA}_0$  en la configuración de referencia y en la configuración  $\bar{BA}_j$

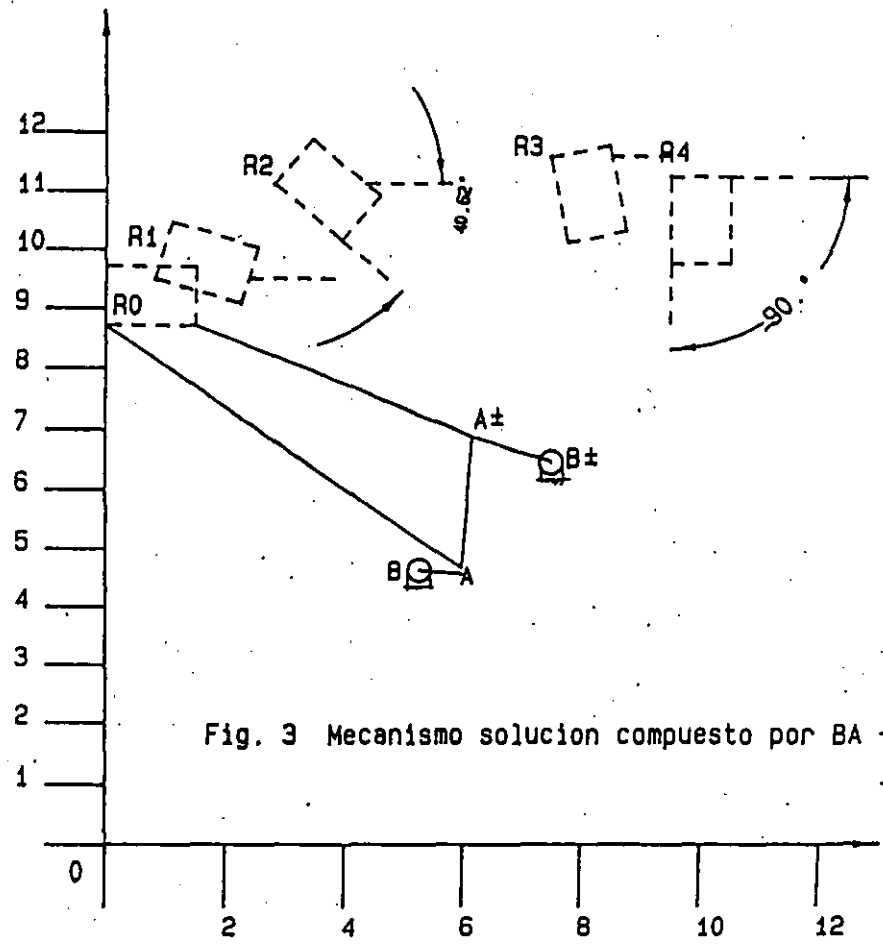


Fig. 3 Mecanismo solución compuesto por BA - B±A±



6

## ANALISIS DINAMICO DE MECANISMOS ACCIONADORES EN LAVADORAS DE ROPA MEDIANTE CAD

Angel A. Rojas Salgado  
Miguel A. Cruz Morales  
Alvaro Ayala Ruiz  
Divisiones de Estudios de Posgrado  
y de Ingeniería Mecánica- Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, UNAM  
Apdo. Postal 70-256  
04510 México, D.F.

### RESUMEN

En el presente artículo se conjuntan las técnicas gráficas y analíticas en un sistema de CAD y se aplica a los mecanismos accionadores en lavadoras de ropa de agitador. Se obtiene el movimiento de cada uno de los elementos que constituyen el mecanismo en su forma real, para un ciclo completo de trabajo. Los resultados tienen la exactitud necesaria en los aspectos cinemáticos y dinámicos para su rediseño o modificaciones adecuadas.

### INTRODUCCION

El análisis cinemático y dinámico de sistemas mecánicos cobra importancia en el proceso de diseño o de rediseño en los sistemas accionadores, pues mediante este análisis es posible evaluar su operación sin necesidad de construirlo.

El campo del análisis cinemático y dinámico ha existido desde antes que existieran las primeras computadoras. Inicialmente los métodos de análisis y síntesis fueron de naturaleza gráfica y los modelos para representar los sistemas se elaboraban mediante dibujos en papel. La computadora digital y los sistemas CAD han representado una innovación en el campo del diseño [1]. Por una parte, las complejas técnicas numéricas han podido ser integradas

17

para el análisis, mediante estas técnicas pueden evaluarse variables tales como: pares y fuerzas críticas, velocidades en un intervalo completo de operación, así como la ventaja mecánica de la transmisión. Por otro lado es posible obtener propiedades geométricas y dinámicas de cada uno de los elementos que integran el mecanismo con lo que se puede simular el movimiento del mecanismo y detectar situaciones adversas tales como interferencias.

En el mercado existen un gran número de marcas de lavadoras de ropa de agitador que tienen entre sí diferencias de construcción importantes. Sin embargo, la mayoría de las lavadoras funcionan bajo el mismo principio y emplean componentes que en muchos aspectos son similares. Dentro de esta amplia variedad, los mecanismos de accionamiento más empleados son los de cuatro barras articuladas RRRR.

El objeto de cada uno de estos mecanismos es el transformar el movimiento de rotación del motor a un movimiento oscilatorio del agitador, el cual crea turbulencia en la tina de lavado y transmite la fuerza requerida para la extracción de la mugre.

Las lavadoras de ropa de uso doméstico presentan dificultades por parte de los consumidores, dentro de éstas se encuentran las causas de descompostura debido a defectos de fabricación. Los componentes que son objeto de reparación o sustitución con mayor frecuencia son: los engranes, la transmisión y el agitador.

Los fabricantes coinciden en que la falla de los engranes es debida al mal diseño de los mismos y a la mala calidad del material [2]. La descompostura de la transmisión puede ser debida a la mala calidad del buje del sinfín, al mal uso que le da el usuario o al desgaste natural. En cuanto al agitador las averías son causadas por el mal uso y al desgaste natural [2].

El objeto que se persigue es realizar el análisis cinemático y dinámico de un mecanismo accionador de una lavadora de ropa de agitador para realizar el rediseño o modificaciones adecuadas de los elementos que constituyen dicho mecanismo.

## DESARROLLO

En la fig. 1 se muestra uno de los mecanismos de accionamiento más comunmente empleado en lavadoras de ropa de agitador. La lavadora opera con un motor de 1/4 Hp con velocidad de 1250 rpm que transmite energía a través de un conjunto de poleas y un piñon helicoidal, elementos que no se ilustran en la figura. El piñon helicoidal se acopla al engrane de entrada y posee una velocidad de 29 rpm y un par de 65 N-m, calculadas de acuerdo a las reducciones existentes en la lavadora que se analiza. En este elemento no se representan los dientes por simplicidad del modelo y no afecta considerablemente las propiedades geométricas del elemento, así mismo no intervienen para el análisis del mecanismo RRRR. Este elemento esta conectado al sector de engrane de dientes internos mediante una barra acopladora. El sector de engrane tiene un movimiento oscilatorio ocasionado por el engrane de entrada y la barra acopladora. De nuevo no se representan los dientes del sector por lo mencionado anteriormente. El movimiento oscilatorio es transmitido a la flecha del agitador mediante un piñon que se acopla al sector de engrane.

Se definió la geometría de los componentes de este mecanismo combinando las diversas técnicas existentes de modelado de sólidos, para este fin se realizó el barrido rotacional y de desplazamiento así como la creación de primitivos, también se emplearon operaciones booleanas como unión y corte [3].

El engrane de entrada fue modelado en dos partes, se construyo el perfil del alma del engrane en el plano XY y se utilizo el barrido de desplazamiento para generar un cuerpo que representa el alma, posteriormente se creo un primitivo "tubo", el cual representa la sección donde se encuentran colocados los dientes del engrane, una vez colocados en la posición adecuada cada uno de estos cuerpos se ensamblaron mediante la operación booleana unión, quedando definido el engrane de entrada. Sobre este cuerpo se pueden cortar los dientes del engrane, generando un cuerpo que se utilice como herramienta de corte, pero por lo ya

19

12

20

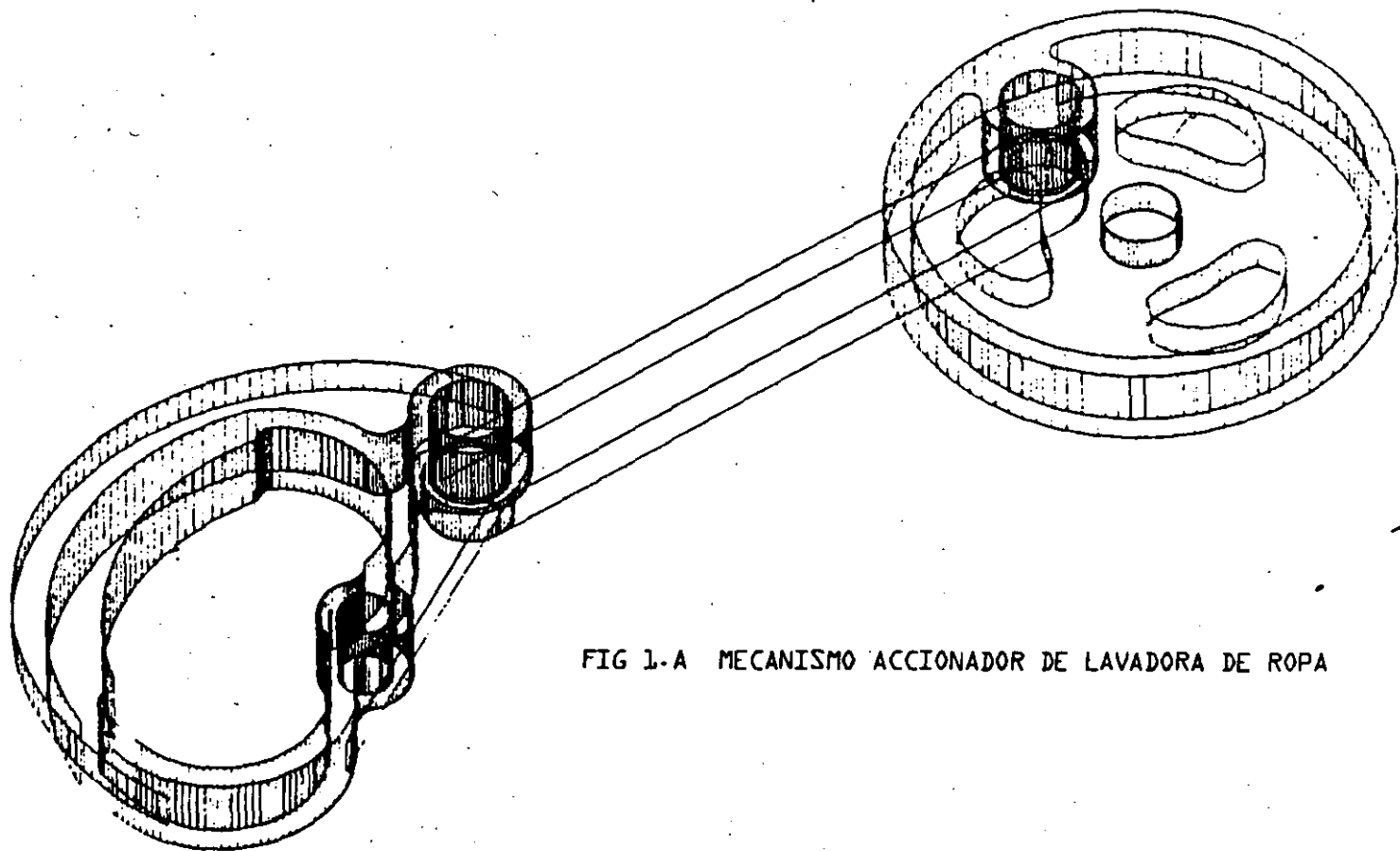


FIG 1-A MECANISMO ACCIONADOR DE LAVADORA DE ROPA

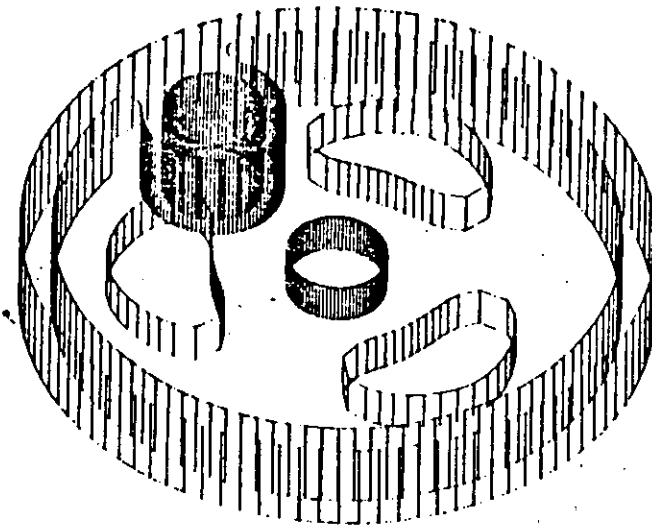


FIG 1-B ENGRANE DE ENTRADA DEL MECANISMO

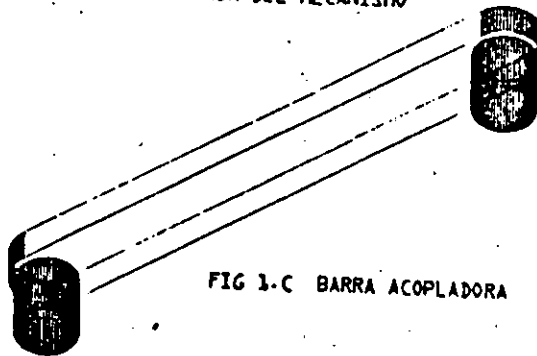


FIG 1-C BARRA ACOPLADORA

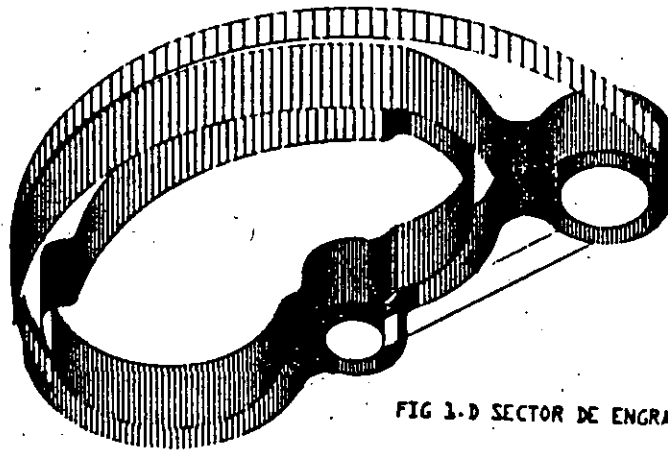


FIG 1-D SECTOR DE ENGRANE

21

mencionado anteriormente no se generaron.

La barra acopladora se generó mediante la creación de dos cilindros que representan los pernos de conexión y para el cuerpo de la barra se definió un perfil en el plano XY que fue extruido mediante el barrido de desplazamiento, posteriormente los tres cuerpos fueron ensamblados para formar completamente la barra acopladora.

En el caso del sector de engrane se definieron tres perfiles de extrusión debido a las diferencias de espesor en el cuerpo, como se puede observar en la figura 1. Estos perfiles al ser extruidos fueron unidos para conformar el sector de engrane.

También se definió un cuerpo llamado barra fija el cual solo sirve como un elemento de referencia representando la estructura sobre el cual está montado el mecanismo. Este fue generado mediante la unión de dos cilindros y un primitivo "cubo".

Una vez generados todos los elementos que componen el mecanismo se utilizó la familia de ensamblado de sistemas para acoplarlos y en esta forma simular el movimiento de cada uno de los cuerpos. Este movimiento se simula mediante el almacenamiento de varias configuraciones que puede tomar el mecanismo, formando así una secuencia que puede ser animada.

La representación en diagramas cinemáticos de este mecanismo se ilustra en la fig. 2. Siendo la barra r2 la representación del engrane de entrada, la barra r3 representa la barra acopladora y la barra r4 el sector de engrane de dientes internos.

En la fig. 3 se muestra el mecanismo en diferentes posiciones. Esta representación se obtiene de la misma manera como se hizo para los elementos sólidos que constituyen el mecanismo.

En la tabla I se dan las propiedades geométricas que se requieren de cada uno de los elementos que constituyen el mecanismo para poder realizar el análisis cinemático y dinámico. Todas las propiedades se obtuvieron mediante el sistema CAD empleado.

22

$R4 = 7 \text{ cms}$   
 $R3 = 16.17 \text{ cms}$   
 $R2 = 3.905 \text{ cms}$   
 $R1 = 17.5 \text{ cms}$

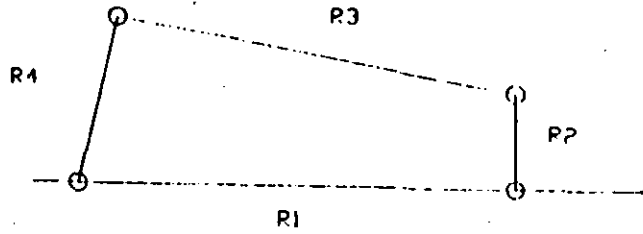


FIG. 2. DIAGRAMA DE ALAMBRE DEL MECANISMO

$R4 = 7 \text{ cms}$   
 $R3 = 16.17 \text{ cms}$   
 $R2 = 3.905 \text{ cms}$   
 $R1 = 17.5 \text{ cms}$

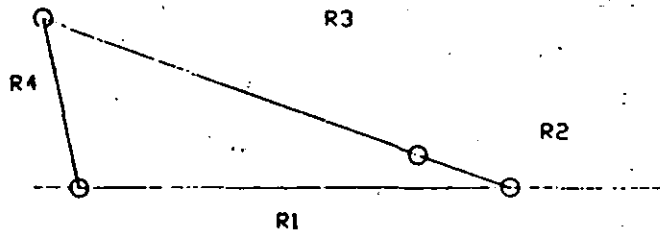


Fig. 3. PRIMERA POSICION EXTREMA

$4 = 7 \text{ cms}$   
 $3 = 16.17 \text{ cms}$   
 $2 = 3.905 \text{ cms}$   
 $1 = 17.5 \text{ cms}$

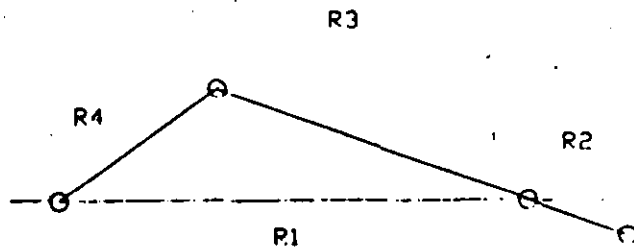


Fig. 4. SEGUNDA POSICION EXTREMA

23

13

TABLA I

ELEMENTO	MASA (Kg)	MOMENTO DE INERCIA (m <sup>4</sup> )	DISTANCIA AL CENTRO DE GRAVEDAD (m)
Engrane de entrada	1.2926	0.0031461	0.0
Barra acopladora	0.4636	0.0017689	0.0748775
Sector de engrane	0.8574	0.0021559	0.08088

El análisis cinemático comprende la obtención de la posición, la velocidad y la aceleración angular y lineal de cada uno de los elementos en todo el ciclo de trabajo.

Las propiedades físicas del i-ésimo elemento están especificadas por la masa  $m_i$  y el momento de inercia  $I_i$ . La posición, velocidad y aceleración angulares son especificados por  $\theta_i$ ,  $\omega_i$  y  $\alpha_i$ .

En el mecanismo de la figura 2 se puede establecer la ecuación de cierre de posición:

$$r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3} = r_1 + r_4 e^{i\theta_4} \quad (1)$$

De la ecuación de posición se puede obtener la ecuación Freudenstein [2]:

$$k_1 - k_2 \cos\theta_4 + k_3 \cos\theta_2 + \cos(\theta_4 - \theta_2) = 0 \quad (2)$$

donde:

$$k_1 = \frac{r_3^2 - r_1^2 - r_2^2 - r_4^2}{2 r_2 r_4}, \quad k_2 = \frac{r_1}{r_2}, \quad k_3 = \frac{r_1}{r_4}$$

La ecuación (2) se puede transformar en [4]:

$$A \tan^2(\theta_4/2) + B \tan(\theta_4/2) + C = 0 \quad (3)$$

donde:

24



$$A = k_1 + k_2 - (1 - k_3) \cos \theta_2$$

$$B = 2 \sin \theta_2$$

$$C = k_1 - k_2 + (1 + k_3) \cos \theta_2$$

Así la ec. (3) es cuadrática en  $\tan(\theta_4/2)$ , y su solución es, sencillamente:

$$\tan(\theta_4/2) = \frac{-B \pm (B^2 - 4AC)^{1/2}}{2A} \quad (4)$$

De donde se obtienen dos raíces las cuales corresponden a las posiciones conjugadas del mecanismo. De acuerdo a la configuración que tenga el mecanismo se puede elegir alguna de ellas.

De la ec. (1) se pueden tomar las derivadas para determinar la velocidad y la aceleración, teniendo para la velocidad:

$$r_2 \omega_2 (i e^{i\theta_2}) + r_3 \omega_3 (i e^{i\theta_3}) = r_4 \omega_4 (i e^{i\theta_4}) \quad (5)$$

y para la aceleración:

$$r_2 (\alpha_2 - \omega_2^2) e^{i\theta_2} + r_3 (\alpha_3 - \omega_3^2) e^{i\theta_3} = r_4 (\alpha_4 - \omega_4^2) e^{i\theta_4} \quad (6)$$

De las ecuaciones (5) y (6) se obtiene un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas, siendo las expresiones que las definen [5] :

$$\omega_3 = \omega_2 \frac{r_2 \sin(\theta_4 - \theta_2)}{r_3 \sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad (7)$$

$$\omega_4 = \omega_2 \frac{r_2 \sin(\theta_3 - \theta_2)}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad (8)$$

$$\alpha_3 = \frac{(-r_2 \alpha_2 \sin(\theta_4 - \theta_2) + r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_4 - \theta_2) + r_3 \omega_3^2 \cos(\theta_4 - \theta_3) - r_4 \omega_4^2)}{r_3 \sin(\theta_4 - \theta_3)} \quad (9)$$

$$\alpha_4 = \frac{\{r_2 \alpha_2 \sin(\theta_3 - \theta_2) - r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_3 - \theta_2) + r_4 \omega_4^2 \cos(\theta_3 - \theta_4) - r_3 \omega_3^2\}}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad (10)$$

La aceleración lineal de los centros de gravedad se obtienen de las siguientes expresiones:

$$g_2 = q_2 \alpha_2 e^{i(\theta_2 + \phi_2 + \pi/2)} - q_2 \omega_2^2 e^{i(\theta_2 + \phi_2)} \quad (11)$$

$$g_3 = r_2 \alpha_2 e^{i(\theta_2 + \pi/2)} - r_2 \omega_2^2 e^{i\theta_2} + q_3 \alpha_3 e^{i(\theta_3 + \phi_3 + \pi/2)} - q_3 \omega_3^2 e^{i(\theta_3 + \phi_3)} \quad (12)$$

$$g_4 = q_4 \alpha_4 e^{i(\theta_4 + \phi_4 + \pi/2)} - q_4 \omega_4^2 e^{i(\theta_4 - \phi_4)} \quad (13)$$

De esta manera el análisis cinemático queda concluido.

El análisis dinámico comprende la obtención de las fuerzas en cada articulación  $f_i$  y el par de salida  $T_4$ .

El sistema de fuerzas en las uniones es el resultado de la combinación de efectos de las cargas estimadas que actúan sobre el mecanismo y las fuerzas dinámicas inducidas por la aceleración de las barras.

Las ecuaciones del movimiento para el  $i$ -ésimo miembro pueden ser escritas de la siguiente forma [7]:

$$f_i - f_{i-1} + \Sigma F_i = m_i g_i \quad (14)$$

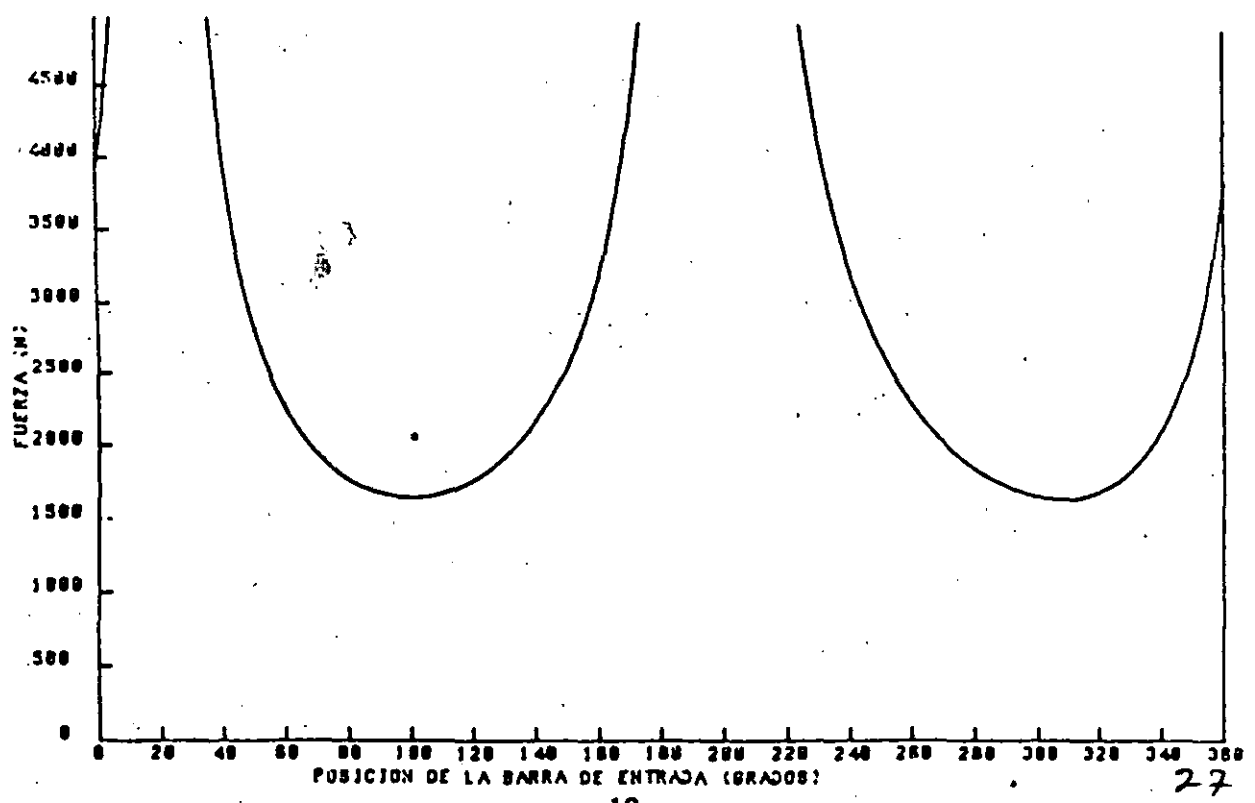
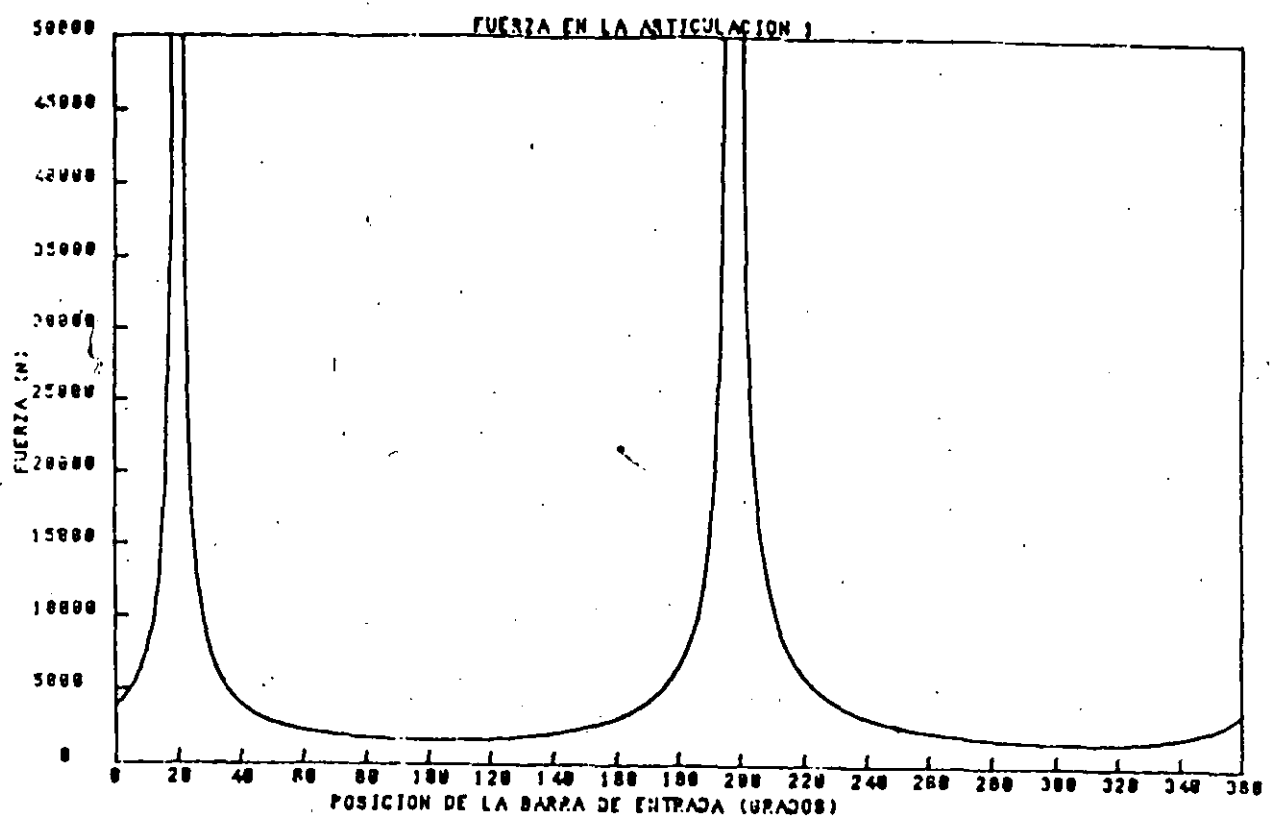
$$(p_i \times f_i) - (q_i \times f_{i-1}) + (d_i \times \Sigma F_i) + \Sigma T_i = I_i \alpha_i \quad (15)$$

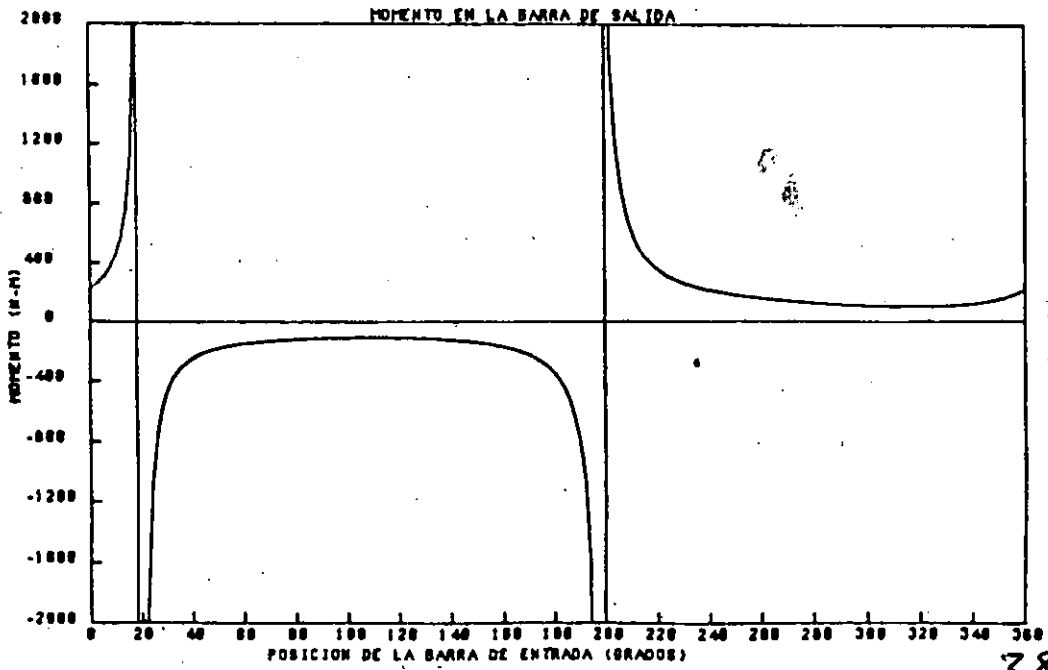
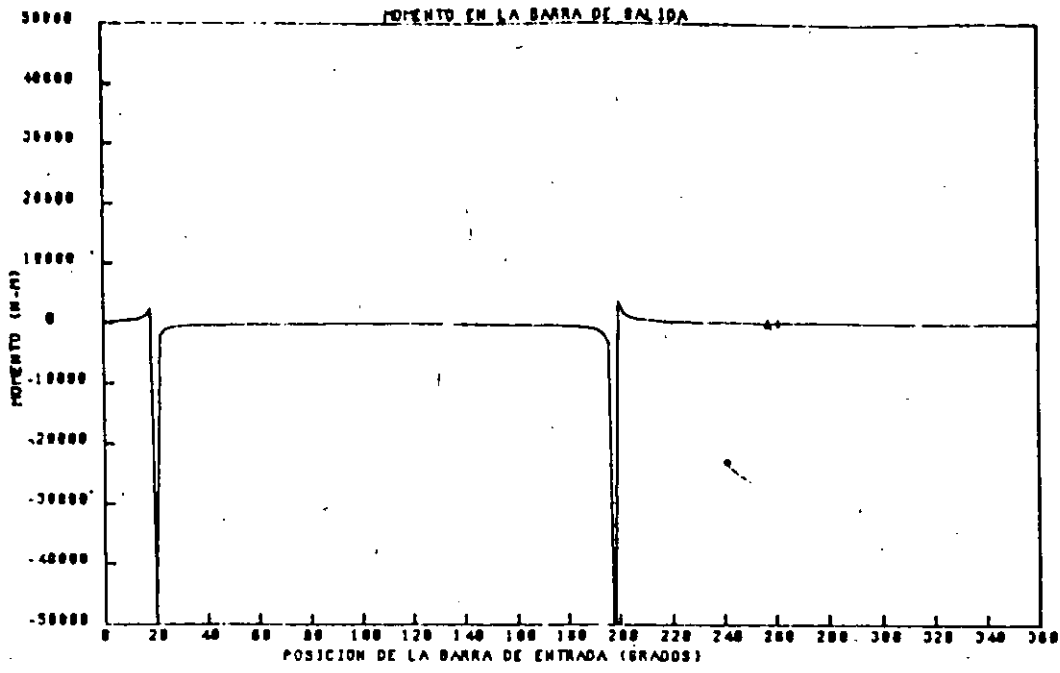
donde:

$p_i$  : Es el vector del centro de gravedad de la  $i$ -ésima barra a la articulación  $i$ .

$q_i$  : Es el vector del centro de gravedad de la  $i$ -ésima barra a la articulación  $i-1$ .

$d_i$  : Es el vector del centro de gravedad  $i$  a el punto de aplicación a la resultante de fuerzas externas  $\Sigma F_i$ .





28

$\sum F_i$ : Es la suma de todas las fuerzas actuando en la barra  $i$  diferentes de las fuerzas en las uniones  $f_i$  y  $f_{i-1}$ .

$\sum T_i$ : Es la suma de todos los pares actuando sobre la  $i$ -ésima barra.

Las ecuaciones (14) y (15) se pueden arreglar en forma matricial, para el caso que se analiza no existen fuerzas ni pares externos en las barras, solamente existe el par de entrada y el par de salida, el arreglo queda en la siguiente forma:

$$\begin{array}{cccccccc|ccc}
 -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{1x} & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{1y} & 0 \\
 q_{2y} & -q_{2x} & -p_{2y} & p_{2x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{2x} & -T_2 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{2y} & m_3 g_{3x} \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & f_{3x} & m_3 g_{3y} \\
 0 & 0 & q_{3y} & -q_{3x} & -p_{3y} & p_{3x} & 0 & 0 & 0 & f_{3y} & I_3 \alpha_3 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & f_{4x} & m_4 g_{4x} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & f_{4y} & m_4 g_{4y} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & q_{4y} & -q_{4x} & -p_{4y} & p_{4x} & 1 & T & I_4 \alpha_4
 \end{array}$$

donde:

$$p_2 = (a - c_2) \quad p_3 = (b - c_3) \quad p_4 = (b_0 - c_4)$$

$$q_2 = (a_0 - c_2) \quad q_3 = (a - c_3) \quad q_4 = (b - c_4)$$

Note que la parte izquierda de la matriz describe la geometría instantánea del mecanismo. El vector columna del lado derecho contiene los términos dinámicos. Las fuerzas y pares desconocidos forman el vector fuerza.

Al realizarse el análisis cinemático y dinámico se obtienen las gráficas (1) y (2), en las cuales se ilustra la fuerza en la articulación 1 y el par de salida.

### CONCLUSIONES

Las gráficas de las fuerzas en las articulaciones del

mecanismo son iguales. Esto es debido a la baja velocidad angular que se tiene en el engrane de entrada. Por lo tanto, otra alternativa de análisis en este caso puede ser el análisis estático.

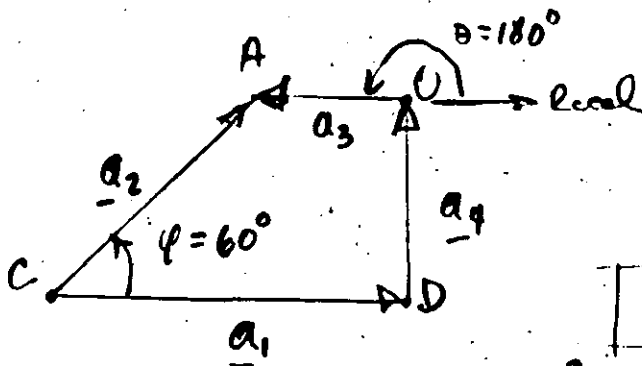
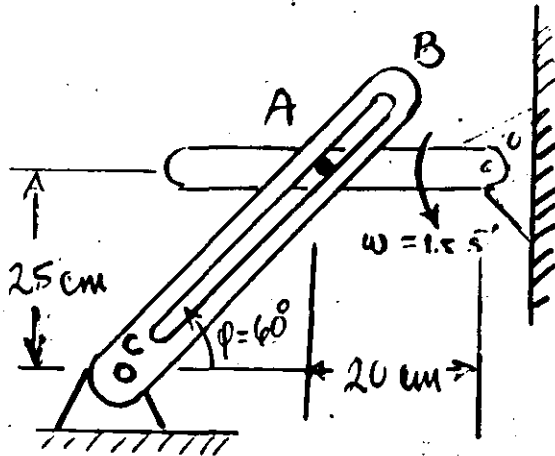
La gráfica del momento de salida presenta un valor muy bajo, excepto en las posiciones extremas, donde se pueden apreciar las discontinuidades en  $20^\circ$  y  $200^\circ$  de la posición de la barra de entrada, por esta razón el material del sector de engrane debe soportar cargas de impacto.

El engrane de entrada soporta cargas pequeñas en sus dientes, por lo cual, puede ser fabricado de material plástico.

#### Bibliografía:

1. Crawford R, Charlesworth W, Bailey M, "The Design, Analysis and Display of Three Dimensional Mechanism Using a CAD Executive", Mechanism and Machine Theory, vol 20, N°-4, pp 251-256, 1985.
2. INCO, Estudio de Reclamaciones contra Proveedores de Artículos Electricos y Electronicos-Lavadoras (parte II), 1979 Dic/043/14 - 886/43/01, Instituto Nacional del Consumidor.
3. Angeles J. Análisis y Síntesis Cinemáticos de Sistemas Mecánicos Limusa, S.A, México, 1978.
4. I-deas, Geomod User's Guide, Structural Dynamics Research corp. 1986.
5. Angeles J. y Callejas M., "Software para el análisis digital de sistemas mecánicos", Memoria del VII Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C. Oaxaca, Oax. 1981 pag 316 - 320.
6. Mabie H y Ocvirk F, Mecanismos y Dinámica de Maquinaria Limusa S.A. México, 1978

In la figura se esquematiza la sección de una máquina. El perno A del eslabón articulado AO está confinado a moverse en la ranura del eslabón BC, el eslabón AO gira a razón constante de 1.5 rad/s cuando  $\theta = 60^\circ$ . Determine la velocidad y aceleración angular de la barra ranurada BC.



$$|a_3| = |OA| = 20 \text{ cm}$$

$$|a_2| = |CA| = 28.8675$$

$$|a_4| = |DB| = 25 \text{ cm}$$

Polígono vectorial

$$|a_1 + a_4 + a_3 = a_2|$$

cuya representación compleja es

$$a_1 e^{i0} + a_4 e^{i\pi/2} + a_3 e^{i\pi} = a_2 e^{i\varphi}$$

o bien  $|a_1 + ia_4 + a_3 e^{i\pi} = a_2 e^{i\varphi}|$  — (1) posición

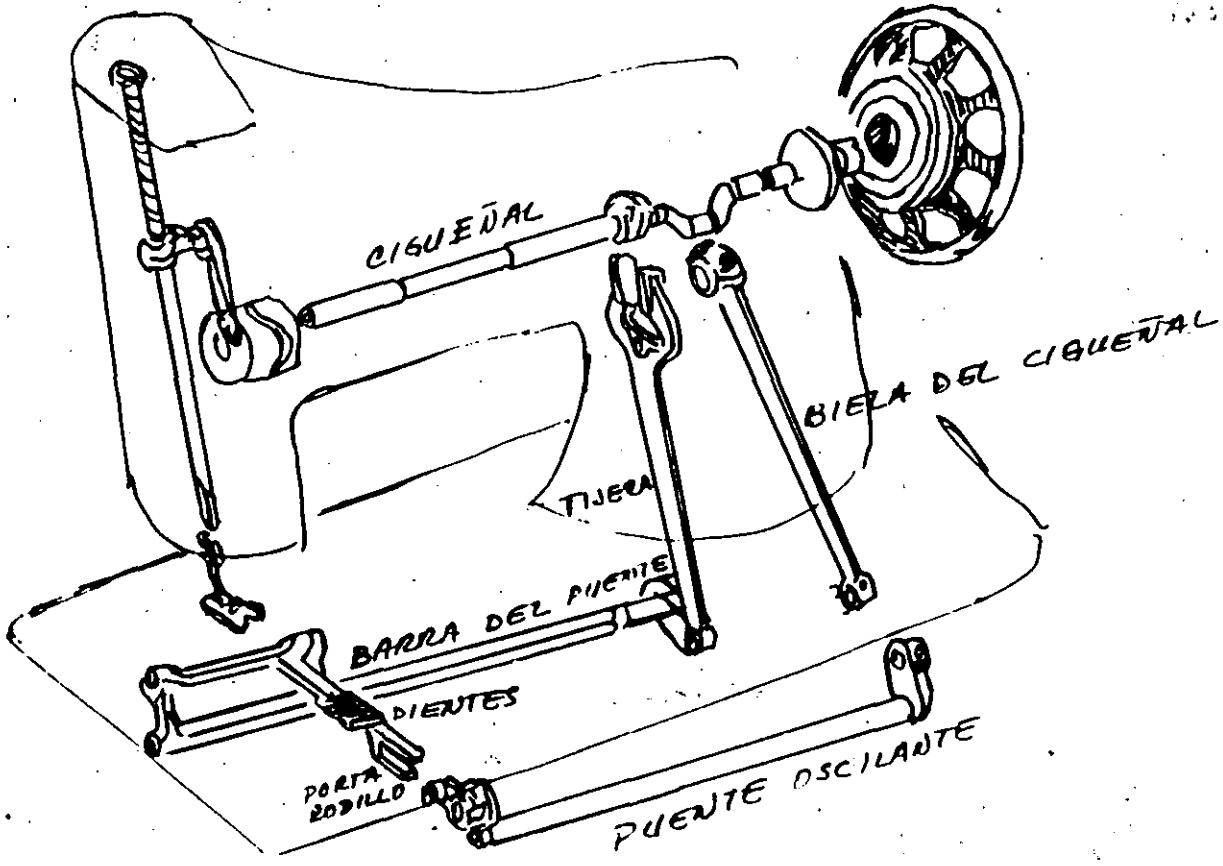
Derivando con respecto al tiempo

$$|a_3 \dot{\theta} e^{i\theta} = \dot{a}_2 e^{i\varphi} + \dot{\varphi} a_2 i e^{i\varphi}| \quad \text{--- (2)}$$

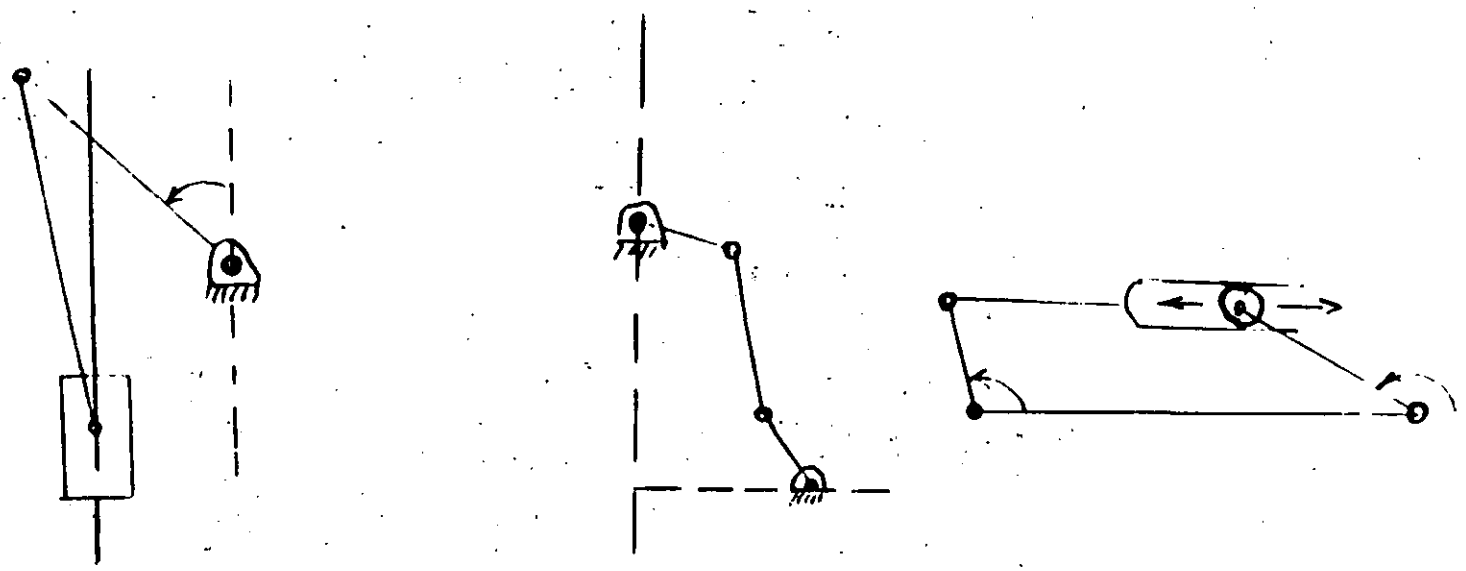
Derivando nuevamente para obtener la aceleración

$$ia_3 \ddot{\theta} e^{i\theta} + i^2 a_3 \dot{\theta}^2 e^{i\theta} = \ddot{a}_2 e^{i\varphi} + i\dot{\varphi} \dot{a}_2 e^{i\varphi} + i\dot{\varphi} \dot{a}_2 e^{i\varphi} + ia_2 \ddot{\varphi} e^{i\varphi} + (i^2 a_2 \dot{\varphi}^2) e^{i\varphi}$$

$$|i(a_3 \ddot{\theta} e^{i\theta}) - a_3 \dot{\theta}^2 e^{i\theta} = (\ddot{a}_2 - a_2 \dot{\varphi}^2) e^{i\varphi} + i(2\dot{\varphi} \dot{a}_2 + a_2 \ddot{\varphi}) e^{i\varphi}|$$



MECANISMOS QUE SE OBSERVAN





## Diseño de un tacómetro

El mecanismo de la figura sirve para estimar la velocidad angular  $\dot{\phi}$  de la flecha  $F$  alrededor del eje  $EE'$ . Consiste de un regulador de watt  $ABC$  que está formado por dos eslabones rígidos de longitud  $a$  acoplados, uno en  $A$  a  $F$ , y en  $B$  a la esfera de masa  $m$  y el otro, en  $B$  a la propia esfera y en  $C$  a un collarín  $D$  que desliza a lo largo del eje  $EE'$ . El collarín a su vez está acoplado a la chumacera  $Q$  por medio de un par de revoluciones de eje  $EE'$ ; es decir,  $C$  gira con  $F$  alrededor de  $EE'$  con respecto a  $Q$ , a quien arrastra en un movimiento de traslación a lo largo de  $EE'$ , pero no en el de rotación. El movimiento de traslación de  $Q$  a lo largo de  $EE'$  es transformado por el mecanismo  $HJK$  en uno de rotación del eslabón  $HK$ , medido por el ángulo  $\phi$ , registrado en una caratula graduada en rpm como se muestra. De un análisis dinámico del regulador de watt en el que se desprecia la inercia de todos los miembros estructurados, excepto la de la esfera de masa  $m$ , se obtiene la siguiente relación:

$$\theta = \text{ang} \cos \frac{g}{\dot{\phi}^2 a}$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. Si la velocidad nominal  $\dot{\phi}$  es de 150 rpm con variaciones máximas de  $\pm 20\%$ , y se desea tener una lectura precisa en la caratula dentro de este intervalo, se requiere dimensionar el mecanismo  $HJK$  de manera tal que en el intervalo mencionado  $\phi$  varíe linealmente con  $\dot{\phi}$ . De usted las dimensiones  $b$ ,  $c$  y  $d$  del mecanismo en cuestión. Datos:  $e = 40$  cm.

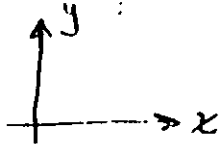
$$f = 5$$
 cm.

$$a = 15$$
 cm.

Trabajo virtual

$$\sum \underline{F}_i \cdot \delta \underline{r}_i = m \underline{a} \cdot \delta \underline{r}$$

$$F_j^y \cdot \delta y_j = F_j^x \cdot \delta x_i$$



$$F^y = -mg$$

$$F^x = mp^2 a \sin \theta$$

$$x = a \sin \theta$$

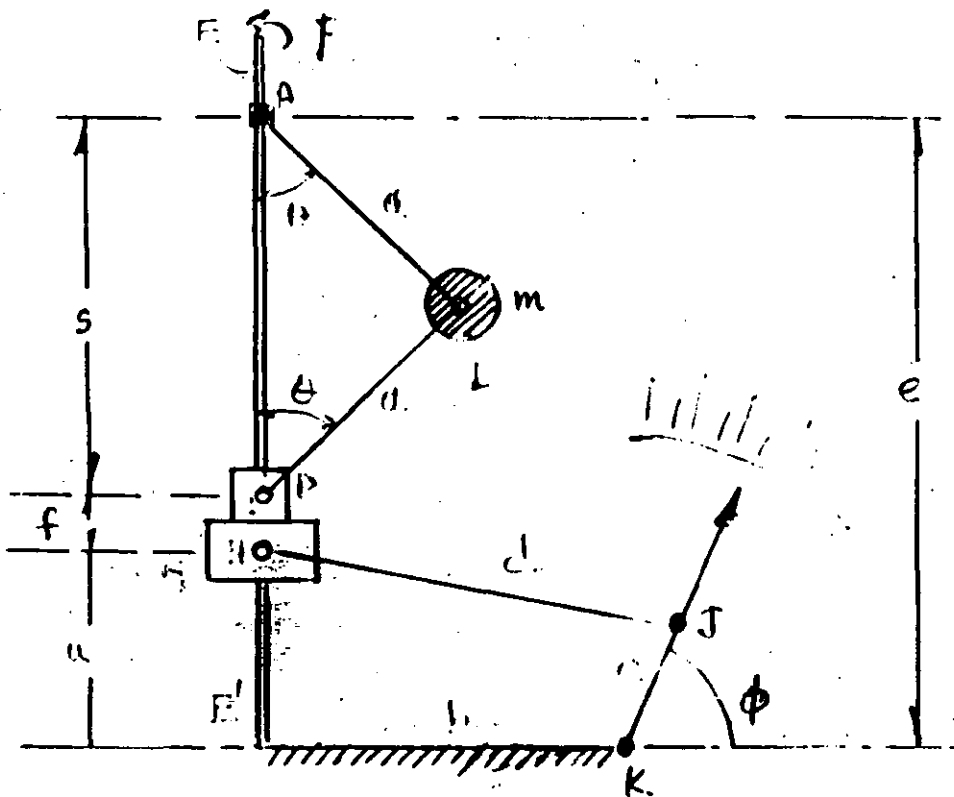
$$\delta x = a \cos \theta \delta \theta$$

$$y = a \cos \theta$$

$$\delta y = -a \sin \theta \delta \theta$$

$$+mg(a \sin \theta \delta \theta) = mp^2 a \sin \theta (a \cos \theta \delta \theta)$$

$$\frac{g}{ap^2} = \cos \theta$$



simplificando la expresión anterior

$$b^2 + a^2 - c^2 + s^2 + 2abc \cos \theta_2 + 2bs \operatorname{sen} \theta_2 = 0$$

haciendo  $k_1 = 2b$   
 $k_2 = 2ab \Rightarrow k_2 = k_1 a$   
 $k_3 = b^2 + a^2 - c^2$

el sistema queda finalmente

$$\boxed{S^2 + k_1 s \operatorname{sen} \theta_2 + k_2 \cos \theta_2 + k_3 = 0} \quad (a)$$

Tomando los siguientes datos de la maquina Liberty

$$\theta_2 = 90^\circ \quad S = 3.0 \text{ cm.}$$

$$\theta_2 = 210^\circ \quad S = 5.1 \text{ cm.}$$

$$\theta_2 = 270^\circ \quad S = 6.2 \text{ cm.}$$

Haciendo las sustituciones correspondientes en la ec (a)

$$9 + 3k_1 + 0 + k_3 = 0$$

$$26.01 - 2.55k_1 - 0.866k_2 + k_3 = 0$$

$$38.44 - 6.2k_1 + 0 + k_3 = 0$$

En forma matricial el sistema queda

$$\begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ -2.55 & -0.866 & 1 \\ -6.2 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -9 \\ -26.01 \\ -38.44 \end{bmatrix}$$

$$k_1 = 3.2$$

$$k_2 = -0.866$$

$$k_3 = -18.6$$

$$b = 3.2/2 = 1.6$$

$$a = -0.866/3.2 = -0.2706 \text{ cm.}$$

$$-18.6 - (1.6)^2 - (0.2706)^2 = -c^2 \quad \underline{c = 4.608 \text{ cm.}}$$

MOVIMIENTO DE LA AGUJA

Movimiento cigueñal - barra con aguja

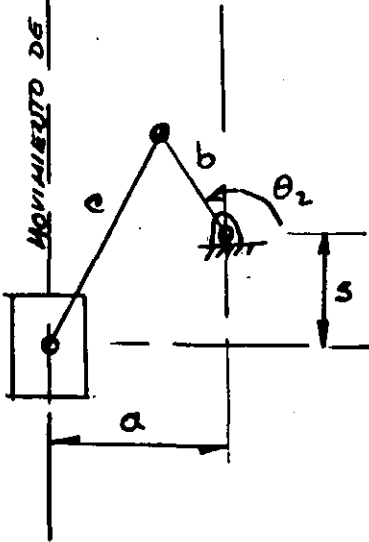
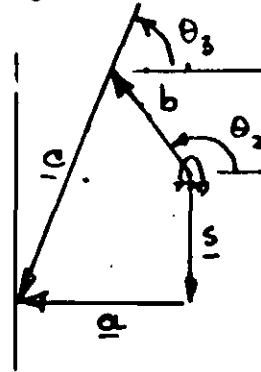
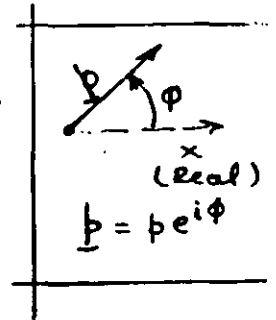


Diagrama cinemático



poligono vectorial

$$\underline{b} + \underline{c} = \underline{s} + \underline{a}$$



Empleando complejos

$$b e^{i\theta_2} + c e^{i(\theta_3 + \pi)} = s e^{3\pi/2} + a e^{i\pi}$$

o bien

$$b(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2) + c[\cos(\theta_3 + \pi) + i\sin(\theta_3 + \pi)] = -is - a$$

$$\text{Real)} \quad b\cos\theta_2 + c\cos(\theta_3 + \pi) = -a$$

$$\text{Imag)} \quad b\sin\theta_2 + c\sin(\theta_3 + \pi) = -s$$

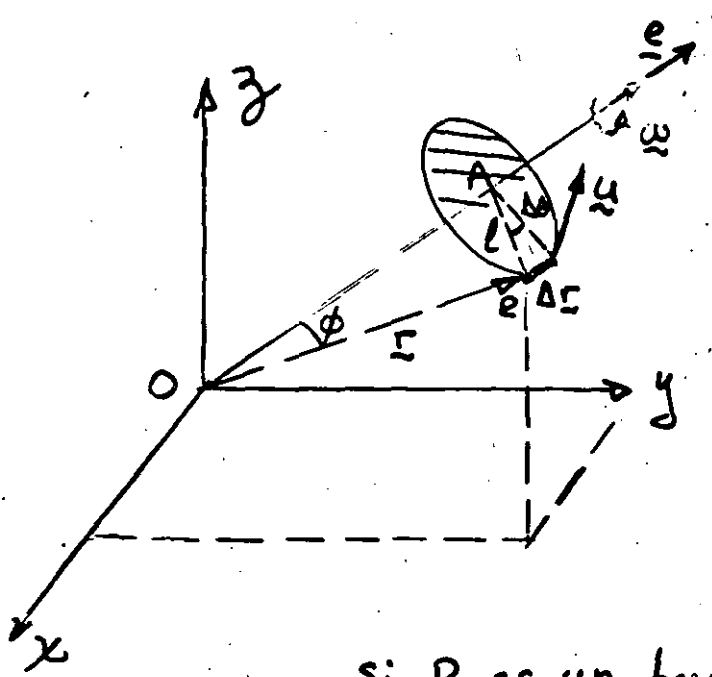
Elevando al cuadrado las expresiones anteriores en la siguiente forma

$$(b\cos\theta_2 + a)^2 = [c\cos(\theta_3 + \pi)]^2$$

$$(b\sin\theta_2 + s)^2 = [c\sin(\theta_3 + \pi)]^2$$

Sumando las cantidades anteriores

$$b^2\cos^2\theta_2 + 2abc\cos\theta_2 + a^2 + b^2\sin^2\theta_2 + 2bs\sin\theta_2 + s^2 = c^2$$



26

$\underline{u}$  y  $\underline{e}$  son vectores unitarios

$$\underline{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} \underline{e} = \dot{\theta} \underline{e}$$

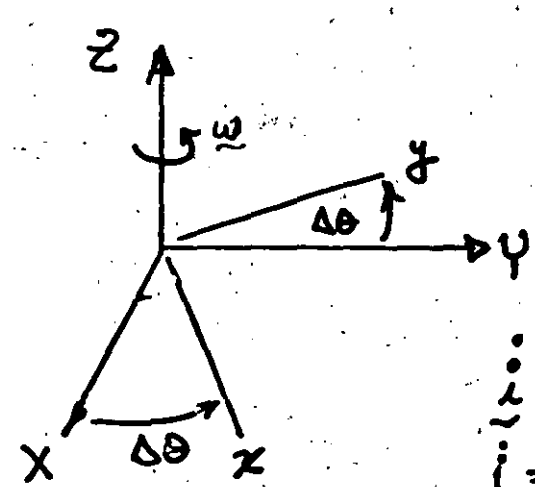
si  $P$  es un punto del cuerpo rígido

$$\dot{\underline{r}} = \underline{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{l \Delta \theta}{\Delta t} \underline{u} = l \dot{\theta} \underline{u}$$

pero  $l = r \sin \phi$

$$\dot{\underline{r}} = r \sin \phi \dot{\theta} \underline{u} = |\underline{r}| |\underline{\omega}| \sin \phi \underline{u}$$

$$\dot{\underline{r}} = \underline{\omega} \times \underline{r}$$



$$\dot{i} = \underline{\omega} \times \underline{i}$$

$$\dot{j} = \underline{\omega} \times \underline{j}$$

# Diseño de un Tacómetro

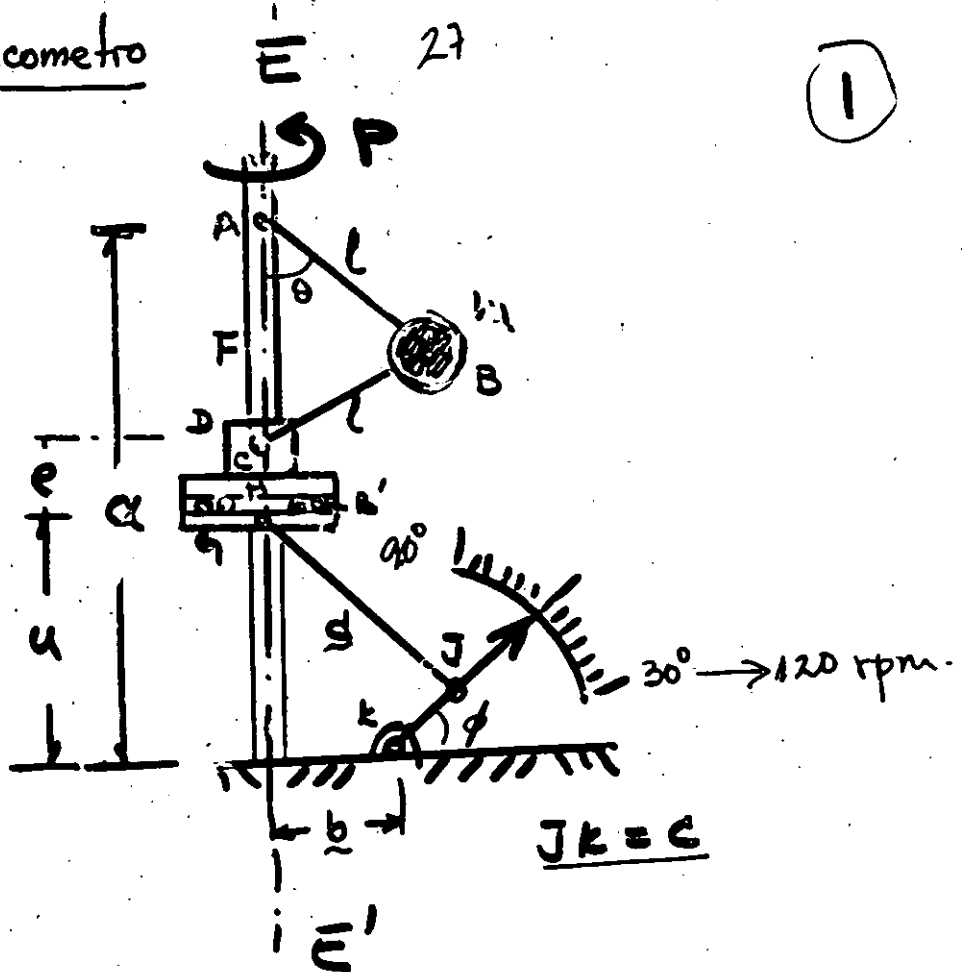
E 27

(1)

$$\theta = \cos^{-1} \frac{g}{f \cdot l}$$

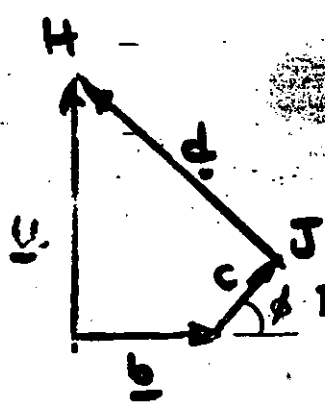
$p = 150 \text{ rpm}$   
 $\pm 20\%$

$d = 40 \text{ cm}$   
 $e = 5 \text{ cm}$   
 $l = 15 \text{ cm}$



El modelo cinemático del mecanismo que se desea diseñar es el siguiente

$$\begin{aligned} \underline{d} &= d e^{i\theta} \\ \underline{u} &= u e^{i\pi/2} \\ \underline{c} &= c e^{i\phi} \\ \underline{b} &= b e^{i0} \end{aligned}$$

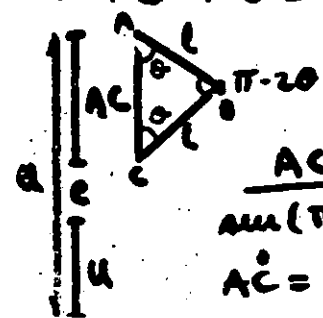


$$\underline{d} = \underline{u} - \underline{c} - \underline{b}$$

$$d^2 = u^2 + c^2 + b^2 - 2uc \cos(\pi/2 - \phi) - 2ub \cos \pi/2 + 2bc \cos \phi$$

$$R(\phi, u) = d^2 = u^2 + c^2 + b^2 - 2uc \sin \phi + 2bc \cos \phi$$

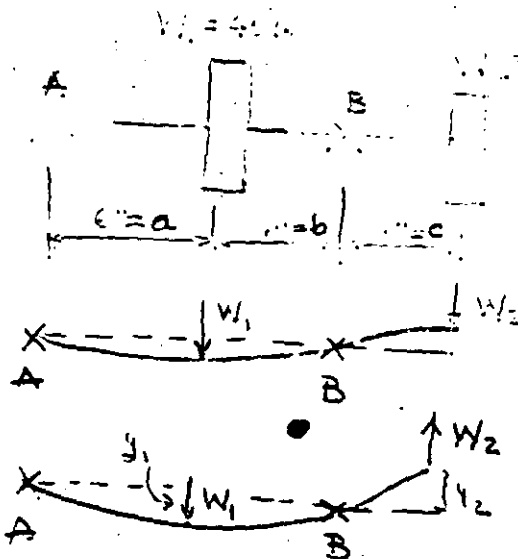
$$\begin{aligned} u &= a - (e + Ac) \\ u &= 40 - (5 + Ac) \\ &= 35 - Ac \end{aligned}$$



$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

$$\frac{AC}{\sin(\pi - 2\theta)} = \frac{l}{\sin \theta}$$

$$Ac = \frac{l \sin 2\theta}{\sin \theta} = 2l \cos \theta$$



$d = 10''$  (long. entre apoyos)  
 $L = 13''$  (longitud total)

Principio de superposición

$$y_1 = \frac{W_1 b a}{6 d E I} (d^2 - b^2 - a^2) = \frac{40(4)6}{60 E I} (100 - 16 - 36) = \frac{768}{E I} \downarrow$$

sea  $\theta_B$  la inclinación de la curva en B

$$y_2 = c \operatorname{sen} \theta_B \approx c \theta_B = \frac{c W_1 a b (d + a)}{6 d E I} = \frac{3(40)6(4)16}{60 E I} = \frac{768}{E I} \uparrow$$

Para la carga  $W_2$  actuando sola sobre la flecha

$$y_1 = \frac{W_2 c a}{6 d E I} (a^2 - d^2) = \frac{20(3)6}{60 E I} (36 - 100) = \frac{384}{E I} \downarrow$$

$$y_2 = \frac{W_2 c^2 L}{3 E I} = \frac{20(9)13}{3 E I} = \frac{780}{E I} \uparrow$$

Por el principio de superposición

$$y_1 = \frac{768}{E I} + \frac{384}{E I} = \frac{1152}{E I} \downarrow$$

$$y_1^2 = \frac{1.33 \times 10^6}{(E I)^2}$$

$$y_2 = \frac{768}{E I} + \frac{780}{E I} = \frac{1548}{E I} \uparrow$$

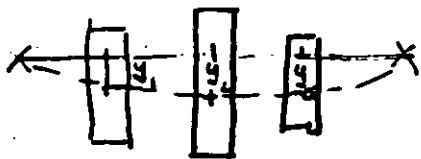
$$y_2^2 = \frac{2.40 \times 10^6}{(E I)^2}$$

$$\omega^2 = \frac{g \sum W y}{\sum W y^2} = \frac{386 E I [(40 \times 1152) + (20 \times 1548)]}{(40 \times 1.33 \times 10^6) + (20 \times 2.40 \times 10^6)} = 0.294 E I$$

$$\omega = 0.543 \sqrt{E I} = \left(\frac{60}{2.94}\right) (0.543) \sqrt{30 \times 10^6 \times \left[\frac{\pi d^4}{64}\right]} \quad d = 0.75$$

$$= 3530 \text{ rpm.}$$

El método de Rayleigh está basado en el continuo intercambio entre energía cinética y energía de deformación del sistema (dinámico y estático).



$$E.C = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \frac{\omega_n^2}{g} [W_1 y_1^2 + W_2 y_2^2 + W_3 y_3^2]$$

$$v = y \omega_n$$

Cuando se alcanza la máxima deflexión, la energía cinética es perdida y se almacena como energía de deformación.

El promedio de cada fuerza (peso) que se mueve la distancia  $y$  es  $W/2$  y el trabajo promedio es  $\frac{W y}{2}$

teniendo que la energía potencial total es

$$E.P = \frac{1}{2} (W_1 y_1 + W_2 y_2 + W_3 y_3)$$

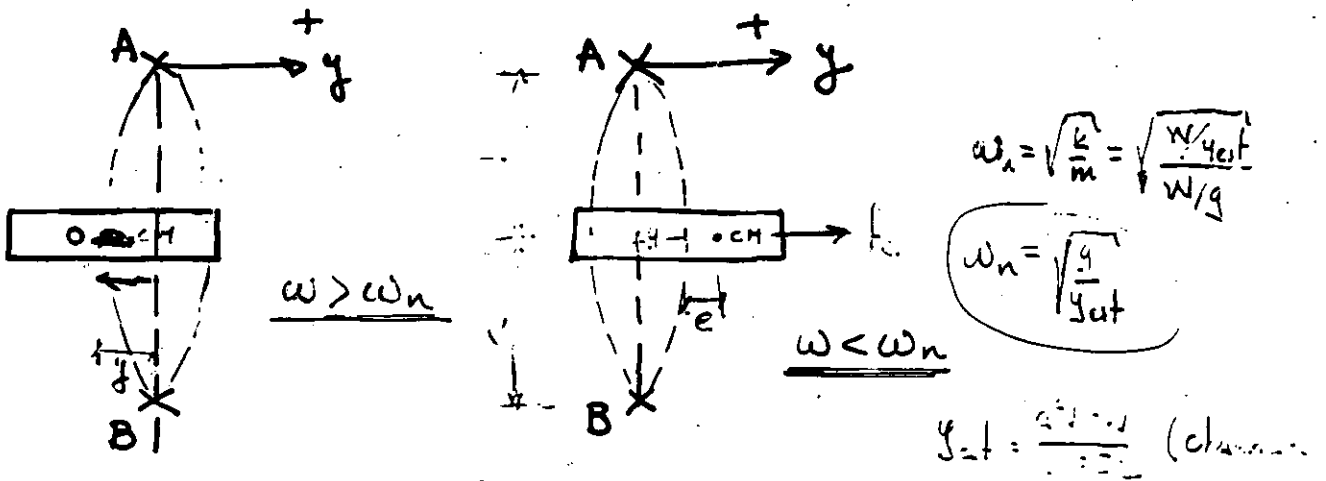
igualando las energías

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g \sum W_i y_i}{\sum W_i y_i^2}}$$

Ejemplo:

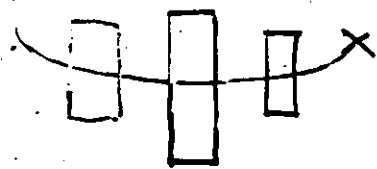
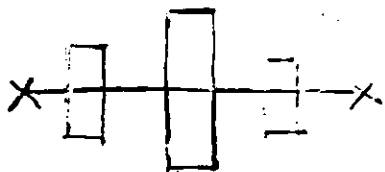
Considere la flecha mostrada en la figura, la cual es simplemente soportada en A y B y de peso despreciable comparado con los pesos  $W_1$  y  $W_2$ . La flecha es de acero y de  $3/4"$  de diámetro. Se desea encontrar la velocidad crítica por el método de Rayleigh. La deflexión estática es mostrada en la fig b y la dinámica en c.



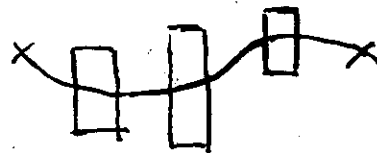


Las flechas soportadas por chumaceras se consideran simplemente apoyadas y las soportadas por cofre-tes, se consideran empotradas.

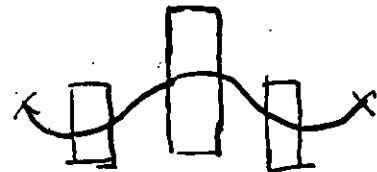
### Flechas con diferentes discos



primer modo con frecuencia  $\omega_1$

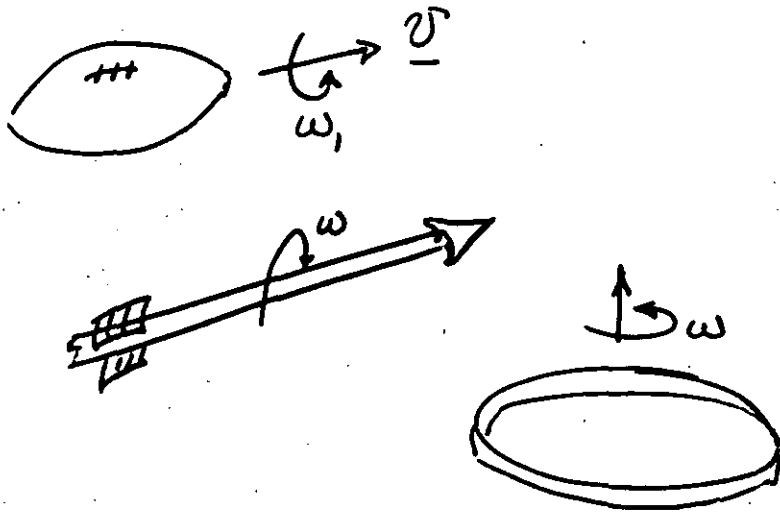


segundo modo  $\omega_2$

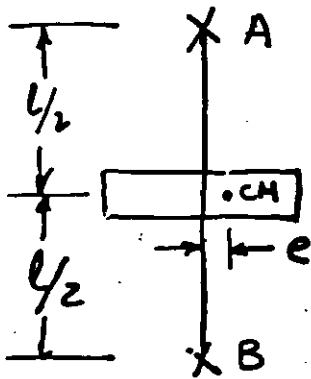


tercer modo  $\omega_3$

Ejemplos de objetos que se estabilizan al girar



Velocidad crítica en flechas



La masa de la flecha es despreciable comparada con la masa del disco

$$f_c = ma = m(y+e)\omega^2$$

fuerza centrífuga

y es la deflexión de la flecha

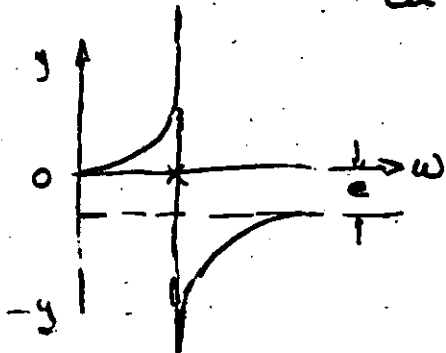
La flecha ejerce una fuerza resistente

$$F = ky = m(y+e)\omega^2$$

$$y = \frac{e\omega^2}{\frac{k}{m} - \omega^2}$$

cuando  $\omega^2 = \frac{k}{m}$  se tiene una vel. crítica

$$y = \infty$$



32

derivando (1) con respecto al tiempo

$$I_2 \ddot{e}_2 = (I_3 - I_1) \dot{e}_3 (\omega_0 + e_1) + (I_3 - I_1) e_3 (\dot{e}_1 + 0)$$

de (2)

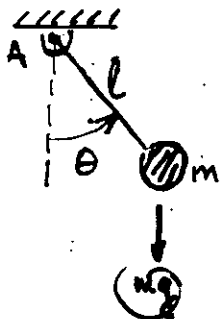
$$\dot{e}_3 = \frac{I_1 - I_2}{I_3} (\omega_0 + e_1) e_2$$

quedando

$$I_2 \ddot{e}_2 = \frac{(I_3 - I_1)(I_1 - I_2)}{I_3} (\omega_0 + e_1)^2$$

$$\ddot{e}_2 + \left[ \frac{(I_3 - I_1)(I_1 - I_2)}{I_2 I_3} \omega_0^2 \right] e_2 = 0$$

Recordando que



$$\Sigma M_A = I_A \ddot{\theta} = m l^2 \ddot{\theta}$$

$$-m g l \sin \theta = m l^2 \ddot{\theta}$$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0$$

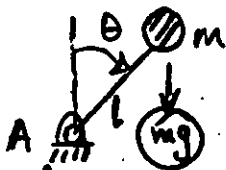
al considerar ángulos pequeños  $\sin \theta \approx \theta$

la esfera regresa a su posición de equilibrio

$$\ddot{\theta} + \omega^2 \theta = 0$$

$$\omega^2 = \frac{g}{l}$$

Por otra parte



$$\Sigma M_A = I_A \ddot{\theta} = m l^2 \ddot{\theta}$$

$$m g l \sin \theta = m l^2 \ddot{\theta}$$

$$\ddot{\theta} - \omega^2 \theta = 0$$

la esfera no regresa a su posición inicial

$$I_3 > I_2 > I_1 > 0$$

$$I_3 < I_2 < I_1 < 0$$

## Estabilidad de rotación con momento cero

Considerando un cuerpo rígido cuyas momentos de inercia principales son  $I_1, I_2, I_3$  y velocidades angulares  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  sobre cada eje principal

Las ecuaciones de Euler son:

$$\sum \underline{M} = \frac{\partial \underline{H}}{\partial t} + \underline{\omega} \times \underline{H} = 0$$

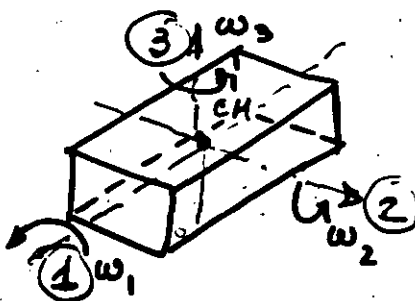
$$\underline{H} = \underline{I} \underline{\omega} = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \omega_1 \\ I_2 \omega_2 \\ I_3 \omega_3 \end{bmatrix}$$

$$\underline{\omega} \times \underline{H} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ I_1 \omega_1 & I_2 \omega_2 & I_3 \omega_3 \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3 \\ (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 \\ (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2 \end{bmatrix}$$

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3 = 0$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 = 0$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2 = 0$$



Para una rotación  $\omega_1 = \omega_0$  alrededor del eje 1, la condición sin perturbación da  $\omega_2 = \omega_3 = 0$

Si una pequeña perturbación pequeña es introducida, es decir:

$$\omega_1 = \omega_0 + e_1$$

$$\omega_2 = e_2$$

$$\omega_3 = e_3$$

$$1) I_2 \dot{e}_2 = (I_3 - I_1) e_3 (\omega_0 + e_1)$$

$$2) I_3 \dot{e}_3 = (I_1 - I_2) (\omega_0 + e_1) e_2$$

Para un cuerpo rígido

$$W = \int \Sigma \underline{F} \cdot d\underline{R} = \int \Sigma \delta m \underline{\ddot{R}} \cdot d\underline{R}$$

pero

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} M \underline{\dot{R}} \cdot \underline{\dot{R}} \right) &= \frac{1}{2} M \underline{\ddot{R}} \cdot \underline{\dot{R}} + \frac{1}{2} M \underline{\dot{R}} \cdot \underline{\ddot{R}} = M \underline{\ddot{R}} \cdot \underline{\dot{R}} \\ &= M \underline{\dot{R}} \cdot \frac{d\underline{R}}{dt} \\ d \left( \frac{1}{2} M \underline{\dot{R}} \cdot \underline{\dot{R}} \right) &= M \underline{\ddot{R}} \cdot d\underline{R} \end{aligned}$$

por lo que

$$\begin{aligned} W = \int \Sigma \delta m \underline{\ddot{R}} \cdot d\underline{R} &= \int d \left( \frac{1}{2} \Sigma \delta m \underline{\dot{R}} \cdot \underline{\dot{R}} \right) = \frac{1}{2} \Sigma \delta m \underline{\dot{R}} \cdot \underline{\dot{R}} \\ &= \frac{1}{2} \int (\underline{\dot{p}} + \underline{\omega} \times \underline{r}) \cdot (\underline{\dot{p}} + \underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m \\ &= \frac{1}{2} \int \underline{\dot{p}} \cdot \underline{\dot{p}} \delta m + \frac{1}{2} \int \underline{\dot{p}} \cdot (\underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m + \frac{1}{2} \int \underline{\dot{p}} \cdot (\underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m \\ &\quad + \frac{1}{2} \int (\underline{\omega} \times \underline{r}) \cdot (\underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m \\ &= \frac{1}{2} \underline{\dot{p}} \cdot \underline{\dot{p}} M + \frac{1}{2} \underline{\omega} \cdot \int \underline{r} \times (\underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m \end{aligned}$$

$$W = \frac{1}{2} \underline{\dot{p}} \cdot \underline{\dot{p}} M + \frac{1}{2} \underline{\omega} \cdot \underline{H} = \frac{1}{2} \underline{\dot{p}} \cdot \underline{\dot{p}} M + \frac{1}{2} \underline{\omega} \cdot \underline{I} \underline{\omega}$$

como

$$dW = \underline{F} \cdot d\underline{R} \quad \text{si } \underline{F} = m \underline{g} \underline{k}$$

$$dW = m \underline{g} \underline{k} \cdot d\underline{R} \quad W = \int m \underline{g} dh$$

Teniedose finalmente

$$\underline{H} = \underline{p} \times \dot{\underline{r}} + \underline{I} \underline{\omega}$$

$$\text{donde } \underline{I} \underline{\omega} = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

o bien  $\underline{H} = H_x \underline{i} + H_y \underline{j} + H_z \underline{k}$

al derivar esta última expresión con respecto al tiempo

$$\dot{\underline{H}} = \underline{M} = \dot{H}_x \underline{i} + \dot{H}_y \underline{j} + \dot{H}_z \underline{k} + H_x \dot{\underline{i}} + H_y \dot{\underline{j}} + H_z \dot{\underline{k}}$$

donde el cuerpo rígido gira con velocidad  $\underline{\omega}$

$$\dot{\underline{i}} = \underline{\omega} \times \underline{i}$$

$$\dot{\underline{j}} = \underline{\omega} \times \underline{j}$$

$$\dot{\underline{k}} = \underline{\omega} \times \underline{k}$$

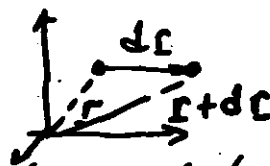
$$\dot{\underline{H}} = \frac{\partial \underline{H}}{\partial t} + \underline{\omega} \times \underline{H}$$

Ec. de Euler

## TRABAJO Y ENERGIA

El incremento de trabajo asociado con el desplazamiento de la partícula de masa  $5m$  de la posición  $\underline{r}$  a la  $\underline{r} + d\underline{r}$  se define como

$$dW = \underline{F} \cdot d\underline{r}$$



$d\underline{r}$  es el cambio de posición en el tiempo  $dt$

El término  $\underline{\omega} \times \underline{r}$  representa la velocidad de cada partícula alrededor de un punto y  $\underline{\rho}$ ,  $\dot{\underline{\rho}}$  representan la colocación del centro de masa y su velocidad.  $\underline{\omega}$ ,  $\underline{\rho}$  y  $\dot{\underline{\rho}}$  son independientes de la colocación de cada partícula.

$$\int \underline{\rho} \times (\underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m = \underline{\rho} \times \underline{\omega} \times \int \underline{r} \delta m = 0$$

$$\int \underline{r} \times \dot{\underline{\rho}} \delta m = -\dot{\underline{\rho}} \times \int \underline{r} \delta m = 0$$

además  $\underline{a} \times (\underline{b} \times \underline{c}) = \underline{b}(\underline{a} \cdot \underline{c}) - \underline{c}(\underline{a} \cdot \underline{b})$

Teniendo en cuenta:

$$\begin{aligned} \underline{H} &= \int \underline{\rho} \times \dot{\underline{\rho}} \delta m + \int \underline{r} \times (\underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m \\ &= \underline{\rho} \times \dot{\underline{H}} + \int (\underline{r}^2 \underline{\omega} - \underline{r} \underline{\omega} \cdot \underline{r}) \delta m \end{aligned}$$

pero  $\underline{r}^2 = (x\underline{i} + y\underline{j} + z\underline{k}) \cdot (x\underline{i} + y\underline{j} + z\underline{k}) = x^2 + y^2 + z^2$

$$\underline{\omega} \cdot \underline{r} = (\omega_x \underline{i} + \omega_y \underline{j} + \omega_z \underline{k}) \cdot (x\underline{i} + y\underline{j} + z\underline{k}) = x\omega_x + y\omega_y + z\omega_z$$

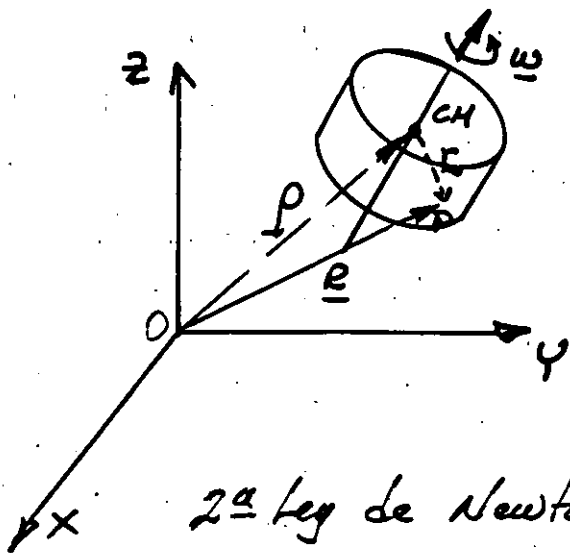
por lo tanto

$$\begin{aligned} \underline{r}^2 \underline{\omega} - \underline{r}(\underline{\omega} \cdot \underline{r}) &= (x^2 + y^2 + z^2)\omega_x \underline{i} - (x^2\omega_x + zy\omega_y + z^2\omega_z)\underline{i} + \\ &\quad (x^2 + y^2 + z^2)\omega_y \underline{j} - (xy\omega_x + y^2\omega_y + yz\omega_z)\underline{j} + \\ &\quad (x^2 + y^2 + z^2)\omega_z \underline{k} - (xz\omega_x + yz\omega_y + z^2\omega_z)\underline{k} \end{aligned}$$

definiendo:  $I_x = \int (y^2 + z^2) \delta m$        $I_y = \int (x^2 + z^2) \delta m$

$$I_{xy} = \int xy \delta m$$

$$I_{xz} = \int xz \delta m$$



$$\underline{r}_c = \frac{\sum m_i \underline{r}_i}{\sum m_i}$$

$$\underline{r}_c \sum m_i = \int m_i \underline{r}_i$$

2ª Ley de Newton

La suma de las fuerzas externas es igual al cambio del momentum lineal en la unidad de tiempo

$$\sum \underline{F} = \frac{d}{dt} (m \underline{v}) \quad \text{momentum lineal} = m \underline{v}$$

Momentum angular o momento de momentum

$$\underline{H}_p = \underline{r} \times \delta m \underline{\dot{r}} \quad \text{para una partícula de masa } \delta m$$

$$\underline{H}_p = \underline{\dot{r}} \times \delta m \underline{r} + \underline{r} \times \delta m \underline{\dot{r}} = \underline{H}_p$$

se tomó el origen en el centro de masa

$$\text{Fuera del centro de masa } \underline{H}_p = \underline{R} \times \delta m \underline{\dot{R}}$$

Para un sistema de partículas

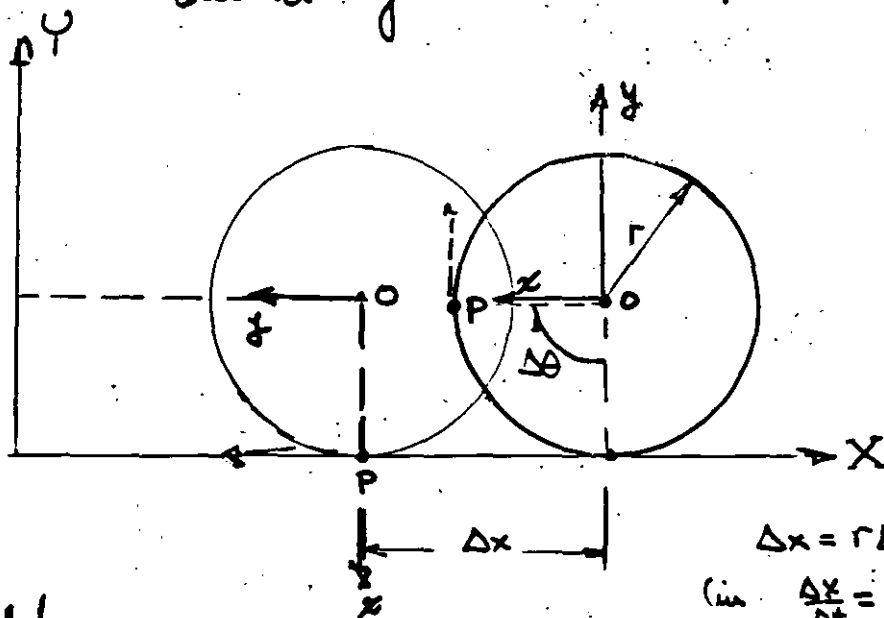
$$\underline{H}_c = \sum \underline{R}_i \times \delta m \underline{\dot{R}}_i$$

Para un cuerpo rígido

$$\underline{H} = \int (\underline{r} + \underline{\rho}) \times (\underline{\dot{r}} + \underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m = \int \underline{\rho} \times \underline{\dot{\rho}} \delta m + \int \underline{\rho} \times (\underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m + \int \underline{r} \times \underline{\dot{\rho}} \delta m + \int \underline{r} \times (\underline{\omega} \times \underline{r}) \delta m$$



Sea la siguiente moneda. 38

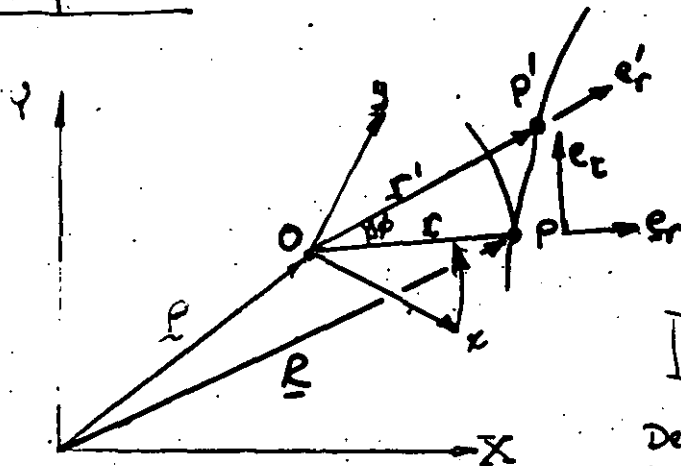


En el plano

$$\Delta x = r \Delta \theta$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} r \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$$

$$v = r \dot{\theta}$$

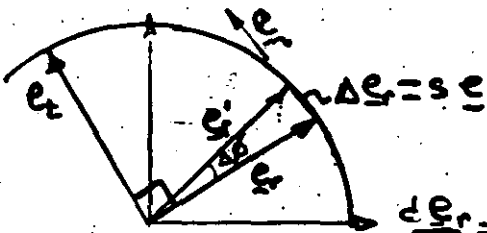


$$\underline{r} = r \underline{e}_r$$

$$\underline{r} = \underline{\rho} + r \underline{e}_r \quad \text{posición de P}$$

Derivando con respecto al tiempo la posición para obtener la velocidad

$$\underline{\dot{r}} = \dot{\rho} + \dot{r} \underline{e}_r + r \dot{\underline{e}}_r$$



$$\frac{d \underline{e}_r}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \underline{e}_r}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{s \underline{e}_t}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r \Delta \phi \underline{e}_t}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \underline{e}_t$$

$$= \dot{\phi} \underline{e}_t$$

$$\underline{\dot{r}} = \dot{\rho} + \dot{r} \underline{e}_r + r \dot{\phi} \underline{e}_t$$

Derivando nuevamente con respecto al tiempo

$$\underline{\ddot{r}} = \underline{\ddot{\rho}} + \underline{\ddot{r}} \underline{e}_r + \underline{\dot{r}} \dot{\phi} \underline{e}_t + \underline{\dot{r}} \dot{\phi} \underline{e}_t - r \dot{\phi}^2 \underline{e}_r$$

La ecuación (2) puede descomponerse en parte real e imaginaria

$$a_3 \dot{\theta} (i \cos \theta + i^2 \sin \theta) = \dot{a}_2 (\cos \varphi + i \sin \varphi) + a_2 \dot{\varphi} (i \cos \varphi + i^2 \sin \varphi)$$

$$\text{Real: } -a_3 \dot{\theta} \sin \theta = \dot{a}_2 \cos \varphi - a_2 \dot{\varphi} \sin \varphi$$

$$\text{Imag: } a_3 \dot{\theta} \cos \theta = \dot{a}_2 \sin \varphi + a_2 \dot{\varphi} \cos \varphi$$

sustituyendo valores

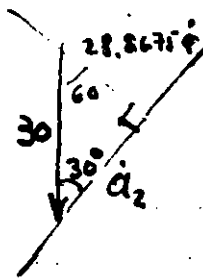
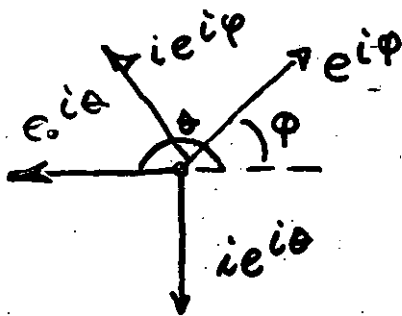
$$-20(1.5) \sin 180 = \dot{a}_2 \cos 60 - 28.8675 \dot{\varphi} \sin 60 \quad (4)$$

$$20(1.5) \cos 180 = \dot{a}_2 \sin 60 + 28.8675 \dot{\varphi} \cos 60 \quad (5)$$

resolviendo  $\dot{\varphi} = -0.5196 \text{ rad/s}$   
 $\dot{a}_2 = -25.98 \text{ cm/s.}$  Solución

sustituyendo valores en la ec (2)

$$20(1.5) i e^{i\theta} = \dot{a}_2 e^{i60} + \dot{\varphi} (28.8675) i e^{i60}$$



$$\sin 30 = \frac{28.8675 \dot{\varphi}}{30}$$

$$\dot{\varphi} = 0.5196 \text{ rad/s}$$

$$\cos 30 = \frac{\dot{a}_2}{30}$$

$$\dot{a}_2 = 25.98 \text{ cm/s}$$

40  
como se necesitan 3 condiciones (para determinar c, b, a)

$$F_1 = 150 + 150(0.2) = 180 \text{ rpm} \quad (2)$$

$$F_2 = 150 \text{ rpm}$$

$$F_3 = 150 - 150(0.2) = 120 \text{ rpm}$$

como:  $\cos \theta = \frac{g}{b^2 L}$  se tiene

$$\cos \theta_1 = \left( \frac{980}{\left( \frac{180 \times 2\pi}{60} \right)^2 \cdot 15} \right) = 0.184$$

$$\cos \theta_2 = \left( \frac{980}{\left( \frac{150 \times 2\pi}{60} \right)^2 \cdot 15} \right) = 0.265$$

$$\cos \theta_3 = \left( \frac{980}{\left( \frac{120 \times 2\pi}{60} \right)^2 \cdot 15} \right) = 0.414$$

$$AC_1 = 5.52$$

$$AC_2 = 7.95$$

$$AC_3 = 12.42$$

sustituyendo estos valores

$$u_1 = 29.48$$

$$u_2 = 27.05$$

$$u_3 = 22.58$$

$$\begin{aligned} -30 &= -u(20) - Q \\ 90 &= u(140) + Q \\ \hline 60 &= u(60) \end{aligned}$$

$$u = 1$$

$$Q = -90$$

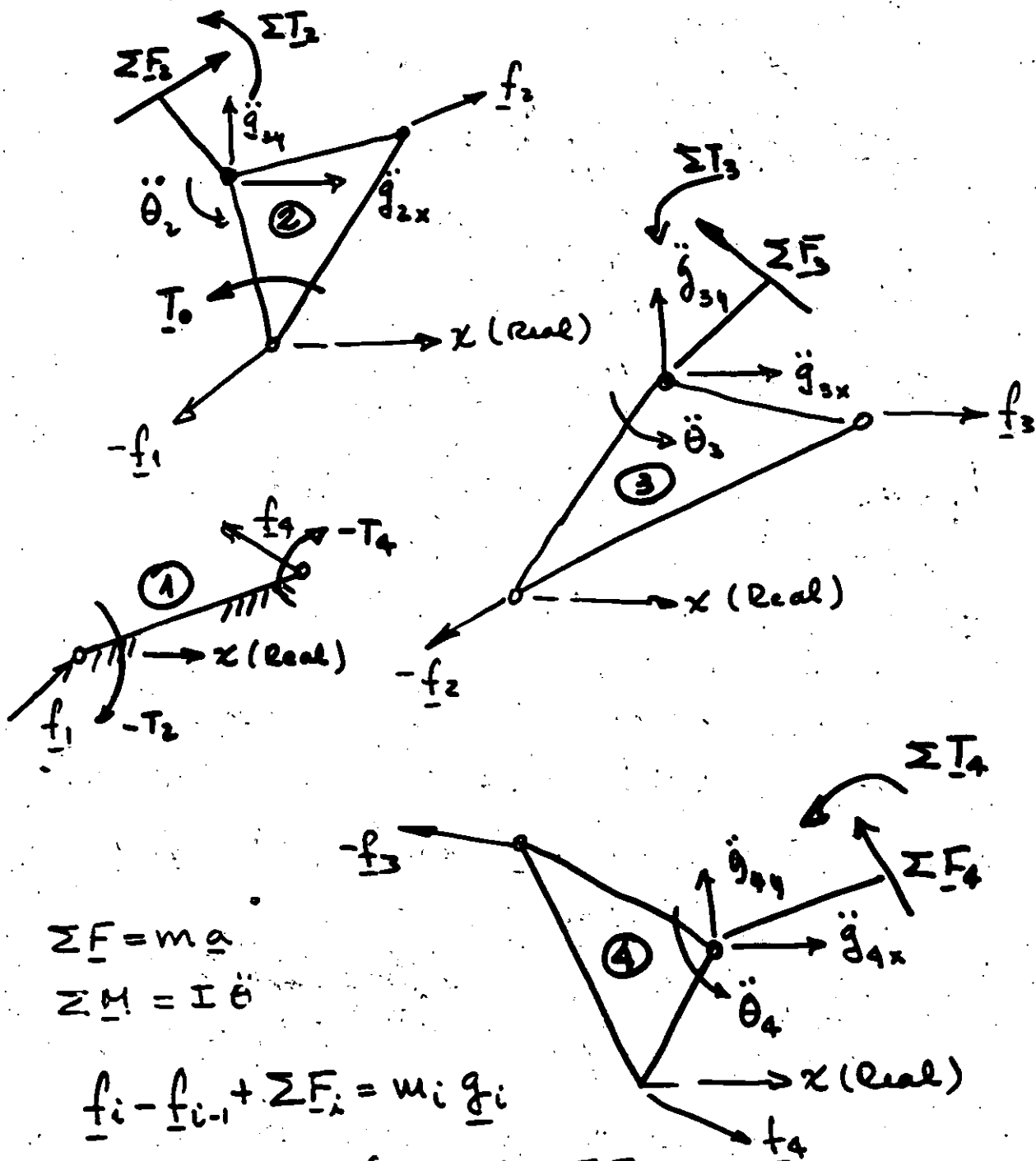
Para obtener los valores de  $\phi$  que sean lineales en  $P$  se tiene  $\phi = uP + Q$

$$\text{si } \phi_3 = 30^\circ \text{ cuando } P_3 = 120$$

$$\text{si } \phi_1 = 90^\circ \text{ cuando } P_1 = 180$$

Resolviendo se tiene

Diagrama de cuerpo libre de cada estación



$$\Sigma \underline{F} = m \underline{a}$$

$$\Sigma \underline{M} = I \ddot{\theta}$$

$$\underline{f}_i - \underline{f}_{i-1} + \Sigma \underline{F}_i = m_i \underline{q}_i$$

$$(\underline{r}_i \times \underline{f}_i) - (\underline{r}_i \times \underline{f}_{i-1}) + (\underline{d}_i \times \Sigma \underline{F}_i)$$

$$+ \Sigma T_i = I_i \ddot{\theta}_i$$

para el mecanismo de cuatro barras

Es. 2  $\underline{f}_2 - \underline{f}_1 = m_2 \ddot{\underline{g}}_2 - \Sigma \underline{F}_2$

$(\underline{a} - \underline{g}_2) \times \underline{f}_2 - (\underline{b} - \underline{g}_2) \times \underline{f}_1 + T_0 = I_2 \ddot{\Theta}_2 - (\underline{d}_2 \times \Sigma \underline{F}_2) - \Sigma \underline{F}_2$

Es. 3

$\underline{f}_3 - \underline{f}_2 = m_3 \ddot{\underline{g}}_3 - \Sigma \underline{F}_3$

$(\underline{a}^* - \underline{g}_3) \times \underline{f}_3 - (\underline{a} - \underline{g}_3) \times \underline{f}_2 = I_3 \ddot{\Theta}_3 - \Sigma T_3 - (\underline{d}_3 \times \Sigma \underline{F}_3)$

Es. 4

$\underline{f}_4 - \underline{f}_3 = m_4 \ddot{\underline{g}}_4 - \Sigma \underline{F}_4$

$(\underline{b}^* - \underline{g}_4) \times \underline{f}_4 - (\underline{a}^* - \underline{g}_4) \times \underline{f}_3 = I_4 \ddot{\Theta}_4 - \Sigma T_4 - (\underline{d}_4 \times \Sigma \underline{F}_4)$

como  $\underline{r} \times \underline{f} = r_x f_y - r_y f_x$  y  $\underline{p}_2 = (\underline{a} - \underline{g}_2)$ ,  $\underline{p}_3 = (\underline{a}^* - \underline{g}_3)$   
 $\underline{q}_2 = (\underline{b} - \underline{g}_2)$ ,  $\underline{q}_3 = (\underline{a} - \underline{g}_2)$

$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_{2y} & -q_{2x} & -p_{2y} & -p_{2x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{3y} & -q_{3x} & -p_{3y} & p_{3x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{4y} & -q_{4x} & -p_{4y} & p_{4x} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} f_{1x} \\ f_{1y} \\ f_{2x} \\ f_{2y} \\ f_{3x} \\ f_{3y} \\ f_{4x} \\ f_{4y} \\ T_0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} m_2 \ddot{g}_{2x} - \Sigma F_{2x} \\ m_2 \ddot{g}_{2y} - \Sigma F_{2y} \\ I_2 \ddot{\Theta}_2 - \Sigma T_2 - (\underline{d}_2 \times \Sigma \underline{F}_2) \\ m_3 \ddot{g}_{3x} - \Sigma F_{3x} \\ m_3 \ddot{g}_{3y} - \Sigma F_{3y} \\ I_3 \ddot{\Theta}_3 - \Sigma T_3 - (\underline{d}_3 \times \Sigma \underline{F}_3) \\ m_4 \ddot{g}_{4x} - \Sigma F_{4x} \\ m_4 \ddot{g}_{4y} - \Sigma F_{4y} \\ I_4 \ddot{\Theta}_4 - \Sigma T_4 - (\underline{d}_4 \times \Sigma \underline{F}_4) \end{bmatrix}$
--	---	--

Fuerza de sacudimiento  $F = \underline{f}_1 - \underline{f}_4 = \begin{cases} F_x = f_{1x} - f_{4x} \\ F_y = f_{1y} - f_{4y} \end{cases}$



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MÁQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**TECNICAS DE OPTIMIZACION DE ELEMENTOS DE MAQUINAS**

**DR. ENRIQUE CHICUREL UZIEL**

**PALACIO DE MINERIA**

## **Diseño óptimo mediante computadora y su aplicación a la ingeniería mecánica**

*Enrique Chicurel Uziel*

### 8.1 El problema de diseño

El problema de diseño tradicional se refiere a la concepción y determinación de las características físicas de un sistema en forma tal que satisfaga básicamente los requisitos de funcionamiento cumpliendo con ciertas restricciones.

El sistema a diseñar puede ser, entre otros, una estructura, un aparato, una máquina, un sistema de control, un circuito, o bien una combinación de dos o más de los mismos.

Las restricciones se pueden referir a las limitaciones en las características mecánicas o eléctricas de los materiales, a los tamaños y capacidades de los componentes que se encuentran comercialmente, al espacio disponible, al medio ambiente, a consideraciones de seguridad y a muchas otras.

### 8.2 Necesidad de optimizar en diseño

Por lo general, no basta con satisfacer los requisitos de funcionamiento sino que, además, hay que satisfacerlos de acuerdo con algún criterio que depende del objeto que se persigue y la aplicación del sistema, como por ejemplo, el diseño debe ser lo más económico posible, o bien lo más eficiente, o lo más compacto, o lo más seguro. Es decir que, esencialmente, el problema de diseño es un problema de optimización, proceso que requiere una gran cantidad de operaciones aritméticas.

Cabe señalar que un diseño se mejora durante la evolución del producto, es decir, mediante el desarrollo de nuevos prototipos en donde se utilizan las experiencias logradas en la producción y aplicación de los anteriores. Este es un proceso lento y costoso pero inevitable. Sin embargo, las técnicas matemáticas de optimización

y la computadora electrónica han hecho posible abreviar y abaratar dicho proceso.

Estas circunstancias, aunadas a la existencia de la fuerte competencia entre fabricantes de los países altamente industrializados ha traído como consecuencia un gran auge en el desarrollo de dichas técnicas.

Existen tres clases de optimización, a saber:

1. Optimización de magnitud
2. Optimización de forma
3. Optimización de configuración

Lo que comúnmente se entiende por optimización se refiere a la primera categoría. Sin embargo, todas son dignas de consideración.

### 8.3 Optimización de magnitud

Para concretar las ideas anteriores y lograr hacer optimizaciones prácticas a la mayor brevedad, echemos una ojeada a unos ejemplos de optimización de magnitud.

#### Ejemplo 1

Se desea diseñar una caja de cartón cilíndrica lo más económica en material posible para contener 1000 cm<sup>3</sup> de cierto producto. Los anaqueles que se acostumbra utilizar para almacenar dichas cajas tienen una altura de 6 cm entre repisas.

Determinar las proporciones óptimas.

#### Solución

##### Formulación inicial:

$$A = 2(\pi rh + \pi r^2)$$

$$V = \pi r^2 h$$

$$h \leq h_{\text{lim}}$$

Criterio de optimización.

(A, función a minimizar).

Requisito de funcionalidad.

Limitación.

Se especifican:  $V, h_{lim}$

Variables:  $r, h$

Variable restringida:  $h$

Variable libre:  $r$

Para obtener la formulación final, eliminamos la variable libre  $r$

**Formulación final:**

$A = 2(\sqrt{\pi V h^3} + V h^{-1})$  Criterio de optimización.

$h \leq h_{lim}$  Limitación.

Se especifican:  $V$  y  $h_{lim}$

Variable:  $h$

Recurriendo al cálculo se obtiene:

$$\frac{dA}{dh} = \sqrt{\pi V} h_c^{-1/2} - 2V h_c^{-2} = 0$$

$$h_c = 1.085 V^{2/3} = 10.85 \text{ cm}$$

puesto que  $h_{lim} = 6 \text{ cm}$

$$h_c > h_{lim}$$

por lo tanto  $h_c$  no es la altura óptima y según podemos ver en la gráfica de la figura 1

$$h_{opt} = h_{lim} = 6 \text{ cm}$$

y por lo tanto

$$r_{opt} = \sqrt{\frac{V}{\pi h_{opt}}} = \sqrt{\frac{1000}{\pi(6)}} = 7.25 \text{ cm}$$

$$A_{opt} = 2(\pi r_{opt} h_{opt} + \pi r_{opt}^2) = 2[\pi(7.25)(6) + \pi(7.25)^2] = 609 \text{ cm}^2$$

En la figura 1 apreciamos que cualquier punto en la región de diseño factible satisface el requisito de funcionalidad de la caja: contener 1000 cm<sup>3</sup>. Sin embargo, sólo cuando  $h = 6 \text{ cm}$  se satisface el criterio de optimización: máxima economía.

Un diseño en donde no se utilizara ningún criterio de optimización podría resultar pésimo; considérese, por ejemplo, la parte izquierda de la región de diseño factible

El método que se ilustra es debido al profesor R. C. Johnson, del Instituto Politécnico de Worcester.<sup>(12)</sup>

**Ejemplo 2**

Una viga de acero simplemente apoyada de 100" de largo, de sección rectangular, con 3" de peralte y 1" de ancho, soporta una carga concentrada de 720 lb en el centro.

1. Calcular  $\sigma$  máximo,  $\sigma$  = esfuerzo normal a una sección.
2. Calcular  $\tau$ , máximo,  $\tau$  = esfuerzo cortante transversal.

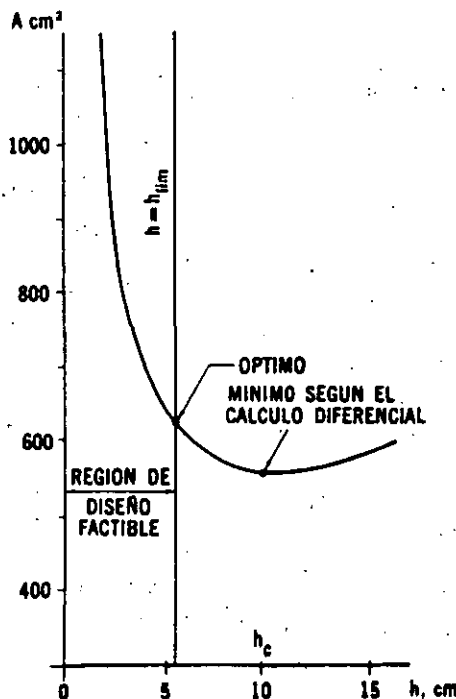


Figura 1. Optimización de caja de cartón cilíndrica.



3. Establecer una relación entre el esfuerzo cortante máximo  $\tau$  en función de  $\sigma$  y  $\tau_t$  para cualquier punto.
4. Comparar los valores numéricos obtenidos en los incisos 1 y 2 y, a la luz de ello, simplificar la relación que se estableció en el inciso 3.
5. Considerar ahora que las dimensiones de la sección de la viga no han sido determinadas. Utilizando la relación del inciso 4 determinar las dimensiones de la sección, tal que:

El costo (peso) sea mínimo  
 $\tau$  no exceda a 8000 lb/in<sup>2</sup>  
 El peralte  $h$  no exceda a 3"  
 La deflexión máxima no exceda 0.45"

Proceder de la siguiente manera:

- a) Obtener la formulación inicial completa.
  - b) A partir de la inicial obtener la formulación final completa.
  - c) Dibujar a escala la región de diseño factible.
  - d) Calcular los valores óptimos de: el área seccional (índice del costo), las dimensiones, y el esfuerzo  $\tau$ .
6. Si se exige ahora que la deflexión no exceda a 0.2",
    - a) Dibujar la nueva región de diseño factible.
    - b) Recalcular los valores requeridos en el inciso 5d.

Solución

Nomenclatura

- A = área seccional de la viga.
- a = área seccional de la viga arriba (o abajo) del punto para el cual se calcula  $\tau$ .
- b = ancho de la viga.
- c = distancia medida desde el eje neutro al punto más alejado del mismo.
- $\Delta$  = deflexión máxima de la viga.
- E = módulo de Young.
- h = peralte de la viga.
- I = momento de inercia del área seccional de la viga.
- L = longitud de la viga.
- M = momento flexionante.
- P = carga transversal sobre la viga.
- Q = primer momento del área "a" respecto al eje neutro.
- V = fuerza cortante.

$\bar{y}$  = distancia centroidal del área "a" medida desde el eje neutro.

( )<sub>L</sub> = valor límite.

$$1. \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x} c}{I} \quad c = \frac{h}{2} \quad I = \frac{bh^3}{12}$$

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{PL}{4} = \frac{(720)(100)}{4} = 18\,000 \text{ lb/in}^2$$

$$\therefore \sigma_{m\acute{a}x} = 6 \frac{M_{m\acute{a}x}}{bh^2} = \frac{(6)(18\,000)}{(1)(3)^2} = 12\,000 \text{ lb/in}^2$$

$$2. \tau_{t,m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x} Q_{m\acute{a}x}}{I b}$$

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{P}{2}$$

$$Q_{m\acute{a}x} = a \bar{y} = \left(\frac{bh}{2}\right) \frac{h}{4} = \frac{bh^2}{8}$$

$$\tau_{t,m\acute{a}x} = \frac{3P}{4bh} = \frac{3(720)}{4(1)(3)} = 180 \text{ lb/in}^2$$

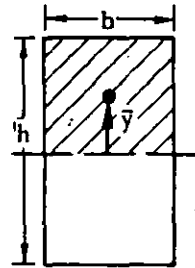


Figura 2. Ejemplo 2. Área "a" y su distancia centroidal.

3. Para cualquier punto y mediante el círculo de Mohr se obtiene

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau_t^2}$$

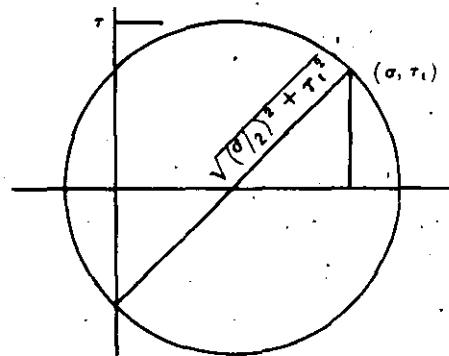


Figura 3. Ejemplo 2. Círculo de Mohr.

4.  $\tau_t \ll \sigma$  y además

cuando  $y = c$   $\sigma$  es máximo y  $\tau_t = 0$   
 cuando  $y = 0$   $\sigma = 0$  y  $\tau_t$  es máximo

$\therefore \tau_t$  se puede considerar nulo y

$$\tau = \frac{\sigma}{2}$$

5. Consideraciones preliminares:

$$\tau = \frac{\sigma}{2} = \frac{3M}{bh^2}$$

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} = \frac{ML^2}{Ebh^3}$$

**Formulación inicial**

$\Delta = bh$  Criterio de optimización  
 (A, función a minimizar)

$$\left. \begin{aligned} \tau &= 3 \frac{M}{bh^2} \\ \Delta &= \frac{ML^2}{Ebh^3} \end{aligned} \right\} \text{Requisitos de funcionalidad}$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &\leq \tau_L \\ \Delta &\leq \Delta_L \\ h &\leq h_L \end{aligned} \right\} \text{Limitaciones}$$

Se especifican: E, M, L,  $\tau_L$ ,  $\Delta_L$ ,  $h_L$ .

Variables: b, h,  $\tau$ ,  $\Delta$

Variables libres: b

Nótese que las variables libres son sencillamente las que no se indican como limitadas.

Eliminando las variables libres se obtiene la:

**Formulación final**

$$\Lambda = \frac{3M}{\tau h} \text{ Criterio de optimización (A, función a minimizar)}$$

$$\Delta = \frac{L^2 \tau}{3Eh} \text{ Requisito de funcionalidad.}$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &\leq \tau_L \\ \Delta &\leq \Delta_L \\ h &\leq h_L \end{aligned} \right\} \text{Limitaciones}$$

Se especifican: los parámetros E, M, L y los valores límites  $\tau_L$ ,  $\Delta_L$ ,  $h_L$ .

Variables independientes:  $\tau$ , h

Variable dependiente:  $\Delta$

Observamos que, a diferencia del ejemplo 1, ahora tenemos dos variables independientes y que, por lo tanto, tendremos una región de diseño factible en dos dimensiones.

Determinemos pues las fronteras de dicha región.

Las fronteras referentes a las variables independientes quedan definidas inmediatamente por las limitaciones, de donde se obtienen sus ecuaciones:

$$\tau = \tau_L = 8000$$

$$h = h_L = 3$$

La frontera referente a la variable dependiente se obtiene sustituyendo la limitación correspondiente en la ecuación referente al requisito de funcionalidad

$$\tau = \frac{3E\Delta_L}{L^2} h = \frac{3(30 \times 10^6)(0.45)}{(100)^2} h$$

$$\tau = 4060 h$$

La región de diseño factible se muestra en la figura 4.

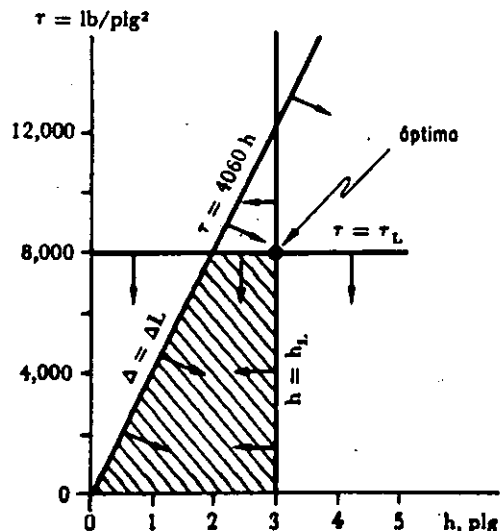


Figura 4. Ejemplo 2. Región de diseño factible para  $\Delta_L = 0.45''$ .

Puesto que la función objetivo es

$$A = \frac{3M}{\tau h} = \frac{54000}{\tau h}$$

A es mínimo cuando h y  $\tau$  son ambas máximas dentro de la región de diseño factible o sea  $h = 3''$ ,  $\tau = 8000 \text{ lb/in}^2$ .

$$\therefore A_{\text{óptimo}} = \frac{54000}{3(8000)} = 2.23 \text{ in}^2$$

y el valor correspondiente de b es:

$$b = \frac{A}{h} = \frac{2.23}{3} = 0.75''$$

6. Para  $\Delta_L = 0.2''$

$$\tau = 1800 h$$

y la nueva región de diseño factible se muestra en la figura 5.

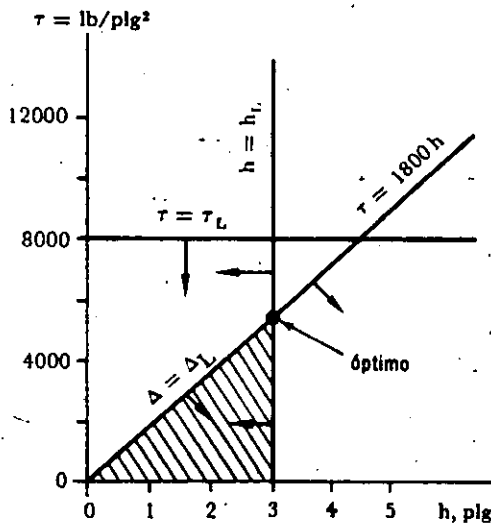


Figura 5. Ejemplo 2. Región de diseño factible para  $\Delta_L = 0.2''$ .

Una vez más el óptimo se obtiene de la relación:

$$A_{\text{ópt}} = \frac{54000}{\tau_{\text{MAX}} h_{\text{MAX}}}$$

como se aprecia en la figura 5.

$$h_{\text{MAX}} = 3''$$

y  $\tau_{\text{MAX}}$  se obtiene de la intersección de las fronteras:

$$\tau = 1800 h$$

$$h = h_L = 3''$$

es decir

$$\tau_{\text{MAX}} = 1800 h_L = 5400 \text{ lb/in}^2$$

$$\therefore A_{\text{ópt}} = \frac{54000}{(5400)(3)} = 3.33''$$

$$b_{\text{ópt}} = \frac{A}{h} = \frac{3.33}{3} = 1.11''$$

Resumiendo, los valores óptimos son:

$\Delta_L, \text{in}$	$A, \text{in}^2$	$h, \text{in}$	$b, \text{in}$	$\Delta, \text{in}$	$\tau, \text{lb/in}^2$
0.45''	2.23	3	0.75	0.296	8000
0.20''	3.33	3	1.11	0.2	5400

### 8.4 Consideraciones algebraicas

Si en los anteriores ejemplos se consideraron exclusivamente los requisitos de funcionalidad, se tiene un sistema con un número mayor de variables que de ecuaciones.

A continuación se resumen estas cantidades en relación a los dos primeros ejemplos.

Ejemplo	Formulación	Nº de variables	Nº de ecuaciones requisito de funcionalidad
1	Inicial	2	1
1	Final	1	0
2	Inicial	4	2
2	Final	3	1

Lo anterior quiere decir que existe un número infinito de soluciones de dicho sistema.

Si se considera ahora el conjunto de las ecuaciones referentes a los requisitos de funcionalidad y las desigualdades referentes a las limitaciones, se tiene que se han reducido los valores que pueden asumir las variables pero el número de soluciones sigue siendo infinito.

En diseño tradicional, no se define ningún criterio para seleccionar una sola de las soluciones posibles.

En cambio, en diseño óptimo sí se fija con toda precisión dicho criterio. El proceso de optimización consiste en la búsqueda de dicha solución.

### Ejemplo 3

Se requiere diseñar un resorte helicoidal para un convertidor de par. Ya ha sido seleccionada la cons-

tante  $k$  del resorte, así como la fuerza máxima de compresión  $Q$ .

El resorte va montado en una flecha cuyo diámetro  $D_f$  ya se fijó por lo que el diámetro interior  $D_i$  queda limitado. Además por consideraciones de espacio existe un límite que no debe exceder el diámetro exterior  $D_e$  del resorte.

Ya se seleccionó el material, por lo cual ya quedaron determinados el esfuerzo permisible  $\tau_p$ , y el módulo de torsión  $G$ . Sin embargo, el alambre viene únicamente en  $M$  diferentes diámetros  $d_n$ .

Se desea hacer mínima la longitud cerrada del resorte  $L_c$  (cuando todas las espiras están en contacto) correspondiente a la carga máxima  $Q$ .

Las relaciones que se emplean en el diseño de resortes helicoidales son:

$$k = \frac{G d^4}{8ND_m^3}$$

$$\tau = \frac{8QD_m W}{\pi d^3}$$

$$W = \frac{4D_m - d}{4(D_m - d)} + 0.615 \frac{d}{D_m}$$

$d$  = diámetro del alambre.

$D_m$  = diámetro medio de la espira.

$N$  = número de espiras.

$W$  = factor de concentración de esfuerzo de Wahl.

Establecer la formulación inicial.

A partir de la formulación inicial obtener la final.

Optimizar, dados los siguientes valores:

$$k = 38 \text{ lb/in}$$

$$Q = 418 \text{ lb}$$

$$D_f = 2 \text{ in}$$

$$D_e \text{ máx} = 4 \text{ in}$$

$$\tau_p = 40,000 \text{ lb/in}^2$$

$$G = 12 \times 10^6 \text{ lb/in}^2$$

$$d = \frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{3}{32}, \dots, 1 \text{ in}$$

**Solución:**

**Formulación inicial**

$$L_c = Nd$$

Criterio de optimización  
( $L_c$  función a minimizar)

$$k = \frac{Gd^4}{8D_m^3 N}$$

$$\tau = \frac{8QD_m W}{\pi d^3}$$

$$W = \frac{4D_m - d}{4(D_m - d)} + 0.615 \frac{d}{D_m}$$

$$D_m = \frac{D_i + D_e}{2}$$

$$D_e = D_i + 2d$$

$$D_i \geq D_f$$

$$\tau \leq \tau_p$$

$$D_e \leq D_e \text{ máx}$$

$$d = d_1, d_2, \dots, d_M$$

Requisitos de funcionalidad

limitaciones

Se especifican:  $k, Q, G, D_f, \tau_p, D_e \text{ máx}$

Variables:  $N, d, \tau, D_m, W, D_i, D_e$

Variables libres:  $N, W, D_m$

Eliminando las variables libres se obtiene:

**Formulación final**

$$L_c = \frac{Gd^3}{8k(D_i + d)^3}$$

Criterio de optimización.  
 $L_c$ , función de minimizar.

$$\tau = \frac{4Q(D_i + d)}{\pi d^3} \left[ \frac{4D_i + 3d}{2D_i} + 1.23 \frac{d}{D_i + d} \right]$$

$$D_e = D_i + 2d$$

Requisitos de funcionalidad

$$D_i \geq D_f$$

$$\tau \leq \tau_p$$

$$D_e \leq D_e \text{ máx}$$

$$d = d_1, d_2, d_3, \dots, d_M$$

Limitaciones

Se especifican los parámetros:  $k, Q, G$ , así como los valores límite:  $D_f, \tau_p, D_e \text{ máx}, d_1, d_2, \dots, d_M$

Variables independientes:  $D_i, d$

Variables dependientes:  $\tau, D_e$

Substituyendo valores numéricos obtenemos:

**Formulación final**

$$L_c = 3.84 \times 10^4 \frac{d^3}{(D_i + d)^3}$$

Criterio de optimización  
( $L_c$ , función a optimizar)

$$\tau = 531 \frac{(D_1 + d)}{d^3} \left[ \frac{4D_1 + 3d}{2D_1} + \frac{1.23d}{D_1 + d} \right]$$

Requisito de funcionalidad

$$D_2 = D_1 + 2d$$

$$D_1 \geq 2$$

$$\tau \leq 4 \times 10^4$$

$$D_2 \leq 4$$

$$d = \frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{3}{32}, \dots, 1$$

Limitaciones

Variables independientes:  $D_1, d$

Variables dependientes:  $\tau, D_2$

Determinamos primero la región de diseño factible en el sistema de coordenadas  $D_1, d$ . Se obtiene una frontera de la limitación en  $D_1$  y es la recta

$$D_1 = 2$$

Nótese que por referirse a una variable independiente esta frontera es constante.

Las otras fronteras se obtienen de substituir las limitaciones de las variables dependientes en las ecuaciones referentes a los requisitos de funcionalidad.

$$4 = D_1 + 2d$$

$$4 \times 10^4 = 531 \frac{(D_1 + d)}{d^3} \left( \frac{4D_1 + 3d}{2D_1} + \frac{1.23d}{D_1 + d} \right)$$

Como estas fronteras se refieren a las variables dependientes, no son constantes, y, en general, son curvas. Las fronteras se muestran en la figura 6. Analizando las limitaciones se concluye que la región de diseño factible es la que se muestra encerrada por las líneas sólidas.

Puesto que la función a optimizar ya no es tan sencilla, no se puede determinar el punto óptimo mediante una mera inspección de la ecuación referente al criterio de optimización.

Si no se tiene idea de optimización, lo primero que se ocurre es obtener los contornos de nivel de  $L_c$ . La ecuación se obtiene de la relación correspondiente al criterio de optimización

$$D_1 = \left( 3.84 \times 10^4 \frac{d^3}{L_c} \right)^{1/4} - d$$

En la figura 6 se muestran cuatro contornos correspondientes a los valores de  $L_c = 40, 70, 150, 400$  plg.

Si imaginamos a la región de diseño factible llena de contornos, llegamos a la conclusión que el óptimo

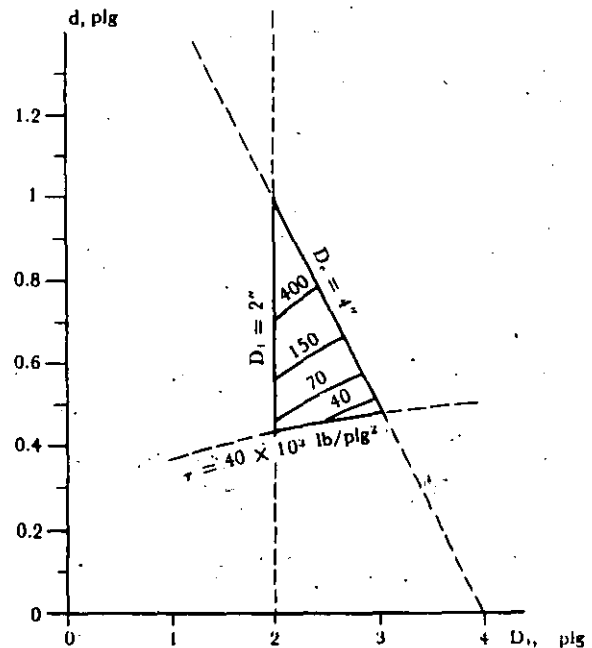


Figura 6. Ejemplo 3. Región de diseño factible y contornos de nivel de  $L_c$ .

se encuentra en el extremo derecho inferior de la región de diseño factible, es decir,  $d \approx 0.48$  plg.

Pero consideremos ahora a  $d$  como realmente es: una variable discreta. Esto significa que la región de diseño factible consta realmente de los segmentos de recta que se muestran en la figura 7.

Como los valores de  $L_c$  suben más lentamente a lo largo de la frontera inferior que a lo largo de la frontera derecha y como

$$\frac{15''}{32} < d < \frac{1''}{2}$$

el óptimo debe quedar en el extremo derecho del segmento inferior, por lo que las proporciones óptimas son:

$$d = 15/32''$$

$$D_1 = 2.7''$$

$$D_2 = 3.6''$$

$$L_c = 28''$$

calculadas a partir de la formulación final.

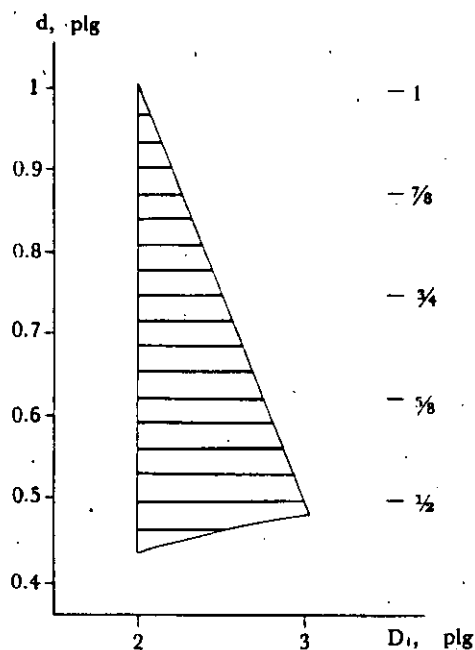


Figura 7. Ejemplo 3. Región de diseño factible tomando en cuenta los valores discretos de  $d$ .

### 8.5 Métodos de exploración local

La solución anterior, aunque muy ilustrativa, es sumamente ineficiente pues requiere de una gran cantidad de cómputos: por un lado, para determinar las fronteras (de hecho, la frontera inferior impuesta por la limitación en  $r$  se calculó por tanteos); y, por otro lado, para determinar suficientes curvas de nivel para obtener una idea del comportamiento de la función a optimizar. El método sería muy difícil y laborioso si tuviéramos que lidiar con tres variables independientes y prácticamente imposible si fueran más.

Todas estas dificultades resultan del hecho que se trató de examinar la topografía de la región completa.

Hay métodos mucho más eficientes. Para entender la idea fundamental recurramos a una analogía.

Baldomero y Agripina juegan. Baldomero se halla con los ojos vendados en un punto en el interior de un predio grande, cercado, en una región montañosa y árida. Agripina le pide que, sin quitarse la venda, encuentre el punto más bajo del predio.

Baldomero se sienta en el suelo y con sus manos palpa el terreno en derredor suyo y escoge la dirección a lo largo de la cual parece descender más el terreno. Camina un trecho como de dos metros y se vuelve a sentar para palpar su derredor una vez más, repitiendo el proceso varias veces hasta encontrar un punto tal que en todas direcciones sube el terreno o bien se topa con cerca. Eufórico, le grita a Agripina que ya encontró

el lugar señalado. Agripina le responde que no es cierto, pero lo conduce a otro punto inicial para darle una oportunidad más. Baldomero procede una segunda vez de idéntica manera hasta llegar a otro punto desde donde pregunta a Agripina si éste es el más bajo del predio. Agripina le responde afirmativamente y premia a Baldomero con un chocolate.

Evidentemente, en su primer intento, Baldomero llegó a un mínimo relativo. Está claro que, dadas suficientes oportunidades, Baldomero siempre podrá encontrar el mínimo absoluto, y esto, sin haber visto nunca el terreno.

Baldomero empleó un método que podríamos llamar de exploración local.

Una técnica muy útil de exploración local en optimización es el método de Box.<sup>1</sup>

Hemos utilizado una terminología propia de diseño pero que difiere de la utilizada por los especialistas en optimización. Así es que, primero que nada, presentamos un pequeño glosario de términos equivalentes.

<i>Diseño</i>	<i>Optimización</i>
Función a optimizar	= Función objetivo
Requisitos de funcionalidad	= Restricciones de igualdad
Limitaciones	= Restricciones de desigualdad
Variables independientes	= Variables de decisión
Limitaciones a las variables independientes	= Restricciones explícitas
Limitaciones a las variables dependientes	= Restricciones implícitas

Examinemos ahora el método de Box para dos variables de decisión. Supongamos concretamente que la optimización se refiere a minimización.

Se escogen cuatro puntos que satisfagan todas las restricciones, es decir, que se encuentren dentro de la región factible. Se aísla el punto más alto (el de valor más alto de la función objetivo). Se encuentra el centroide de los tres puntos restantes y se "refleja" el punto aislado a través de dicho centroide.

El punto reflejado substituye ahora al punto inicialmente aislado. De los cuatro puntos que quedan se vuelve a aislar el más alto y se repite todo el proceso anterior. De esta manera el conjunto de puntos o "Simplex" se va desplazando hacia abajo, substituyendo un punto del conjunto con cada desplazamiento. Si un punto reflejado viola una restricción explícita, se regresa a la frontera; es decir, que, a la variable que excedió su limitación, se le reasigna su valor limitativo. Si un punto reflejado viola una restricción implícita, se regresa medio camino.

En general se tiene:

$f = f(\underline{x})$  función objetivo

$\underline{y} = \underline{y}(\underline{x})$  restricciones de igualdad

$\underline{x}_b \leq \underline{x} \leq \underline{x}_a$  restricciones de desigualdad explícitas

$\underline{y}_b \leq \underline{y} \leq \underline{y}_a$  restricciones de desigualdad implícitas

$\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_1, \dots, x_n)$  Vector, punto cualquiera

$\underline{x}_k = (x_{1k}, x_{2k}, \dots, x_{1n}, \dots, x_{nk})$  Vector, punto específico

$\underline{y} = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m)$  Vector

$y_j = y_j(x_1, x_2, \dots, x_1, \dots, x_n)$

$x_i =$  variables de decisión independientes

$y_j =$  variables dependientes.

En el método de Box la reflexión se efectúa de la siguiente manera:

$$\underline{x}_{\text{reflejado}} = \underline{x}_c - R(\underline{x}_{\text{alto}} - \underline{x}_c)$$

$\underline{x}_c =$  vector de coordenadas del centroide

$R =$  coeficiente de reflexión

$$\underline{x}_c = \frac{1}{p-1} \sum_{k=1}^p \underline{x}_k$$

(k ≠ alto)

$$p = 2n$$

Para el caso descrito anteriormente  $p = 4$ .

Veamos cómo funciona el proceso aplicándolo al ejemplo 3 con  $R = 1.3$ .

Consideremos un Simplex inicial dado por los cuatro puntos que se especifican en la tabla siguiente así como los valores de  $L_c$ ,  $\tau$ ,  $D_c$  correspondientes.

Punto	$D_i$	$d$	$\tau$	$D_c$	$L_c$
1	2.2	0.59	$18.9 \times 10^3$	3.38	126
2	2.55	0.59	$21.6 \times 10^3$	3.73	88.1
3	2.2	0.65	$15 \times 10^3$	3.5	192
4	2.55	0.65	$16.5 \times 10^3$	3.85	136

Los puntos se escogieron para no violar la restricción en  $D_i$ , y como se puede apreciar, las restricciones en  $\tau$  y  $D_c$  tampoco fueron violadas. Ver figura 8.

El punto alto es el 3. Procedemos a calcular el centroide de los puntos restantes.

$$D_{1c} = (2.2 + 2.55 + 2.55) / 3 = 2.43$$

$$d_c = (0.59 + 0.59 + 0.65) / 3 = 0.61$$

Reflejamos para obtener el punto 5.

$$D_{1s} = 2.43 - 1.3(2.2 - 2.43) = 2.73$$

$$d_s = 0.61 - 1.3(0.65 - 0.61) = 0.558$$

Evidentemente no hemos violado la restricción en  $D_i$  y de acuerdo con la tabla 1 tampoco hemos violado las restricciones en  $\tau$  ni  $D_c$ . Como se puede apreciar en dicha tabla, el valor de  $L_c$  descendió.

Los puntos que quedan ahora son 1, 2, 4 y 5. De acuerdo con la tabla 1 el punto 4 es el más alto, reflejándolo obtenemos el punto 6, que, como se ve, tampoco viola ninguna restricción.

Quedan los puntos 1, 2, 5, 6. El punto más alto es el 1, reflejándolo se obtiene el punto 7 que según la tabla 1 sí viola la restricción en  $D_c$ .

Calculamos un nuevo punto reflejado, pero esta vez utilizamos  $R = 0.65$ . Ver figura 8.

$$D_{1s} = 2.57 - 0.65(2.2 - 2.57) = 2.81$$

$$d_s = 0.549 - 0.65(0.59 - 0.549) = 0.522$$

En la tabla constatamos ahora que el punto 8 ya no viola ninguna restricción.

En la figura 8 aparecen todos los puntos calculados en la tabla 1 así como los centroides correspondientes a cada iteración. Como se ve, el proceso "busca" al punto óptimo sin "conocer" el terreno guiándose, exclusivamente, por lo que encuentra a su paso. Desde luego, funciona con cualquier número de variables.

TABLA 1  
OPTIMIZACION POR EL METODO DE BOX

Punto	$D_i$	$d$	$\tau$	$D_c$	$L_c$
1	2.2	0.59	$18.9 \times 10^3$	3.38	126
2	2.55	0.59	21.6	3.73	88.1
3	2.2	0.65	15	3.5	192
4	2.55	0.65	16.5	3.85	136
5	2.73	0.558	24.8	3.89	58.3
6	2.43	0.495	30.9	3.42	45.2
7	3.04	0.495	36.7	4.03	25.6
8	2.81	0.522	31.6	3.86	36

Se viola la restricción

### 8.6 Método sistematizado de diseño óptimo mediante computadora<sup>14</sup>

Existe un gran número de técnicas de optimización. Sin embargo, con el objeto de presentar un método sistematizado de diseño auxiliado por computadora,

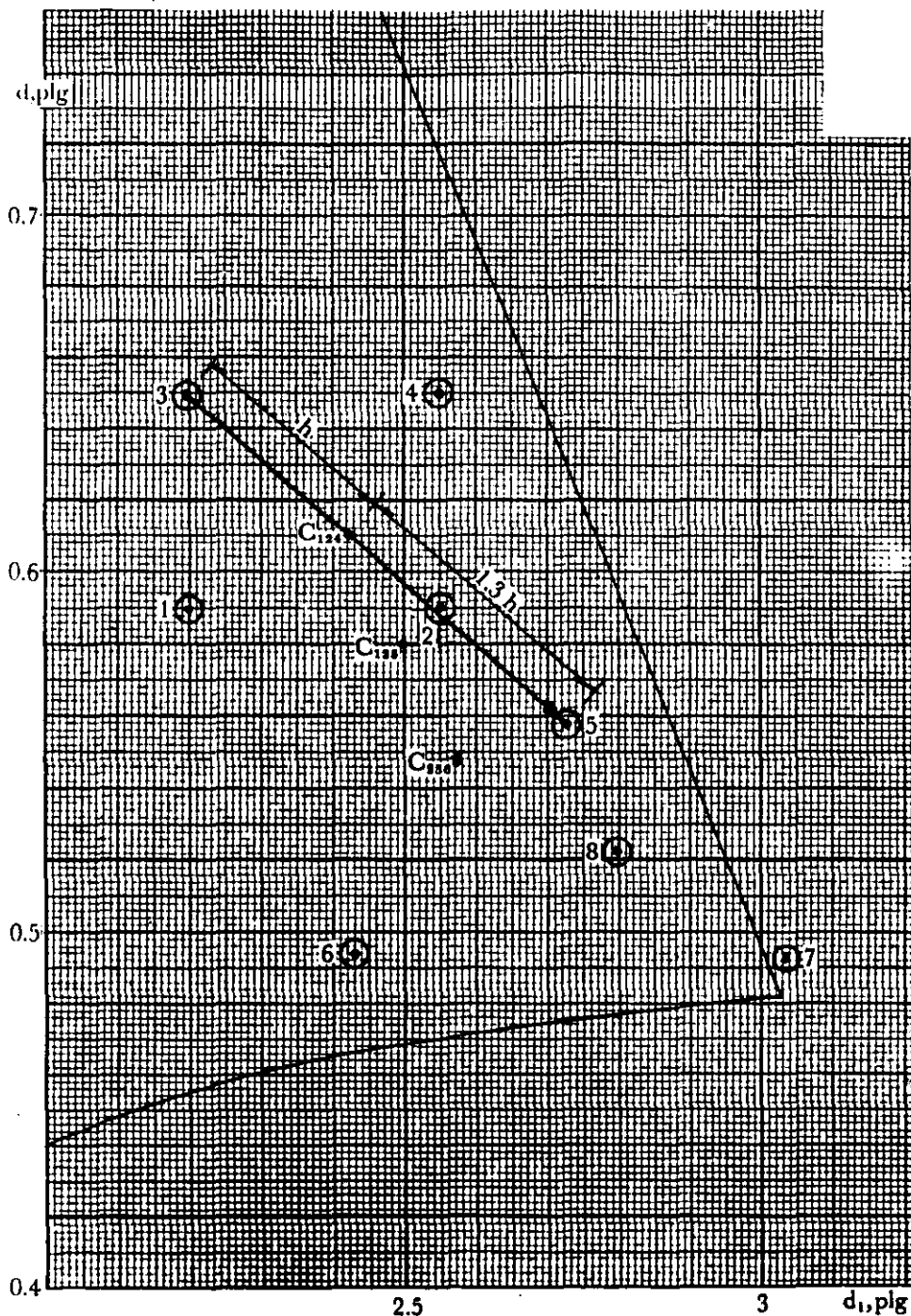


Figura 8. Ejemplo 3. Optimización por el método de Box.

nos limitaremos al uso del programa OPTIM del doctor L. B. Evans, del Instituto Tecnológico de Massachussetts, ver Apéndice 4.

OPTIM está basado en el método de Box, programado en FORTRAN, es sumamente flexible y de manejo muy sencillo.

Para introducir el método se examinará un ejemplo.

**Ejemplo 4**

Resolver el ejemplo 2 mediante OPTIM.

*Solución:*

Para comodidad del lector se repite aquí la formulación inicial



$$A = bh \quad \text{función objetivo}$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &= 3 \frac{M}{bh^2} \\ \Delta &= \frac{ML^2}{Ebh^3} \end{aligned} \right\} \text{restricciones de igualdad}$$

$$\left. \begin{aligned} \tau &\leq \tau_i \\ \Delta &\leq \Delta_i \\ h &\leq h_i \end{aligned} \right\} \text{restricciones de desigualdad}$$

Se seleccionan  $h$  y  $\tau$  como variables de decisión independientes y se disponen las ecuaciones referentes a la función objetivo y las restricciones de igualdad en forma "secuencialmente definida".

Se especifican los parámetros

$$E = 30 \times 10^6 \text{ lb/plg}^2$$

$$M = 18 \times 10^3 \text{ lb-plg}$$

$$L = 100 \text{ in}$$

Los valores limitativos

$$\tau_i = 8\,000 \text{ lb/plg}^2$$

$$\Delta_L = 0.45 \text{ plg}$$

$$h_L = 3 \text{ plg}$$

$$\left. \begin{aligned} E &= p_1 \\ M &= p_2 \\ L &= p_3 \end{aligned} \right\} \text{Definición de parámetros}$$

$$\left. \begin{aligned} h &= x_1 \\ \tau &= x_2 \end{aligned} \right\} \text{Definición de las variables independientes (por lo general se escogen limitadas)}$$

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{12M}{h^2} \\ A &= bh \\ \Delta &= \frac{ML^2}{Ebh^3} \end{aligned} \right\} \text{Definición de variables dependientes}$$

$$Y_1 = \Delta \quad \text{Designación de variable(s) independiente(s) limitada(s)}$$

$$F = A \quad \text{Designación de función objetivo.}$$

TABLA 2  
DISPOSICIÓN DE LOS DATOS

Número de variables independientes	Número de variables dependientes	Número de parámetros	Número máximo de iteraciones	Frecuencia de impresión de iteraciones
2	1	3	200	200
Variables independientes	Límite inferior	Límite superior	Valor inicial	
h	0	3	2	
$\tau$	0	8 000	4 000	
Variable Dependiente				
$\Delta$	0	0.45		
Parámetros	Valor			
E	$30 \times 10^6$			
M	18 000			
L	100			
Función objetivo	Desviación relativa máxima en el valor óptimo	Desviación absoluta máxima en el valor óptimo		
A	0.001	0.002		

(Aproximadamente = valor esperado/1 000)

1	5	7	10	15	20	25	30	35	40	45	50
// JOB											
// DUP											
XDELETE MODEL											
// FOR											
XONE WORD INTEGERS											
XLIST ALL											
** E. CHICUREL - OPTIMIZACION DEL PESO DE UNA VIGA											
SUBROUTINE MODEL											
REAL L,M											
COMMON F, X(5), Y(10), P(20)											
E = P(1)											
M = P(2)											
L = P(3)											
H = X(1)											
TAU = X(2)											
B = 3.0XM/(TAU*H**2)											
A = B*H											
DELTA = (M*L**2)/(E*B*H**3)											
Y(1) = DELTA											
F = A											
RETURN											
END											
// DUP											
XSTORE WS UA MODEL											
// XEQ OPTIM 1											
XLOCAL PTR, OPTRD, RANDI, FAIL, IY, ST, MODEL											
OPTIM PESO VIGA, DELTA MAX = 0.45 IN											
2	1	3	200	200							
H	0.0	3.0	2.0								
TAU	0.0	8000.0	4000.0								
DELTA	0.0	0.45									
E	30000000.0										
M	18000.0										
L	100.0										
A	0.001	0.002									
OPTIM PESO VIGA, DELTA MAX = 0.2 IN											
2	1	3	200	200							
H	0.0	3.0	2.0								
TAU	0.0	8000.0	4000.0								
DELTA	0.0	0.2									
E	30000000.0										
M	18000.0										
L	100.0										
A	0.001	0.002									
TARJETA EN BLANCO											
/X } Según instalación											

Tarjetas de control según instalación. Las que se muestran son las actualmente en uso en el Centro de Cálculo de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Tarjeta fija

Tarjeta fija

Tarjetas fijas

Según instalación

Figura 9. Ejemplo 4. Codificación.

E. CHICUREL - OPTIMIZACION DEL PESO DE UNA VIGA

```

SUBROUTINE MODEL
REAL L,M
COMMON F,X(5),Y(10),P(20)
E = P(1)
M = P(2)
L = P(3)
H = X(1)
TAU = X(2)
B = 3.0*M/(TAU*H**2)
A = B*H
DELTA = (M*L**2)/(E*B*H**3)
Y(1) = DELTA
F = A
RETURN
END
    
```

OPTIM PESO VIGA, DELTA MAX = 0.45 IN

INDEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
H	0.00000E 00	0.30000E 01	0.20000E 01
TAU	0.00000E 00	0.80000E 04	0.40000E 04

DEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
DELTA	0.00000E 00	0.45000E 00	0.22222E 00

PARAMETERS

NAME	VALUE
E	0.30000E 08
M	0.18000E 05
L	0.10000E 03

OBJECTIVE FUNCTION

NAME	VALUE	REL DEV	ABS DEV
A	0.67500E 01	0.10000E-02	0.20000E-02

OPTIM PESO VIGA, DELTA MAX = 0.2 IN

INDEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
H	0.00000E 00	0.30000E 01	0.20000E 01
TAU	0.00000E 00	0.80000E 04	0.10000E 04

DEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
DELTA	0.00000E 00	0.20000E 00	0.55555E-01

PARAMETERS

NAME	VALUE
E	0.30000E 08
M	0.18000E 05
L	0.10000E 03

OBJECTIVE FUNCTION

NAME	VALUE	REL DEV	ABS DEV
A	0.27000E 02	0.10000E-02	0.20000E-02

Figura 10. Ejemplo 4. Programa según lo imprime OPTIM.

Nótese que la secuencia de las ecuaciones es tal que todas las cantidades han quedado definidas por los parámetros  $p_i$  o por las variables de decisión  $x_i$  o bien por cantidades previamente definidas en función de éstas.

Por tal motivo, un conjunto de ecuaciones como el anterior se denominará *formulación secuenciada*.

Para preparar un programa OPTIM se usará la formulación secuenciada como el modelo matemático y además se suministrarán los datos numéricos como se detallan en la tabla 2.

La codificación del programa aparece en la figura 9, y se entiende a la luz de la explicación anterior. Los formatos están indicados y hay que adherirse estrictamente a ellos. (Ver Apéndice 4.)

Nótese que se incluyeron dos juegos de datos, cada uno de los cuales genera una corrida, la primera se refiere al valor limitativo  $\Delta_L = 0.45''$  y la segunda al valor  $\Delta_L = 0.20''$ .

El programa como lo imprime OPTIM aparece en la figura 10. En la figura 11 se muestran las primeras 3 iteraciones. Conviene señalar que sólo se suministra un punto inicial a OPTIM y que éste determina el resto de los puntos necesarios para establecer un Simplex inicial. Los centroides aparecen en la 5a. columna.

Los resultados aparecen en la figura 12 que, como se puede apreciar, coinciden con los obtenidos mediante el uso de regla de cálculo en el ejemplo 2.

VARIABLES IN SIMPLEX (CENTROID IS VERTEX 5)

VERTEX	1	2	3	4	5
H	0.20000E 01	0.19943E 01	0.14989E 01	0.44596E 00	0.14848E 01
TAU	0.40000E 04	0.57396E 04	0.50838E 04	0.14153E 04	0.40597E 04
DELTA	0.22222E 00	0.31977E 00	0.37684E 00	0.35262E 00	
A	0.67500E 01	0.47174E 01	0.70861E 01	0.85552E 02	

ITERATION 1 ENTERING VERTEX 4 FDEV = 0.8083E 02 FMIN = 0.4717E 01

VARIABLES IN SIMPLEX (CENTROID IS VERTEX 5)

VERTEX	1	2	3	4	5
H	0.20000E 01	0.19943E 01	0.14989E 01	0.30000E 01	0.18311E 01
TAU	0.40000E 04	0.57396E 04	0.50838E 04	0.80000E 04	0.49411E 04
DELTA	0.22222E 00	0.31977E 00	0.37684E 00	0.29629E 00	
A	0.67500E 01	0.47174E 01	0.70861E 01	0.22500E 01	

ITERATION 2 ENTERING VERTEX 3 FDEV = 0.4836E 01 FMIN = 0.2250E 01

VARIABLES IN SIMPLEX (CENTROID IS VERTEX 5)

VERTEX	1	2	3	4	5
H	0.20000E 01	0.19943E 01	0.30000E 01	0.30000E 01	0.23314E 01
TAU	0.40000E 04	0.57396E 04	0.69913E 04	0.80000E 04	0.59132E 04
DELTA	0.22222E 00	0.31977E 00	0.25893E 00	0.29629E 00	
A	0.67500E 01	0.47174E 01	0.25746E 01	0.22500E 01	

ITERATION 3 ENTERING VERTEX 1 FDEV = 0.4500E 01 FMIN = 0.2250E 01

VARIABLES IN SIMPLEX (CENTROID IS VERTEX 5)

Figura 11. Ejemplo 4. Primeras tres iteraciones.

OPTIM PESO VIGA. DELTA MAX = 0.45 IN  
 PROCEDURE HAS CONVERGED IN 6 ITERATIONS  
 THE SOLUTION IS AS FOLLOWS

INDEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
H	0.00000E 00	0.30000E 01	0.30000E 01
TAU	0.00000E 00	0.80000E 04	0.80000E 04

DEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
DELTA	0.00000E 00	0.45000E 00	0.29629E 00

PARAMETERS

NAME	VALUE
E	0.30000E 08
M	0.18000E 05
L	0.10000E 03

OBJECTIVE FUNCTION

NAME	VALUE	REL DEV	ABS DEV
A	0.22500E 01	0.10000E-02	0.20000E-02

OPTIM PESO VIGA. DELTA MAX = 0.2 IN  
 PROCEDURE HAS CONVERGED IN 19 ITERATIONS  
 THE SOLUTION IS AS FOLLOWS

INDEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
H	0.00000E 00	0.30000E 01	0.30000E 01
TAU	0.00000E 00	0.80000E 04	0.53988E 04

DEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
DELTA	0.00000E 00	0.20000E 00	0.19995E 00

PARAMETERS

NAME	VALUE
E	0.30000E 08
M	0.18000E 05
L	0.10000E 03

OBJECTIVE FUNCTION

NAME	VALUE	REL DEV	ABS DEV
A	0.33340E 01	0.10000E-02	0.20000E-02

Figura 12. Ejemplo 4. Resultados.

0.7 Formulación secuenciada 10

La formulación secuenciada se puede generalizar de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
 U_{p1} &= p_1 \\
 U_{p2} &= p_2 \\
 &\vdots \\
 U_{pm} &= p_m \\
 U_{x1} &= x_1 \\
 U_{x2} &= x_2 \\
 &\vdots \\
 U_{xn} &= x_n \\
 U_1 &= U_1 (U_{p1}, \dots, U_{pm}, U_{x1}, \dots, U_{xn}) \\
 U_2 &= U_2 (U_{p1}, \dots, U_{pm}, U_{x1}, \dots, U_{xn}, U_1) \\
 U_3 &= U_3 (U_{p1}, \dots, U_{pm}, U_{x1}, \dots, U_{xn}, U_1, U_2) \\
 &\vdots \\
 U_k &= U_k (U_{p1}, \dots, U_{pm}, U_{x1}, \dots, U_{xn}, U_1, U_2, \\
 &\quad \quad \quad U_3, \dots, U_{k-1}) \\
 y_1 &= U_{y1} \\
 y_2 &= U_{y2} \\
 &\vdots \\
 y_l &= U_{yl} \\
 F &= U_F
 \end{aligned}$$

donde:

1. Los parámetros son  
 $p_1, p_2, \dots, p_m$
2. Las variables independientes (que por lo general se escogen *limitadas*) son:  
 $x_1, x_2, \dots, x_n$
3. Las variables dependientes son:  
 $U_1, U_2, \dots, U_k$   
incluyendo a la función objetivo.
4. Las variables dependientes *limitadas* o a imprimir son:  
 $y_1, y_2, \dots, y_l$
5. La función objetivo es:  
 $F$

6. Las variables

$$U_{y1}, U_{y2}, \dots, U_{yl}, U_F$$

constituyen un subconjunto del conjunto integrado por las variables

$$U_1, U_2, \dots, U_k$$

7. Todas las U tienen nombres según lo desee el usuario respetando, en el programa, las restricciones que al respecto impone el lenguaje FORTRAN.

La formulación secuenciada se debe establecer en forma tal que n sea mínima, es decir, con el número más pequeño de variables independientes, pues, esto significa que se mejora la posibilidad de convergencia.  
 $n \geq \text{No. de variables} - \text{No. restricciones de igualdad}$   
 Ver sección 8.4

8.8 Tratamiento de variables discretas

En el siguiente ejemplo se ilustra cómo se pueden tratar las variables discretas.

Ejemplo 5.

Establecer la formulación secuenciada correspondiente y resolver mediante OPTIM el problema del ejemplo 3.

Solución:

Formulación secuenciada

$$\begin{aligned}
 k &= p_1 \\
 Q &= p_2 \\
 G &= p_3 \\
 d &= x_1 \\
 D_1 &= x_2 \\
 D_e &= D_1 + 2d \\
 D_m &= (D_1 + D_e)/2 \\
 N &= G d^4 / 8k d_m^2 \\
 L_c &= Nd \\
 W &= (4 D_m - d) / 4 (D_m - d) + 0.615 d / D_m \\
 \tau &= 8 Q D_m W / d^3 \\
 y_1 &= D_e \\
 y_2 &= \tau \\
 F &= \cancel{L_c} \\
 d &\leq 1 \\
 D_1 &\geq 2 \\
 D_e &\leq 4 \\
 \tau &\leq 40 \times 10^3 \\
 k &= 38 \\
 Q &= 418 \\
 G &= 12 \times 10^6
 \end{aligned}$$

## 182 Diseño óptimo mediante computadora

El programa se muestra en la figura 13 y los resultados en la figura 14. Puesto que  $d$  se trató como variable continua su valor correspondiente al óptimo está dado en la figura 14 y es

$$d = 0.483$$

El óptimo discreto debe corresponder o bien a  $d = \frac{1}{2}'' = 0.5''$  ó  $d = \frac{15}{32}'' = 0.46875''$ . Para determinar cuál de los dos se modificó el programa de tal manera que  $d$  se considera un parámetro (ver figuras 15 y 16), y se hizo una corrida para cada uno de los valores mencionados. Los resultados aparecen en la figura 17, de donde se obtiene

PAGE 3

E. CHICUREL - OPTIMIZACION RESORTE

```

SUBROUTINE MODEL
REAL N,K,LC
COMMON F,X(5),Y(10),P(20)
G = P(1)
K = P(2)
Q = P(3)
D = X(1)
DI = X(2)
DE = DI + 2.0 * D
DM = (DI + DE)/2.0
N = (G * D ** 4)/(8.0 * K * DM**3)
LC = N * D
W = ((4.0*DM-D)/(4.0*(DM-D)))+0.615*D/DM
TAU = 8.0*Q*DM*W/(3.1416*D**3)
Y(1) = DE
Y(2) = TAU
F = LC
RETURN
END
    
```

### OPTIMIZACION LONGITUD DE RESORTE

#### INDEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
D	0.00000E 00	0.10000E 01	0.66000E 00
DI	0.20000E 01	0.40000E 01	0.22000E 01

#### DEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
DE	0.20000E 01	0.40000E 01	0.35199E 01
TAU	0.00000E 00	0.40000E 03	0.14474E 03

#### PARAMETERS

NAME	VALUE
G	0.12000E 08
K	0.38000E 02
Q	0.41800E 03

#### OBJECTIVE FUNCTION

NAME	VALUE	REL DEV	ABS DEV
LC	0.21131E 03	0.10000E-02	0.10000E-01

Figura 13. Ejemplo 3. Programa.

OPTIMIZACION LONGITUD DE RESORTE  
 PROCEDURE HAS CONVERGED IN 18 ITERATIONS  
 THE SOLUTION IS AS FOLLOWS

INDEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
D	0.00000E 00	0.10000E 01	0.48311E 00
DI	0.20000E 01	0.40000E 01	0.30335E 01

DEPENDENT VARIABLES

NAME	LOWER BOUND	UPPER BOUND	VALUE
DE	0.20000E 01	0.40000E 01	0.39997E 01
TAU	0.00000E 00	0.40000E 05	0.39965E 05

PARAMETERS

NAME	VALUE
G	0.12000E 08
K	0.38000E 02
Q	0.41800E 03

OBJECTIVE FUNCTION

NAME	VALUE	REL DEV	ABS DEV
LC	0.23888E 02	0.10000E-02	0.10000E-01

Figura 14. Ejemplo 5. Resultados considerando a d, el diámetro del alambre, como variable continua.

$$d = 0.5'' \quad L_c = 28.8''$$

$$d = 0.46875'' \quad L_c = 28.1''$$

por lo cual, el segundo se considera como el óptimo discreto.

En la figura 17 aparecen también los valores correspondientes al óptimo de

$$D_1 = 2.7''$$

$$\tau = 40\,000 \text{ lb/in}^2$$

$$D_2 = 3.6''$$

Una vez discretizada la variable d existe la posibilidad que el valor óptimo ya no se encuentre en la vecindad del óptimo continuo y se podría pensar que valdría la pena hacer una corrida para cada uno de los valores discretos. Sin embargo, en el caso general de diseño, conviene mantenerse en una región am-

plia de valores bajos de la función objetivo. Esto se debe a que:

1. Las características de los materiales no se pueden controlar con mucha precisión.
2. Hay variaciones en la forma y dimensiones de las piezas, particularmente en los procesos de fabricación más económicos.
3. Los ajustes de ensamble pueden variar las condiciones de operación.
4. La operación misma puede requerir variaciones en las variables independientes (de optimización) en la vecindad del punto óptimo.

Como señala el doctor Marco Antonio Murray Lasso, en casos excepcionales, de diseño muy refinado; conviene operar en el óptimo verdadero aunque éste sea un punto aislado alejado de una región baja y a pesar de que esto resulte en un diseño muy costoso.

Es menester señalar que, aunque no se muestran, fue necesario hacer varias corridas comenzando con

```

SUBROUTINE MODEL
REAL N,K,LC
COMMON F,X(5),Y(10),P(20)
G = P(1)
K = P(2)
Q = P(3)
D = P(4)
DI = X(1)
DE = DI + 2.0 * D
DM = (DI + DE)/2.0
N = (G * D ** 4)/(8.0 * K * DM**3)
LC = N * D
W = ((4.0*DM-D)/(4.0*(DM-D)))+0.615*D/DM
TAU = 8.0*Q*DM*W/(3.1416*D**3)
Y(1) = DE
Y(2) = TAU
F = LC
RETURN
END

```

Figura 15. Ejemplo 5. Primera parte del programa, o sea, el modelo matemático. Diámetro del alambre  $d$  discretizado.

diferentes puntos iniciales para poder asegurar la obtención del mínimo, pues *OPTIM* se topa con problemas semejantes a los de Baldomero.

### 8.8 Regresiones

La información requerida para el diseño que se obtiene de catálogos de fabricantes, manuales y libros de texto, frecuentemente aparece en forma tabular o gráfica.

En muchas ocasiones conviene tener dicha información en forma de relaciones matemáticas. Para tal objeto se puede efectuar una regresión por mínimos cuadrados.

El método se puede resumir de la siguiente manera:

1. Se supone la forma general de la relación funcional con ciertos parámetros variables.
2. Se establecen los errores en varios puntos de la curva supuesta, con relación a los valores gráficos o tabulares dados, en función de los parámetros.
3. Se establece la suma de los cuadrados de los errores a que se refiere el inciso 2.
4. Se determina el valor de los parámetros variables que hace mínima la suma a que se refiere el inciso 3.

El proceso se puede llevar a cabo analítica o numéricamente.

En la forma analítica se obtiene la mínima suma por cálculo, es decir, diferenciando parcialmente dicha suma con relación a cada uno de los parámetros variables y requiriendo la anulación de cada una de las derivadas.

En la forma numérica se lleva a cabo un proceso de optimización de la suma considerando a los parámetros variables como las variables independientes de decisión y, desde luego, a la suma como la función objetivo a minimizar.

Simbólicamente se tiene:

#### Problema

Establecer una relación entre "y" y "x" que ligue a un conjunto de valores tabulares correspondientes dados:

$x_{T1}$	$y_{T1}$
$x_{T2}$	$y_{T2}$
$x_{T3}$	$y_{T3}$
...	...
$x_{TN}$	$y_{TN}$

#### Procedimiento:

Suponer

$$y = y(a_1, a_2, \dots, a_p, x)$$



METODOLOGIA PARA OPTIMACION DE ENGRANES CONICO-ESPIRALES  
SU APLICACION AL OMNIVIRAMOVIL

Enrique Chicurel Uziel<sup>1</sup>  
Filiberto Gutiérrez Martínez<sup>1</sup>  
Miguel Angel Bazúa Witte<sup>2</sup>

Proyecto 8158

Junio de 1990

- (1) Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM  
(2) Estudiante de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM

## I N D I C E

NOMENCLATURA	1
OBJETIVOS	3
ANTECEDENTES	4
INTRODUCCION	8
ALGUNOS CONCEPTOS FUNDAMENTALES	9
AMPLIFICADOR	
Procedimiento	12
Resultados del rediseño	23
REDUCTOR	
Procedimiento	30
Resultados del rediseño	37
RAYADO	43
COMPARACION DE LOS DOS JUEGOS DE ENGRANES OPTIMADOS	45
MONTAJE Y ACABADOS	48
CONCLUSIONES	50
PERSPECTIVAS	52
REFERENCIAS	54
APENDICE	55

## N O M E N C L A T U R A

- $a$  = Adendo  
 $A_o$  = Largo de cono (generatriz del cono de paso) Fig. 6  
 $C_p$  = Constante elástica para el cálculo del esfuerzo de contacto  
 $D$  = Diámetro de paso  
 $D_o$  = Diámetro externo  
 $F$  = Ancho de cara, Fig. 6  
 $f_s$  = Factor de carga  
 $I$  = Factor geométrico para el cálculo del esfuerzo de Herz  
 $J$  = Factor geométrico para el cálculo del esfuerzo de flexión  
 $k_v$  = Factor dinámico  
 $m_F$  = Razón de contacto de cara  
 $m_G$  = Razón de reducción o amplificación =  $N_2/N_1 = D_2/D_1$   
 $M$  = Módulo,  $1/P$   
 $n$  = Velocidad angular  
 $N$  = Número de dientes  
 $N_c$  = Número crítico de rayado  
 $N_s$  = Número aplicado de rayado o estriación

- $P$  = Paso diametral =  $N/D = \pi/p_c$   
 $P_C$  = Paso diametral calculado  
 $P_S$  = Paso diametral supuesto  
 $p_c$  = Paso circular =  $\pi D/N = \pi/P$   
 $R$  = Constante para el cálculo de  $k_v$   
 $S$  = Límite de fatiga  
 $S_a$  = Arco de avance  
 $S_F$  =  $\sigma_F / \sigma_{FR}$   
 $S_H$  =  $\sigma_H / \sigma_{HR}$   
 $S_s$  = Límite de fatiga superficial  
 $T$  = Par  
 $V$  = Velocidad periférica en el diámetro de paso  
 $W_t$  = Carga tangencial  
 $\beta$  =  $F/A_o$   
 $\gamma$  = Angulo de paso  
 $\sigma_F$  = Esfuerzo de flexión en los engranes cónico espirales  
 $\sigma_{FR}$  = Esfuerzo de flexión en el piñón cónico recto.  
 $\sigma_H$  = Esfuerzo de Herz o de contacto en los engranes cónico es  
rales  
 $\sigma_{HR}$  = Esfuerzo de Herz en los engranes cónico rectos.  
 $\phi$  = Angulo de presión  
 $\psi$  = Angulo de hélice, Fig. 7  
 $( )_1$  = Referente al piñón  
 $( )_2$  = Referente al engrane

## OBJETIVOS

- 1.- Disminuir el nivel de ruido en la operación del vehículo "Omniviramóvil"
- 2.- Desarrollar una metodología para la optimación de engranes cónico espirales.

### ALGUNOS CONCEPTOS FUNDAMENTALES

En el diseño de engranes se busca básicamente evitar la fractura por flexión manteniendo a los esfuerzos de flexión abajo del límite de fatiga

$$\sigma_{F1} < S \quad \sigma_{F2} < S$$

y asimismo, para evitar la falla por picadura manteniendo al esfuerzo de contacto abajo del límite de fatiga superficial

$$\sigma_H < S_s$$

Para disminuir el ruido se requiere maximizar la razón de contacto de cara

$$m_F = S_a / p_c$$

que es igual al número de dientes que cruzan o intersecan a un radio, Fig. 7.

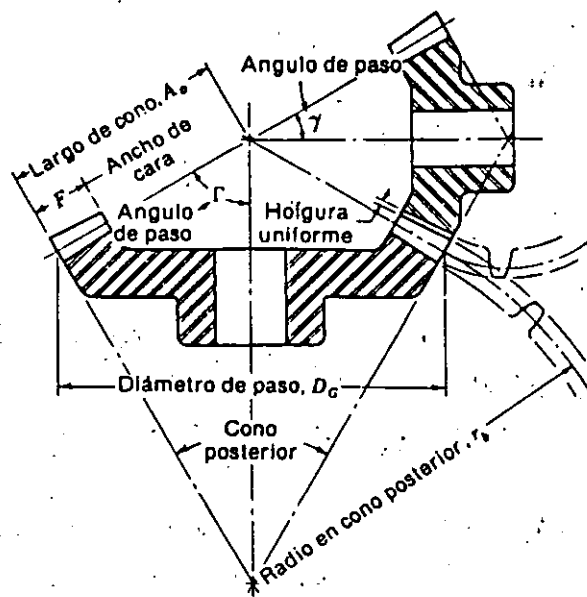


Fig. 6. Terminología de engranes cónicos. Ref.[2]

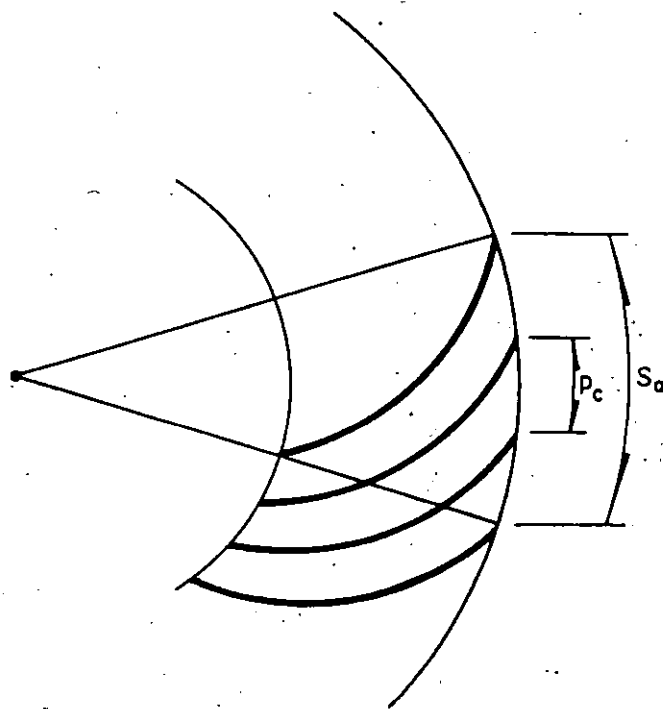


Fig. 7. Razón de contacto de cara,  $m_F = S_a/P_c$

Otra razón importante es

$$\beta = F/A_o$$

Pues mientras más grande es, mayor es el par que se puede transmitir pero menor es el tamaño de los dientes en el diámetro menor del engrane y, por lo tanto, mayor es el daño que se puede causar por efectos de desalineamiento.

Los esfuerzos aplicados están dados por las fórmulas:

$$\sigma_F = f_s W_t P / (k_v FJ) \quad (\text{Lewis})$$

$$\sigma_H = C_p \sqrt{f_s W_t / (k_v F D_1 I)} \quad (\text{Herz})$$



#### AMPLIFICADOR

El amplificador, diseñado por el Dr. C. Szczepaniak<sup>1</sup>, se muestra en las Figs. 8 y 9.

#### PROCEDIMIENTO

Puesto que se tenían ciertas dudas respecto a los límites de fatiga de los materiales tanto en flexión como superficial se optó por mantener los esfuerzos de los nuevos engranes abajo o, cuando más, iguales a los valores de los esfuerzos aplicados en los engranes cónico rectos originales pues se comprobó mediante una inspección visual que habían resistido bien el uso.

Por tal motivo, con los datos de los engranes originales:

<sup>1</sup> Director, Instituto de Investigación en vehículos, Universidad Politécnica de Lodz, Polonia.

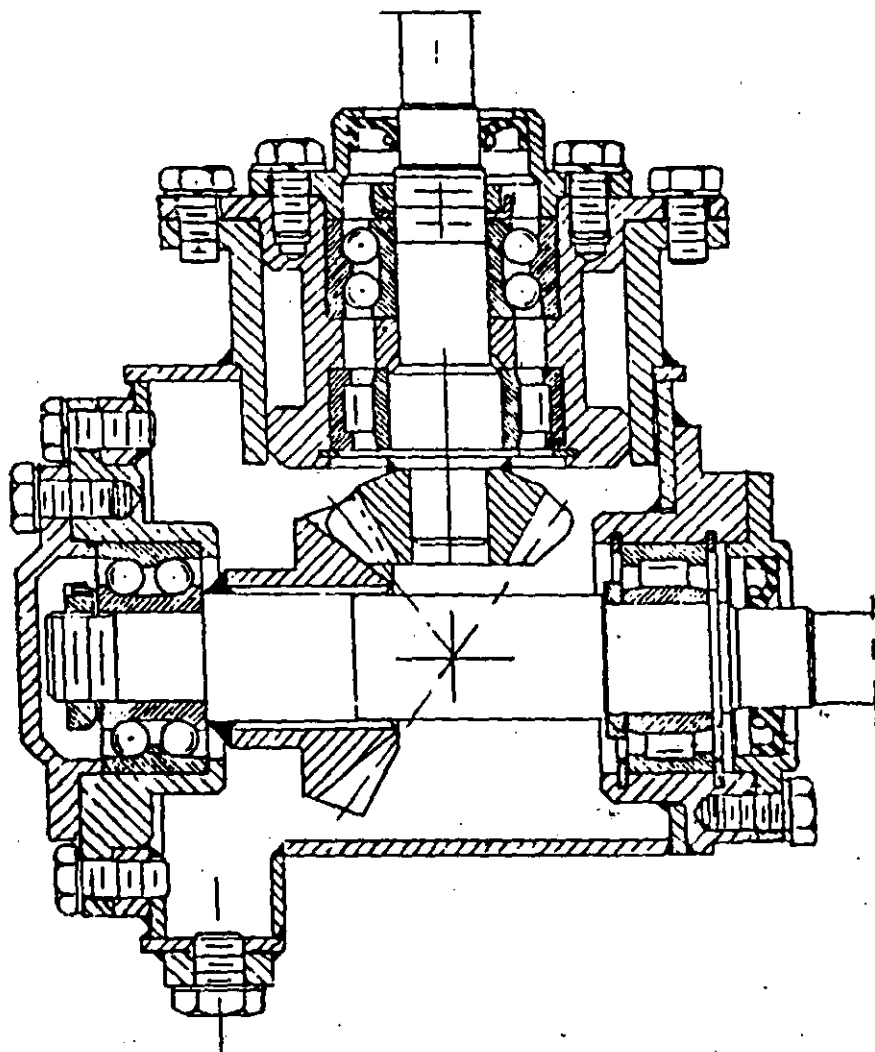


Fig. 8. Dibujo del amplificador con engranes cónico-rectos

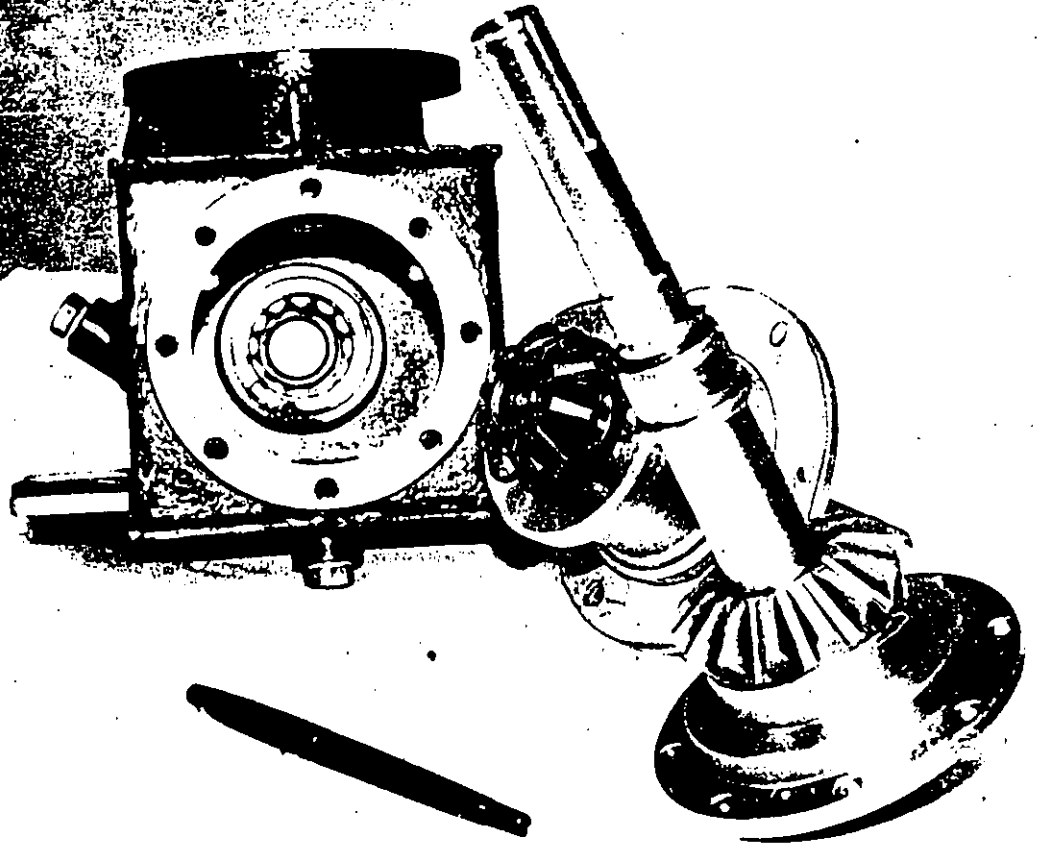


Fig. 9. Amplificador con engranes cónico-rectos, desensamblado.

$$N_1 = 10$$

$$D_{o1} = 2.23 \text{ plg}$$

$$N_2 = 14$$

$$D_{o2} = 2.82 \text{ plg}$$

Se calcularon los esfuerzos

$$\sigma_{FR} = 44,700 \text{ lbf/plg}^2$$

$$\sigma_{HR} = 326,000 \text{ lbf/plg}^2$$

y se establecieron las limitaciones

$$S_F = \sigma_F / \sigma_{FR} \leq 1 \quad S_H = \sigma_H / \sigma_{HR} \leq 1$$

Por otro lado, existe un sistema Gleason de engranes cónico espirales tal que el esfuerzo de flexión en el piñón, normalmente mayor, es en este caso idéntico al del engrane para

$$\psi = 35^\circ$$

$$\phi = 20^\circ$$

lo cual conduce a engranes sumamente compactos. Dada la limitación de espacio impuesta por la conservación de la caja existente se optó por el mencionado sistema.

Puesto que aumentando  $D$  solo se pueden aumentar  $m_F$  y disminuir  $S_F$  y  $S_H$  se fijó el diámetro exterior en

$$D_{o2} = 85 \text{ mm}$$

que es el diámetro máximo que permite la boca de la caja por donde ha de entrar el engrane.

Son dignas de consideración las limitaciones:

$$1.25 \leq m_F \leq 2$$

La limitación inferior es una norma AGMA<sup>1</sup> que se justifica porque si se viola se pierde esencialmente la razón para recurrir a dientes espirales.

La limitación superior fue sugerida por el Ing. Jesús López Rodríguez de la empresa Engranés Cónicos S.A. de Querétato Qro. quien señaló que, en su experiencia, hasta ese valor se disminuye el ruido pero excediéndolo se aumenta.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se estableció la formulación secuenciada 1. Nótese que todas las cantidades a la izquierda de las ecuaciones están expresadas en función de las especificaciones o de otras cantidades ya definidas previamente por otra ecuación, salvo  $P$  y  $\beta$ . De tal suerte que si se hicieran las sustituciones indicadas se obtendrían explícitamente:

$$m_F = m_F (P, \beta)$$

$$S_F = S_F (P, \beta)$$

$$S_H = S_H (P, \beta)$$

Por tal motivo se consideran a  $P$  y  $\beta$  como las variables independientes, a todas las demás como variables dependientes y a  $m_F$  como la función objetivo.

Puesto que solo se tienen dos variables independientes no hubo necesidad de utilizar la computadora, ni siquiera un algoritmo, sino que se recurrió al método gráfico de R.C. Johnson. Esto tiene la ventaja adicional que las relaciones funcionales

$$m_F = m_F (FP)$$

$$J = J (N_1, N_2)$$

$$I = I (N_1, N_2)$$

Presentadas en forma gráfica, Refs. 1 y 2, se pueden manejar de esa manera sin necesidad de convertirlas en expresiones analíticas.

1 AGMA es la American Gear Manufacturing Association, (Asociación de Fabricantes de Engranés de los Estados Unidos).

# FORMULACION 1

## FORMULACION SECUENCIADA

### ESPECIFICACIONES

- $\sigma_{FR} = 44,700$  Lbf/plg<sup>2</sup>
- $\sigma_{HR} = 326,000$  Lbf/plg<sup>2</sup>
- $m_G = 1.4$
- $D_{e2} = 3.3465$  plg = 85 mm
- $T_1 = 823$  Lbf - plg
- $n_1 = 840$  RPM
- $C_p = 2800$  Lbf<sup>1/2</sup>/plg
- $R = 78$  ft<sup>1/2</sup>/min<sup>1/2</sup>

### RELACIONES GEOMETRICAS

- $\gamma_2 = \arctan m_G$
- $a_2 = (0.46 + 0.39/m^2)/P$
- $D_2 = D_{e2} - 2a_2 \cos \gamma_2$
- $D_1 = D_2/m_G$
- $A_o = D_1 \sqrt{1+m_G^2}/2$
- $N_1 = P D_1$
- $N_2 = m_G N_1$
- $F = 8 A_o$
- $m_F = m_F(FP)$

### RELACIONES DINAMICAS

- $V = \pi D_1 n_1$
- $K_V = \sqrt{R / (R + V)}$
- $W_t = 2T_1 / D_1$

### ESFUERZO DE FLEXION

- $J = J(N_1, N_2)$
- $\sigma_F = W_t P / (K_V F J)$
- $S_F = \sigma_F / \sigma_{FR}$

### ESFUERZO DE CONTACTO

- $I = I(N_1, N_2)$
- $\sigma_{H1} = C_p \sqrt{W_t / (k_V F D_1 I)}$
- $S_{H1} = \sigma_{H1} / \sigma_{HR}$

### LIMITACIONES

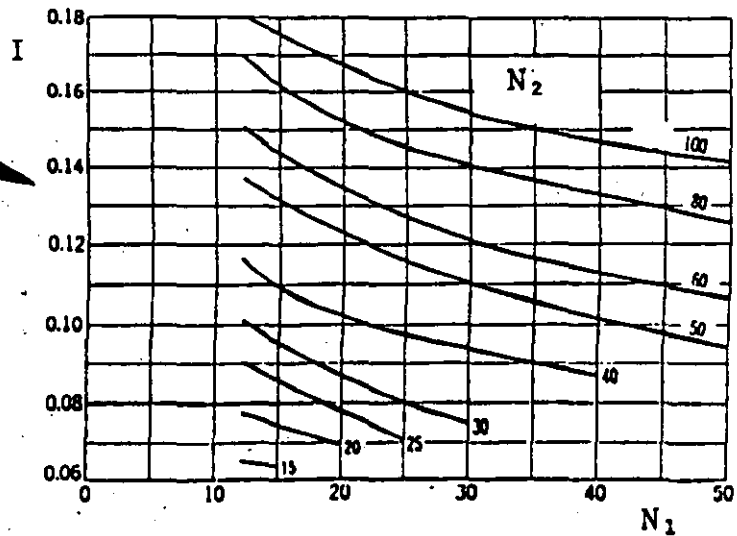
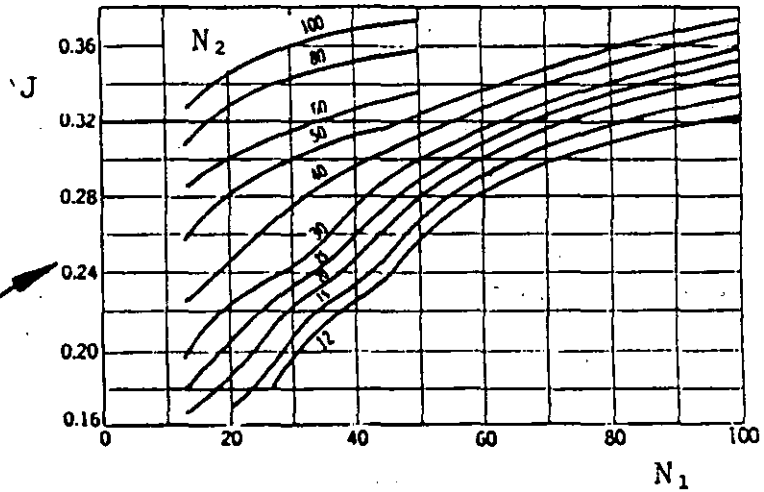
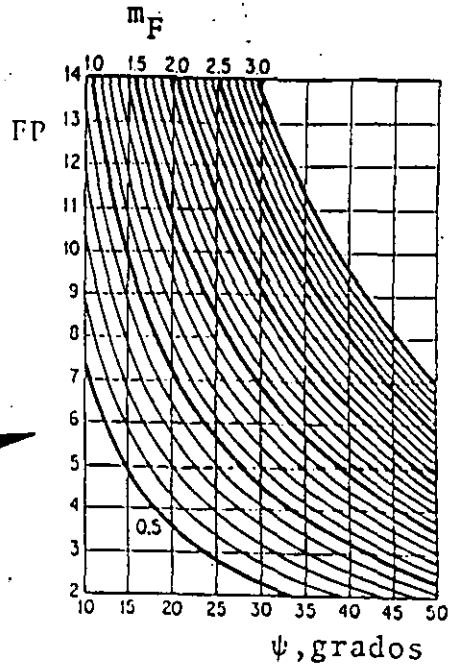
- $B \leq 0.3$  (AGMA)
- $S_F \leq 1$
- $S_{H1} \leq 1$
- $1.25 \leq m_F \leq 2$

### VARIABLES INDEPENDIENTES

P, B

### FUNCION OBJETIVO

$m_F$



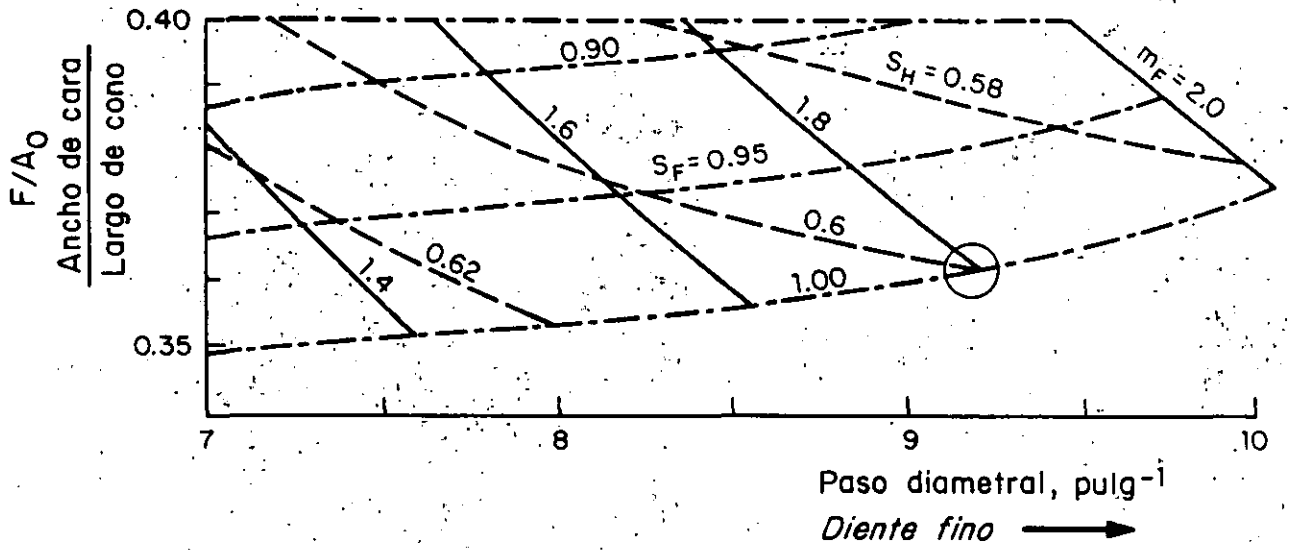


Fig. 10. Región de diseño factible.

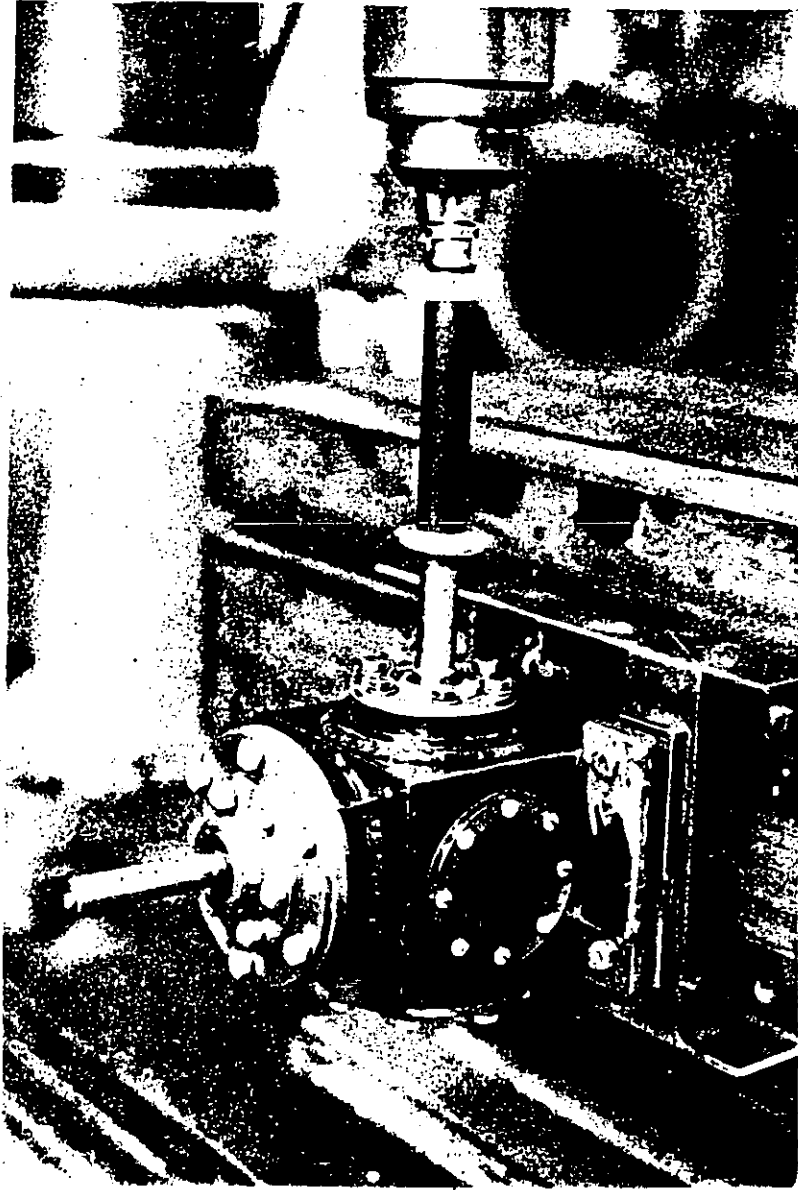


Fig. 11. Amplificador con engranes cónico-espinales montado para pruebas en un taladro radial.





Fig. 15. Piñones del amplificador; original a la izquierda, optimado a la derecha.

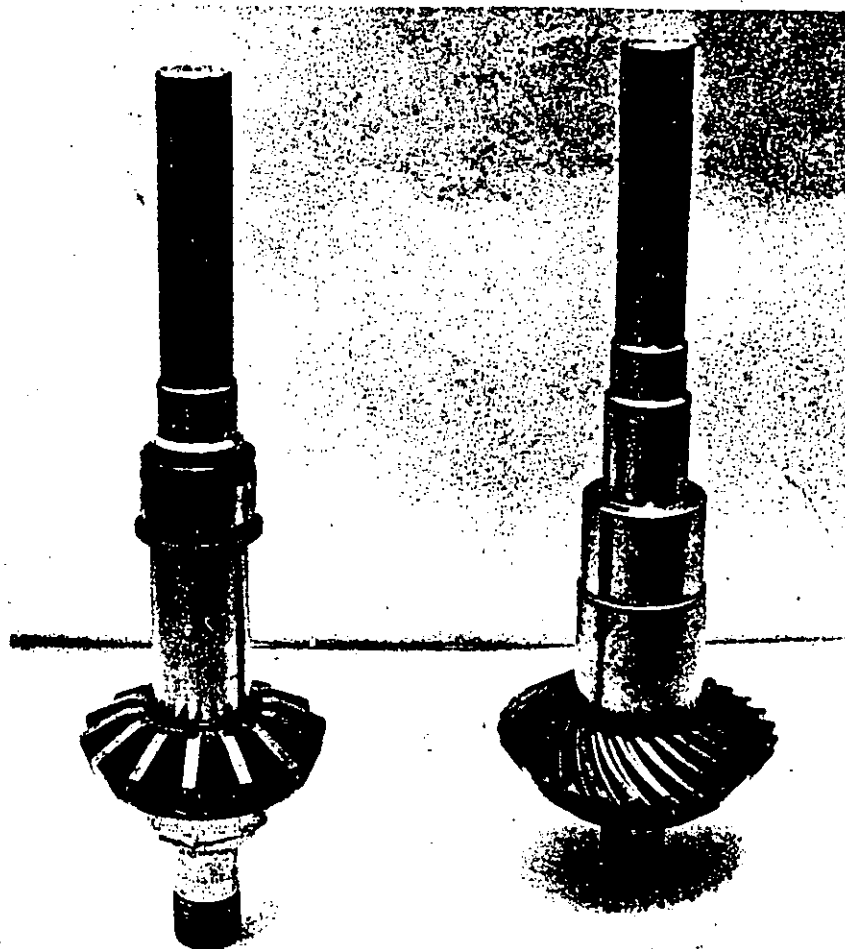
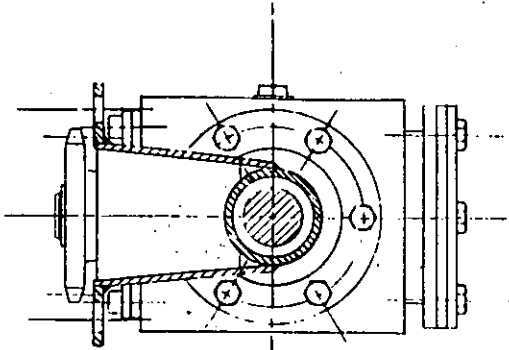
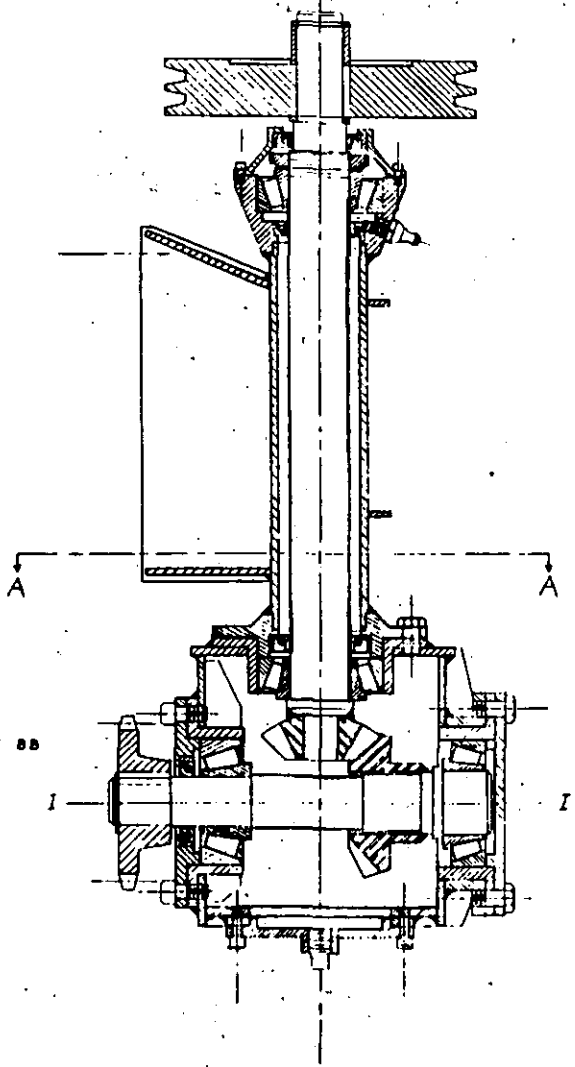


Fig. 16. Engranes del amplificador; original a la izquierda, optimado a la derecha.

PROYECTO	INSTRUMENTOS	INSTITUTO O	MINERIA
ESTADO		PROYECTO	
FECHA		INSTRUCION	AMULE GENERAL
		PROYECTO Y EJECUCION	GENERAL
		REVISADO Y APROBADO POR	
		AUTOMATICO E. U. J.	
		SEÑALADO EN	24-2105
		ACORDADO EN	FECHA 17/1/50



CORTE AA



CORTE BB

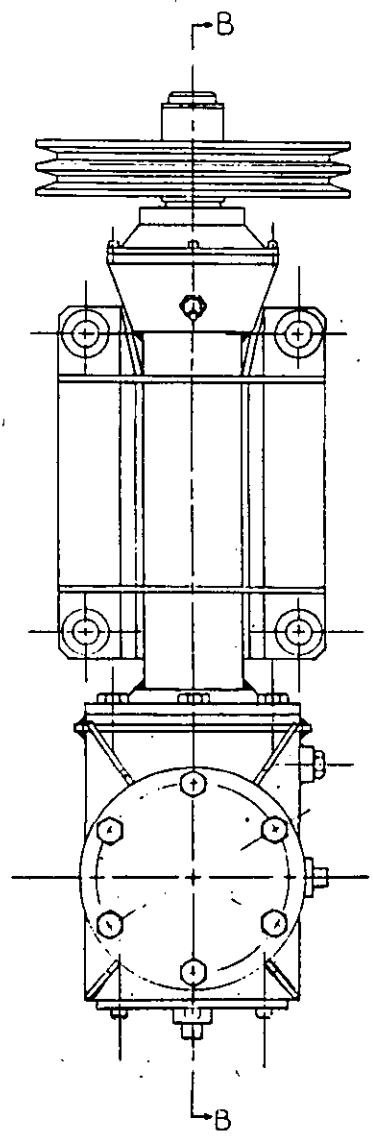


Fig. 17. Dibujos del reductor con engranes cónico-rectos.

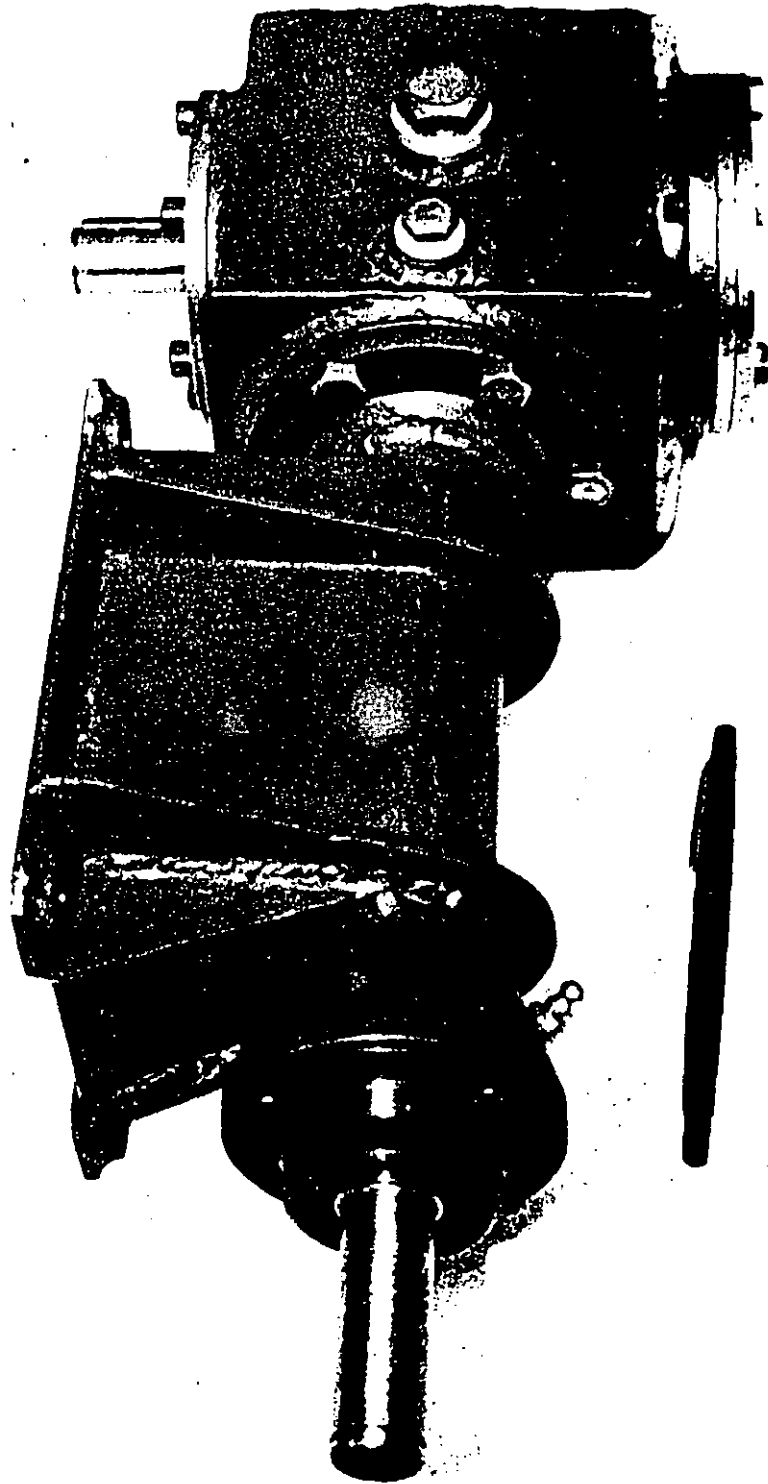


Fig. 18. Reductor ensamblado.

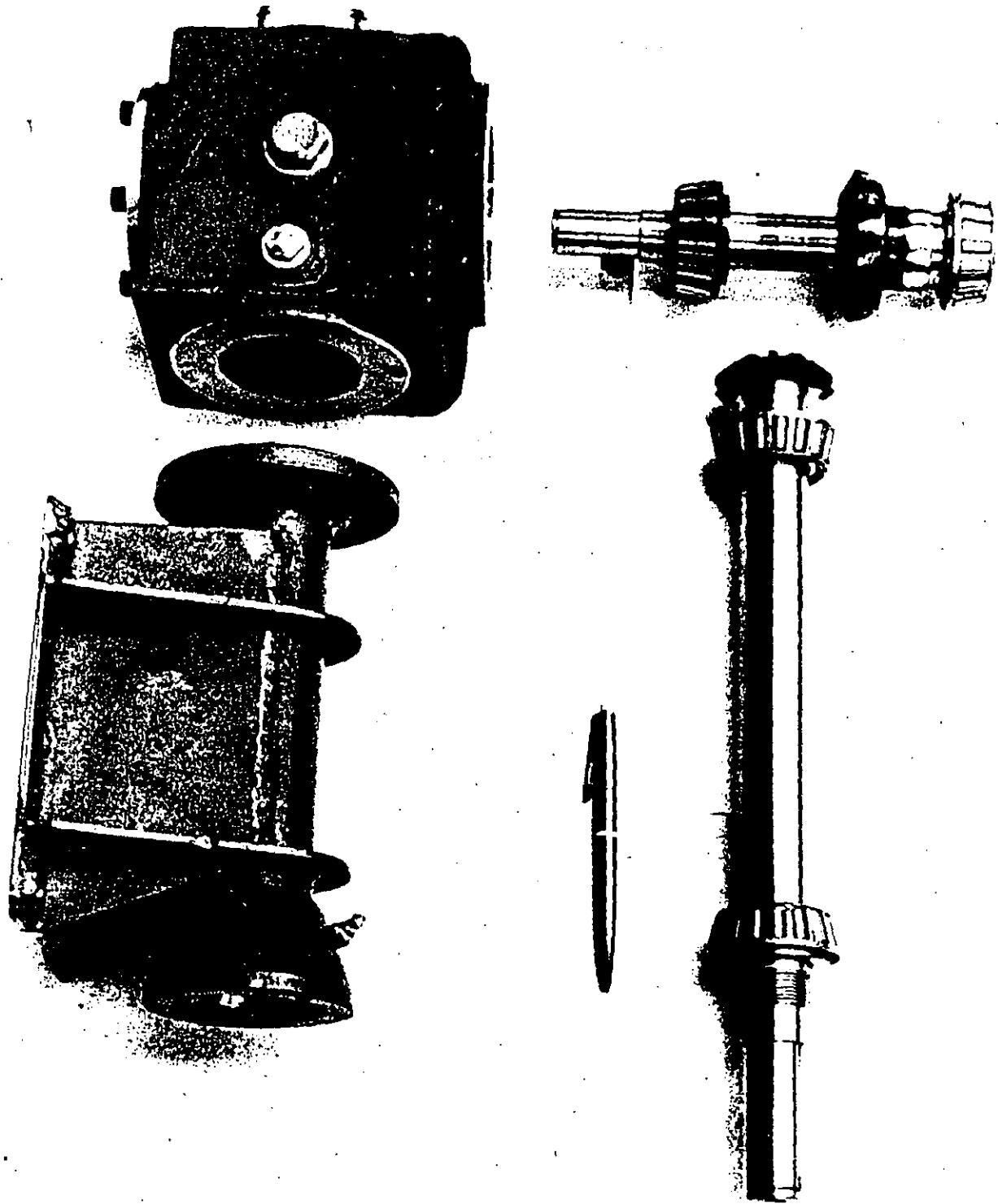


Fig. 19. Reductor con engranes rectos, desensamblado.

56

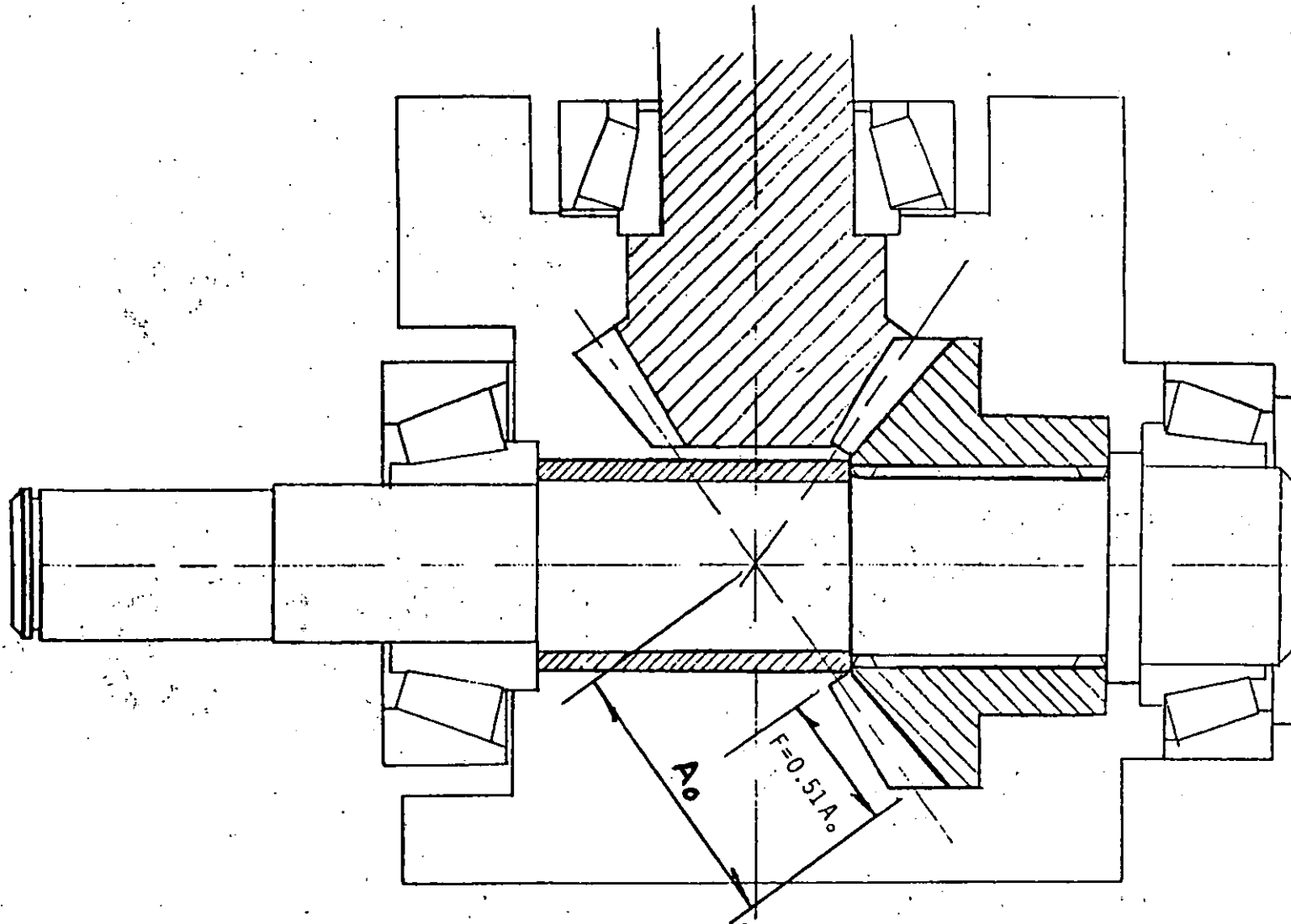


Fig. 20. Ensamble de los engranes del reductor. Nótese que si "F" fuera mayor, el engrane no tendría superficie alguna para apoyarse en el espaciador.

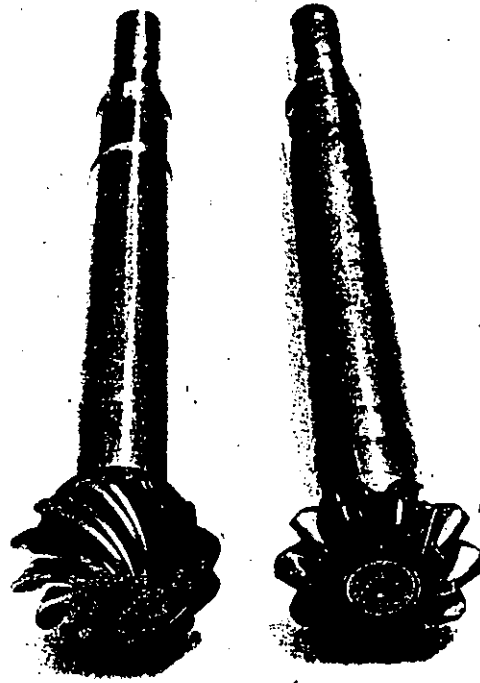


Fig. 23. Piñones del reductor; original a la derecha, optimado a la izquierda.

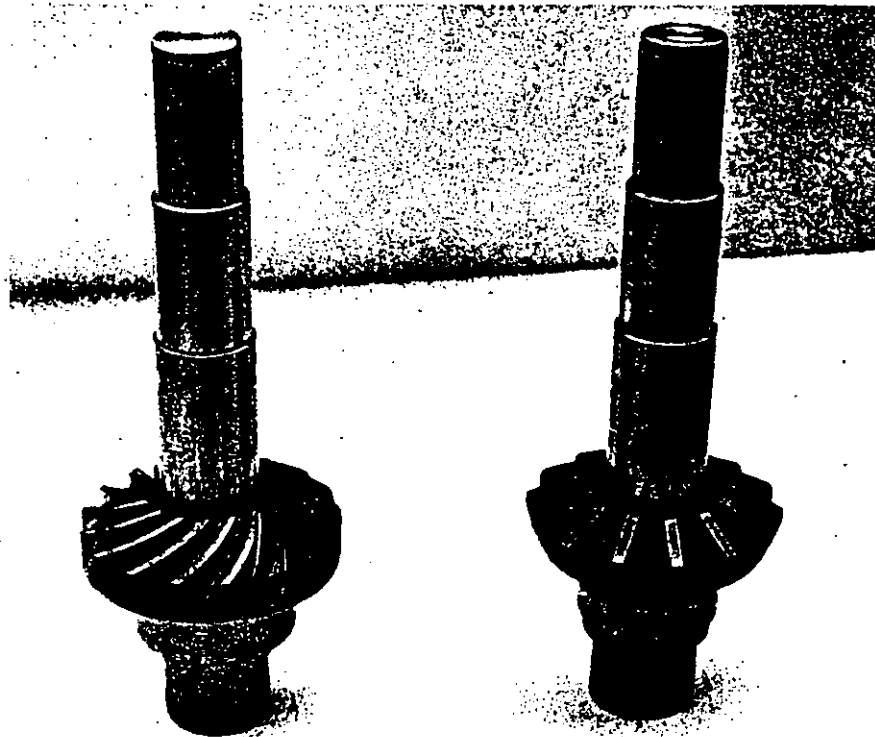


Fig. 24. Engranés del reductor; original a la derecha, optimado a la izquierda.

## RAYADO

En el diseño de engranes, además de que se busca evitar las fallas de fractura y picadura también se busca evitar la falla de rayado, Ref. 3. Para esto se requiere que.

$$N_s \leq N_c$$

donde  $N_s$  está dado por la relación empírica:

$$N_s = (W_t/F)^{3/4} n_1^{1/2}/p^{1/4}$$

que es válida únicamente para unidades inglesas. A continuación se dan los valores optimados de todas las cantidades involucradas en la anterior relación para ambas cajas de engranes.

	W	F	$n_1$	P	$N_s$
	Lb	Plg	RPM	Plg <sup>-1</sup>	
Amplificador	697.5	2.360	840	8.899	2889
Reductor	939.6	1.973	700	6.082	3297

Los valores de  $N_s$  así calculados satisfacen la relación

$$N_s \leq N_c$$

para varios lubricantes con temperaturas de operación hasta de 250°F como se aprecia en la tabla 5.

TABLA 5

Temperatura de operación, °F	100°	150°	200°	250°	300°
Lubricante	Número crítico de rayado				
AGMA 1	9,000	6,000	3,000		
AGMA 3	11,000	8,000	5,000	2,000	
AGMA 5	13,000	10,000	7,000	4,000	
AGMA 7	15,000	12,000	9,000	6,000	
AGMA 8A	17,000	14,000	11,000	8,000	
Grado 1065, Mil-0-6082B	15,000	12,000	9,000	6,000	
Grado 1010, Mil-0-6082B	12,000	9,000	6,000	2,000	
Sintético (Turbo 35)	17,000	14,000	11,000	8,000	5,000
Sintético Mil-L-7808D	15,000	12,000	9,000	6,000	3,000

Reproducida de la Ref. 3



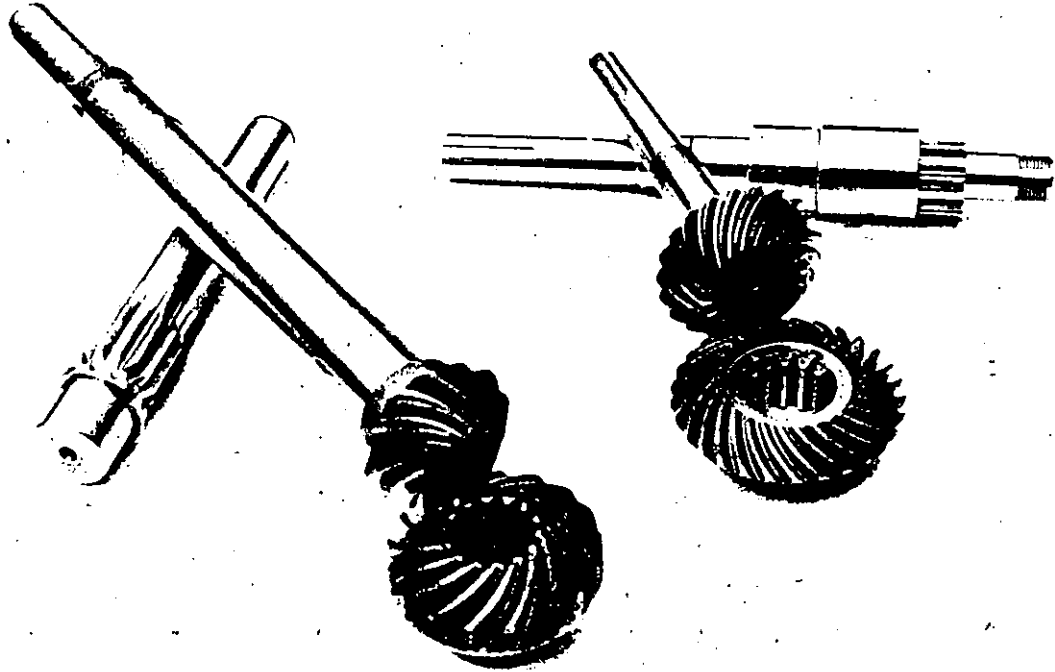


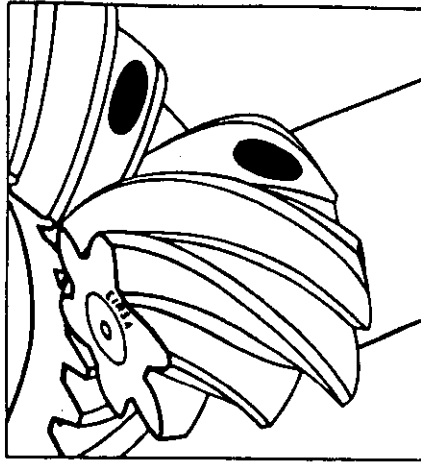
Fig. 25. Se presentan a la derecha, el piñón, el engrane y la flecha estriada del amplificador; del reductor a la izquierda.

## MONTAJE Y ACABADOS

A la luz de lo que se destacó anteriormente puesto que se violó la norma AGMA referente a la razón  $F/A_0$  fue necesario tener especial cuidado con el montaje. Se requiere que los vértices de los conos de paso se encuentren en un punto. Esta situación se detecta por la forma de la huella que deja en los dientes el azul de prusia que es una crema un tanto pegajosa, Fig. 26.

Para ello se procedió de la siguiente manera: se montó la caja en un taladro radial y después de untar los dientes con dicha sustancia se hicieron girar los engranes ajustando su posición mediante el espesor, número y ubicación de espaciadores colocados unos en las flechas y otros entre portabaleros y caja Figs. 14 y 20.

Una vez que se obtuvo una huella satisfactoria se aplicó en los dientes pasta especial abrasiva y haciéndolos girar en el mismo taladro radial se lapearon para eliminar las asperezas.



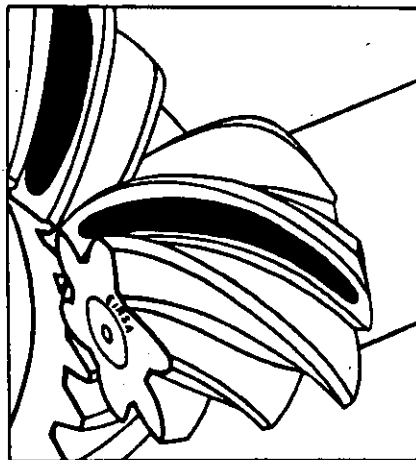
**CONTACTO INCORRECTO**

TIPO: PIÑON ADELANTADO  
SOLUCION: ATRASAR PIÑON



**CONTACTO INCORRECTO**

TIPO: PIÑON ATRASADO  
SOLUCION: ADELANTAR PIÑON



**CONTACTO CORRECTO**

AL 85% EN EL  
FLANCO DE CARGA

Fig. 26. Huellas que se observan en los engranes al girar, cuando están untados con pasta de Azul de Prusia. (Cortesía de Engranes Rivera, S.A.)

## REFERENCIAS

1. Chicurel E. "Transmission for an unlimited angle of steering Vehicle" Proceedings International Symposium on Gearing and Power Transmissions, Tokio, Japón, Sept. 1981, Pags. 407-411
2. Chicurel E., Szczepaniak C., Roque A., Sánchez M. A., Ramírez C. "Diseño y montaje para la nueva Transmisión del Omniviramóvil" memoria IX Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, León, Gto., Sept. 1983, Pags 123 a 127.
3. Dudley D. W. (Editor) Gear Handbook 1<sup>a</sup>. Ed. Mc Graw Hill, 1962, Capítulo 13
4. Oberg E., Jones F. D. y Horton H.L., Machinery's Handbook, 20a ed., 3a. impresión, Industrial Press Inc., 1976, Pags. 861-868
5. Shigley J.E. Mechanical Engineering Design, 3<sup>a</sup> ed., Mc. Graw Hill, 1977 Capítulo 12

COMPUTER SEQUENCE FOR DIRECT, NO SEARCH, OPTIMIZATION OF SPIRAL BEVEL GEARS

Enrique Chicurel, Filiberto Gutiérrez and Miguel Angel Bazúa  
 Instituto de Ingeniería and DEPEI, UNAM. Ciudad Universitaria,  
 Apartado Postal 70-472, Coyoacán, 04510, México, D.F., México.

**ABSTRACT** The quietness of operation optimum for spiral bevel gears is established, once and for all, in terms of the transcendental equations that represent the intersection of the appropriate boundaries of the feasible design region that defines it. This is done making use of the R.C. Johnson Method and taking advantage of the monotonicity of the variables involved.

The system of equations is arranged in a sequence and the resulting program obtains the solution (the optimum) iteratively but directly, i.e., there is no search routine.

Two examples from practice were worked out by use of a programmable calculator, one referring to a speed amplifier and the other to a reducer. The solutions are given in the paper.

**KEYWORDS** Spiral bevel gear optimization; gearbox design; quietness in gears; smooth gear operation; compact design of gears; gear size optimization; R.C. Johnson Method in gears.

NOMENCLATURE

- a = addendum
- A<sub>o</sub> = cone distance
- D = pitch diameter
- D<sub>o</sub> = outside diameter
- F = face width
- J = flexural stress geometric factor
- K<sub>v</sub> = dynamic factor
- m<sub>f</sub> = face contact ratio
- m<sub>G</sub> = reduction or amplification ratio  
 (m<sub>G</sub> = N<sub>2</sub>/N<sub>1</sub> = D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>)
- H = modulus, 1/P
- n = angular velocity
- N = number of teeth
- P = diametral pitch
- P<sub>a</sub> = assumed diametral pitch
- P<sub>c</sub> = calculated diametral pitch
- R = constant in the K<sub>v</sub> formula
- S = fatigue limit
- S<sub>f</sub> = σ<sub>f</sub>/σ<sub>FU</sub>
- S<sub>H</sub> = σ<sub>H</sub>/σ<sub>HU</sub>
- T = torque
- V = tangential velocity at the pitch circle
- W<sub>t</sub> = tangential load
- β = F/A<sub>o</sub>
- ε = small number, say P<sub>a</sub>/1000
- γ = pitch angle
- σ<sub>f</sub> = flexural stress
- σ<sub>FU</sub> = permissible flexural stress usually based on the fatigue limit
- σ<sub>H</sub> = Herz or contact stress
- σ<sub>HU</sub> = permissible contact stress usually based on the surface fatigue limit
- φ = pressure angle
- ψ = helix angle
- ( )<sub>1</sub> = referring to pinion
- ( )<sub>2</sub> = referring to gear
- ( )<sub>L</sub> = referring to lower limiting value
- ( )<sub>U</sub> = referring to upper limiting value

INTRODUCTION

This work was motivated by the need to decrease the noise of the experimental vehicle "Omniviramóvil", which was attributed chiefly to two straight bevel gear drives: a speed amplifier and a speed reducer required in its peculiar transmission (Chicurel, Gutiérrez, Bazúa, 1990). For the sake of expediency originally the planet and rear axle gears from the differential of the Chevrolet Nova automobile were used even though they are not the ideal ones for this application. Thus the problem was reduced to the optimum design of the substitute gears as far as quietness of operation is concerned and this necessarily implies resorting to spiral bevel gears of the Gleason System with:

$$\psi = 35^\circ \quad \phi = 20^\circ$$

Cost and space considerations required that the original housings be conserved.

DESCRIPTION

The problem was essentially solved by the R.C. Johnson method.

As is well known maximizing m<sub>f</sub> (within permissible limits) is most important when trying to minimize noise thus it was chosen as the objective function.

The region of interest, Fig. 1, was drawn by use of the formulas from Machinery's Handbook, (1976) and Shigley (1977) and the data referring to the amplifier gears, Example 1. With this overview we recognize three important cases:

1. The feasible region is bounded by the four curves:

$$m_f = m_{fU} \quad m_f = m_{fL}$$

$$\beta = \beta_U \quad S_f = 1$$

The boundary m<sub>f</sub> = m<sub>fU</sub> is a continuum of possible optimum points. Of these we select the intersection of the boundaries:

$$m_f = m_{fU} \quad \beta = \beta_U$$

Because it corresponds to the lowest S<sub>f</sub>. If, for

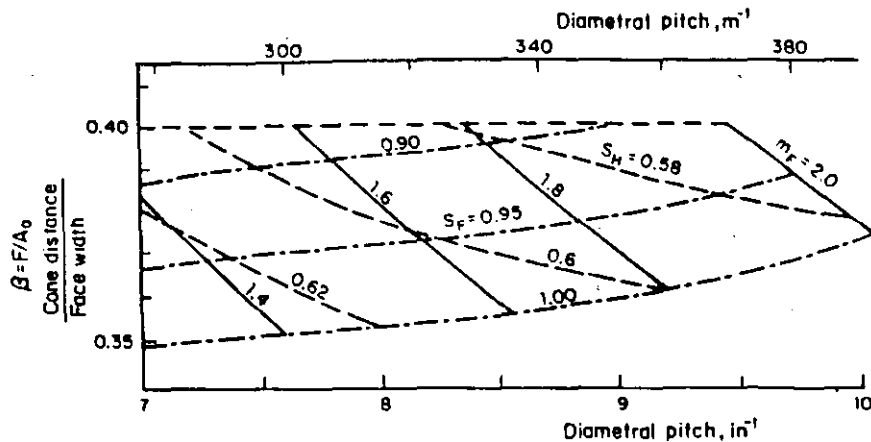


Fig. 1. Feasible region for the amplifier gears.

this point  $S_f < 1$ , we are indeed dealing with case 1, otherwise the optimum must be found considering case 2.

2. The feasible region is bounded only by the three curves:

$$m_f = m_{fL} \quad \beta = \beta_U \quad S_f = 1$$

and the optimum lies in the intersection of boundaries:

$$\beta = \beta_U \quad S_f = 1$$

If, for this point  $m_f \geq m_{fL}$ , we are indeed dealing with case 2, otherwise we must resort to case 3.

3. There is "no feasible region" because the predetermined boundary  $\beta = \beta_U$  lies below the intersection of the boundaries:

$$m_f = m_{fL} \quad S_f = 1$$

and, if nothing else can be changed, the value of  $\beta_U$  is increased so that  $\beta = \beta_U$  passes through the above intersection which is now the only feasible point and thus the optimum. Whether this value of  $\beta$  is acceptable depends entirely on the designer's judgement.

The AGMA standard for industry is  $\beta = 0.3$ . However, space considerations may require raising this value which, in turn requires greater care in mounting. An example of this is in automotive applications, see original gears, Table 1.

Based on these considerations and using the formulas of the Machinery's Handbook (1976) and Shigley (1977) a computer sequence was established according to the flow diagram of Fig. 2.

In general if the gears are to be kept small and contact stresses are high, the resistance of the gears may usually be increased by resorting to a higher hardness. Also, if scoring is a potential menace it may often be avoided by resorting to a different lubricant. Thus no boundaries of the feasible region related to contact stresses and scoring were considered and this paid off handsomely in program simplicity. However both contact stresses and the possibility of scoring should be checked after a tentative optimum is obtained. And, of course, it is convenient to include the corresponding formulas in the computer sequence at the exit points, they are not shown in the flow diagram of Fig. 2 because they do not add to the substance of this paper.

#### EXAMPLE 1.

The specifications referring to the speed amplifier are:

$m_{fL} = 1.25$	$D_{o2} = 0.085 \text{ m}$
$m_{fU} = 2.0$	$T_1 = 93.1 \text{ N-m}$
$\sigma_{fU} = 309 \text{ MPa}$	$n_1 = 14 \text{ Rev/s}$
$\sigma_{fU} = 2\,250 \text{ MPa}$	$\beta_U = 0.36$
$m_G = 1.4$	$R = 5.559 \text{ (m/s)}^{1/2}$

The upper limiting value of the face contact ratio  $m_{fU}$  was recommended by gear expert Mr. Jesús López Rodríguez of Engranes Cónicas S.A. who pointed out to the first author that, in his experience, noise does indeed decrease as  $m_f$  increases however if the value of 2 is exceeded noise starts increasing again.

The limiting values of the stresses  $\sigma_{fU}$  and  $\sigma_{fU}^{HV}$  are usually taken as the flexure and surface fatigue limits respectively. In this case they were considered to be the calculated applied stresses in the original amplifier gears, since they showed no signs of failure.

The value of the outside diameter of the gear  $D_{o2}$  is the maximum that the original housing permits.

Calculations were carried out in a programmable calculator. Notice that the final  $m_f = 1.8$  is lower than  $m_{fU} = 2$  because this situation corresponds to case 2.

The results are shown in Table 1 and Fig. 2 is a photograph of the original as well as the optimized pinion.

#### EXAMPLE 2.

The specifications referring to the reducer are:

$m_{fL} = 1.25$	$D_{o2} = 0.071 \text{ m}$
$m_{fU} = 2.0$	$T_1 = 104.9 \text{ N-m}$
$\sigma_{fU} = 309 \text{ MPa}$	$n_1 = 11.67 \text{ rev/s}$

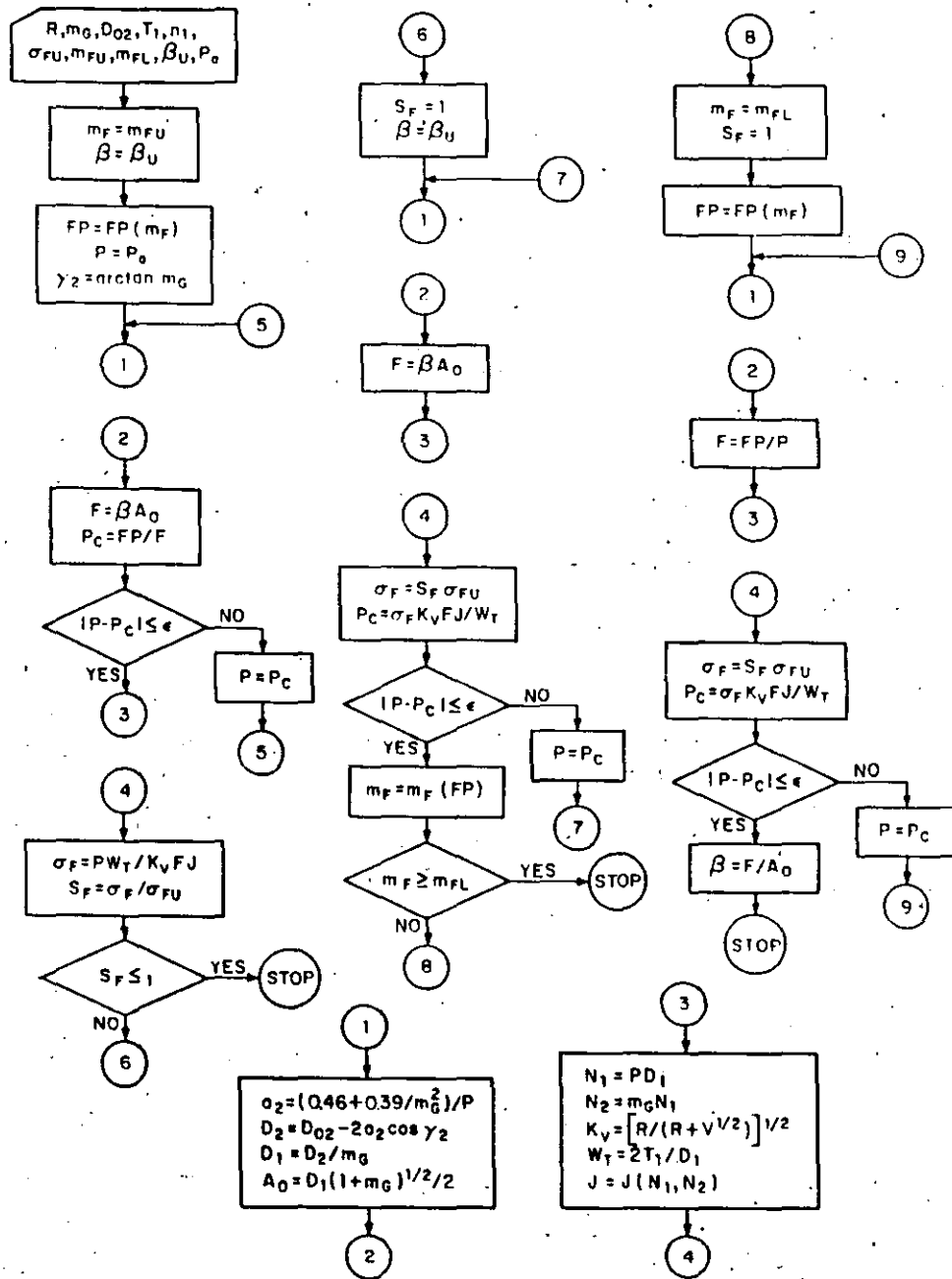


Fig. 2. Flow diagram of the optimizing computer sequence. the three branches shown in the upper position correspond to each of the cases mentioned in the text.

$$\begin{aligned} \sigma_{HU} &= 2\,250 \text{ MPa} & \beta_U &= 0.36 \\ m_G &= 1.4 & R &= 5.559 \text{ (m/s)}^{1/2} \end{aligned}$$

As mentioned before  $\sigma_{FU}$  and  $\sigma_{HU}$  are the applied stress values for the original amplifier gears which showed no sign of failure. The original reducer gears did show signs of wear. This problem was solved by use of the computer sequence. The results are shown in Table 2.

It should be pointed out that the final value of  $\beta = F/A_0 = 0.51$  is higher than the original  $\beta_U$  thus this is an example of case 3.

#### CONCLUSIONS

A very simple computer sequence has been presented for the quietness of operation optimization of bevel spiral gears has been presented. Complications were avoided because the boundaries of the feasible region relating to contact stress and scoring were omitted. However, the sequence ought to include the corresponding formulas at the exits so as to calculate them after the tentative optimum has been established. In all three cases considered the solution is simply the intersection of two of the boundaries of the feasible region, i.e., no search is carried out within the region.



Fig. 3. Comparison of the original and optimized pinions.

TABLE 1. Amplifier Gears

	Original	Optimized	% Increase
$N_1$	10	21	+110
$D_{01}$	m 0.0567	0.0647	+14
$D_1$	m 0.0485	0.0599	+24
$N_2$	14	29	+107
$D_{02}$	m 0.0716	0.0850	+19
$D_2$	m 0.0679	0.0828	+22
$\psi$	0°	35°	
$m_G$	1.4	1.381	-1.4
$P$	$m^{-1}$ 206	350	+70
$F/A_0$	0.41	0.363	-11
$\sigma_H$	MPa 2 253	1 352	-40
$\sigma_F$	MPa 309	309	0
$m_F$	0	1.8	

TABLE 2. Reducer Gears

	Original	Optimized	% Increase
$N_1$	10	12	+20
$D_{01}$	m 0.0567	0.0573	+1
$D_1$	m 0.0485	0.0501	+3.4
$N_2$	14	17	+21
$D_{02}$	m 0.0716	0.0710	-0.8
$D_2$	m 0.0679	0.0710	+4.6
$\psi$	0°	35°	
$m_G$	1.4	1.417	+1.2
$P$	$m^{-1}$ 206	239	+16
$F/A_0$	0.41	0.51	+24
$\sigma_H$	MPa 2 392	1 867	-22
$\sigma_F$	MPa 348	309	-11
$m_F$	0	1.25	

The process is iterative simply because the values of  $m$ , or the product  $FP$  and  $J$  are obtained either from tables stored in memory or directly from graphs. The optimization examples showed substantial increase in the face contact ratio.

REFERENCES

Chicurel, E., Gutiérrez, F., Bazga, M.A. (1990).

Metodología para la optimación de engranes cónico-espaciales, su aplicación al Omniviamóvil. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Oberg, E., Jones, F.D. and Horton, H.L. (1976). Bevel gearing, Machinery's Handbook, 20th ed., Industrial Press, New York, pp. 872.

Shigley, J.E. (1977). Helical worm and bevel gears, Mechanical Engineering Design, 3rd ed., McGraw Hill, pp. 487-493.



PROGRAMA PARA EL DISEÑO  
DE ENGRANES HELICOIDALES NO ESTÁNDAR

Enrique Chicurel Uziel  
Instituto de Ingeniería y DEFFI, UNAM  
Apdo. Postal 70-472, Coyoacán,  
04510, México, D. F.

Program for the design of helical, non  
standard gears

In addition to presenting the program described in the title, a procedure is suggested for the search of optima of various objective functions by use of such a program. Optima may refer to: maximum torque capacity, maximum contact ratio and minimum center distance.

Addendum modification, number of teeth, helix and pressure angles may be treated as independent variables.

Examples are given of optimum designs that can be manufactured by use of standard tools as well as others that require special tools. The results reveal surprising improvements.

Resumen

Además de presentar el programa que se describe en el título, se sugiere un procedimiento, y el uso del mismo, para encontrar el óptimo de diversas funciones objetivo, como son: máxima capacidad de par, máxima razón de contacto y mínima distancia entre centros.

Entre otras, se pueden tratar como variables independientes a: la modificación de adendó, el número de dientes así como los ángulos de presión y de hélice.

Se incluyen ejemplos de diseños óptimos que se pueden fabricar con la utilización de herramienta estándar así como otros que requieren la utilización de herramienta especial. Los resultados revelan mejoras sorprendentes.

Introducción

Como es bien conocido, los engranes no estándar son aquellos que incorporan adendos no estándar.

Para obtener un adendo largo se coloca la herramienta (fresa madre ó tipo cremallera) más lejos del tejo con respecto a la posición estándar, mientras que para obtener un adendo

corto se coloca la herramienta más cerca. Debido a la peculiar forma de la involuta, el diente resulta más ancho en la sección crítica y por lo tanto, más fuerte cuando el adendo es largo, y más delgado y débil cuando el adendo es corto. Por este motivo, una de las razones para recurrir a la modificación de adendo es para robustecer al piñón, que normalmente es más débil que el engrane. Otra razón es eliminar la posibilidad de socavado. Ver Ref. 1.

Bajo estas circunstancias el cálculo del factor geométrico de flexión es bastante complejo.

Cuando se utiliza la modificación de adendo para robustecer la transmisión, se mantienen los mismos círculos de paso para conservar tanto la distancia entre centros como la razón de reducción. Por la forma, ya descrita, en que se genera el diente de un piñón con adendo aumentado, su dedendo se disminuye; por lo tanto, los dientes del engrane ya no pueden penetrar tanto dentro del círculo de paso del piñón. En vista de lo anterior, se concluye que el aumento de adendo del piñón debe estar acompañado por una reducción, igual en magnitud, en el adendo del engrane.

Notación

$a_s$	= adendo estándar = $1/P$
$C$	= distancia entre centros
$C_p$	= constante elástica para el cálculo de la capacidad de carga tangencial en desgaste
$D_i$	= diámetro de paso
$a_a$	= $ a_{a1}  =  a_{a2} $
$a_{a1}$	= desplazamiento de la herramienta para modificación de adendo
$a_0$	= desplazamiento de la herramienta para modificación óptima de adendo (por lo que se refiere a par máximo)
esp	= especificaciones
$F$	= ancho total de cara
$F_c$	= ancho total de cara descontando chafilados laterales
$i$	= ver al final de esta lista
$I$	= factor geométrico para el cálculo de la capacidad de carga tangencial al desgaste

$J_i$	=	ídem en flexión.
$k_s$	=	factor de tamaño. $P_{DN} > 5$ , $k_s = 1$ . $P_{DN} \leq 5$ , $k_s = 0.85$
$k_v$	=	factor dinámico
$m_F$	=	razón de contacto de cara
$m_p$	=	razón de contacto transversal
$m_T$	=	razón de contacto total
$m_{TL}$	=	razón de contacto total mínima permisible
$N$	=	número de dientes
$N_c$	=	número crítico de rayado
$i$	=	revoluciones por minuto
$P_B$	=	paso circular transversal en el círculo base
$P_D$	=	paso diametral transversal
$P_{DN}$	=	paso diametral normal
$P_x$	=	paso circular axial
$R_{Bi}$	=	radio transversal en el círculo de base
$R_{vi}$	=	radio virtual de paso
$R_{ui}$	=	radio externo descontando chafán en la punta del diente
$S_{epi}$	=	límite de fatiga en flexión permisible (ponderado con todos los factores correspondientes menos $k_s$ y $k_v$ )
$S_{hp}$	=	ídem en desgaste (ponderado con todos los factores correspondientes)
$T_i$	=	capacidad de par
$T_{NEI}$	=	ancho normal externo del diente
$W$	=	capacidad de carga tangencial que gobierna
$W_{TN}$	=	capacidad de carga tangencial en desgaste
$W_{Ti}$	=	ídem en flexión
$W_{Ts}$	=	ídem en rayado
$z$	=	segmento de acción
$\epsilon$	=	0.03 mm
$\phi_N$	=	ángulo de presión normal
$\phi_T$	=	ángulo de presión transversal
$\psi$	=	ángulo de hélice
$( )_i$	=	referente a piñón o engrane. $i = 1$ se refiere al piñón. $i = 2$ se refiere al engrane.

#### Descripción del Programa

El programa obtiene automáticamente el valor del adendo modificado óptimo, es decir, aquel que hace iguales las capacidades de carga tangencial de piñón y engrane.

En la Fig.1 se muestra la entrada de especificaciones al programa, en la Fig 2 la salida de resultados.

El programa consta de más de dos centenares de relaciones matemáticas, por tal motivo a continuación se presentan únicamente las que se requieren para dar una idea de su funcionamiento.

#### Algunas Funciones Objetivo Posibles

Máximo par

$$T_2 = W D_2 / 2 \quad (1)$$

Máxima razón de contacto

$$m_T = m_p + m_F \quad (2)$$

Mínima distancia entre centros

$$C = D_1 (1 + m_G) / 2 \quad (3)$$

#### Variables Independientes

$$e_a, N_i, \phi_N, \psi \quad (4)$$

#### Restricciones de Igualdad Principales

$$e_{a1} = e_a \quad (5)$$

$$e_{a2} = -e_a \quad (6)$$

$$m_p = z / P_B \quad (7)$$

$$m_F = F / P_x \quad (8)$$

$$J_i = J_i(\text{esp}, e_{ai}) \quad (9) \text{ Ref.3}$$

$$W_{Ti} = S_{epi} k_s k_v F J_i / P_D \quad (10) \text{ Ref.4}$$

$$W_{Th} = k_v F_c D_1 I (S_{hp} / C_p)^2 \quad (14) \text{ Ref.5}$$

$$W_{Ts} = F_c (P_{DN}^4 / n_1^2)^{1/3} \quad (15) \text{ Ref.2}$$

$$W = \text{Menor de } (W_{T1}, W_{T2}, W_{Th}, W_{Ts}) \quad (16)$$

$$T_i = W D_i / 2 \quad (17)$$

#### Restricciones de Desigualdad

Socavados:

$$(a_s - a_{a1}) / R_{vi} \sin^2 \phi_N \leq 1 \quad (18) \text{ Ref.6}$$

TITULO  
 TB-11, PAR MAXIMO, HERRAMIENTA ESTANDAR, OPCION B  
 FECHA  
 MARZO 18, 1988, VIERNES

ESPECIFICACIONES

DE LA TRANSMISION  
 RELACION, DIST ENTRE CENTROS, IDEAL, OPERATIVA  
 2.333333, 4.0628044, 4.043

DE LOS ENGRANES  
 ESPESOR, NUM ADENDO, LIM RIZN CTO TOT  
 3., 1., 1.4

DE LA HERRAMIENTA  
 NUM ADENDO (DED ENGR), NUM RAD CURV PNTA, PROTUBER  
 1.25, 0.3, 0.

RPM DEL PINON  
 1200.

DE LOS MATERIALES  
 LIMITE DE FATIGA  
 FLEXION: PINON, ENGRANE, CONTACTO  
 24000., 24000., 300000.

CTE ELAST ESP CTO, NUM CRIT RAYADO  
 2300., 15000.

VARIABLES INDEPENDIENTES

NUM DE DIENTES DEL PINON: INIC, INCRE, FINAL  
 6.

ANG DE PRESION: INIC, INCRE, FINAL  
 25.

ANG DE HELICE: INIC, INCRE, FINAL  
 34.87

PARAMETROS DE CONTROL DE LA SOLUCION

NET CALC FACT DISTR CARDA (1 o 2)  
 1

IMPRESION DE ITERACIONES PARA  
 OBTENCION DE PUNTO CRITICO (SI o NO)  
 0

AJUSTE DESPL HERRAMIENTA (SI o NO)  
 1

IMPRESION DE ITERACIONES PARA  
 OBTENCION DEL AJUSTE (SI o NO)  
 0

Fig. 1 Entrada de especificaciones

TB-11, PAR MAXIMO, HERRAMIENTA ESTANDAR, OPCION B  
 MARZO 18, 1988, VIERNES

HERRAMIENTA DIMS, PLB PROTUBERANCIA	,0000	
DEPLA MOF AD	PINON	ENGRANE
DEPLA TOTAL	.0541	-.0541
	.0455	-.0427
	FORPILA	VALOR
ADENDO	1.2500 / P	.4147
RAD CURV PUNTA	.3000 / P	.1000
	PINON	ENGRANE
VELOCIDAD ANGULAR, RPM	1200.	514.
ESF PERM, LB/PLB CUADR		
FLEXION	24000.0	24000.0
CONTACTO	300000.0	300000.0
FACT GEOM ESF FLEX	.384	.384
CONST ELAST ESF CTO	2300.	
NUM CRIT RAYADO	15000.	
PASO CIARC, PLB		
TRANSVERSAL	1.2764	
NORMAL	1.0472	
	NOMINAL	OPERACION
DIST CENTROS, PLB	4.0628	4.0430
PASO DIAM, 1/PLB		
TRANSVERSAL	2.46	2.46
NORMAL	3.00	3.00
ANULOS, BRADOS		
PRESION, NORMAL	25.00	25.00
HELICE	34.87	
ESPESOR ENGRS, PLB	3.0000	
RAZONES DE CONTACTO, PLB		
TRANSVERSAL	.94	
DE CARA	1.44	
TOTAL	2.58	
	PINON	ENGRANE
NUMERO DE DIENTES	6.0	14.0
DIAM TRANS, PLB		
DE BASE	2.1193	4.9450
DE PASO, NOM	2.4377	5.6879
EXTERNOS	3.2125	6.2464
DIMS NOMS DTES, PLB		
ADENDO	.3874	.2792
ANCHO PUNTA	.1354	.2035
" PASO	.8461	.4481
" CRITICO	.6108	.4423
HOLBURA	.0080	.0680
MOF ANCHO P MOF AD	.0505	-.0505
MODIF ANCHO TOTAL	.0425	-.0585
RADIO CURV PUNTA	.0200	.0200
RAD CURV LATERAL	.0480	.0480
RAZONES RESTRIC (Positivas menor que 1 p no violar restric)		
SOBRADO	1.12	.62
MAX RADIO UTIL	.70	.97
DTE PLANTIABUDO	.01	.00
RIZN CTO TOT MIN		.54
CAP CARA TAMB, LB		
FLEXION	8194.	8194.
DEBASTE	14125.	14125.
RAYADO	12694.	12694.
MINIMA		8194.
CAP PAR, LB-PLB	9987.	23303.

Fig. 2 Salida de resultados

Diente puntiagudo:

$$e/T_{NE1} \leq 1 \quad (19)$$

Máximo radio utilizables:

$$R_{U1} / (C^2 \text{sen}^2 \phi_T + R_{B1}^2) \leq 1 \quad (20)$$

Razón de contacto mínima permisible:

$$m_{TL} / m_T \leq 1 \quad (21)$$

Si se desea, el programa optimiza automáticamente el ángulo (como variable independiente) por cuanto a máxima capacidad de par de acuerdo a la siguiente rutina. A la luz de las relaciones (5), (6), (9) y (10):

$$W_{T1} = W_{T1}(e_a) \quad (11)$$

$$e_a = e_0 \quad (12)$$

tal que:

$$W_{T1}(e_0) = W_{T2}(e_0) = W_T \quad (13)$$

Es menester hacer los siguientes señalamientos. Maximizar la razón de contacto tiene un gran efecto en la disminución del ruido. Dado que la relación de velocidades está, por lo general, especificada, minimizar la distancia entre centros implica minimizar los diámetros de paso, tanto del piñón como del engrane, relación (5).

Procedimientos para optimar

Como ha señalado el M. en C. Manuel Aquirre Gándara y de acuerdo con la Ref. 7, en el caso de engranes, las características a optimar son funciones monotónicas o cuasi monotónicas. Además los óptimos se ubican en las fronteras de la región de diseño factible, Refs. 7, 8 y 9. Por tales motivos en el programa no se incluyó un algoritmo formal formal de optimación, eliminando así el problema de la convergencia.

En consonancia con los anteriores conceptos, y de acuerdo con las observaciones del autor, se proponen, en forma tentativa, los procedimientos para optimar que se muestran en la Tabla 1.

Ejemplos

En las tablas 2 y 3 se muestran un diseño y seis variantes que son

TABLA 1  
PROCEDIMIENTOS PARA OPTIMAR

VARIABLES INDEPENDIENTES	PAR MÁXIMO	RAZÓN DE CONTACTO MÁXIMA	DISTANCIA DE CENTROS MÍNIMA
$e_{Q1} = -e_{Q2}$	↑	TAL QUE $W_{T1} = W_{T2}$	
$\psi$		↑	
$N$ o $P_0$	↓	↑	↓
D.	CONSTANTE		
LIMITACIONES CON FRONTERAS DE LA REGION DE DISEÑO FACTIBLE DONDE SE PUEDA UBICAR EL OPTIMO	SOGAVADO DEBASTE RAYADO		PLESION
	ÁNGULO DE HELICE MÁXIMO PERMISIBLE DIENTE PUNTIAGUDO		
LIMITACIONES DISCRETAS	NÚMERO DE DIENTES ENTERO PASO DIAMETRAL NOMINAL ESTÁNDAR (EN CASO DE SEDES UTILIZAR HERRAMIENTA ESTÁNDAR)		

Las variables independientes sencillamente se incrementan (↑) o se reducen (↓) hasta llevar a una o más de las fronteras de la región de diseño factible, es decir, al valor limitativo de una o más restricciones.

optimaciones con diversas funciones objetivo. Los diseños optimados de la Tabla 2 se pueden fabricar con herramienta estándar mientras que los de la tabla 3 requieren herramienta especial. Como se aprecia por los porcentajes encerrados en los rectángulos, los resultados son espectaculares.

Conclusiones

Se ha dado una idea de la estructura y el funcionamiento de un programa de computadora para el diseño de engranes rectos y helicoidales, estándar y no estándar.

Además se han propuesto procedimientos para obtener óptimos con diversas funciones objetivo mediante la utilización de un programa tal. La sustancia de este trabajo radica en el hecho que, esencialmente, se señaló la ubicación de los óptimos. Conociendo dicha ubicación ya no tiene caso recurrir a los algoritmos iterativos tradicionales. Sin embargo, dichos procedimientos se consideran tentativos porque todavía no se acumula suficiente experiencia.

Por lo espectacular de las mejoras obtenidas, salta a la vista que, por lo general y, particularmente cuando se trata de producción en serie, vale la pena optimar el diseño de engranes.

TABLA 2  
REDUCTOR. OPTIMACIONES  
UTILIZACION DE HERRAMIENTA ESTANDAR

DISEÑO	ACTUAL	ENGRANES NO ESTANDAR		
		PAR MAXIMO	RAZON DE CONTACTO MAXIMA	DISTANCIA CENTROS MINIMA
DIST ENTRE CENTROS MM PLO	103.20	103.20	103.20	89.44
REDUCCION %	4.683	4.083	4.083	8.259
NUMERO DE DIENTES PIRON ENGRANE	20	6	32	7
RAZON DE REDUCCION ALFMENTO %	2.89	6.33	8.34	9.20
PASO DIAM NORMAL MM PLO	0.32	0.18	0.83	0.84
DESPLA HERR MODN AD MM PLO	0	1.37	0.10	0.48
ANGULO PRESION NORMAL HELICE GRADOS	20	0.0541	0.0078	0.0259
COEFICIENTE DE SOCAVADO	0.88	0.88	0.17	0.74
RAZON DE CONTACTO ALFMENTO %	1.41	2.58	3.28	4.19
CAPACIDAD DE PAR MM LB PLO ALFMENTO %	897	2.830	7.284	8.338
	7.588	208	3.5	9

FRONTERAS DE LA REGION DE DISEÑO FACTIBLE DONDE SE UBICA EL OPTIMO	ELECCION	
	ANGULO DE HELICE 20°	
	ANGULO DE PRESION NORMAL 40°	
	SOCAVADO	SOCAVADO
	PASO DIAM NORMAL ESTANDAR	

TABLA 3  
REDUCTOR. OPTIMACIONES  
UTILIZACION DE HERRAMIENTA ESPECIAL

DISEÑO	ACTUAL	PAR MAXIMO	RAZON DE CONTACTO MAXIMA	DISTANCIA CENTROS MINIMA
DIST ENTRE CENTROS MM PLO REDUCCION %	103.20	103.20	103.20	48.47
	4.683	4.083	4.083	8.259
NUMERO DE DIENTES PIRON ENGRANE	20	8	68	4
RAZON DE REDUCCION ALFMENTO %	2.89	2.32	8.88	8.88
PASO DIAM NORMAL MM PLO	0.32	0.18	1.48	0.22
DESPLA HERR MODN AD MM PLO	0	1.38	0.09	0.81
ANGULO PRESION NORMAL HELICE GRADOS	20	0.0548	0.0038	0.0319
ANGULO PRESION NORMAL HELICE	20	33	40	38
ANGULO PUNTA DIENTE MM PLO	2.69	34.87	44.38	48
COEFICIENTE DE SOCAVADO	0.88	0.68	0.03	0.25
RAZON DE CONTACTO ALFMENTO %	1.41	0.027	0.001	0.819
CAPACIDAD DE PAR MM LB PLO ALFMENTO %	897	0.52	0.02	0.43
	7.588	2.84	897	4.48
		80	1.789	2.16
		4.084	897	897
		28.151	7.868	7.833
		3.378	1.5	3.8

FRONTERAS DE LA REGION DE DISEÑO FACTIBLE DONDE SE UBICA EL OPTIMO	RAYADO	FLEXION	DESBASTE
		ANG HELICE 20°	
		DIENTE PLANTABURO	

Reconocimientos

Se reconocen los iluminadores conceptos del M. en C. Carlos Beckwith así como los útiles comentarios del Ing. Rodrigo López, ambos del CIATEQ. Se aprecian las valiosas sugerencias del M. en C. Manuel Aguirre Gándara del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

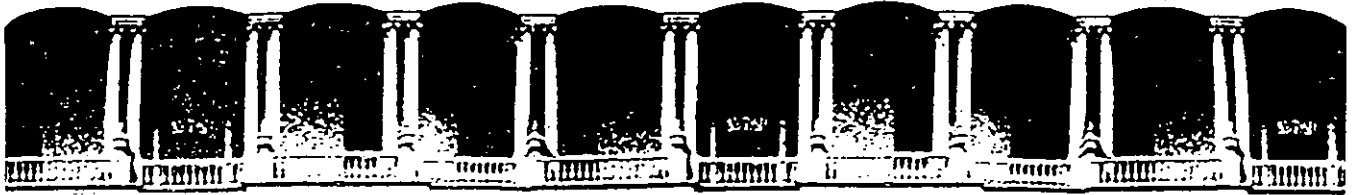
Se aprovecha la ocasión para agradecer a los pioneros del Diseño Optimor Dr. R.C. Johnson, del Instituto Tecnológico de Rochester, por su desinteresada ayuda y consejos y Profesor D. Wilde, de la Universidad de Stanford, por sus señalamientos.

Referencias

- Dudley, D.W., Gear Handbook, 1a Ed., Mc Graw Hill, 1962, Pags. 5-10 a 5-17.
- Idem, Paq. 13-45
- Errichello, R., "An Efficient Algorithm for Obtaining The Gear Strength Geometry Factor on a Programmable Calculator", Proc. Int'l. Symp. on

Gearing and Power Transmissions, Vol. 1  
Ago. 1981, Tokio, Japón, Paqs. 475 a 484.

- Shigley, J.E., Mechanical Engineering Design, 3a Ed., McGraw Hill, 1963, Pags. 430, 435, 436 y 463.
- Idem, Pags. 449 a 442 y 463.
- Spotts, M.F., Design of Machine Elements, 3a Ed., Prentice Hall, 1961, Pags. 380 a 384.
- Chicurel, E. y Echeverría Villagómez J.S., "Helical Gear Optimization by the Johnson Method", Proc. 7th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Sevilla, España, Sept 1987, Pags. 991 a 995.
- Johnson, R.C., Mechanical Design Synthesis, 2a Ed., R. Krieger, Cap. 8 Pags. 206 a 312.
- Chicurel, E., "Global Optimum Search in Design", Proc. 5th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Montreal, Canada, Julio 1979, Vol. 2, Pags. 879 a 882.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**C U R S O S   A B I E R T O S**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**EMPLEO DE DISPOSITIVOS ELECTRONICOS EN EL DISEÑO DE  
MAQUINAS INDUSTRIALES**

**ING VICTOR J. GONZALEZ V.**

**PALACIO DE MINERIA**

# EMPLEO DE DISPOSITIVOS ELECTRONICOS EN EL DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES

## INTRODUCCION

Este tema está dirigido a Ingenieros y Técnicos que trabajan en diseño y mantenimiento de máquinas industriales.

Los dispositivos y sistemas que se presentan, han sido escogidos como representativo de un amplio rango de aplicaciones industriales. No se pretende que en este curso se aprenda a diseñar máquinas industriales con dispositivos electrónicos. El objetivo principal es dar a conocer los dispositivos y circuitos que más comunmente son encontrados en las máquinas industriales.

Cada vez que se presenta un dispositivo, se describen primero sus características fundamentales y luego su uso en sistemas industriales. Los aspectos físicos intrínsecos de funcionamiento de los dispositivos son dejados a los libros propuestos en la bibliografía.

## DIODOS

Un diodo es un dispositivo electrónico semiconductor formado por la unión de dos materiales semiconductores (ver figura 1), estos materiales son los del tipo n y tipo p, estos materiales se forman agregando un número predeterminado de tomos, como impurezas, a una base de germanio o silicio:

Los materiales tipo n y p representan los bloques de construcción básicos de los dispositivos semiconductores. La unión de estos dos materiales resulta un elemento semiconductor de importancia en sistemas electrónicos.

A continuación tenemos la curva de corriente vs voltaje aplicado de un diodo (ver figura 2); la ordenada es el eje de corriente y la abscisa es el eje de voltaje. Se puede ver que este dispositivo presenta un comportamiento no lineal, como todos los dispositivos electrónicos, y que se pueden identificar dos zonas de operación básicas que se clasifican con respecto a la polarización del dispositivo, la polarización directa y la polarización inversa. La polarización en inversa es cuando se conecta la terminal positiva al material tipo n y la terminal negativa al material tipo p, esta polarización permite que circule una corriente, llamada de saturación inversa, que es de un valor tan pequeño que puede considerarse de cero. La polarización en directa sucede cuando se aplica un potencial positivo al material p y un potencial negativo al material n, en este caso la corriente que atraviesa al diodo es una función exponencial del voltaje aplicado a el mismo, en la simbología de este dispositivo la flecha indica el sentido de la corriente de conducción.

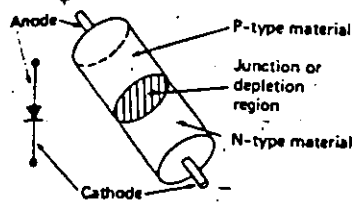


Figura 1

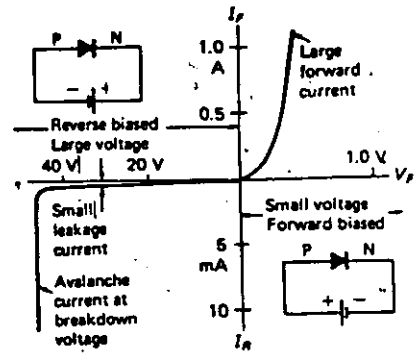


Figura 2

### DIODO ZENER

Existen varias clases de diodos, entre los más comunes se encuentran los diodos zener que trabajan en la zona de polarización inversa. Se sabe que los diodos pueden ser destruidos si se les permite trabajar con corrientes de avalancha y esto es cierto para los rectificadores, sin embargo, los diodos zener son normalmente operados en el voltaje de avalancha. La figura 3, muestra la curva característica de los zener. El diodo está seguro si la corriente en inversa no sobrepasa al máximo permitido por la potencia de compra de este. Los zeners no se utilizan como rectificadores. La curva característica (figura 3) muestra que el incremento de  $V_Z$  ( $\Delta V_Z$ )

Zener

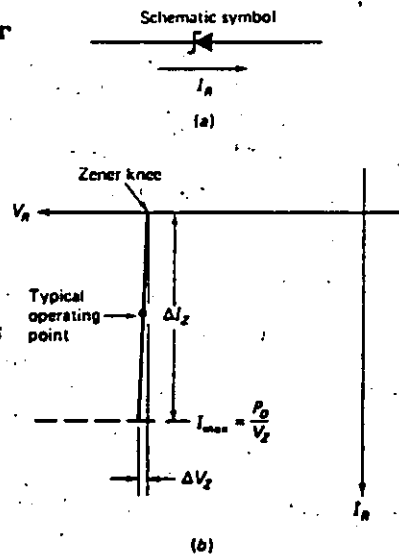


Figura 3



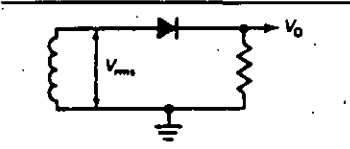
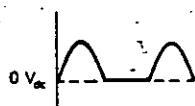
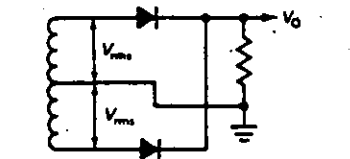
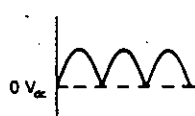
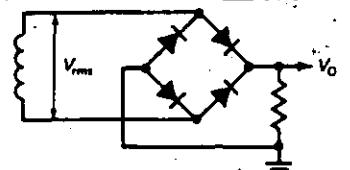
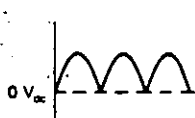
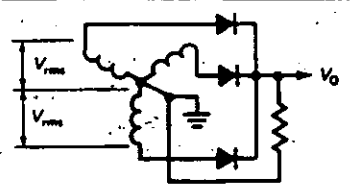
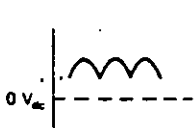
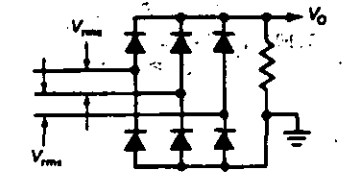
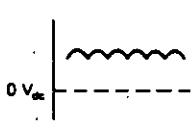
es razonablemente pequeño con respecto al incremento de  $I_z$  ( $\Delta I_z$ ) en la región que comprende desde el codo del zener a la  $I_{max}$ . La impedancia ( $Z$ ) de un diodo zener, en esta región, está dada por:

$$Z = \Delta V_z / \Delta I_z$$

El diodo zener ideal no mostrará cambio en  $V_z$  y tendrá una impedancia de  $0 \Omega$ . Los mejores diodos zener prácticos tienen una baja impedancia, que indica que se aproximan al ideal. Estos solo muestran una pequeña variación de voltaje sobre un rango amplio de corriente en inversa, esto los hace muy útiles para regular voltajes y en aplicaciones de referencia. Los zeners están disponibles para voltajes desde 1.8 hasta 200 V y en rangos de potencia de 0.25 hasta 50 W.

### CIRCUITOS RECTIFICADORES

En la figura 4 se presentan cinco arquitecturas de circuitos

Schematic	Name	$V_o$ (peak)	$V_o$ dc	PIV per Diode	RMS Ripple Voltage	Ripple Frequency	Output Waveform
	Half-wave	$1.41 V_{rms}$	$0.45 V_{rms}$	$1.41 V_{rms}$	$0.54 V_{rms}$	$1/f_L$	
	Full-wave	$1.41 V_{rms}$	$0.90 V_{rms}$	$2.82 V_{rms}$	$0.43 V_{rms}$	$2/f_L$	
	Bridge (full-wave)	$1.41 V_{rms}$	$0.90 V_{rms}$	$1.41 V_{rms}$	$0.43 V_{rms}$	$2/f_L$	
	Three-phase wye line to neutral (half-wave)	$1.41 V_{rms}$	$1.17 V_{rms}$	$2.45 V_{rms}$	$0.21 V_{rms}$	$3/f_L$	
	(Y or Δ) Three-phase bridge line to line (full-wave)	$1.41 V_{rms}$	$1.35 V_{rms}$	$2.45 V_{rms}$	$0.057 V_{rms}$	$6/f_L$	

\* $f_L$  = Line frequency

Figura 4

rectificadores, en ellas se muestran los voltajes de salida promedios de dc ( $V_o$ ) de cada uno, el voltaje inverso pico (PIV) que debe soportar cada diodo, el voltaje rms, la frecuencia del rizo y las formas de onda a la salida. Se nota que el voltaje de salida promedio en dc es mucho menor para el circuito de media onda y solo es el 54% del voltaje rms de entrada.

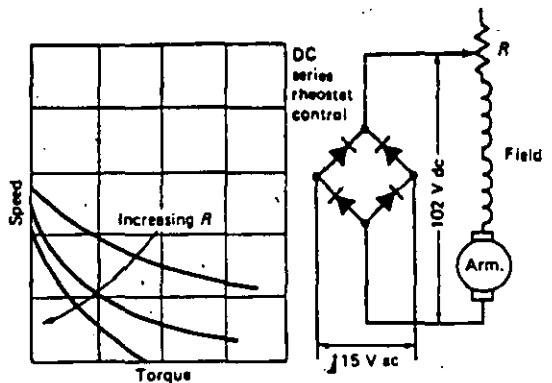
Tambi n se muestra un circuito rectificador de tres fases. Estos circuitos son muy populares en equipos industriales y tienen algunas ventajas sobre los circuitos de una sola fase. Nótese que el voltaje de rizo más pequeño es el que se tiene en los circuitos de tres fases.

#### METODOS DE CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTORES UNIVERSALES

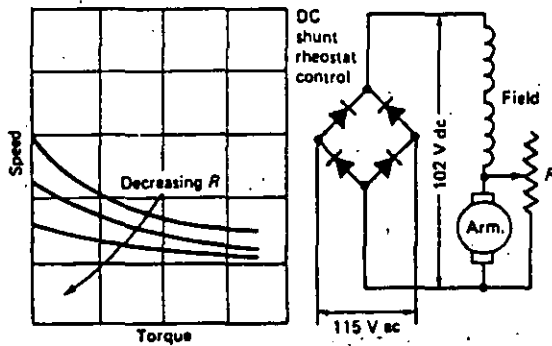
El motor universal es un motor diseñado para operar con corriente directa o alterna y es capaz de desarrollar altas velocidades y alto par a bajas velocidades. La velocidad del motor se puede cambiar con solo variar el voltaje a través del motor. Esto se puede llevar a cabo por tres métodos: control de la resistencia serie, control de la resistencia de derivación y control del voltaje variable. La curva velocidad/par obtenida por el uso de un reóstato en serie con el motor (armadura y campo) se ilustra en la figura (5.a). El control de las resistencias serie tiene buenas características de comienzo (alto par a alta velocidad), pero es evidente que la velocidad de regulación del motor disminuye con el incremento del par requerido. La resistencia en serie produce una caída de voltaje en el circuito que es proporcional a la corriente en este. La caída de voltaje a través de la resistencia crecer en tanto el motor sea cargado (la corriente del motor crece con un aumento en la carga). Se puede notar que el voltaje a través del motor disminuir con un incremento en la carga, y la velocidad caer rápidamente con una carga que aumente. Además, entre más grande sea la resistencia, más grande será la caída de velocidad cuando la carga aumente. La resistencia en serie o reóstato tendrá un efecto mayor al encendido del motor. La máxima corriente circula cuando el motor se enciende y la caída resistiva limitará el voltaje del motor a su valor más bajo. Las resistencias en serie usualmente son ajustadas a una resistencia mínima al comienzo y luego aumenta su valor en tanto el motor gane velocidad.

El control de la resistencia en derivación del motor, junto con la curva velocidad/par, se muestra en la figura (5.b). El motor es controlado derivando una resistencia ajustable a través de la armadura. A pesar que el rango de velocidad es limitado, este método de control mejora la regulación de velocidad, como se muestra en la curva, mientras se mantienen buenos comienzos del par. Este es un excelente método para adaptar la velocidad de los motores que operan en paralelo.

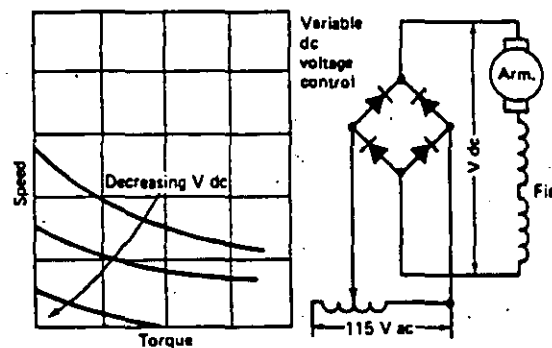
La figura (5c) muestra el circuito, junto con las curvas de velocidad/par obtenidas por el control del voltaje variable. Se puede ver que el rango de velocidad aumenta, junto con una regulación perfeccionada y el comienzo del par. El voltaje variable puede ser obtenido con el uso de un autotransformador y un circuito rectificador.



(a)



(b)



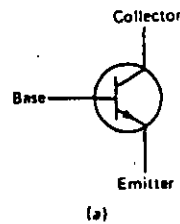
(c)

Figura 5

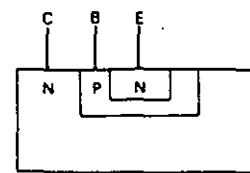
## TRANSISTORES DE UNION

El transistor bipolar se forma por la unión de los dos materiales semiconductores n y p en tres capas de estos.

El símbolo esquemático para el transistor NPN se muestra en la figura 6, su nombre se lo debe a la forma en la que han sido unidos los materiales, este consta de tres terminales llamadas emisor, colector y base. El emisor emite la señal portadora, la base controla el flujo de la portadora y el colector colecta la portadora que viene

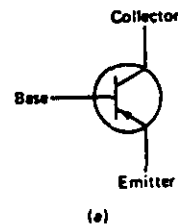


(a)

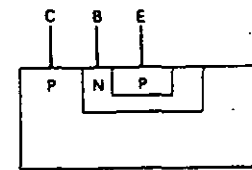


(b)

Figura 6



(a)



(b)

Figura 7

del emisor. El símbolo esquemático muestra una flecha en el emisor. Esta flecha señala la dirección de la corriente convencional que circula como se hace en el diodo.

Otra forma para construir un transistor bipolar de unión se muestra en la figura 7. Aquí la base es de material N y el colector y el emisor son hechos de material P. Esta estructura es llamada transistor PNP y su símbolo esquemático se muestra con la flecha del emisor apuntando hacia adentro. Estos dos tipos de transistores pueden realizar las mismas funciones básicas pero con flujos opuestos de corriente emisor-colector; además deben ser operados con polaridades opuestas en las terminales.

En la figura 8 se puede ver que la corriente de base, o de control, es pequeña y proporcional a la corriente total en el colector.

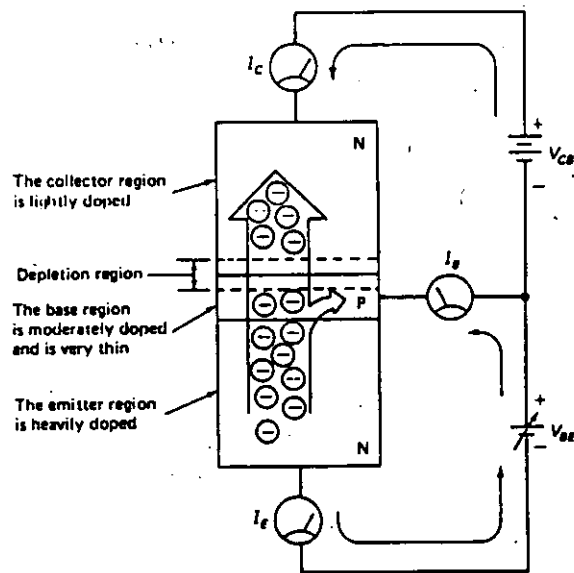


Figura 8

#### MODOS DE OPERACION DEL TRANSISTOR.

El transistor tiene tres regiones de operación, estas son: región de corte, región lineal y región de saturación (ver Figura 9). Es importante hacer notar que las condiciones de base del circuito determinan de que modo va a trabajar.

Un transistor está en la región de corte cuando la corriente de base se hace cero y resulta cuando el switch de la base es abierto. Todo el voltaje aplicado se cae a través del transistor, el cual actúa como un switch abierto del colector al emisor. En corte la carga no se incluye.

Se está operando en la región lineal cuando se cierra el switch de la corriente de base, la corriente de base tiene ahora un valor pequeño y la corriente de colector tendrá un valor beta veces la

corriente de base, y aproximadamente la mitad del voltaje aplicado que cae a través del circuito colector-emisor. El circuito colector-emisor funciona ahora como una resistencia. La carga esta parcialmente energizada en el modo lineal.

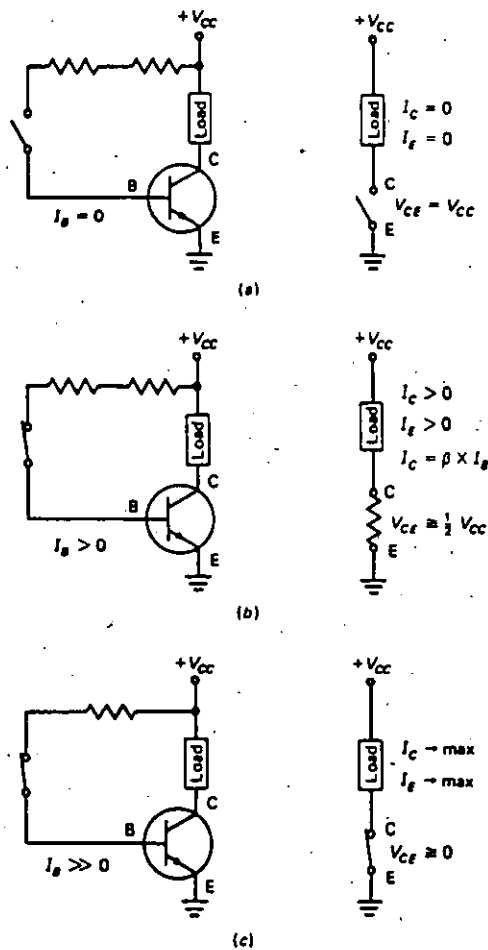


Figura 9

La saturación, se presenta cuando la corriente de base alcanza un valor alto. Sucede cuando alguna resistencia ha sido movida de la base. El circuito colector está actuando como un circuito cerrado. La caída de colector a emisor se aproxima a 0 volts y la corriente a través de la carga está limitada por la ley de ohm: la resistencia de la carga y el valor de  $V_{CC}$ .

La figura 9 muestra también que una sola fuente de voltaje es todo lo que se requiere para polarizar ambas uniones del transistor.

#### AMPLIFICADOR DE VOLTAJE EMISOR COMUN

A continuación, en la Figura 10, se muestra un circuito amplificador emisor común. El nombre emisor común se usa ya que la señal de entrada se aplica en la base del circuito, la señal de salida

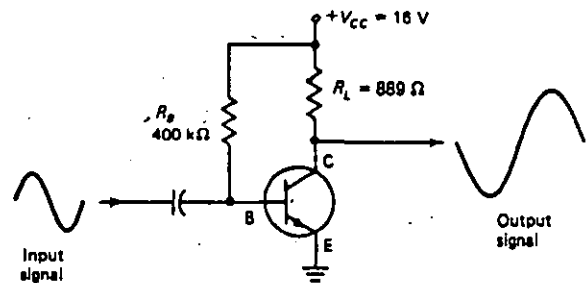


Figura 10

se toma del circuito colector, y el emisor se conecta a tierra, por lo tanto es común a ambos circuitos de entrada y salida. Este circuito es muy útil en amplificadores de señal pequeña ya que se espera que tenga una ganancia de voltaje cercana a 100 veces (40 db, ignorando las impedancias). Puede ser visto como un amplificador de voltaje aunque se base en un transistor bipolar, el cual es, por definición, un amplificador de corriente.

La señal de entrada está capacitivamente acoplada en la base del transistor. Como la señal de entrada va en dirección positiva incrementará la corriente de base y la corriente del colector también aumentará pero muchas veces más ya que existe una pequeña ganancia de corriente desde la base al colector. El aumento en la corriente del colector ocasionará una caída a través de la resistencia de carga del colector ( $R_L$ ), y por lo tanto menos caída de voltaje caerá a través del transistor desde el colector hasta tierra. Se puede ver que la señal de salida va en dirección negativa (menos positiva) cuando la señal de entrada va en una dirección positiva. De esta forma, la señal de salida tiene la fase invertida 180° si se compara con la señal de entrada.

## TIRISTORES

Los tiristores son circuitos de conmutación basados en una estructura PNP. Son bistables, cuentan con dos, tres y hasta cuatro circuitos terminales y circuitos capaces de operar unidireccionalmente (dc) o bidireccionalmente (ac).

El SCR o rectificador controlado de silicio es el más viejo y popular tiristor. Es un circuito muy confiable y se espera que funcione billones de veces antes de que se descomponga.

La figura 11 muestra la curva característica volt-ampere para un SCR. La región de bloqueo en inversa se muestra en el tercer cuadrante y es similar a la de un rectificador de silicio. Comúnmente, el voltaje de inversa máximo nunca es excedido ya que una avalancha en

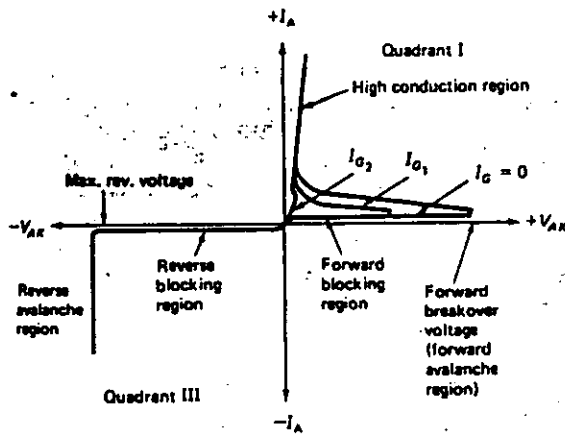


Figura 11

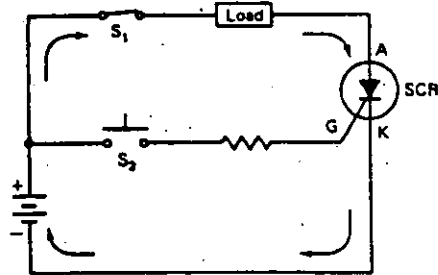


Figura 12

inversa puede destruir al SCR. La avalancha en directa se muestra en el primer cuadrante. Ocurre en la entrada de corriente cero y en algunos altos valores de polarización en directa. La corriente  $I_{c2}$  representa la mayor entrada de corriente y puede encenderse con un pequeño valor de polarización en directa. Este es el modo normal de encendido para el SCR. En la gráfica se tiene que la región de alta conducción esta asociada con una caída de voltaje en directa, esta hace eficiente al SCR en operaciones de switcheo.

#### CIRCUITO DE PRUEBA DEL SCR.

En la figura 12 se muestra un circuito con la habilidad de encender al SCR. La batería externa esta arreglada para polarizar en directa al SCR, pero no es suficiente para crear una avalancha, por lo que no circula corriente. Cuando S2 es presionado, el circuito de entrada está completo, el SCR se enciende y aparece la corriente de la carga, aún cuando se suelte S2 la corriente continúa fluyendo a través de la carga y del SCR. Después S1 debe abrirse para eliminar la polarización de la fuente de directa y apagar el SCR. Un punto importante de entender es que los SCR pueden ser fácilmente encendidos pero no apagados. Cuando los SCR son usados para controlar potencia en dc, una circuitería especial es usada para lograr apagarlos. Apagar el SCR comunmente se le llama a la acción de aplicar una corriente de polarización en inversa a través de sus terminales de anodo y cátodo. El tiempo que transcurre entre el fin de la corriente en inversa, y el punto en el cual el voltaje en directa puede seguramente volverse a aplicar se llama tiempo de apagado, su rango varía desde microsegundos hasta cientos de microsegundos, dependiendo del diseño del circuito.

#### CONTROL DE POTENCIA EN AC

En la figura 13 se muestra como usar un SCR para controlar el valor rms aplicado a una carga. Las formas de onda representan corrientes de carga. El SCR está en serie con la carga. Una compuerta de control se utiliza para crear el pulso en el momento deseado de encendido. Se apaga automáticamente cuando la línea de ac pasa por el cero. La potencia en la carga se controla por el ángulo de conducción. Con un ángulo de conducción grande el circuito se enciende la mayor parte del tiempo y la potencia es alta.

Los circuitos que operan bajo el principio mostrado son utilizados ampliamente en la industria. Se utilizan comunmente para controlar velocidades de motores, salidas de luz y fuentes de calor, así como cargadores de baterías; son populares porque son eficientes. Casi toda la energía se lleva a la carga y muy poca al circuito de control.

#### CONTROL DE VELOCIDAD PARA MOTOR UNIVERSAL CON SCR

Ya que los motores universales pueden ser operados con corriente alterna o directa, entonces éstos pueden ser controlados con circuitos que regulen el ángulo de conducción de onda rectificada o de onda completa. En este caso se muestra el uso de un SCR (figura 14). Se trata de un circuito de media onda con retroalimentación que controla el punto de encendido, por lo que este mantiene la velocidad de control constante. El SCR conduce solamente en los medios ciclos positivos; por lo que se tiene un control menor.

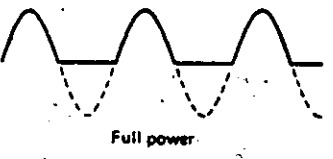
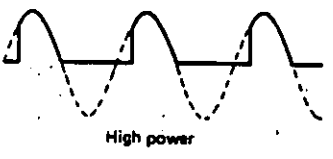
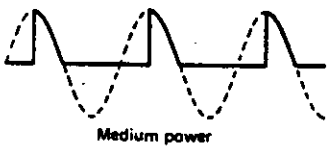
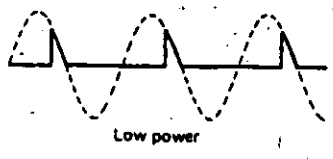
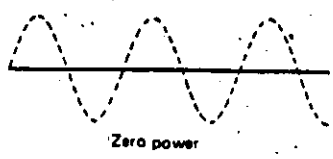
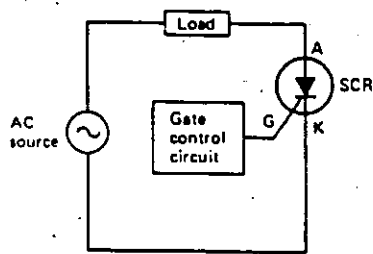


Figura 13

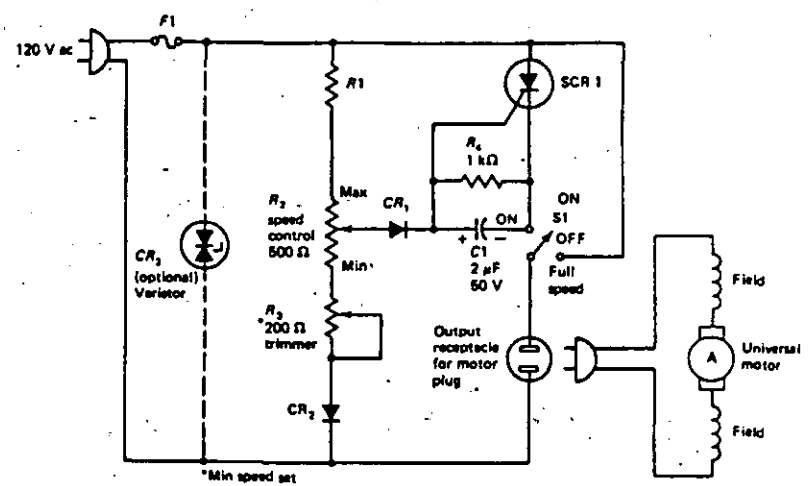


Figura 14

**TRANSISTORES DE MONOUNION(UJT)**

Los UJT, por sus siglas en inglés de "unijunction transistor", son utilizados como circuitos de encendido. Están hechos de una barra de silicio tipo N ligeramente contaminada y con una fuertemente contaminación en el material P que es soldado dentro de la barra (figura 15). La zona P forma la sección emisora del transistor, y su sola unión le da el nombre de monounión. Los contactos B1 y B2 (base1 y base2) al final de la barra son óhmicos (no tienen acción de diodos). En el circuito equivalente del diodo emisor está conectado en la unión de las dos resistencias; la resistencia de abajo es variable. Es llamada resistencia negativa porque decrece abruptamente cuando el diodo emisor del UJT se polariza en directa con respecto a B1. Los UJT usan una barra tipo N y un emisor tipo P.



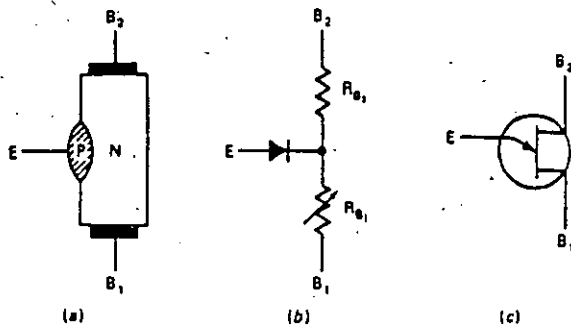


Figura 15

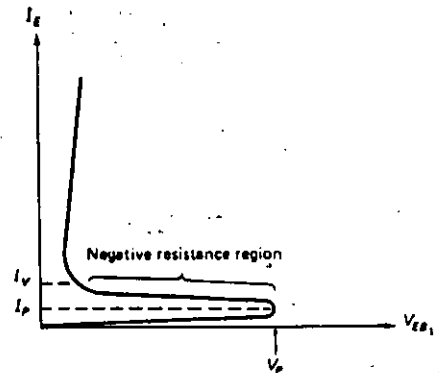


Figura 16

### CURVA CARACTERISTICA VOLT-AMPERE DEL UJT

En la figura 16 se nota el comportamiento de la resistencia negativa. En tanto la polarización en directa aumenta gradualmente a través del emisor a la base 1, se alcanza un punto llamado  $V_p$ ; en este punto el diodo es polarizado en directa. Entra después a la región de resistencia negativa, y el voltaje cae a un valor mucho más bajo. La curva también muestra una región donde el voltaje disminuye cuando la corriente aumenta. Esto se debe a una súbita caída en la resistencia dentro del transistor. La curva muestra que la corriente de emisor en el punto de inicio se llama  $I_p$ ; también muestra una alta corriente, llamada corriente de valle o  $I_v$ . Esta corriente de valle es similar a la corriente que maneja el tiristor. El UJT no puede asumir ningún punto estable entre  $I_p$  e  $I_v$ .

### OSCILADOR UJT DE RELAJACION Y FORMAS DE ONDA.

En la figura 17 se muestra un circuito muy útil en aplicaciones de control y de tiempos industriales. Un oscilador cambia de señales dc a ac. Un oscilador de relajación usa constantes de tiempo RC para controlar las frecuencias de oscilación. Cuando se aplica el voltaje de alimentación, el capacitor se empieza a cargar a través de  $R_1$ . Eventualmente el capacitor alcanza el punto de encendido del UJT. El diodo emisor se enciende, la resistencia interna del transistor desde la base 1 al emisor cae, y el capacitor se descarga rápidamente a través de  $R_3$  (usualmente es menor a  $100 \Omega$ ) y el transistor. Cuando la corriente de descarga del capacitor alcanza el valor de  $I_v$ , el UJT se apaga e inicia un nuevo ciclo. También se muestran formas de onda y en la terminal B1 pulsos de forma de onda. El periodo para las formas de onda es aproximadamente igual a la constante de tiempo  $R_1C$ .

### CIRCUITO UJT DE CONTROL DE FASE

En la figura 18 se muestra una forma de como el UJT puede controlar a un SCR, el cual controla la potencia entregada a la

carga. Este circuito controla la potencia en la carga por el ángulo de conducción. Tan rápido como el SCR se enciende es mayor la potencia en la carga y el ángulo de conducción. El diodo zener toma los picos positivos de la fuente en el voltaje de caída, mientras que los cambios negativos son tomados cerca de la referencia de 0v, ya que estos polarizan en directa al zener. El voltaje de ruptura del zener se alcanza tempranamente en el ciclo positivo, y el voltaje a través del UJT es constante para casi todo el ciclo. El capacitor se carga a través de R2 hasta que el voltaje de encendido del UJT es alcanzado. Cuando se enciende, desarrolla un pulso a través de R4, el cual prende al SCR. Si el periodo del oscilador UJT es pequeño, pulsos extras de compuerta pueden ser entregados durante el ciclo positivo. Esto no causará ningún efecto ya que el primer pulso prenderá al SCR y los pulsos consecuentes serán ignorados.

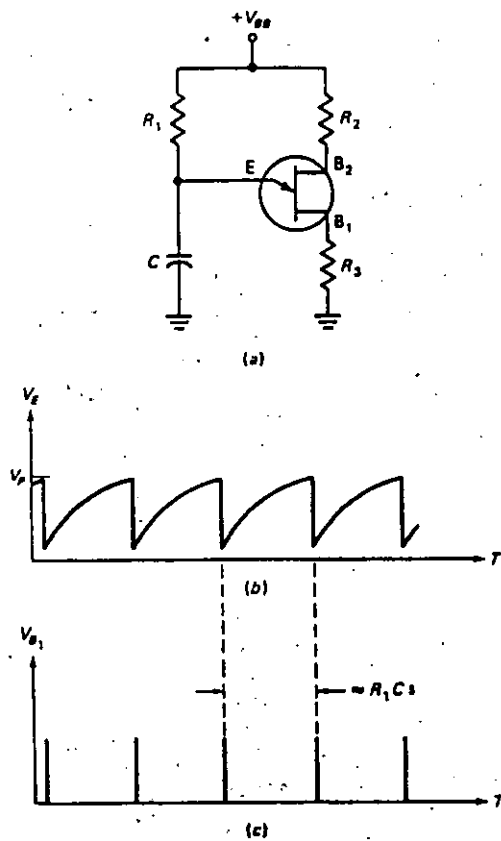


Figura 17

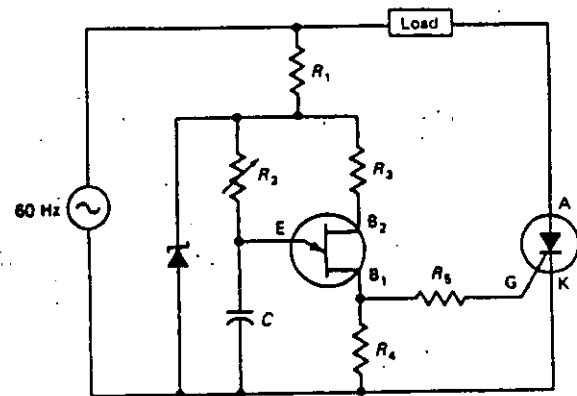


Figura 18

### CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR UNIVERSAL

En la figura 19 se muestra el circuito de control de velocidad usando un UJT, este proporciona un mayor rango de control, se nota que como fuente de poder se usa corriente directa no filtrada y este tipo de fuente es necesaria para conmutar al SCR, de otra forma permanecerá encendido y el control se perderá. La corriente pulsante de directa sirve también para apagar al oscilador UJT, entonces empieza una carga

nueva en cada ciclo de la fuente de voltaje pulsante.

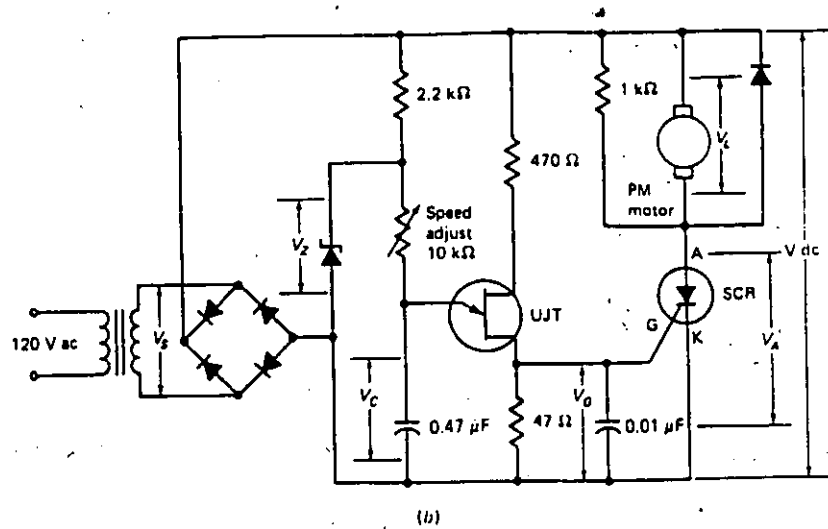


Figura 19

#### CICLOCONVERTIDOR SIMPLIFICADO DE UNA SOLA FASE

El circuito b sico mostrado en la figura 20, tiene 2 puntos medios de doble pulso para convertidores de fase controlada. Uno lo forma el grupo positivo y otro el grupo negativo, lo cual es una configuración de un convertidor dual.

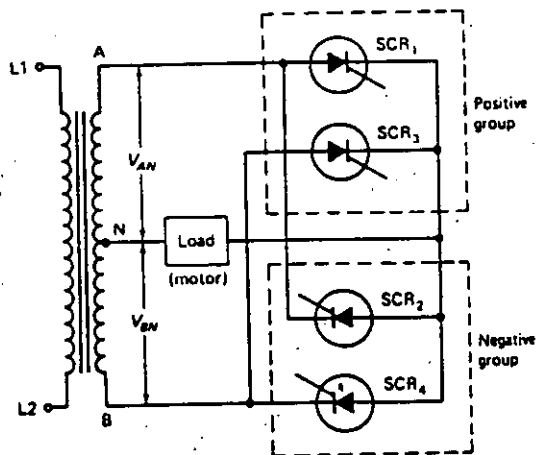


Figura 20

La corriente de salida de cada grupo fluye en una sola dirección (los SCRs son circuitos unidireccionales). Para producir una corriente alterna en la carga, los dos grupos, positivo y negativo, deben ser concretados en forma paralela inversa. El grupo positivo (SCR1 y SCR3) permiten a la corriente de carga fluir solamente durante la mitad positiva del ciclo, cuando  $V_{AN}$  o  $V_{BN}$  es positivo, y el grupo negativo permite a la corriente fluir durante el medio ciclo negativo, esto cuando  $V_{AN}$  o  $V_{BN}$  es negativo.

### Formas de Onda

Se asume una carga inductiva y se muestran las formas de onda (figura 21). Los voltajes  $V_{AN}$  y  $V_{BN}$  están  $180^\circ$  fuera de fase. Variando los puntos de encendido ( $t_1$  a  $t_4$ ) de los tiristores, el voltaje principal de salida a la carga puede variarse como se indica. Variando los ángulos de retraso de encendido cerca de  $90^\circ$  de una manera senoidal a la frecuencia de salida deseada resultará en un voltaje de salida principal en la carga que es senoidal en la frecuencia deseada.

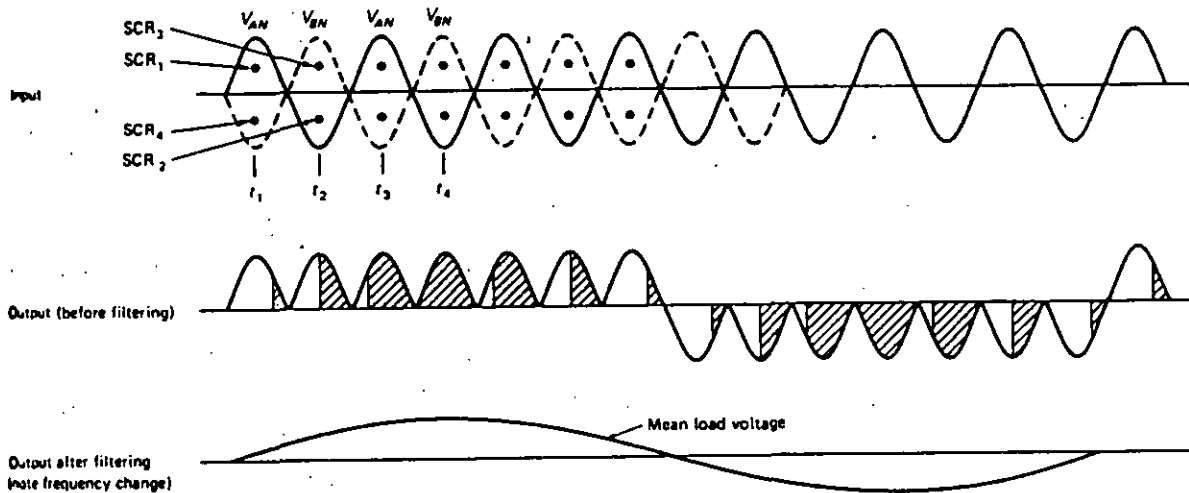


Figura 21

### DIAC

Todos los circuitos de disparo mostrados hasta el momento han sido unilaterales. Se encienden en una sola dirección. Por lo cual, se utilizan más comúnmente en circuitos de control con SCR que en circuitos de control con triac.

El diac mostrado en la figura 22 muestra un dispositivo tipo transistor con una resistencia bidireccional negativa característica. La corriente de rompimiento es de alrededor de  $100 \mu A$  y ocurre en 30 volts aproximadamente.

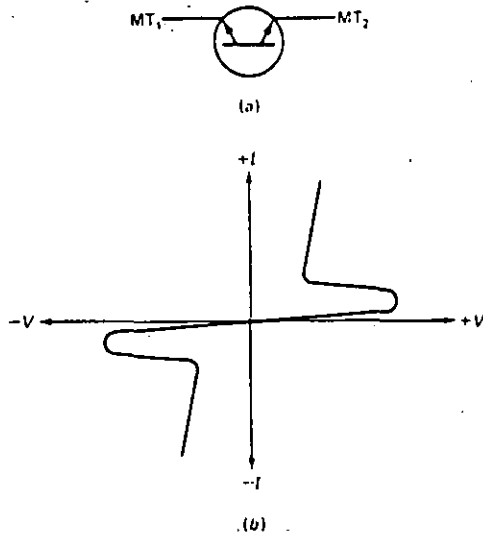


Figura 22

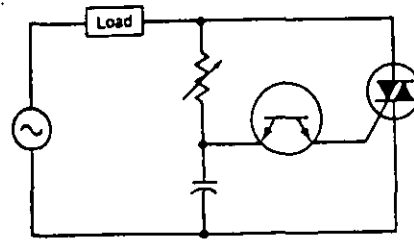


Figura 23

#### CIRCUITO DE CONTROL DE FASE CON DIAC

En la figura 23 se muestra que, en ambos casos, los cambios en la fuente harán que el capacitor se cargue a través de la resistencia variable. Cuando el capacitor alcanza el voltaje de rompimiento, el diac se enciende y prende al triac. El ángulo de fase puede ser adelantado decrementado por medio de la resistencia variable. Incrementando la resistencia variable atrasar el encendido por un ángulo de conducción más pequeño y una potencia de carga menor.

#### TRIAC

El control bilateral también se puede lograr con otro tipo de tiristor, que es equivalente a dos SCRs, que se forma de una sencilla estructura cristalina. Su nombre proviene del inglés y significa ótriodo switch semiconductor de acó, su estructura y símbolo esquemático se muestran en la figura 24.

Este dispositivo puede soportar el flujo de corriente en ambas direcciones. Sus conexiones están etiquetadas como terminal principal 1 ( $MT_1$ ), terminal principal 2 ( $MT_2$ ), y compuerta ( $G$ ). También, en la figura 25, se muestran las curvas características del triac, se trata de un circuito simétrico que es capaz de actuar en el tercer cuadrante como en el primero. La corriente  $I_H$ , es el mínimo valor de corriente requerido para mantener al triac encendido (lo mantiene cerrado). Los SCRs también mantienen pequeños valores de corriente pero sólo en el primer cuadrante de operación. La gráfica no lo muestra, pero los voltajes de encendido en directa y en inversa pueden ser reducidos con la corriente en la compuerta.

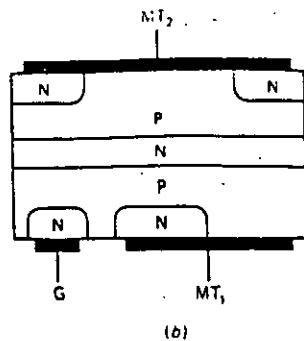
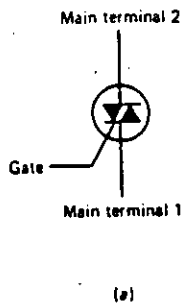


Figura 24

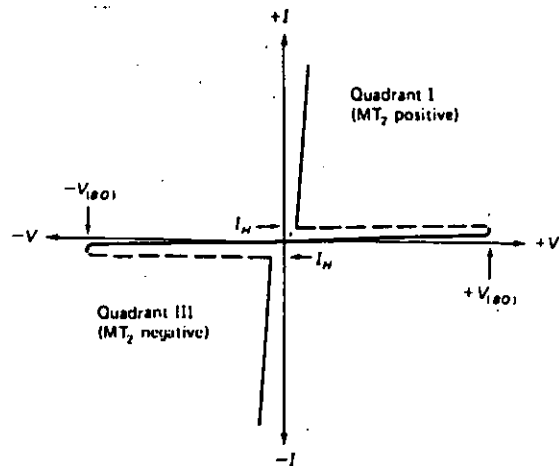


Figura 25

En la figura 26 se muestra además la ventaja de un triac como controlador de potencia en ac. El circuito usa las terminales principales conectadas en serie con la fuente y la carga. Un circuito de control de compuerta provee de pulsos a la compuerta para encender al triac. Las formas de onda representan corrientes de carga y muestran que el ángulo de conducción controla la potencia en la carga. Debe quedar claro que un solo triac controla toda la forma de onda. Los triacs son muy útiles en bastantes aplicaciones, pero otras veces tienen sus limitaciones. No están disponibles para rangos de corriente más allá de 50 A y para rangos de voltaje sobre 600 volts. Por otro lado, un triac debe apagarse durante un breve momento cuando se pasa por el cero. Si la carga es inductiva (como un motor), con un circuito de control con triac puede ser difícil apagar. La conmutación se realiza cuando la corriente cae por un valor abajo de la corriente que se mantiene. Desafortunadamente, existe un voltaje de polarización a través del triac, y la corriente de recuperación del triac actúa como una corriente de compuerta y trata de volverlo a encender. Esto complica el diseño del circuito, lo cual hace al SCR como el tiristor más popular en los sistemas de control industriales.

#### CONTROL DE VELOCIDAD DE ONDA COMPLETA.

El circuito que se muestra en la figura 27 puede ser utilizado en una línea de ac de 60 Hz. Se trata de un circuito de malla abierta (no realimentado). Si se varía R2 se modifica el tiempo de carga del capacitor C1 hasta el voltaje de disparo del diac. Cuando el diac se dispara, se enciende el triac, como se muestra en las formas de onda para Vc1, Vc y Vt. Esto da el voltaje de alimentación Vs, menos la caída a través del triac (Vt) a través de la carga VL; cuando el voltaje Vs pasa por el cero, el triac se apaga. Se queda así hasta que el capacitor C1 se vuelva a cargar (en inversa) al voltaje de disparo del triac. Las formas de onda muestran varias colocaciones de R2 que se usan para obtener el disparo temprano (22x) para máxima potencia hasta el último disparo (157x) para mínima potencia. Este circuito presenta alguna disimetría para las alternaciones en la

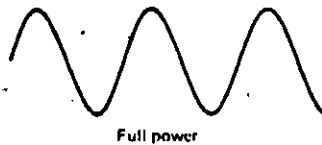
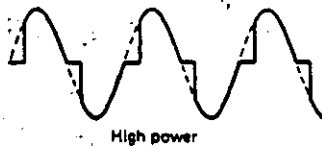
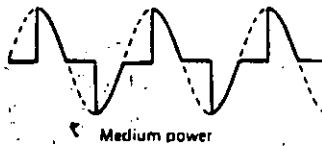
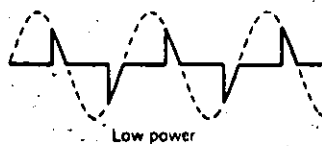
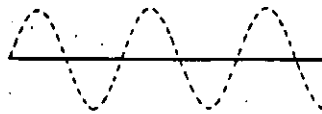
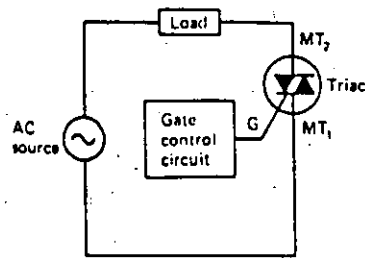
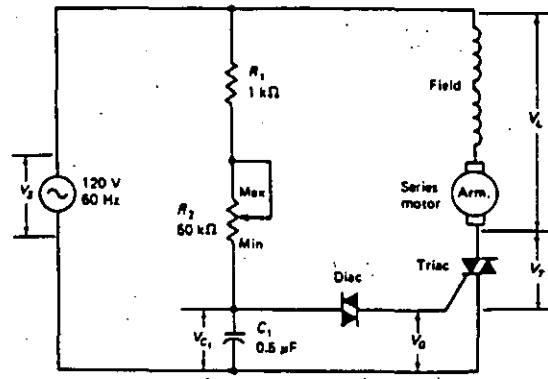


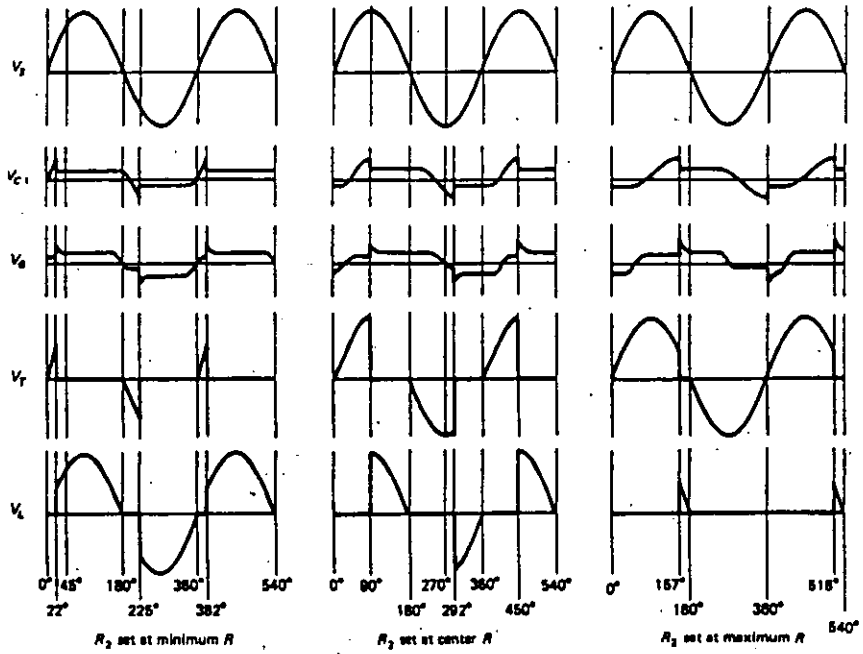
Figura 26

carga; esto se causa por la histéresis del circuito debido a la retención del capacitor C1 de carga a la polaridad del voltaje inicial que se aplica a través de él. La disimetría es aparente en las formas de onda positiva y negativa para  $V_L$

La hist resis puede ser reducida usando un circuito que la compensa (figura 28). Se trata, además, de un circuito popular llamado "dimmer" (controlador de corriente).

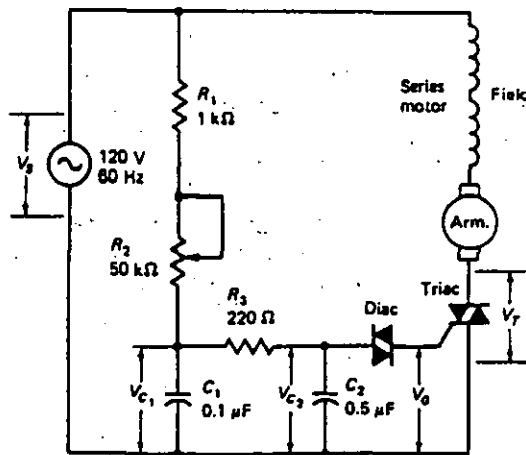


(a)



(b)

Figura 27





## TRANSDUCTORES DE ENTRADA

Estos dispositivos convierten parámetros físicos en señales eléctricas equivalentes, y que contienen toda la información necesaria de lo que sucede. De esta forma un motor eléctrico puede ser visto como un transductor.

### POSICION Y DESPLAZAMIENTO.

El desplazamiento es la diferencia entre la posición de algún objeto y su punto de referencia. Un desplazamiento puede ser lineal (línea recta) o giratorio (angular). Transductores potenciométricos pueden ser utilizados para medir ambos tipos de desplazamiento. En el medio industrial los potenciómetros son transductores muy comunes. En la figura 29 se muestra un potenciómetro de desplazamiento lineal. Un elemento resistivo se muestra arriba del diagrama. El brazo del contacto se mueve a lo largo del elemento resistivo en respuesta al movimiento que se tiene en la flecha de entrada. Si se aplica un voltaje a través de las terminales A y B, entonces parte de ese voltaje aparecerá a través de A y C. La mayoría de los transductores variables son nominalmente lineales. Si la flecha de entrada se encuentra en la posición mecánica del centro, la mitad del voltaje aplicado aparecerá en C; pero si se encuentra en la posición final a su izquierda, el voltaje de salida será cero; si se encuentra a un cuarto de la posición final a la izquierda, el voltaje de salida será un cuarto del voltaje aplicado. En otras palabras, existe una relación lineal entre la posición de la flecha y la señal de salida.

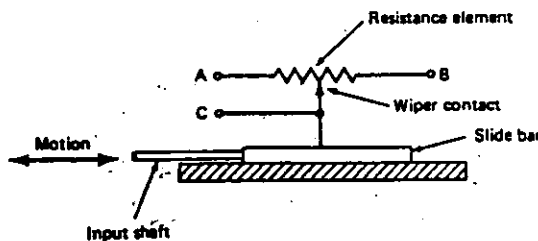


Figura 29

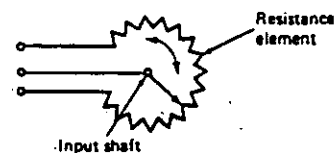


Figura 30

Un potenciómetro de desplazamiento angular se muestra en la figura 30. Cuando la flecha de entrada gira, el contacto del brazo se mueve con él. Si un voltaje pasa a través del elemento resistivo, el voltaje en el contacto del brazo será función de la posición o desplazamiento de la flecha. El ángulo del potenciómetro usualmente está limitado en 320° de giro.

Los transductores variables son relativamente baratos y fáciles de aplicar. Sin embargo, tienen algunas limitaciones; son sensibles a la temperatura, lo cual afecta su exactitud. Los potenciómetros se consideran transductores de baja a mediana exactitud. El contacto del brazo es otra limitante, ya que puede ensuciarse y producir ruido eléctrico.

El transformador diferencial lineal variable (LVDT, siglas en inglés) son más costosos pero puede utilizarse como transductor variable. En la figura 31 se muestra su construcción. Consiste de un primario, dos secundarios, y núcleo móvil. El primario es excitado por una fuente de ac. Cuando el núcleo está exactamente en el centro, la amplitud del voltaje inducido en el secundario 1 será el mismo que el voltaje inducido en el secundario 2.

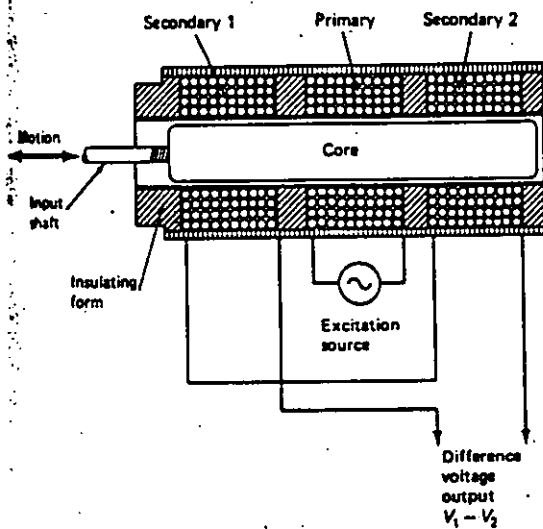


Figura 31

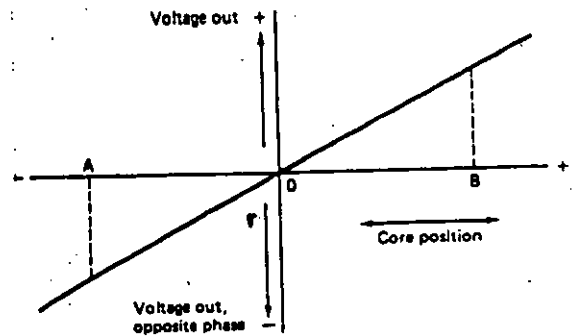


Figura 32

La figura 32 ilustra que sucede con el voltaje de salida cuando el núcleo se mueve a la izquierda y a la derecha. Se nota que la magnitud del voltaje de salida es una función lineal de la posición del núcleo y la fase se determina por el lado de la posición nula en la cual se localiza el núcleo.

En la figura 33 se muestra un circuito sencillo para convertir la salida ac de un LVDT en dc. Con el núcleo en el centro, S1 y S2 producen amplitudes iguales. Ambos rectificadores de media onda producen caídas de voltaje en dc iguales a través de las dos resistencias. Las polaridades se oponen, por lo que el voltaje de

salida de A a B es igual a cero. Si el núcleo se mueve hacia arriba, S1 produce más voltaje que S2. La caída a través de la resistencia superior es ahora mayor, y A se vuelve positivo con respecto a B. Pero si el núcleo se mueve hacia abajo, B se vuelve positivo con respecto a A.

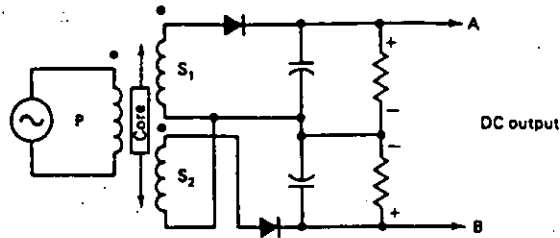


Figura 33

Luego se muestra un transformador diferencial giratorio variable (figura 34). Este transductor permite medir el ángulo de desplazamiento arriba de 90°. La exactitud de este tipo de transformadores es muy buena. Las linealidades típicas están entre .25 y .05 por ciento del rango total. En general, linealidades aún mejores pueden ser obtenidas operando al LVDT casi en su rango máximo. El LVDT industrial típico tiene un rango total aproximado de más o menos 2 1/2 cm. La resolución es excelente, con especificaciones típicas cercanas al 0.000001 cm.

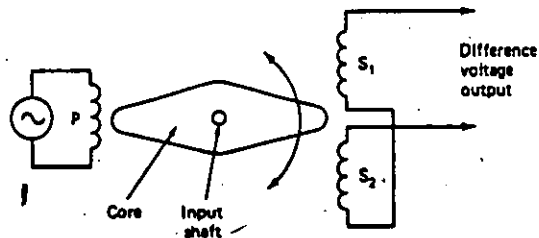


Figura 34

La frecuencia de excitación varía para un LVDT, dependiendo de su diseño y aplicación; el rango de valores típicos está de 50 Hz a 30 Hz. El voltaje que se aplica al primario comúnmente está en los 10 volts. Tiene excelente confiabilidad, con millones de horas de uso antes de descomponerse.

La figura 35.a muestra un tensómetro de hilo aglomerado (strain gage). Consiste de varias vueltas de hilo aglomerado en almohadilla de papel o plástico. Se nota que el eje sensible es paralelo a las porciones largas del hilo. Si el medidor es alargado ligeramente a lo largo del eje, el incremento de la resistencia máxima resulta de la

gran longitud total del hilo que se emplea. En la figura (35.b) se representa un medidor de tipo hoja delgada. Estos medidores son fabricados con procesos de circuito impreso usando aleaciones conductoras alrededor de la hoja delgada. Una configuración en red se utiliza para el elemento de esfuerzo sensible para permitir valores mayores de resistencia de medición mientras se mantienen pequeñas longitudes de medición. La resistencia de medición varía desde 30 a 3000  $\Omega$  con valores comunes entre 120 y 350  $\Omega$ . Las longitudes de medición varían desde 0.02 a 10 cm.

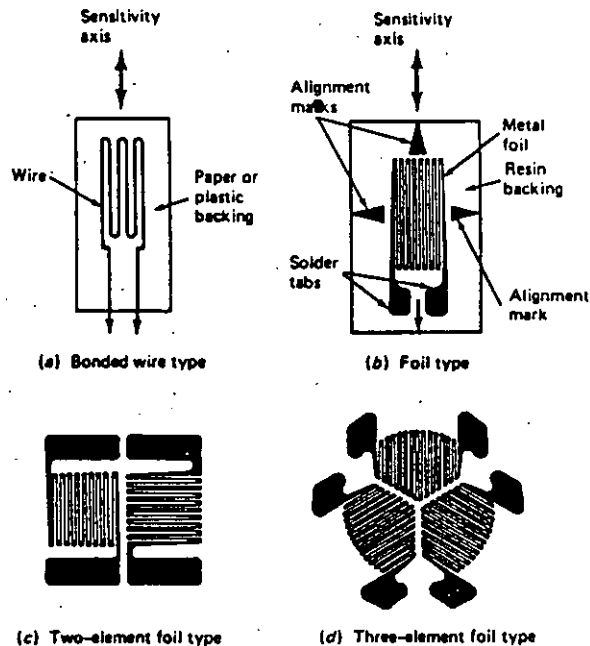


Figura 35

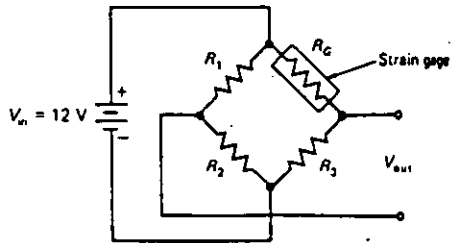
El medidor típico industrial de esfuerzo tiene un factor de medición de 2; el factor de medición es la razón de cambio de la resistencia dividida entre la razón de cambio de la longitud, sus iniciales son GF:

$$GF = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L}$$

Se usan dos elementos de medición de esfuerzo (figura 35.c) cuando se requiere temperatura de compensación, si se tiene una buena alineación, sólo uno de los medidores reaccionará al esfuerzo. Sin embargo, ambos reaccionaran a la temperatura.

El puente de Wheatstone es popular por su exactitud y sensibilidad en aplicaciones de medición, hace de los pequeños cambios señales algo útil. A continuación se muestra un puente con un medidor de esfuerzo como parte del puente (Figura 36). Si los cuatro elementos del puente son iguales a 350  $\Omega$ , el puente debe estar balanceado y el voltaje de salida deber ser cero. En la figura 36 se muestra una

fórmula que da el voltaje de salida si se varía la resistencia de medición. Otra característica del circuito puente es que puede ser exactamente balanceado para producir una salida cero para un esfuerzo cero. Este proceso se llama nulificar el puente.



$$V_{out} = V_s \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_G} \right)$$

Figura 36

Si los elementos de la figura anterior (35.c), se aplican en el circuito puente, uno actúa como sensor de esfuerzo, y el otro da compensación de temperatura. Sin embargo, pueden crear algún error; todos los medidores tienen alguna sensibilidad al esfuerzo perpendicular de su eje longitudinal, esto se llama sensibilidad transversal.

A continuación se muestra otro tipo de transductores de desplazamiento (figura 37). La capacitancia está directamente relacionada con la placa de rea e inversamente relacionada con la placa de espacio. Como el tubo de metal se mueva a la derecha, la distancia entre las placas decrece; aumentando la capacitancia. El transductor capacitivo puede ser colocado dentro de un puente de ac para proporcionar un voltaje de salida en ac que es función de un desplazamiento lineal.

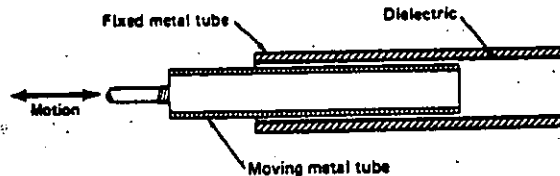


Figura 37

La figura 38 se muestra un capacitor de desplazamiento angular. La capacitancia aumentará si la placa móvil cubre a la placa fija, este dispositivo se utiliza para medir desplazamiento angular.

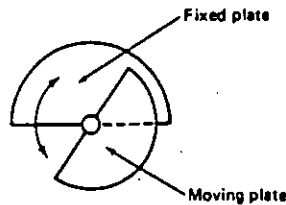


Figura 38

A ninguno de los transductores mostrados en esta sección se les permite usar en la medición de grandes desplazamientos. Hay varias formas de llevar a cabo esto y una forma se muestra en la figura 39; esta muestra que en tanto el material se mueva por debajo de la llanta de fricción, hará que este gire. La llanta está acoplada a los engranes de material ferroso por medio de una flecha. En tanto la llanta de engranes se mueva, alternativamente da un camino alto y un bajo para el sensor de efecto Hall. La salida del sensor es de la forma de los pulsos, los cuáles pueden ser acumulados con circuitos de conteo para medir desplazamientos extremadamente largos.

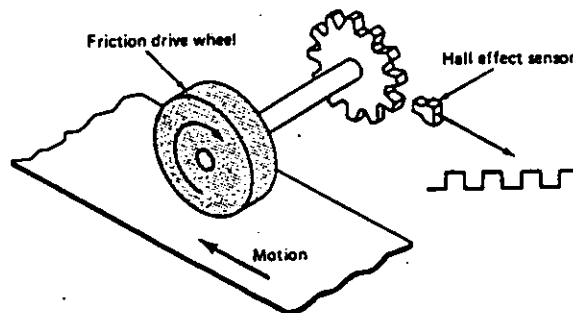


Figura 39

#### VELOCIDAD Y ACELERACION.

La rapidez se puede entender como desplazamiento que se tiene con respecto a una unidad de tiempo, se le puede medir en metros por segundo, kilómetros por hora, o centímetros por minuto. La velocidad es una medida de la rapidez y la dirección, es una cantidad vectorial.

Muchas veces es complicado medir altas velocidades. Algunas veces se mide tomando el periodo de tiempo requerido que le toma a un objeto desplazarse de un punto fijo a otro. Los detectores ópticos y los circuitos de tiempo se usan para hacer estas mediciones, los circuitos modernos de tiempo tienen resoluciones de millonésimas de segundo. La velocidad angular se puede medir por técnicas ópticas (figura 40). Tenemos un tacómetro óptico que puede ser usado para medir velocidad

en flechas, en mecanismos (engranes) o en poleas. Una raya contrastante de pintura o de cinta es aplicada en la parte rotante. El tacómetro tiene una fuente de luz y una lente ensamblada. La luz reflejada dentro del foto detector es alternativamente oscura y brillante debido a la cinta contrastante. El detector produce un pulso cada revolución de la flecha. Los circuitos de conteo y de tiempo convierten los pulsos en velocidad angular:

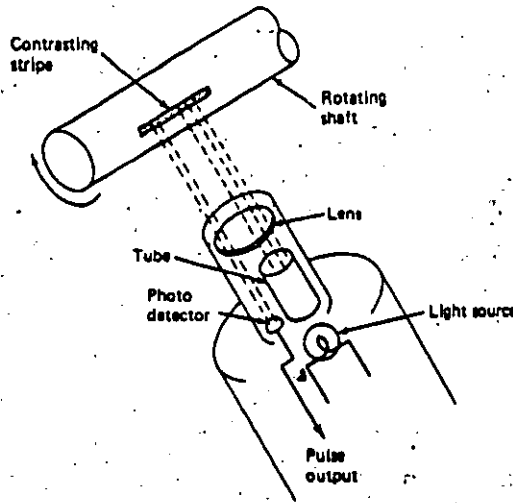


Figura 40

Los tacómetros de corriente directa son también populares para medir velocidades angulares (figura 41). Usualmente están equipados con campos magnéticos permanentes, un circuito de armadura giratorio, un conmutador y una escobilla montada. Ignorando los efectos de la carga, la salida de un tacómetro en dc es proporcional a la densidad de flujo del campo, a la longitud de la armadura del circuito y a la velocidad angular de la flecha.

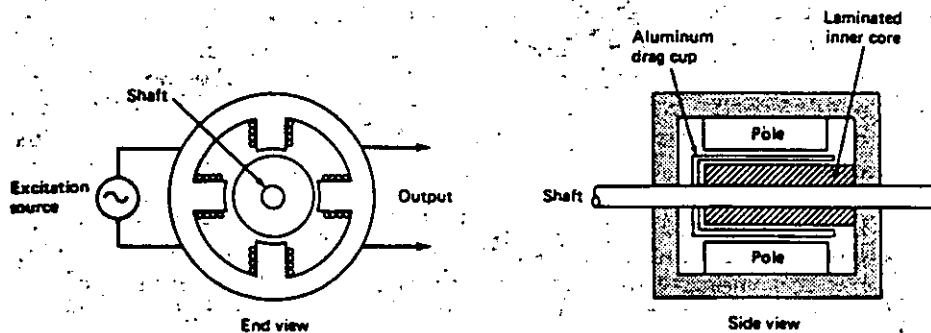


Figura 41

Los tacómetros de copa de arrastre funcionan con el principio de inducción. También se conocen como tacómetros de inducción de ac. La figura 42 muestra su construcción. Un conjunto de bobinas del estator está conectado a una fuente de excitación externa. Las otras bobinas del estator están en una posición de 90° desde las bobinas excitadas y forman el circuito de salida. La copa de arrastre está hecha de cobre o de aluminio y está conectada a la flecha de entrada. La vista de lado muestra que también hay un núcleo laminado interior. La copa de arrastre tiene un espacio libre entre el núcleo y los polos del estator.

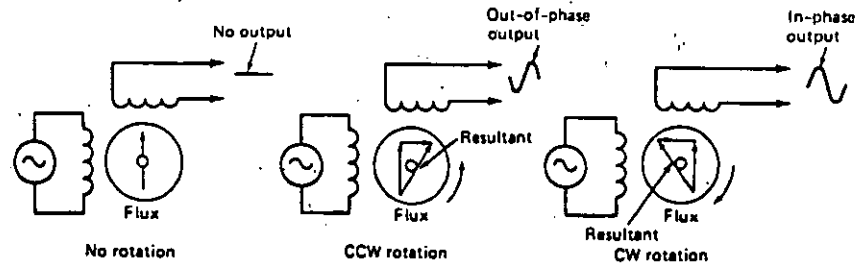


Figura 42

Su teoría de operación se muestra. Sin movimiento de giro, la salida es cero. Un flujo de corriente par sita se induce en la copa de arrastre, pero esta tiene 90° de defasamiento con respecto a las bobinas de salida. Si la flecha gira, un segundo flujo aparece en la copa de arrastre, el cual es causado por una corriente de reacción que fluye de la armadura a la copa y que está en los ángulos derechos de las bobinas de excitación. El flujo resultante produce una salida. Tan rápido como gira la flecha mayor será el flujo de reacción y mejor el ángulo resultante para la salida. Por lo tanto, la salida es proporcional a la velocidad de la flecha. Con un circuito detector de fase apropiado, el tacómetro puede dar información acerca de la dirección de la flecha.

Los tacómetros digitales producen números fijos de pulsos de salida por cada revolución que da la flecha. El tacómetro óptico presentado anteriormente da un pulso por revolución. En la figura 43 tres pulsos son producidos por cada revolución debido a que existen tres ranuras en el disco giratorio, es posible determinar el sentido del movimiento con este tipo de tacómetros utilizando grupos de ranuras superpuestas y alternadas y un LED/fototransistor dual ensamblado.

La aceleración es el cambio que sufre la velocidad. Un objeto que es acelerado aumenta su velocidad con el tiempo. La desaceleración, o aceleración negativa, es cuando el objeto pierde velocidad con el tiempo; esto se mide en unidades de desplazamiento por tiempo.

Tenemos en la figura 44 el acelerómetro b síco, en el cual un transductor con desplazamiento lineal está mecánicamente acoplado a una masa cargada por resorte. La aceleración a lo largo del eje mostrado producir una fuerza de reacción sobre la masa. La tensión del resorte permite más o menos desplazamiento del resorte,



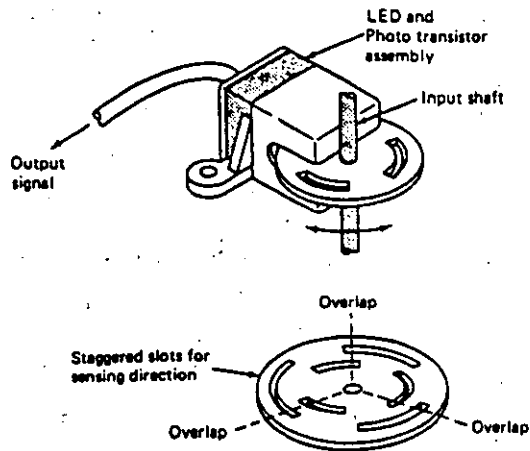


Figura 43

dependiendo de la cantidad de fuerza creada por la aceleración. La señal de salida del transductor de desplazamiento será proporcional a la aceleración.

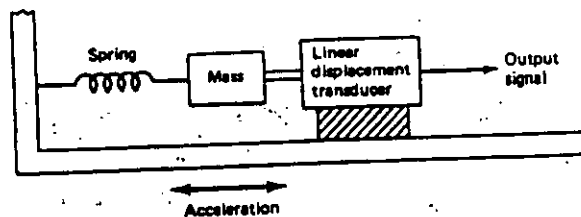


Figura 44

Un acelerómetro con LVDT (transformador diferencial variable lineal) se muestra en la figura 45. El núcleo de este y el resorte de ensamble forman la masa. El resorte en cantiliver resiste el movimiento del núcleo. El desplazamiento del núcleo será proporcional a la aceleración. La desaceleración causará un desplazamiento del núcleo opuesto y, por lo tanto, puede ser también medido. Si el acelerómetro como el mostrado en la figura 45 se pone en movimiento y después se detiene repentinamente, oscilará en su frecuencia natural de oscilación. De hecho, cualquier entrada transitoria mecánica causará oscilaciones en el sistema resorte-masa. Las oscilaciones están típicamente alrededor de 60 Hz.

En la figura 46 se tiene una onda senoidal amortiguada producida por un sistema masa-resorte. La frecuencia natural de resonancia es el recíproco de un período de oscilación. El sistema continúa oscilando, pero la fricción puede llevarlo al reposo. Esta fricción se llama

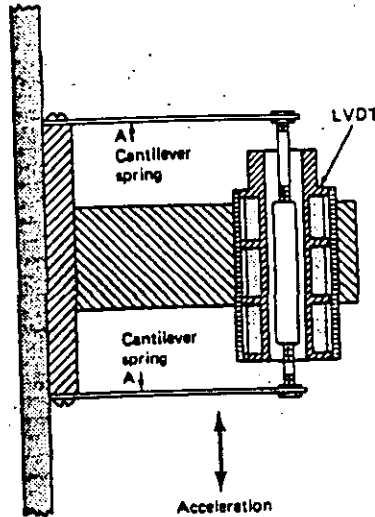


Figura 45

coeficiente de amortiguamiento. Tan mayor sea el coeficiente de amortiguamiento, más rápidamente el sistema se recupera de los transitorios.

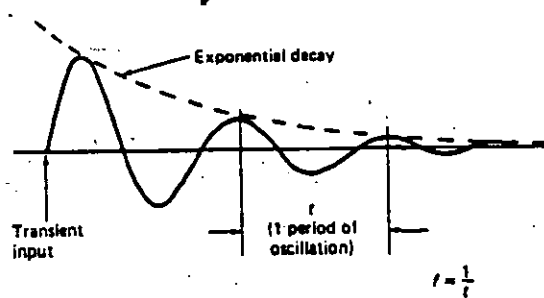


Figura 46

Algunos acelerómetros utilizan materiales viscosos como aceite para aumentar el coeficiente de amortiguamiento. Sin embargo, mucho amortiguamiento ocasiona una respuesta lenta, y el transductor no es preciso en los cambios que se produzcan en la aceleración. La frecuencia de resonancia y el coeficiente de amortiguamiento son especificaciones muy importantes de un acelerómetro. Se ha encontrado que cuando la aceleración cambia con el tiempo (lo cual es muy común) una respuesta exacta no puede ser obtenida por un acelerómetro al menos que la frecuencia de resonancia es al menos varias veces la frecuencia del cambio de aceleración. Es también importante que la masa del acelerómetro no cambie apreciablemente a la respuesta mecánica del sistema a la cual está conectada.

La figura 47 muestra un acelerómetro piezoelctrico que se presta a las rpidas aceleraciones que se tienen en la medición de choques y vibraciones. Estos transductores tienen frecuencias naturales de resonancia arriba de 40 Khz o más. Las superficies de los materiales piezoelctricos, tales como el cuarzo, se cargan cuando los materiales son mecnicamente deformados. La masa sísmica est sostenida por el alojamiento del transductor a traves de los discos de cuarzo. La masa puede ser alta para transductores largos sensibles o baja para frecuencias bajas de resonancia. Una unidad típica de alta sensibilidad tendr un rango aproximado de 100g (g es la constante de gravitación de la tierra) y una frecuencia de resonancia de 2 Khz. Una baja unidad de sensibilidad tiene un valor típico entre -20,000g a +50,000g con una frecuencia de resonancia de 40 Khz.

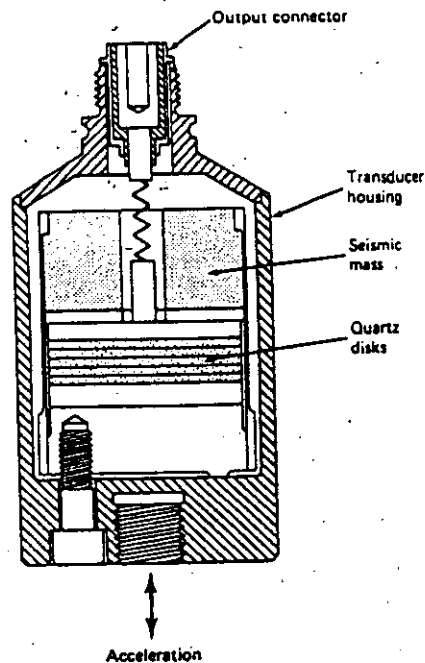


Figura 47

#### FUERZA Y FLUJO.

La fuerza se mide en Newtons (N), un Newton es igual a 0.225 lb; las fuerzas pequeñas se pueden medir en dinas (din); y un Newton es igual a 100,000 dinas.

En la figura 48 se muestra como una fuerza puede ser convertida en esfuerzo y una resistencia cambia para prpósitos de medición; la ranura en cantiliver toma una forma semicircular debido a la fuerza aplicada. La parte superior de la ranura se alarga y la superficie inferior se comprime. La ecuación muestra que la tensión en un punto dado es directamente proporcional a la magnitud y distancia de la fuerza e indirectamente proporcional al ancho de la ranura y al cuadrado del grueso de la ranura. Con todas las medidas de distancia en metros y de fuerza en newtons, las unidades de la tensión ser de

newtons por metro. Es necesario conocer el modulo de elasticidad para el material de la ranura en newtons/ metros cuadrados.

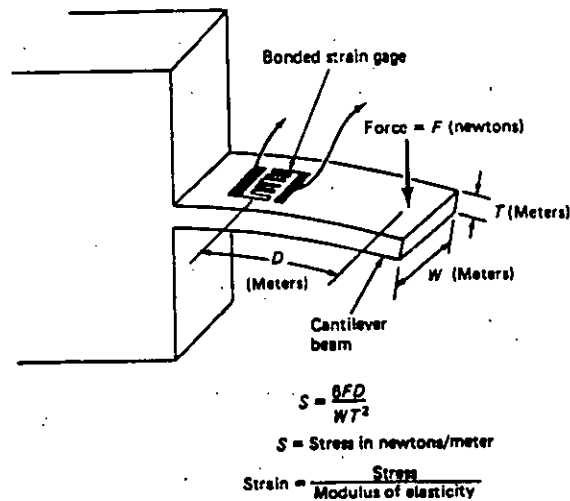


Figura 48

Los transductores de fuerza se pueden aplicar en la medición de flujo sólido; estas unidades pueden ser kilogramos/minuto, en la figura 49 se muestra un arreglo. Una celda de carga se coloca abajo de una mesa transportadora para medir la fuerza que se tiene por el material del flujo. Otro transductor, que no se muestra, da una señal proporcional a la velocidad del transportador. Un circuito o una computadora son utilizados para multiplicar las dos señales de los transductores porque el flujo es directamente proporcional al producto del peso y la velocidad.

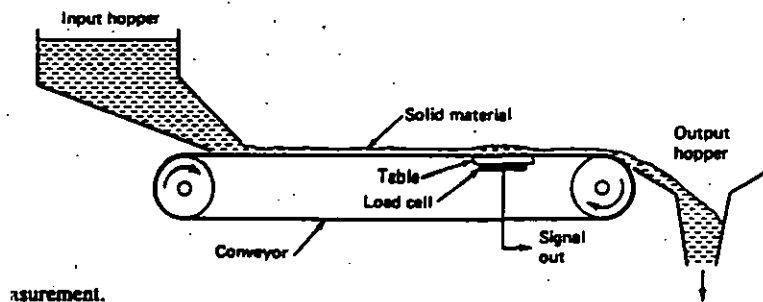


Figura 49

En los fluidos (líquido y gas) el flujo se mide de otras formas. Una manera común es utilizar un venturi para crear una diferencia de presión. Según el principio de BERNOULLI, si la velocidad de un fluido aumenta, su presión disminuye. Asimismo, cuando la velocidad del

fluido disminuye, su presión aumenta. Cuando un fluido pasa a través del venturi su velocidad debe aumentar y su presión debe caer; este es el principio que tienen los medidores de flujo. En la figura 50 se tiene un medidor de flujo para diferencia de presión de venturi. El venturi es aquella parte de la tubería donde el paso se reduce, esta rea reducida fuerza al fluido a aumentar su velocidad a través del venturi. Se nota que dos tubos de presión conectan los fuelles a dos puntos: P1 y P2. El punto P1 es un punto antes del venturi, y P2 está en el venturi. Cuando el fluido fluye, P1 será mucho mayor que P2, y la diferencia de presión será proporcional al flujo. Los fuelles se extienden en proporción a la presión. Cuando P1 sea mucho mayor que P2, el núcleo del LVDT se moverá a la derecha. Si el flujo se aumenta, el núcleo se moverá mucho más a la derecha. Si el flujo para, no habrá efecto Bernoulli y el núcleo estará centrado.

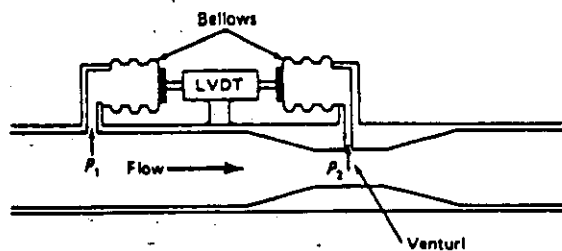


Figura 50

El medidor de flujo de turbina, que se muestra en la figura 51, es un transductor de flujo exacto y muy lineal. El fluido mueve a la turbina, al girar pasan las hojas. Entre más rápido sea el flujo, mayor será la velocidad de giro de la turbina. Las hojas de la turbina son magnetizadas, y los pulsos son inducidos en el devanado magnético localizado en la pared de la tubería.

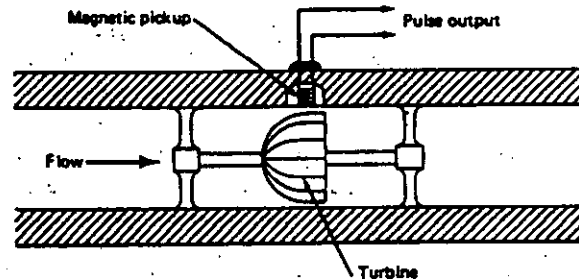


Figura 51

Los medidores de flujo de desplazamiento positivo dividen al flujo en unidades de medición y se notan por su buena exactitud. En la figura 52 tenemos un medidor de flujo de tuerca de disco. El fluido entra por el lado derecho de la casa, luego trabaja a su manera en el cuarto izquierdo de la casa interna, donde aplica presión al disco. El disco oscila (se mueve) y suelta cantidades medidas de flujo en la cámara derecha y sobre la salida de la tubería. En tanto el disco se mueva, gira la flecha superior y esta maneja un generador de pulsos localizado en la casa superior. El valor del pulso es proporcional al flujo.

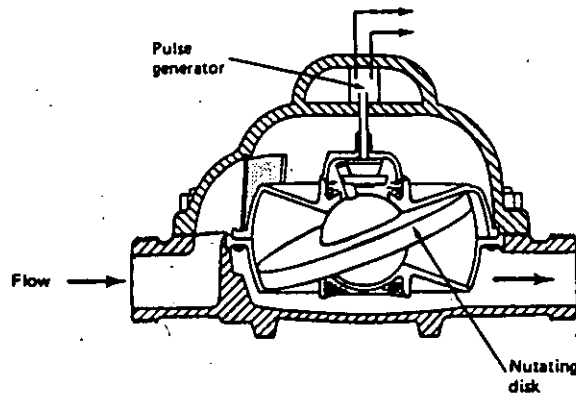


Figura 52

## INVERSOR

El término inversor normalmente se refiere al equipo usado para transformar corriente directa en alterna. Un cicloconvertidor se utiliza para transformar corriente alterna de altas frecuencias en frecuencias bajas sin ninguna conexión intermedia en dc.

En la figura 53 se tiene un inversor de dos transistores. El circuito usa una onda cuadrada de alimentación a través del transformador T2 para manejar las bases de Q1 y Q2. Cada transistor se prende y se apaga alternativamente en saturación. Cuando Q1 está encendido, Q2 está apagado, y la corriente fluye a través de la mitad superior del primario de T1. Más tarde Q1 se apaga y Q2 se enciende. La corriente ahora fluye en la mitad inferior del secundario de T1. Esto induce una onda cuadrada en el secundario de T1, esta salida de onda cuadrada se filtra (L1 y C1) para hacerla más senoidal antes de que se aplique a la carga.

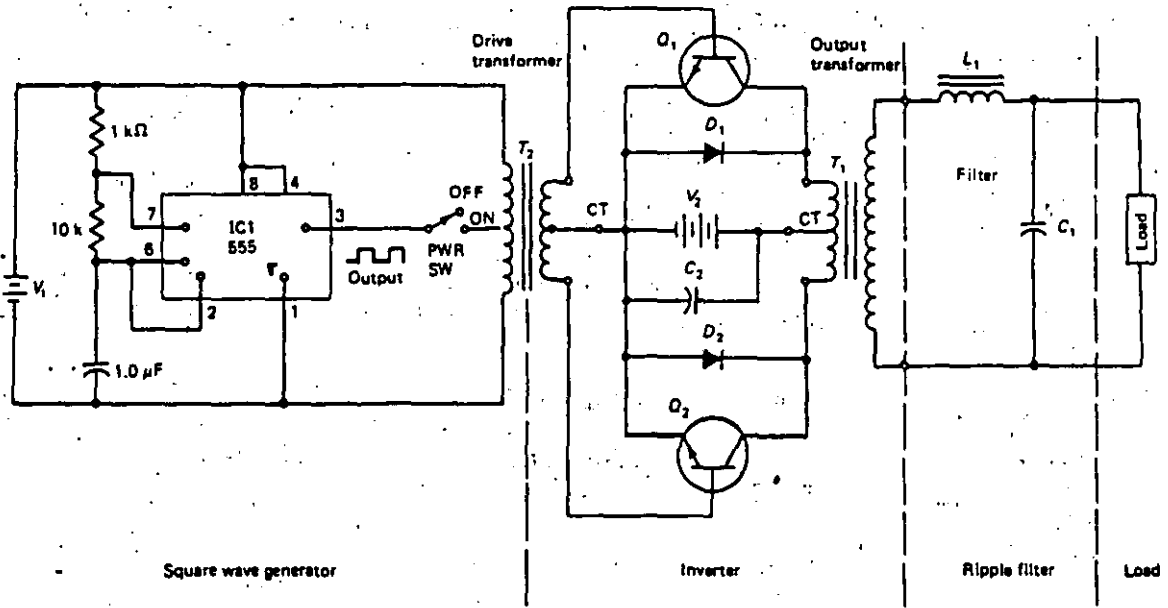


Figura 53

## BIBLIOGRAFIA

SHULER, Charles A. and McNAMEE William L., "INDUSTRIAL ELECTRONICS AND ROBOTICS, MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1986.

CHUTE, George M. and CHUTE, Robert D., "ELECTRONICS IN INDUSTRI", MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 10th Printing 1986.

MALONEY, Timothy J., "ELECTRONICA INDUSTRIAL DISPOSITIVOS Y SISTEMAS", PRENTICE HALL, 1983.

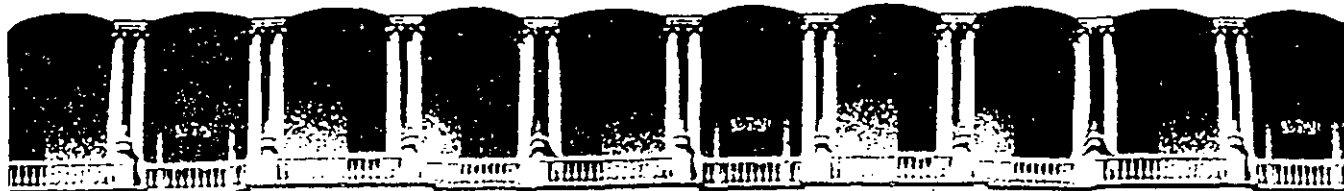
GROOVER, Mikell P., "INDUSTRIAL ROBOTICS, TECHNOLOGY, PROGRAMING, AND APLICATIONS", MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1986.

SCHILLING, Donald L. and BELOVE, Charles, "ELECTRONIC CIRCUITS, DISCRETE AND INTEGRATED", MCGRAW-HILL INTERNATIONAL STUDENTS EDITION, 1981.

LURCH, Norman E., "FUNDAMENTOS DE ELECTRONICA", CECSA, 1989.

BOYLESTAD, Robert and NASHESKY, Louis, "ELECTRONICA TEORIA DE CIRCUITOS", PRENTICE HALL, EDICION REVISADA.





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**METODO DE ELEMENTO FINITO**

**ING. MIGUEL ANGEL CRUZ MORALES**

**PALACIO DE MINERIA**

## INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO

### 1. Introducción.

El Método del Elemento Finito (MEF) es una poderosa herramienta numérica para resolver problemas matemáticos relacionados con situaciones prácticas de ingeniería. En el pasado, una práctica común era simplificar tales problemas de tal manera que una solución analítica pudiera ser obtenida. Por esta razón, tales procedimientos ocasionaban que se emplearan factores de seguridad altos en los diseños que se realizaban.

El método del elemento finito es un método numérico para resolver una ecuación o un sistema de ecuaciones diferenciales. El uso del método se ha incrementado por el desarrollo de altas velocidades en las computadoras digitales.

La aplicación del MEF implica la división del sistema físico en pequeñas subregiones conocidas como elementos. Cada elemento es esencialmente una unidad, la cual puede ser analizada. Las características de todo el sistema son aproximadas por el uso de un gran número de elementos. Una de las atracciones de el MEF es la facilidad con la cual puede ser aplicado a un problema de ingeniería que envuelve características geométricas complejas. El precio que se debe pagar por la flexibilidad y simplicidad de los elementos individuales es en la cantidad de cálculos numéricos requeridos para resolver los sistemas de ecuaciones algebraicas resultantes. Por desgracia, este simple, elegante y poderoso método ha sido limitado a investigadores y postgraduados.

### 2. Fundamentos de la Elasticidad lineal y el Elemento Finito.

En la siguiente sección se presenta un procedimiento general, basado en el principio del trabajo virtual para determinar algunas características de cada elemento finito. La aplicación y comprensión de este procedimiento se facilita por algunos conocimientos de la elasticidad, por lo cual se discutirán brevemente algunos de los aspectos esenciales de la elasticidad lineal, los cuales son de interés en el contexto

del elemento finito. Por simplicidad se prestará la mayor atención a coordenadas cartesianas.

### I. Desplazamientos y deformaciones.

Cuando los cuerpos deformables son sometidos a la acción de fuerzas externas al cuerpo, cada punto genera un desplazamiento s:

$$s = u_i + v_j + w_k \quad (1)$$

que a su vez generan interacciones entre las partículas que forman al cuerpo.

La distribución de esas interacciones se pueden obtener si se conocen los desplazamientos de cualquier punto, mediante la definición de tres funciones continuas [1]:

$$u = u(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$v = v(x, y, z, t) \quad (3)$$

$$w = w(x, y, z, t) \quad (4)$$

donde x, y, z, t son las coordenadas espaciales y temporal de cada punto antes de aplicarse cargas al cuerpo deformable.

En función de los desplazamientos, se definen las deformaciones lineales como:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (5)$$

y las deformaciones angulares como:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (6)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (7)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad (8)$$

Las primeras definen el cambio de longitud paralela a cada eje, en segmentos unitarios. Las deformaciones angulares miden el cambio angular entre segmentos ortogonales, paralelos a dos ejes.

Existen condiciones necesarias para lograr la continuidad de los desplazamientos de las partículas, que se definen por las siguientes relaciones:

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{zz}}{\partial y^2} = 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{yz}}{\partial y \partial z} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \epsilon_{zz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{xx}}{\partial z^2} = 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{xz}}{\partial x \partial z} \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( - \frac{\partial \epsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \epsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \epsilon_{xy}}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2 \epsilon_{xx}}{\partial y \partial z} \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( - \frac{\partial \epsilon_{zx}}{\partial y} + \frac{\partial \epsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \epsilon_{yz}}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 \epsilon_{yy}}{\partial z \partial x} \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( - \frac{\partial \epsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \epsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \epsilon_{zx}}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \epsilon_{zz}}{\partial x \partial y} \quad (14)$$

Este conjunto de ecuaciones forman condiciones necesarias para que todo el planteamiento de la Mecánica del Medio Continuo sea coherente y racional.

## II. Esfuerzos.

Los esfuerzos asociados a las caras anteriores y posteriores de un cubo infinitesimal extraída de un continuo, se indican como:

esfuerzos directos:  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$

esfuerzos cortantes:  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{yx},$

El primer subíndice corresponde a la cara sobre la que actúa el esfuerzo y el segundo a la dirección paralela en que lo hace dentro de aquella cara, ver fig. 1.

Para mantener el equilibrio rotacional, los esfuerzos cortantes deben de ser complementarios, esto es:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (15)$$

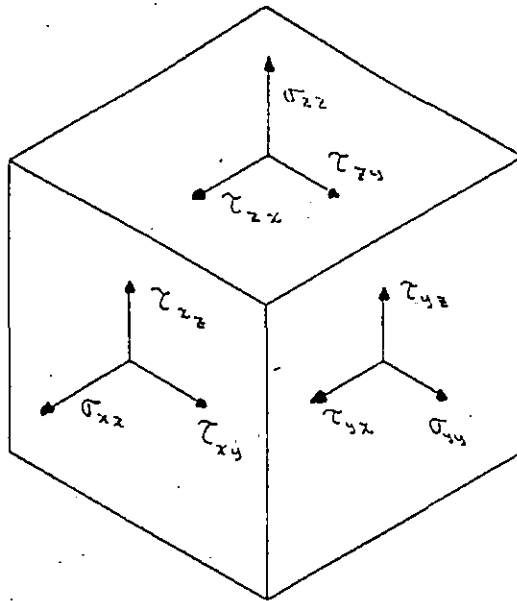


Fig. 1. Componentes de esfuerzo referidas a coordenadas cartesianas

Aplicando las ecuaciones de equilibrio estático,  $\sum F_x=0$ ,  $\sum F_y=0$  y  $\sum F_z=0$ , se llega a las expresiones:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + f_x = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + f_y = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + f_z = 0 \quad (18)$$

donde  $f_x$ ,  $f_y$  y  $f_z$  son las componentes locales de las fuerzas de cuerpo asociadas a un marco general cartesiano de referencia.

### III. Relaciones esfuerzo deformación.

Asumiendo condiciones mediante las cuales el material del cuerpo es elástico, isótropico y homogéneo, las deformaciones

normales se relacionan con los esfuerzos mediante la Ley de Hooke como:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})) \quad (19)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})) \quad (20)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})) \quad (21)$$

Asimismo, las deformaciones angulares se relacionan con los esfuerzos cortantes de la siguiente forma:

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy}/G \quad (22)$$

$$\gamma_{yz} = \tau_{yz}/G \quad (23)$$

$$\gamma_{zx} = \tau_{zx}/G \quad (24)$$

donde G es el módulo de rigidez y esta dada por

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (25)$$

Es conveniente escribir las seis componentes de la deformación en forma matricial, como sigue:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Al invertir la matriz anterior tenemos:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (27)$$

en la cual  $\lambda$  es el conocido coeficiente de Lamé, y esta dado por:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (28)$$

Combinando las ecs. (5)-(8), (16)-(18) y (27) se obtiene un conjunto de ecuaciones de equilibrio del tipo [2]:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \Delta u + f_x = 0 \quad (29)$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \Delta u + f_y = 0 \quad (30)$$

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu \Delta u + f_z = 0 \quad (31)$$

donde:

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (32)$$

Con las cuales es posible obtener los desplazamientos, y de estos desplazamientos, las deformaciones y finalmente los esfuerzos.

Salvo en casos especiales donde la geometría del problema es simple, estas ecuaciones pueden resolverse en forma analítica, por lo que se recurre a otros métodos de solución cuando se tienen geometrías complejas. Por un lado, tenemos métodos experimentales y, por otro, métodos numéricos de solución.

Los métodos experimentales se basan en mediciones directas sobre modelos de las piezas o sobre las mismas piezas en proceso de análisis, obteniéndose resultados gráficos, visuales o medidas directas de los desplazamientos en la pieza o en el modelo. Estos resultados se traducen en los valores reales de esfuerzo o de deformación [3]. Dentro de los métodos más conocidos se tiene el de lacas frágiles, las galgas extensométricas y la fotoelasticidad.

A diferencia de los métodos experimentales, los métodos numéricos resuelven en forma aproximada las ecuaciones diferenciales, por ejemplo el Método del Elemento Finito y el Método de Diferencias Finitas.

#### IV. Concepto Fundamental del Método del Elemento Finito. •

El concepto fundamental del Método del Elemento Finito es que cualquier función continua, como la temperatura, la presión o los desplazamientos, pueden ser aproximados a un modelo discreto compuesto de una serie de segmentos continuos de funciones, definidas sobre un número finito de subdominios [3]:

El modelo discreto se construye como sigue:

- 1.- Un número finito de puntos en el dominio es definido. Estos puntos se conocen como puntos nodales o nodos.
- 2.- El valor de la cantidad continua en cada punto nodal es denotado como una variable la cual sera determinada.
- 3.- El dominio total se divide en un número finito de subdominios llamados elementos. Estos elementos son conectados mediante los nodos, el conjunto de todos los nodos y el conjunto de todos los elementos aproximan la forma del dominio.
- 4.- La función continua es aproximada sobre cada elemento por una función polinomial. El "ajuste" de los coeficientes del polinomio se realiza de tal manera que nos de la "mejor" aproximación posible a la verdadera función continua. Este ajuste es acompañado por alguna minimización de cantidades asociadas con el problema físico. El proceso de minimización produce un conjunto de ecuaciones lineales que se resuelven para encontrar el valor de la función en los nodos.

El concepto fundamental del elemento finito es más fácil de comprender mediante un ejemplo unidimensional. En un elemento estructural de longitud  $L$ , sección transversal uniforme  $A$  y sometido a una carga axial centrada  $P$ , se desean conocer los desplazamientos en la dirección en que se aplica la carga, ver fig. 2.

De la ecuación (2), (5) y (19) tenemos que la deformación esta dada por:

$$\epsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E} \quad (33)$$

como la sección transversal y la fuerza son constantes, y el desplazamiento se da solo en la dirección de la carga tenemos una



• La solución de este problema mediante el método del elemento finito se realiza de la siguiente manera: la función continua es el desplazamiento  $u(x)$  y el dominio es el intervalo  $0L$  a lo largo del eje  $x$ . Cinco puntos a lo largo del eje  $x$  son identificados y numerados, ver fig. 3a. Estos puntos son los nodos. Los valores  $u(x)$  son especificados en cada nodo. La división del dominio en elementos puede realizarse de varias maneras, por ejemplo, se puede limitar cada elemento a dos nodos formando cuatro elementos, se puede dividir el dominio en dos elementos con tres nodos o se pueden utilizar solo dos nodos teniendo un solo elemento, ver fig. 3b.

Cuando se tienen dos nodos por elemento la función que se puede utilizar es un función lineal, en tanto que cuando se utilizan tres nodos la función puede ser un polinomio de segundo grado, ver fig. 3b. En este caso solo se considera un elemento, el cual es suficiente para ilustrar el concepto básico del método definido por los nodos  $U_1$  y  $U_2$ . De esta forma el polinomio que aproxima el desplazamiento en el elemento es:

$$u = \alpha_1 + \alpha_2 x \quad (36)$$

Los coeficientes  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  pueden ser determinados usando las condiciones nodales:

$$u = 0 \text{ en } x = 0 \quad (37)$$

y

$$u = U_2 \text{ en } x = L \quad (38)$$

de estas condiciones resulta un par de ecuaciones, al sustituir las condiciones anteriores en (36):

$$0 = \alpha_1 + \alpha_2(0) \quad (39)$$

$$U_2 = \alpha_1 + \alpha_2(L) \quad (40)$$

las cuales conducen a que:

$$\alpha_1 = 0 \quad (41)$$

$$\alpha_2 = \frac{U_2}{L} \quad (42)$$

sustituyendo los valores para  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  en (36) se obtiene una función sobre el elemento que aproxima al desplazamiento:

$$u = \frac{U_2}{L} x \quad (43)$$

ecuación diferencial que rige el comportamiento del desplazamiento:

$$\frac{du}{dx} = \frac{P}{EA} \quad (34)$$

separando variables e integrando en toda la longitud, obtenemos el desplazamiento como:

$$u = \frac{P L}{EA} \quad (35)$$

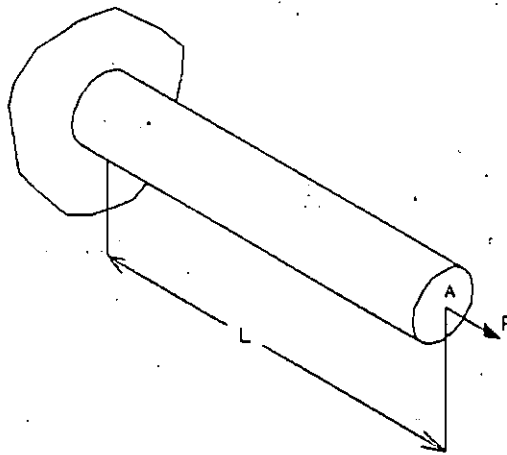


Fig. 2. Barra cargada axialmente.

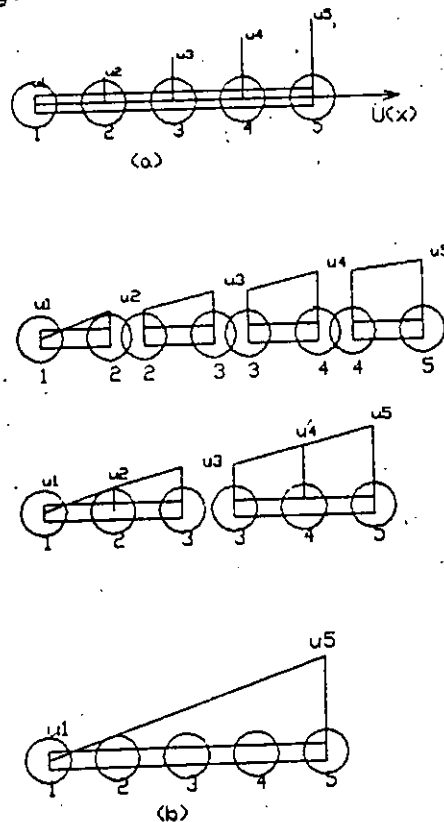


Fig. 3. Nodos y elementos.

En este caso la minimización que se realiza es sobre la energía potencial del sistema y esta dada por:

$$\pi = \int_v \frac{\sigma_{xx} \epsilon_{xx}}{2} dV - P U_2 \quad (44)$$

la integral contiene el término de la energía de deformación, mientras  $P U_2$  es el trabajo hecho por la carga aplicada. El esfuerzo  $\sigma_{xx}$  se relaciona con la componente de la deformación  $\epsilon_{xx}$  por medio de la Ley de Hooke, (33), así la (44), puede ser escrita como:

$$\pi = A E \int_0^L \epsilon_{xx}^2 dx - P U_2 \quad (45)$$

donde  $dV = A dx$  y  $A$  es constante.

La componente de deformación es referida al desplazamiento por  $\epsilon_{xx} = dU/dx$ . Por lo cual derivando (43) tenemos:

$$\epsilon_{xx} = \frac{U_2}{L} \quad (46)$$

La energía potencial para el sistema es:

$$\pi = \frac{AE}{2} \int_0^L \left[ \frac{U_2}{L} \right]^2 dx - P U_2 = \frac{AE}{2L} U_2^2 - P U_2 \quad (47)$$

De la minimización de  $\pi$  con respecto a  $U_2$  obtenemos:

$$\frac{d\pi}{dU_2} = \frac{AE}{L} U_2 - P = 0 \quad (48)$$

la solución nos da:

$$U_2 = \frac{P L}{A E} \quad (49)$$

el cual es idéntico al valor teórico. El valor teórico fue obtenido en este ejemplo porque los desplazamientos varían linealmente en el modelo y el problema físico.

El concepto básico del Método del Elemento Finito es también aplicable a dos y tres dimensiones.

## V. Algoritmo para la aplicación del MEF mediante un sistema CAD.

El MEF mediante un sistema CAD es una herramienta que permite modelar y analizar los comportamientos estáticos, dinámicos, térmicos o de flujo potencial de componentes mecánicos y estructuras.

El análisis por MEF en un sistema CAD esta constituida por tres fases [4]. Estas son:

### a) Pre-Procesamiento.

El objetivo de esta fase es principalmente el preparar la información para el análisis, lo que incluye definir la geometría, generar el modelo de elementos finitos mediante los tipos de generación de mallas, acceder las propiedades físicas y de material, describir las condiciones de frontera y cargas. Esta es la etapa que requiere bastante conocimiento y experiencia en dos areas:

\*El sistema que se analiza.

\*\*El Método del Elemento Finito.

El Pre-procesador es considerado como la parte más costosa del procesamiento, principalmente en términos de horas-hombre.

Los siguientes pasos son estándar durante esta fase:

1.- Definir Geometría. El primer paso preparatorio para usar elementos finitos es el definir o dibujar la pieza/sistema que será analizado. El cómo se lleva a cabo este paso depende del tipo de software con que se cuenta, y de la computadora también. El caso ideal es el poder usar la misma estructura de datos que se usa en otras partes del diseño. La superficie o el volumen definido será el Dominio del problema.

2.- Discretizar Componente/Sistema. El siguiente paso es el dividir la geometría o región de solución en subregiones. La intención es el identificar las posiciones importantes en la parte que será analizada. El número, tipo, tamaño y orden de los elementos finitos será decidido posteriormente.

3.- Seleccionar el Modelo de Aproximación. Debido a que estamos aproximando la solución exacta al problema, una función de

interpolación  $\phi$  adecuada se debe de definir para cada región o elemento finito. La función escogida debe ser sencilla desde el punto de vista computacional y numérico, pero al mismo tiempo debe satisfacer ciertos requisitos relacionados con la física del problema generalmente la función para interpolar la solución de la variable de campo, desplazamientos en el caso de mecánica de sólidos, es una función polinomial ( $A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots + A_nx^n$ ). El grado del polinomio definirá el número mínimo de nodos necesario en cada región/elemento. Esto a la vez define el número de grados de libertad en el análisis.

Toda otra información adicional requerida debe de ser especificada durante el Pre-proceso. Ello incluye básicamente:

- \* condiciones de frontera

- \*\* cargas aplicadas.

En la mayoría de los casos, lo que se tiene después del Pre-proceso es un archivo con toda la información que completamente describe el Modelo de Elementos Finitos.

#### b) Análisis

La segunda fase es realmente el análisis. Es decir, el procedimiento numérico para resolver el problema aproximado. El análisis consiste en el ensamble y solución de un grupo de ecuaciones simultáneas. Cada una de estas ecuaciones corresponde a un grado de libertad en el Modelo. Cuando el grupo de ecuaciones es expresado en forma matricial, las Matrices Globales definen el sistema completo, y las Matrices Elementales describen cada elemento. Esta fase es la más costosa en términos de computación. Los pasos a seguir en esta fase son:

1. Obtener Matrices Elementales. Después de que se seleccionó una función para la variable de campo, es necesario determinar el tipo de comportamiento que seguirá cada elemento finito definido en el Modelo. Este comportamiento es expresado en forma de matrices. Las matrices son derivadas mediante:

- \* la formulación de las condiciones de equilibrio, y/o

- \*\* la aplicación de algún principio variacional.

Para ciertos elementos estándar (e.g. barras, vigas, contacto) las matrices se pueden obtener de libros o manuales. En el caso de

análisis estático, la Matriz de Rigidez ( $[k]_i$ ), el Vector de Fuerzas Nodales ( $\{f\}_i$ ), y el Vector de Desplazamientos ( $\{d\}_i$ ) deben de ser derivados. La condición de equilibrio en cada elemento se puede expresar de la siguiente forma:

$$[k]_i \{d\}_i = \{f\}_i \quad (50)$$

2. Ensamble de Matrices Globales. Dado que el dominio fué discretizado en varios elementos, ahora debemos de ensamblar las matrices elementales para formular la condición global de equilibrio, es decir:

$$[K] \{D\} = \{F\} \quad (51)$$

Este proceso de ensamble es uno bastante rutinario, consiste únicamente de aumentar el tamaño de las matrices elementales al tamaño correspondiente de las matrices globales, y entonces sumarlas todas juntas. Matemáticamente:

$$\sum_{i=1}^N [k]_i \sum_{i=1}^N \{d\}_i = \sum_{i=1}^N \{f\}_i \quad (52)$$

3. Resolver Sistema de Ecuaciones. El grupo de ecuaciones simultáneas que se obtiene al aplicar la condición global de equilibrio debe ser resuelto. La solución será el vector de valores de los grados de libertad, en este caso los desplazamientos de los nodos en la malla. Antes de intentar resolver el sistema de ecuaciones se deben de usar las condiciones de frontera, de lo contrario sería imposible obtener solución alguna pues la matriz  $[K]$  es singular. La Matriz de Rigidez ( $[K]$ ) es una matriz cuadrada, simétrica, con un ancho de banda, y es positiva definida. Varios métodos numéricos existen para resolver este tipo de problemas, entre ellos podemos mencionar:

\* Eliminación de Gauss

\*\* Factorización de Choleski.

c) Post-procesamiento.

Esta última fase abarca la graficación de deflexiones y esfuerzos, y comparar estos resultados con el criterio de falla establecido en el diseño tal como máxima deflexión permitida, las resistencias estática y de fatiga del material, etc. La visualización de los resultados permitira sugerir modificaciones del elemento analizado. Los siguientes pasos son los típicos:

1. Calcular Esfuerzos. En un análisis estático en el campo de la mecánica de sólidos, la magnitud del desplazamiento y del esfuerzo son el criterio de diseño. Para el cálculo del vector de esfuerzos ( $\{\sigma\}$ ) a partir del vector de desplazamientos ( $\{D\}$ ), conceptos de teoría de elasticidad se deben de aplicar. El procedimiento se hace para cada elemento finito. Primero se calculan deformaciones unitarias en cada elemento finito en base a desplazamientos:

$$\{\epsilon\}_i = [B]\{d\}_i \quad (53)$$

donde:  $\{\epsilon\}_i$  es el vector de deformaciones unitarias,  $[B]$  es la Matriz de Deformación Desplazamiento, y  $\{d\}_i$  es el vector de desplazamientos. Ahora bien, los esfuerzos en cada elemento pueden ser calculados a partir de las deformaciones unitarias:

$$\{\sigma\}_i = [E]\{\epsilon\}_i \quad (54)$$

siendo  $\{\sigma\}_i$  el vector de esfuerzos, y  $[E]$  la matriz de elasticidad para el material.

8. Visualizar Resultados. Una vez que se cuenta con los valores de parámetros tales como desplazamientos y esfuerzos, se puede hacer uso de técnicas de gráficas con computadora y visualizar los resultados. Típicamente, métodos de interpolación son usados para generar gráficas de:

- \* dominio deformado
- \*\* isoclinas de desplazamientos
- \*\*\* franjas de esfuerzos.

3. Análisis de Error. Como mencionamos anteriormente, la solución que se obtiene es únicamente una aproximación a la solución real. La validez de esta solución depende de varios factores y decisiones en el procedimiento. Siendo este el caso, es de esperarse cierto error en los resultados. Diferentes algoritmos han sido propuestos para minimizar, o al menos reducir, la magnitud del error. Entre ellos se puede mencionar:

- \* Garantía de Equilibrio
- \*\* Refinamiento de la Malla.

La Garantía de Equilibrio, inicialmente propuesta por G. Loubignac, consiste en un procedimiento iterativo que chequea por un balance de fuerzas. Básicamente, el total de fuerzas aplicadas al sistema debe ser igual al total de reacciones producidas en los

elementos finitos. En caso de que un desbalanceo exista, entonces se puede calcular un incremento en el vector solución (i.e. desplazamientos) que los reducirá. El nuevo vector de desplazamientos será la suma del vector original y los incrementos calculados. Las ecuaciones que describen ésta técnica son:

$$[K]\{\Delta D\} = \{F\} - \sum_{i=1}^N \{RCT\}_i \quad (55)$$

$$\{D\}_{\text{nuevo}} = \{D\}_{\text{previo}} + \sum_{k=1}^K \{(\Delta D)_k\} \quad (56)$$

Este procedimiento es aplicado al final del análisis y no requiere modificación al modelo. El segundo procedimiento, Refinar la malla, es más complicado debido a la necesidad de modificar el modelo de elementos finitos y repetir el análisis completo, lo cual puede resultar bastante costoso.

## VI. Principios de los elementos finitos.

### a) Discretización de un cuerpo.

La discretización de un cuerpo en sub-regiones es la primera de una serie de pasos que debe de realizarse cuando se resuelve un problema de ingeniería por el método del elemento finito. Este paso no tiene una base teórica establecida y depende del uso del criterio de la persona que este realizando la discretización. La aplicación de un pobre o impropio juicio producirá resultados inadecuados en los subsiguientes pasos que están interrelacionados a él.

La discretización de un cuerpo comprende la decisión tanto del número, tamaño y forma de los elementos usados en el modelo del cuerpo. El objetivo general de tal discretización es la de dividir el cuerpo en elementos lo suficientemente pequeños para que simples funciones de desplazamiento puedan adecuadamente aproximar la solución. Es necesario recordar que una gran cantidad de elementos ocasiona mayor tiempo de computo para su solución. Sin embargo, varias reglas generales pueden establecerse para



guiar el proceso de discretización cuando no se tiene experiencia en este campo.

b) Tipos de elementos.

Elementos unidimensionales: Cuando la geometría, propiedades del material y variables dependientes tales como la temperatura, desplazamientos o esfuerzos pueden ser descritos en términos de una coordenada espacial, un elemento unidimensional puede ser utilizado. El elemento unidimensional más simple tiene dos nodos, uno en cada extremo. Este elemento tiene una sección transversal constante y es mostrado esquemáticamente como una línea, como se muestra en la fig. 4 (a). Los elementos unidimensionales de mayor orden son los que tienen tres nodos (cuadrático) y cuatro nodos (cúbico) como se muestra en la fig. 4 (b) y (c). Este tipo de elementos son comúnmente empleados en problemas estructurales y de transferencia.

Elementos bidimensionales. Existen dos tipos de elementos usados para el modelado en el dominio bidimensional, el triángulo y el cuadrilátero de la fig. 5 (a) y (b). En este caso, el elemento lineal en cada familia tiene lados rectos, pero los elementos de mayor orden, cuadráticos y cúbicos, pueden tener lados rectos, curvos o ambos. La capacidad de tener fronteras curvas es posible por la existencia de nodos intermedios en cada borde de los elementos. El elemento bidimensional se emplea en problemas de esfuerzo plano, deformación plana, etc.

Elementos tridimensionales. Los elementos tridimensionales más comunes son variaciones de los elementos bidimensionales, tetrahedros y hexahedros. Un tetrahedro tiene cuatro nodos, mientras que un hexahedro general y un prisma rectangular tienen ocho nodos como se observa en la fig. 6. En este caso, los elementos lineales están restringidos a superficies planas, mientras que los elementos de mayor orden pueden tener superficies curvadas en cada cara.

Algunos problemas tridimensionales pueden ser aproximados por dos coordenadas independientes. Tales problemas pueden ser aproximados utilizando un elemento axisimétrico como se muestra en la fig. 7. Los problemas que poseen simetría axial como pistones, recipientes a presión, discos giratorios, caen dentro de esta categoría. Es conveniente expresar estos problemas en términos de

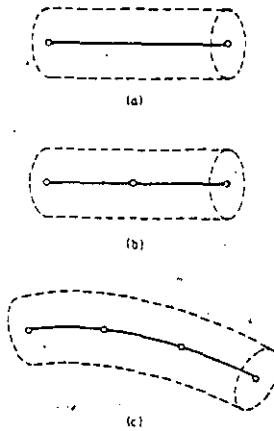


Fig. 5. Elementos finitos unidimensionales.

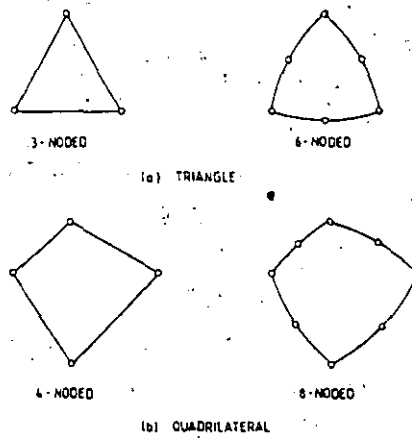


Fig. 6 Elementos finitos bidimensionales.

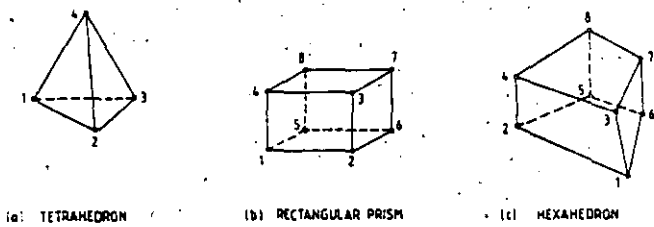


Fig. 7 Elementos finitos tridimensionales.

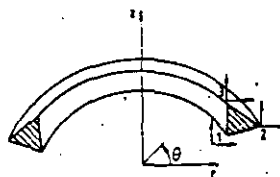


Fig. 8. Elemento axisimetrico.

un sistema coordinado cilindrico. Porque por la simetría, las componentes de esfuerzo son independientes de la dirección tangencial ( $\theta$ ).

c) División del cuerpo en elementos.

El proceso de discretización puede ser dividido en dos partes: la primera se refiere a la división del cuerpo en elementos y la segunda con el etiquetado de los elementos y la numeración de los nodos; éste último es muy simple pero puede ocasionar complicaciones en cuanto a la eficiencia computacional.

El tipo de elementos que serán usados se establecen en primer lugar de acuerdo a las características físicas del problema. Por ejemplo, elementos unidimensionales son usados si el problema envuelve el análisis de una estructura, un problema unidimensional de transferencia de calor o la respuesta dinámica de alguna máquina rotatoria. Similarmente, en el caso de análisis de esfuerzos de componentes de elementos de máquinas, el modelado de los componentes se puede realizar con elementos tridimensionales si la geometría es muy compleja o en algunos casos se puede realizar empleando elementos bidimensionales.

El tamaño de el elemento debe ser seleccionado con cuidado. Si el tamaño de el elemento es relativamente pequeño, la solución será más adecuada. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente esto incrementa el tiempo de computo y el costo. En algunas situaciones, un cuerpo tiene zonas en las cuales se producen variaciones en los esfuerzos y en las deformaciones, por ejemplo regiones en las cuales existen concentración de esfuerzos. En este caso, es necesario formar una fina malla de elementos en y cerca de la región donde se manifiesta dicho efecto.

d) Etiquetado de nodos.

El etiquetado de los nodos (asignación de un número) influye en la eficiencia computacional asociada con la obtención de una solución. El conjunto de ecuaciones lineales generado cuando se utiliza el método del elemento finito tiene una gran cantidad de elementos que son cero. Un listado de las ecuaciones pueden mostrar que todos los elementos diferentes de cero y algunos valores que son cero quedan comprendidos entre dos líneas las cuales son paralelas a la diagonal principal, como se muestra en

el siguiente sistema de ecuaciones:

← Bandwidth →

$$\begin{bmatrix} a & a & a & 0 & a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a & 0 & a & a & a & a & 0 & 0 & 0 \\ a & a & a & 0 & a & a & a & 0 & 0 \\ a & a & a & a & 0 & a & a & a & 0 \\ a & 0 & a & 0 & a & a & a & 0 & a \\ 0 & a & a & a & a & 0 & a & a & a \\ 0 & 0 & a & a & a & a & a & a & a \\ 0 & 0 & 0 & a & a & a & 0 & a & a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a & a & a & a & a \end{bmatrix}$$

La distancia de la diagonal principal a la línea punteada de la figura anterior es llamado el ancho de banda (bandwidth). Todos los coeficientes fuera del ancho de banda son cero, y por lo cual no tienen que ser almacenados.

El ancho de banda B es calculado usando la siguiente formula:

$$B = (N + 1) D$$

donde N es la mayor diferencia entre los nodos numerados de un simple elemento y D es el número de incognitas en cada nodo (grados de libertad). La minimización de B depende de la minimización de N la cual puede ser parcialmente reducida por el etiquetado de nodos a través de un examen de la dimensión mas corta del cuerpo. Ejemplos de dos diferentes sistemas de numeración se muestran en la fig. 8. El valor de B para el primer sistema de numeración es 9, mientras que para el segundo sistema es de 6.

e) Efectos del refinamiento de mallas y elementos de mayor orden para una adecuada solución.

Una adecuada solución por el método del elemento finito puede ser realizada por i) refinamiento de la malla y ii) selección de funciones de interpolación de mayor orden. En i), la solución esta dada por una mayor cantidad de segmentos de funciones que aproximan de una mejor forma la solución exacta. En ii), la solución depende de la selección de una apropiada función de interpolación.

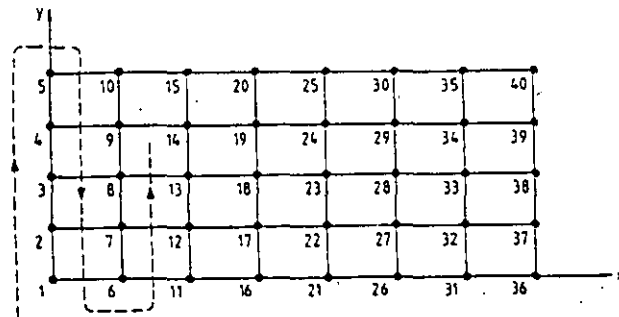
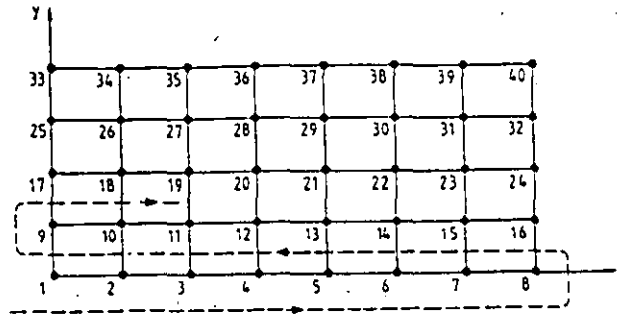


Fig. 8 Numeración de nodos para reducir el ancho de banda.

Un incremento en el número de elementos generalmente significa una mejor solución. Sin embargo, para algún problema, habrá un cierto número de elementos en los que la solución no varía significativamente. Otra característica de la discretización que afecta la solución del método es la razón de aspecto de los elementos.

La razón de aspecto describe la forma del elemento en el ensamble. Para elementos bidimensionales, este parámetro se define como la razón de la dimensión más grande del elemento a la dimensión más pequeña. Esta razón da un factor para saber si el elemento puede ser utilizado o no dentro del análisis.

Las más populares funciones de interpolación de los elementos son los polinomios. Las funciones de interpolación pueden ser clasificadas en tres grupos de acuerdo al orden de la función de interpolación del elemento. Estos grupos son simples, complejas y múltiples. El elemento simple tiene una aproximación polinomial

que consiste de un término constante más el término lineal. El número de coeficientes en el polinomio es igual a la dimensión de el espacio coordinado más uno. El elemento complejo utiliza una función polinomial que consiste en una constante, el término lineal más términos de segundo, tercero y mayor grado que sean necesarios. El elemento múltiple utiliza polinomios que contienen términos de alto orden, pero las fronteras del elemento deben de ser paralelos a los ejes coordinados para garantizar la continuidad entre elementos. Las fronteras de los elementos simples y complejos no están sujetos a esta restricción.

La experiencia indica que con pocos elementos de alto orden se puede obtener gran exactitud, donde los gradientes no pueden ser aproximados por un conjunto de valores constantes. Aunque no se reduce el tiempo de cálculo.

## ANALISIS DINAMICO Y DE ESFUERZOS EN LA TRANSMISION DE LAVADORAS

Miguel Angel Cruz Morales  
Alvaro Ayala Ruiz  
Angel Rojas Salgado  
Facultad de Ingenieria, UNAM  
Apdo. Postal 70-256  
04510 México. D.F.

### RESUMEN

Se presenta una metodología para análisis y sustitución de partes en transmisiones, se hace primero el análisis dinámico de la transmisión de lavadoras de ropa de agitador para calcular las fuerzas inerciales que intervienen y se comparan con los resultados del análisis estático. Hecha esta comparación, a continuación se procede a realizar el análisis de esfuerzos y deformaciones del cuerpo del engrane conductor por el método del elemento finito. Con el conocimiento anterior se procede al cambio de materiales realizando unicamente cambios en las propiedades específicas, obteniéndose la misma funcionalidad, elementos más ligeros y conocimiento teórico de los límites para su uso y garantía.

### INTRODUCCION

Uno de los aparatos electrodomésticos de mayor uso en el hogar es la lavadora de ropa. La lavadora de ropa realiza una acción mecánica a través del movimiento y una acción química por medio del detergente para la extracción de la mugre. De acuerdo a la acción mecánica las lavadoras de ropa las podemos clasificar en: lavadoras de tambor, lavadoras de agitador y lavadoras de disco.

En el mercado existe un gran número de marcas de lavadoras de ropa de agitador que tienen entre sí diferencias de construcción importantes. Sin embargo, la mayoría de las lavadoras funcionan bajo el mismo principio y emplean componentes que en muchos aspectos son similares, por ejemplo: la transmisión está

constituida de un mecanismo de cuatro barras articuladas RRRR, que es el más común, el objeto de este mecanismo es el de transformar el movimiento de rotación del motor a un movimiento oscilatorio del agitador, el cual crea turbulencia en la tina de lavado haciendo pasar el detergente en suspensión entre los tejidos y transmite la fuerza necesaria para la extracción de la mugre. En este tipo de mecanismo los elementos de entrada son un par de engranes helicoidales con las mismas características físicas para las diferentes marcas de lavadoras de agitador.

Para los consumidores, las lavadoras de ropa presentan problemas, ya que algunos componentes son objeto de reparación o sustitución con mayor frecuencia, por ejemplo: la transmisión y el agitador. Los fabricantes coinciden en que la falla en la transmisión se presenta en los engranes que la componen, debido al mal diseño de los mismos, a la mala calidad del material y al mal uso de la lavadora por parte del usuario [1]. En cuanto al agitador las averías son causadas por el mal uso y al desgaste natural.

En el presente trabajo se emplea la computadora digital y los sistemas de computación (Sistemas de Diseño Asistido por Computadora CAD ) como una herramienta que nos permite por una parte integrar las complejas técnicas numéricas para el análisis, y evaluar los pares y fuerzas críticas en un ciclo completo de operación del mecanismo, al realizarse un análisis dinámico y posteriormente estático, para así determinar la ventaja mecánica de la transmisión de la lavadora de ropa. Por otro lado se obtuvieron las propiedades geométricas como las propiedades dinámicas de cada uno de los elementos que integran el mecanismo, con lo cual se puede simular el movimiento del mismo. Conocidas las condiciones de carga de cada elemento, se analiza el problema del material en el engrane de entrada para llevar a cabo la sustitución por un material plástico. Para el diseño de los dientes del engrane se emplea el método tradicional, mediante la ecuación de Lewis. En el diseño del cuerpo del engrane los métodos analíticos no son empleados cada vez que se ha de diseñar un engrane, muchas veces el diseñador realiza este trabajo utilizando criterios adecuados a la experiencia [2]. En este caso por la sustitución del material se hace un análisis de esfuerzos mediante



el método de elemento finito, para determinar de una forma sistemática la posible utilización de este material en dicho elemento. En los dientes no se realiza un análisis de esfuerzos mediante esta técnica porque no se considerarían las cargas dinámicas y de desgaste [3].

#### PROCESO DE CALCULOS

En la Fig. 1 se muestran las partes que constituyen una lavadora de agitador y en la cual se observa la colocación de la transmisión. En la Fig. 2 se presenta la transmisión empleada en este tipo de lavadora y en la Fig. 3 los elementos del mecanismo de accionamiento. Este mecanismo es accionado por un motor de 1/4 de Hp a través de un conjunto de poleas que se conectan al piñón helicoidal. El piñón se acopla al engrane de entrada transmitiendo un par de 203 lb-in a una velocidad angular del engrane de entrada de 70 rpm, de acuerdo a las reducciones existentes en la lavadora que se analiza. El movimiento del engrane de entrada se transmite por un lado al mecanismo de accionamiento de los rodillos y por otro al sector de engrane a través de la biela para producir un movimiento oscilatorio. Este movimiento oscilatorio es transmitido a la flecha del agitador mediante el piñón que se acopla al sector. El mecanismo formado por estos elementos es un mecanismo RRRR del tipo manivela-oscilador. El engrane de entrada constituye la barra de entrada, la biela la barra acopladora y el sector de engrane la barra de salida, Fig. 4.

Cada uno de los diferentes elementos del mecanismo se crearon a través del modelador de sólidos del sistema de CAD, empleando y combinando las diversas técnicas existentes para la creación de objetos (barrido rotacional, barrido de desplazamientos y la creación de primitivos), utilizando también operaciones booleanas (corte, unión, etc.) [4]. Asimismo, se obtuvieron las propiedades físicas de cada uno de los elementos que constituyen el mecanismo mediante la asignación de la densidad del material (ver tabla I), para poder realizar el análisis dinámico de este mecanismo en las condiciones actuales de funcionamiento y obtener las condiciones de carga a las que se encuentra sometido cada uno de los componentes.

TABLA I

ELEMENTO	MASA(lb)	MOMENTO DE INERCIA REFERIDO AL CENTRO DE MASA (lb-in <sup>2</sup> )
Engrane de entrada	2.6487	9.9927
Biela	1.0154	6.3959
Sector de engrane	1.1364	2.0274

El análisis dinámico comprende la obtención de las fuerzas en cada articulación  $f_i$  y el par de salida  $T_4$ . El sistema de fuerzas en las articulaciones es el resultado combinado de los efectos de las cargas estimadas que actúan en el mecanismo y las fuerzas dinámicas inducidas por la aceleración de las barras. Cabe mencionar que la cinemática se realizó con base en números complejos tal como lo describe Angeles en su libro [5]. Este cálculo está basado en la solución de un sistema de ecuaciones. El desarrollo está descrito en el libro de Suh y Radcliffe [6], tal como se muestra a continuación:

$$\begin{array}{cccccccc|cccc}
 -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{1x} & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{1y} & 0 \\
 q_{2y} & -q_{2x} & -p_{2y} & p_{2x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{2x} & -T_2 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & f_{2y} & m_3 \ddot{a}_{3x} \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & f_{3x} & m_3 \ddot{a}_{3y} \\
 0 & 0 & q_{3y} & -q_{3x} & -p_{3y} & p_{3x} & 0 & 0 & 0 & f_{3y} & I_3 \alpha_3 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & f_{4x} & m_4 \ddot{a}_{4x} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & f_{4y} & m_4 \ddot{a}_{4y} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & q_{4y} & -q_{4x} & -p_{4y} & p_{4x} & 1 & T_4 & I_4 \alpha_4
 \end{array}$$

donde:

$$\begin{array}{lll}
 p_2 = (a - g_2) & p_3 = (b - g_3) & p_4 = (b_0 - g_4) \\
 q_2 = (a_0 - g_2) & q_3 = (a - g_3) & q_4 = (b - g_4)
 \end{array}$$

$g_i$ : centro de masa del  $i$ -ésimo eslabón.  
 $p_i$ : el vector de  $g_i$  a la  $i$ -ésima articulación conducida.

$q_i$ : el vector de  $g_i$  a la  $i$ -ésima articulación conductora.

$m_i$ : masa del  $i$ -ésimo eslabón.

$\ddot{a}_i$ : aceleración lineal del centro de masa del  $i$ -ésimo eslabón.

$\alpha_i$ : aceleración angular del  $i$ -ésimo eslabón.

$T_i$ : par en el  $i$ -ésimo eslabón.

#### RESULTADO DE CALCULOS

Al realizar el análisis dinámico se obtienen las gráficas de las Figs. 5 y 6, en las cuales se ilustra el comportamiento de la fuerza en la articulación del engrane de entrada y el par en el sector de engrane. Las magnitudes de las fuerzas en las restantes articulaciones del mecanismo son semejantes a la mostrada en la Fig. 5. Tanto las gráficas de fuerza y par presentan valores extremadamente altos en las posiciones en que la barra de entrada se alinea con la barra acopladora, posiciones extremas, como se muestra en la Fig. 7, mientras que en las demás posiciones los valores mínimos son 200 lb y 400 lb-in para la fuerza y el par respectivamente. Las posiciones extremas producen una gran ventaja mecánica y además de que sirven, mediante el agitador, para detener el movimiento del agua en la tina de lavado. En estas posiciones la velocidad del sector de engrane es cero y se invierte la dirección del movimiento en ese elemento.

Por las condiciones de carga del mecanismo de carga del mecanismo y las velocidades angulares involucradas, otra alternativa de análisis es el estático, para conocer las fuerzas que actúan en los elementos y el par de salida a través de las siguientes ecuaciones, en donde los ángulos corresponden a la Fig. 4, [3]:

$$T_4 = \frac{T_2 a_4 \text{sen}(\phi - \theta)}{a_2 \text{sen}(\psi - \theta)} \quad (1)$$

$$f_1 = \frac{T_2}{a_2 \text{sen}(\psi - \theta)} \quad (2)$$

obteniéndose las gráficas de las Figs. 8 y 9, que presentan

características muy similares al del análisis dinámico. Ambos análisis no nos permiten conocer realmente el valor de las fuerzas y pares que actúan en el mecanismo en las posiciones extremas, debido a que se tienen valores infinitos que no corresponden a la realidad.

Para poder determinar las cargas en los elementos se dividió el análisis estático en dos partes, cada una de ellas considerada al ir de una posición extrema a otra. Pero en este nuevo análisis se determinó el inverso de la ventaja mecánica del mecanismo como primer paso y posteriormente se obtienen las fuerzas en las articulaciones.

Cuando el engrane de entrada se mueve de  $165^{\circ}$  a  $-15^{\circ}$  la barra de salida se mueve en sentido contrario a las manecillas del reloj. La biela se encuentra sometida a compresión. Se calcula el inverso de la ventaja mecánica y las fuerzas en las articulaciones mediante las siguientes expresiones:

$$\frac{T_2}{T_4} = \frac{a_2 \text{ sen}(\psi - \theta)}{a_4 \text{ sen}(\theta - \phi)} \quad (3)$$

$$f_1 = \frac{T_4}{a_4 \text{ sen}(\theta - \phi)} \quad (4)$$

Cuando el engrane de entrada se mueve de  $-15^{\circ}$  a  $165^{\circ}$ , la barra de salida se mueve en el sentido de las manecillas del reloj. La biela está sometida a tensión. El inverso de la ventaja mecánica y las fuerzas en las articulaciones se calculan mediante:

$$\frac{T_2}{T_4} = \frac{a_2 \text{ sen}(\theta - \psi)}{a_4 \text{ sen}(\theta - \phi)} \quad (5)$$

$$f_1 = \frac{T_4}{a_4 \text{ sen}(\theta - \phi)} \quad (6)$$

obteniéndose las gráficas de las Figs 10 y 11. En estas gráficas se obtiene la relación de  $T_2/T_4$  y  $F_1/T_4$  con respecto al ángulo de entrada. Puesto que se conoce  $T_2 = 203 \text{ lb-in}$  de las gráficas de la Fig. 10 se obtiene  $T_4$  y con este valor  $F_1$  con lo cual la máxima fuerza en la articulación del engrane es de 175 lb y la fuerza en

los dientes es de 93 lb, con lo cual el esfuerzo en los dientes es de 3 kpsi.

Con las condiciones de carga del elemento, se tiene un problema de esfuerzos tridimensional en el cuerpo del engrane. Este problema se plantea a través de las ecuaciones de la elasticidad lineal [7]. Debido a la geometría del elemento no existe una solución analítica exacta para esas ecuaciones, por lo que se utiliza el método del elemento finito, el cual es un proceso de discretización utilizado para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales, ordinarias y parciales para la obtención de los esfuerzos y deformaciones, transformando el problema a un sistema de ecuaciones algebraicas lineales de la forma:

$$[K]\{x\}=\{f\} \quad (7)$$

donde:

$[K]$  = es la matriz de rigidez.

$\{x\}$  es el vector de desplazamientos.

$\{f\}$  es el vector de fuerzas nodales.

Se hace este análisis para hierro fundido, material original de la pieza y para una resina acetálica, debido a que posee una alta resistencia comparada con los demás plásticos de ingeniería, bajo coeficiente de fricción, resistencia al desgaste, estabilidad dimensional y baja absorción de humedad [8].

En la Fig. 12 se muestra el engrane de entrada. En la Fig. 13 se muestra el modelo de elementos finitos, siendo estos elementos sólidos tridimensionales y en la Fig. 14 las condiciones de carga en la articulación y los dientes.

## RESULTADOS

En la Fig. 15 se muestra el estado de esfuerzos con el material de hierro fundido, obteniéndose como máximo esfuerzo 1730 lb/in<sup>2</sup>.

En la Fig. 16 el estado de esfuerzos con el material plástico con 25% de fibra de vidrio obteniéndose como máximo esfuerzo 1444 lb/in<sup>2</sup>.

## CONCLUSIONES

Se crea una metodología para análisis y sustitución de material.

Los resultados que arroja esta metodología nos dan la seguridad de que la sustitución es posible tomando en cuenta los análisis estático y dinámico.

Los resultados numéricos de estos dos análisis son similares, esto es debido a que la velocidad angular en el engrane de entrada es baja, además de que los momentos de inercia de los elementos que componen el mecanismo resultan ser pequeños. Por lo tanto la solución se concentra en el análisis estático mediante la determinación de la ventaja mecánica, con lo cual se obtienen las fuerzas máximas en el engrane de entrada.

El esfuerzo de seguridad del acetal es de  $7000 \text{ lb/in}^2$  por lo que el material plástico es adecuado para la sustitución del material.

Del análisis de elemento finito se observa que el cuerpo del engrane con material plástico es más rígido que utilizando hierro fundido.

## BIBLIOGRAFIA

1. INCO, Estudio de Reclamaciones contra Proveedores de Artículos Eléctricos Electronicos-Lavadoras (parte II), 1979 Dic/043/14 - 886/43/01, Instituto Nacional del Consumidor.
2. Shigley J., Diseño en Ingeniería Mecánica, McGraw Hill, 1985.
3. Jauregui J.C., Análisis Elastostático de Dientes de Engrane mediante Computadora, Tesis de Licenciatura, UNAM, México, 1983.
4. I-deas, Geomod User's Guide, Structural Dynamics Research Corp., U.S.A. 1986.
5. Angeles J., Análisis y Síntesis Cinemáticos de Sistemas Mecánicos, Limusa S.A. México, 1978.
6. Suh, Radcliffe, Kinematics and Mechanisms Design, Wiley, U.S.A., 1978.
7. Timoshenko S., Theory of Elasticity, McGrall Hill, Nueva York, U.S.A., 1934.
8. Faulkner L., Plastics Gearing, Marcel Dekker Inc. U.S.A., 1986.

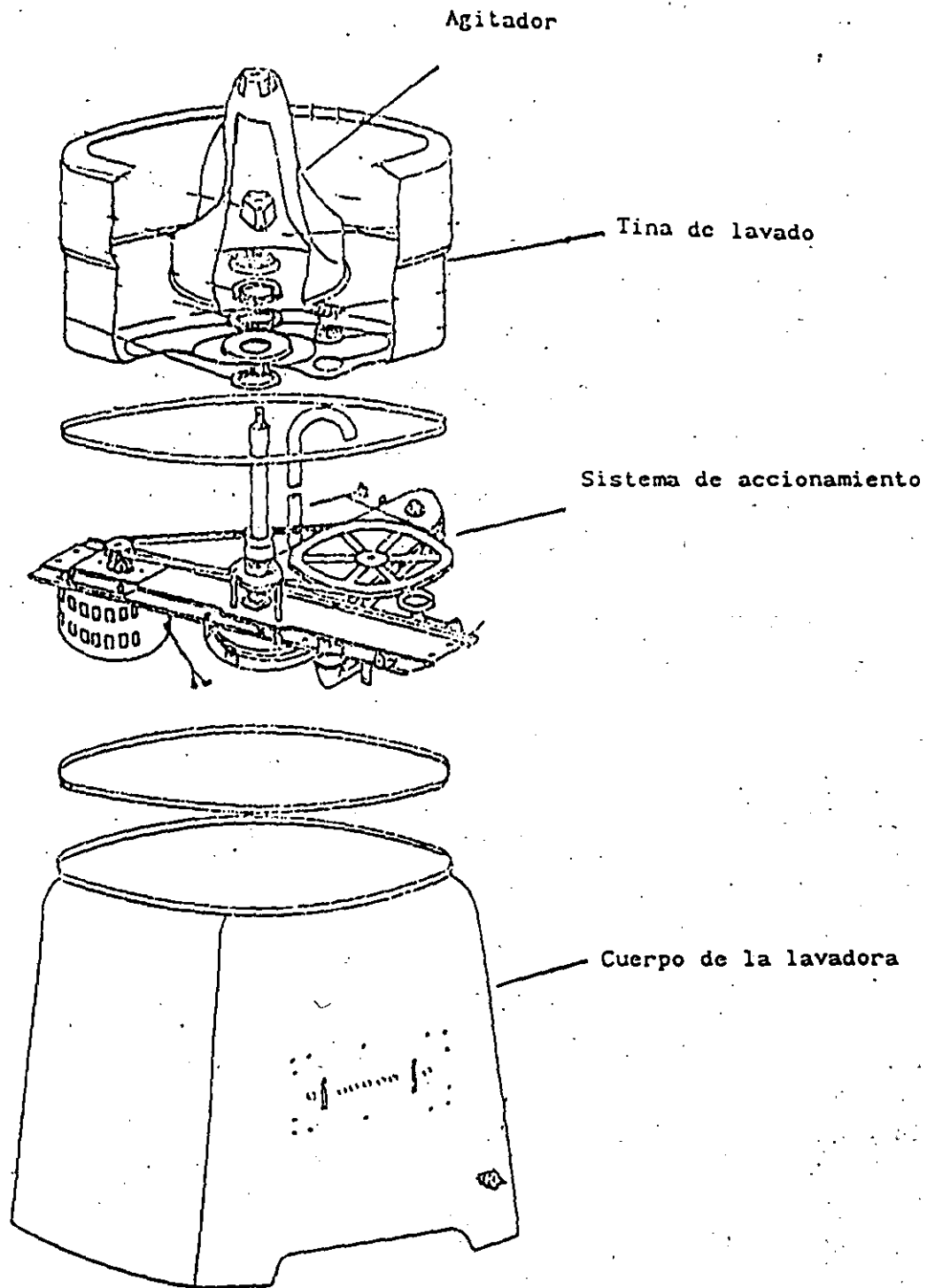


Fig. 1 Ensamble de lavadora de ropa.

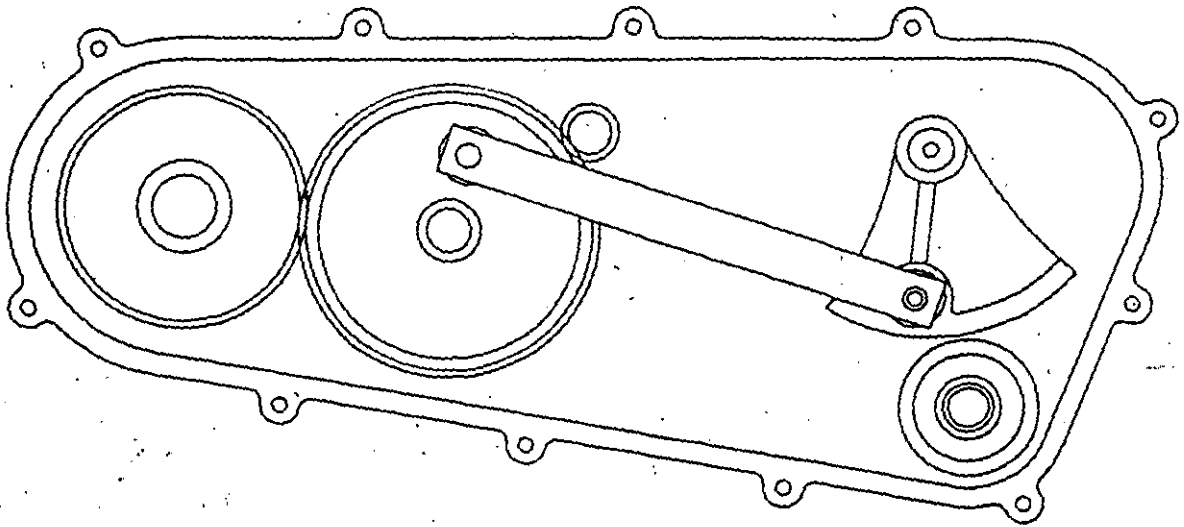
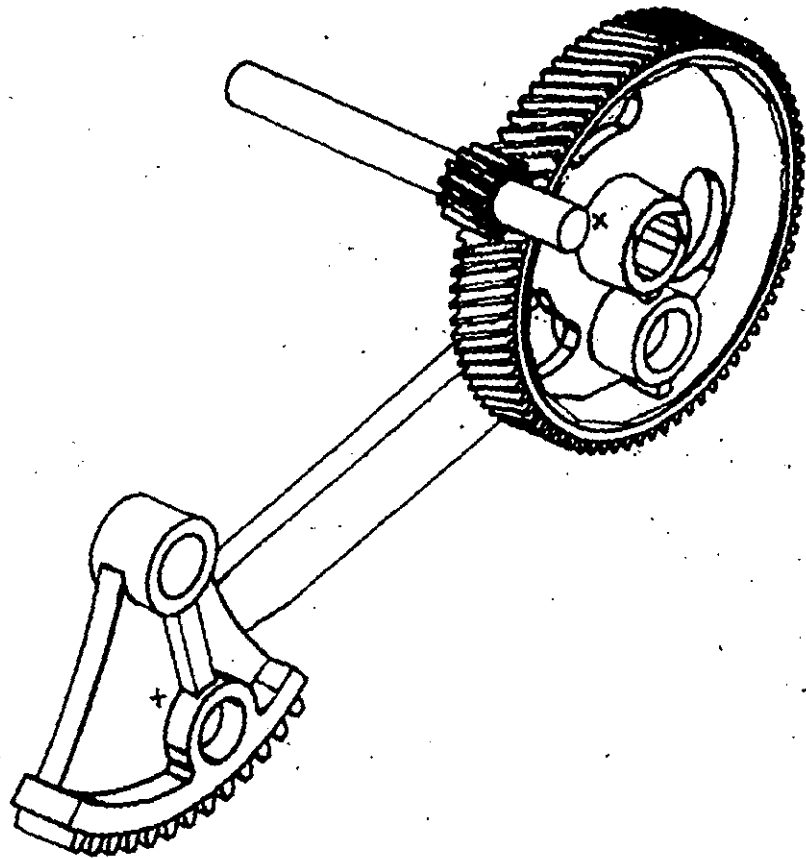


Fig. 2 Transmisión de lavadora.



31

Fig. 3 Mecanismo de accionamiento.

✓



$A1 = 7.704in$   
 $A2 = 1.264in$   
 $A3 = 7.418in$   
 $A4 = 2.437in$

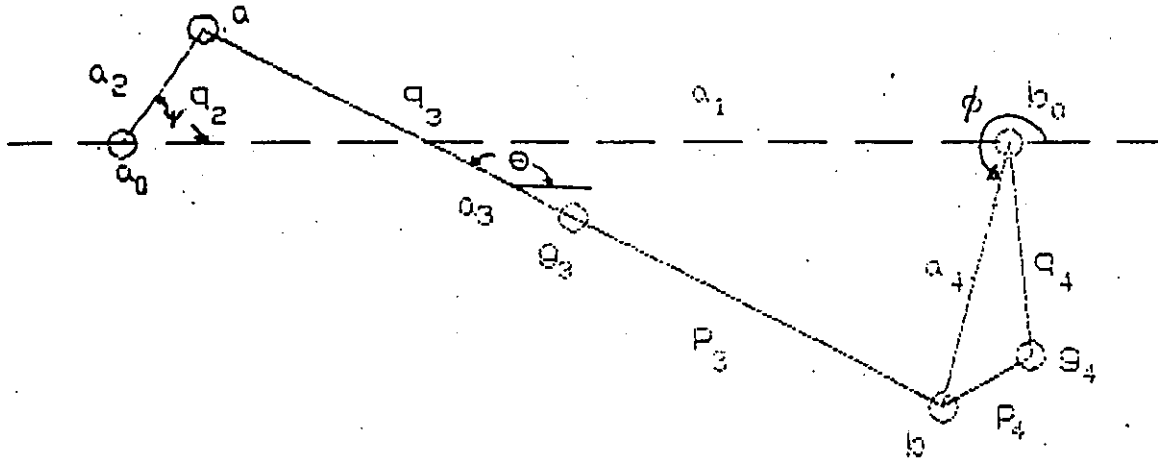


Fig. 4 Modelo cinemático.

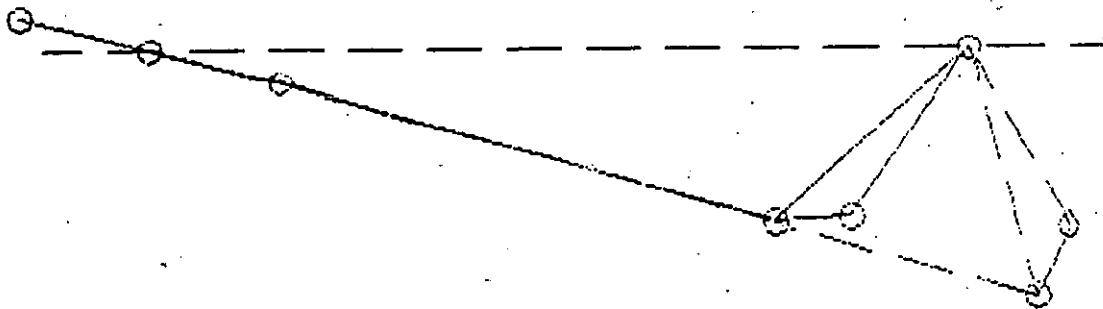


Fig. 7 Posiciones extremas.

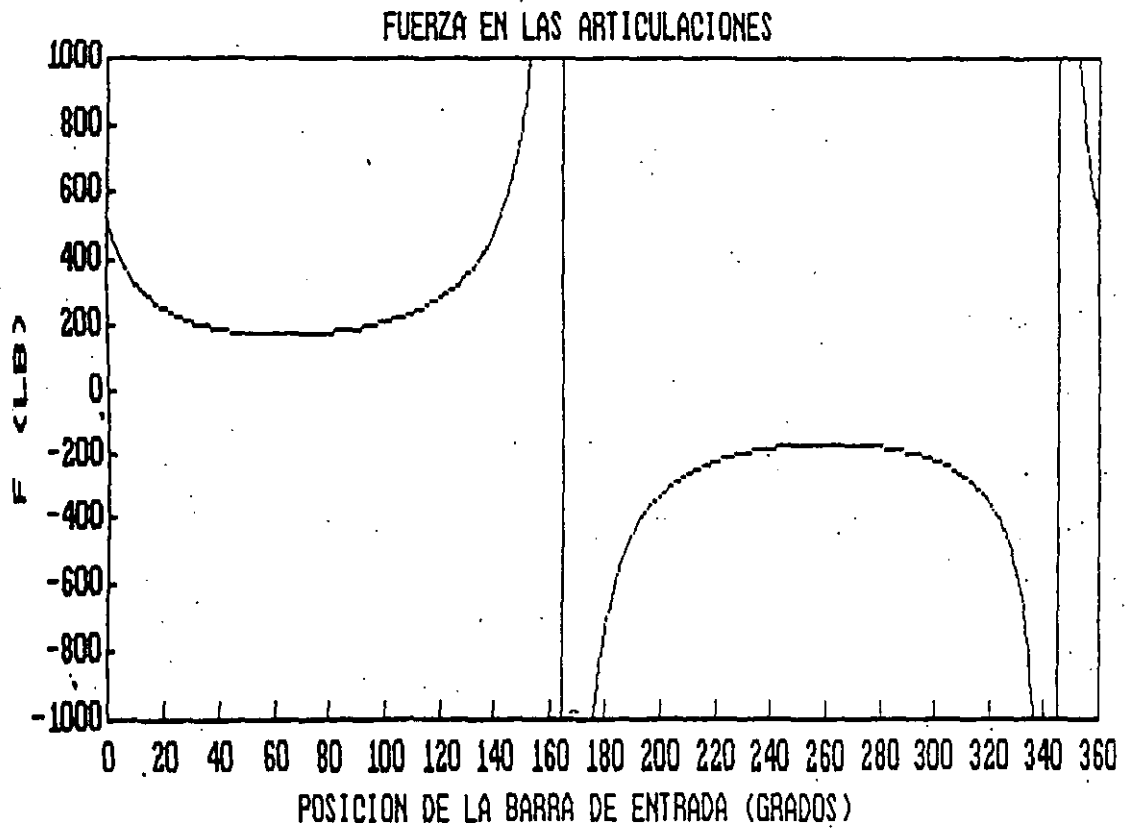
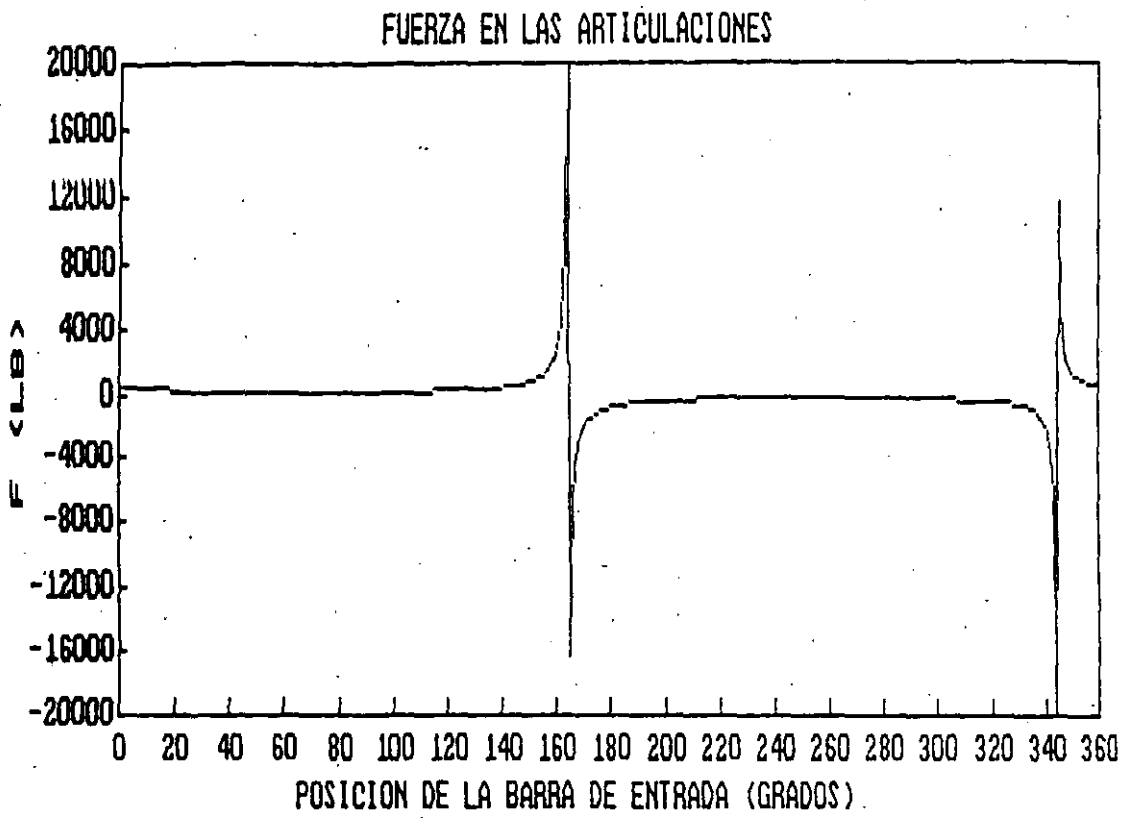


Fig. 5 Fuerza - Análisis Dinámico.

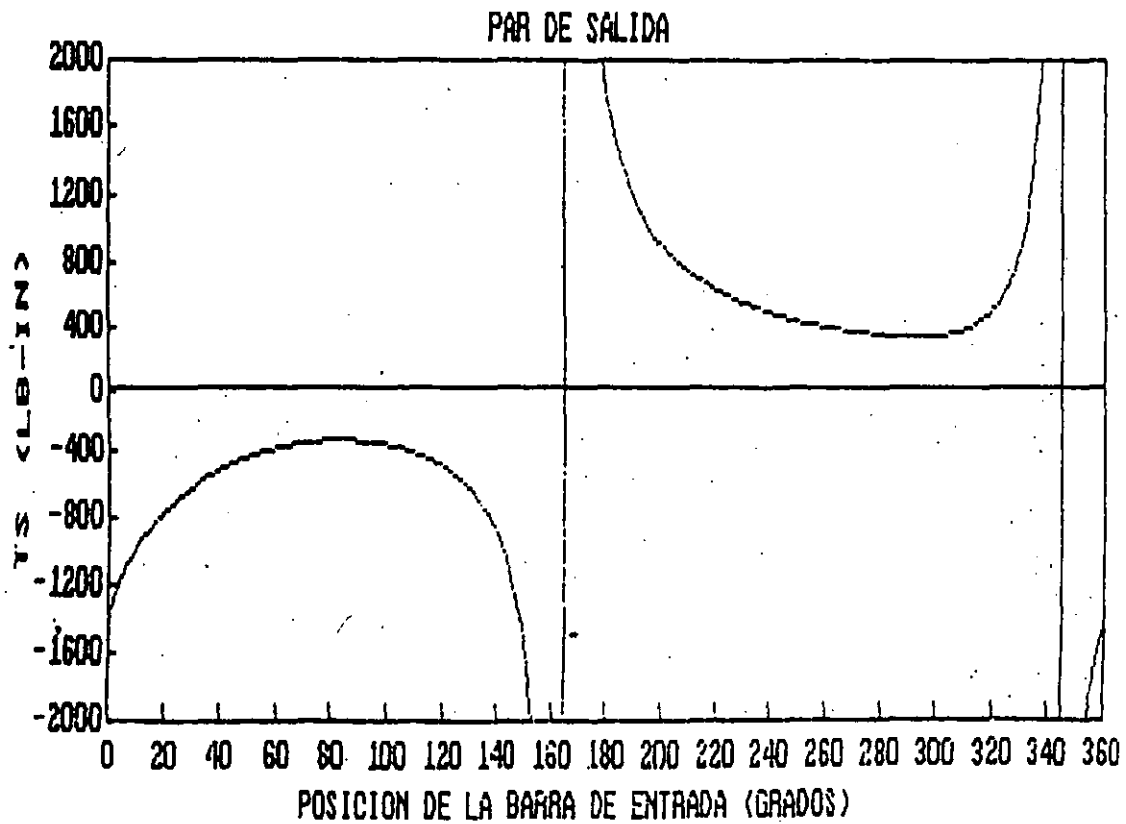
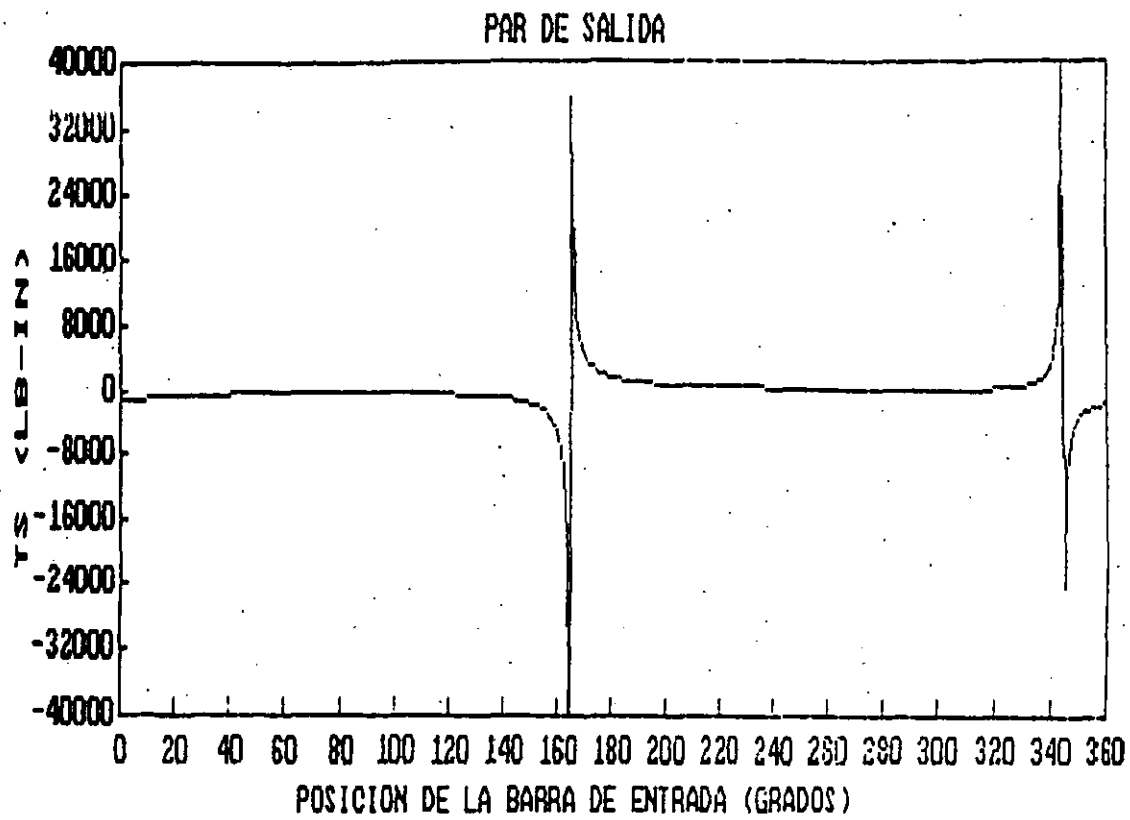


Fig. 6 Par - Análisis Dinámico.

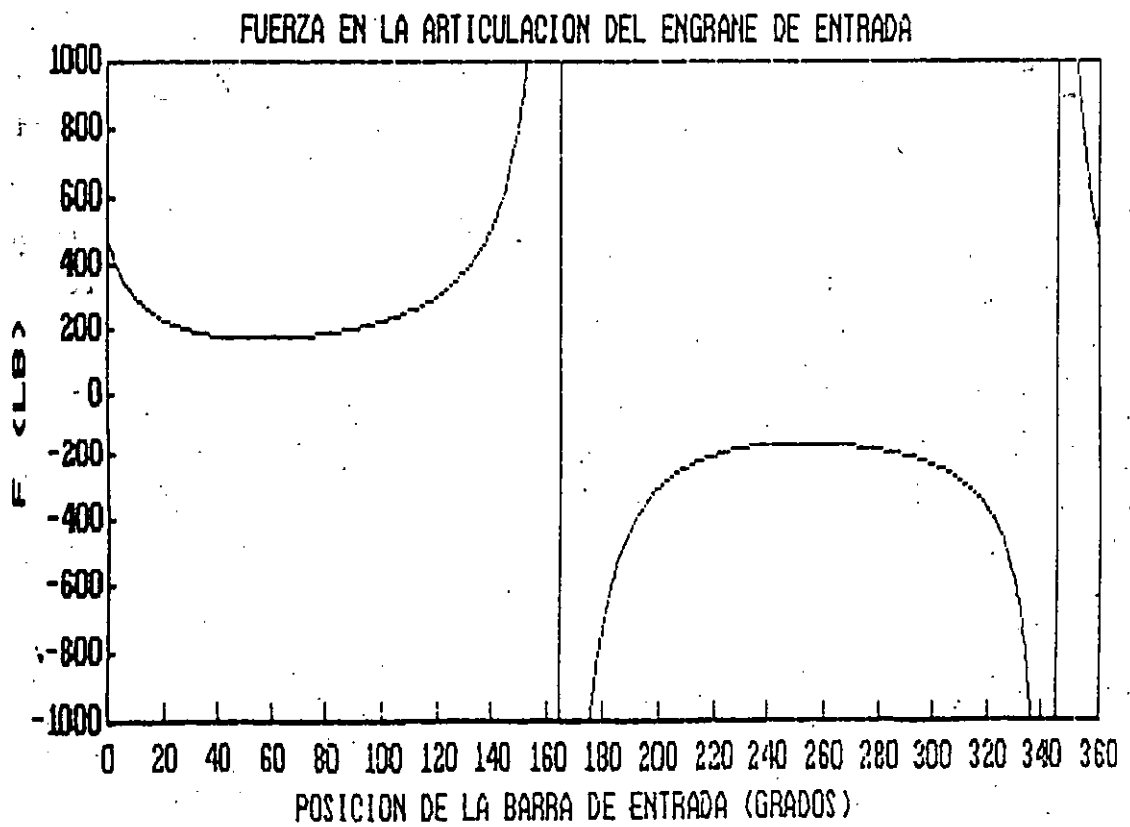
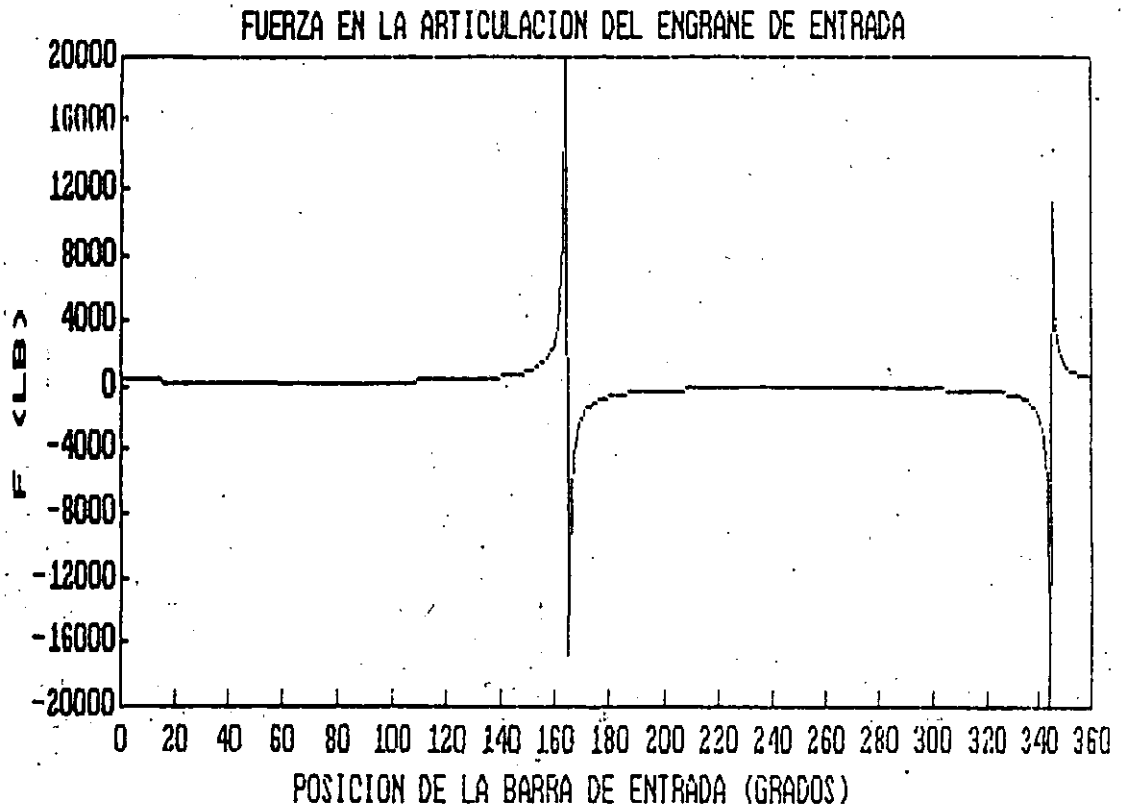


Fig. 8 Fuerza - Análisis Estático.

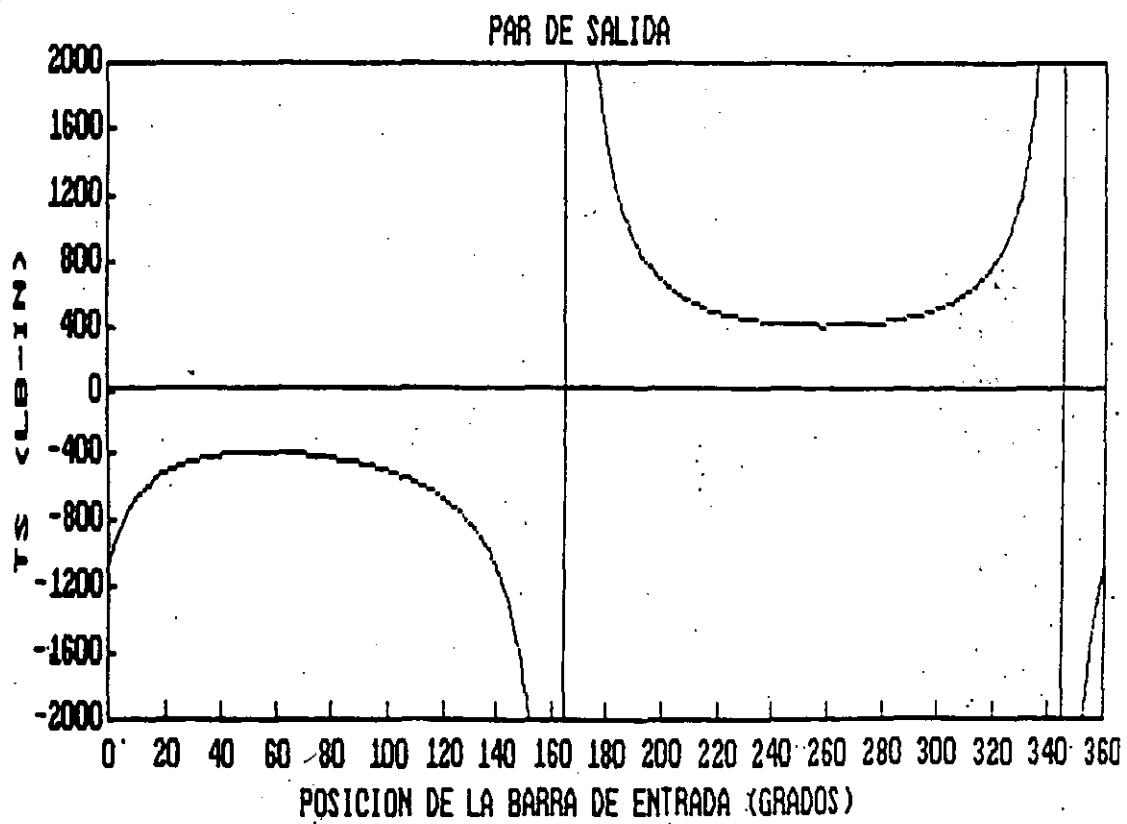
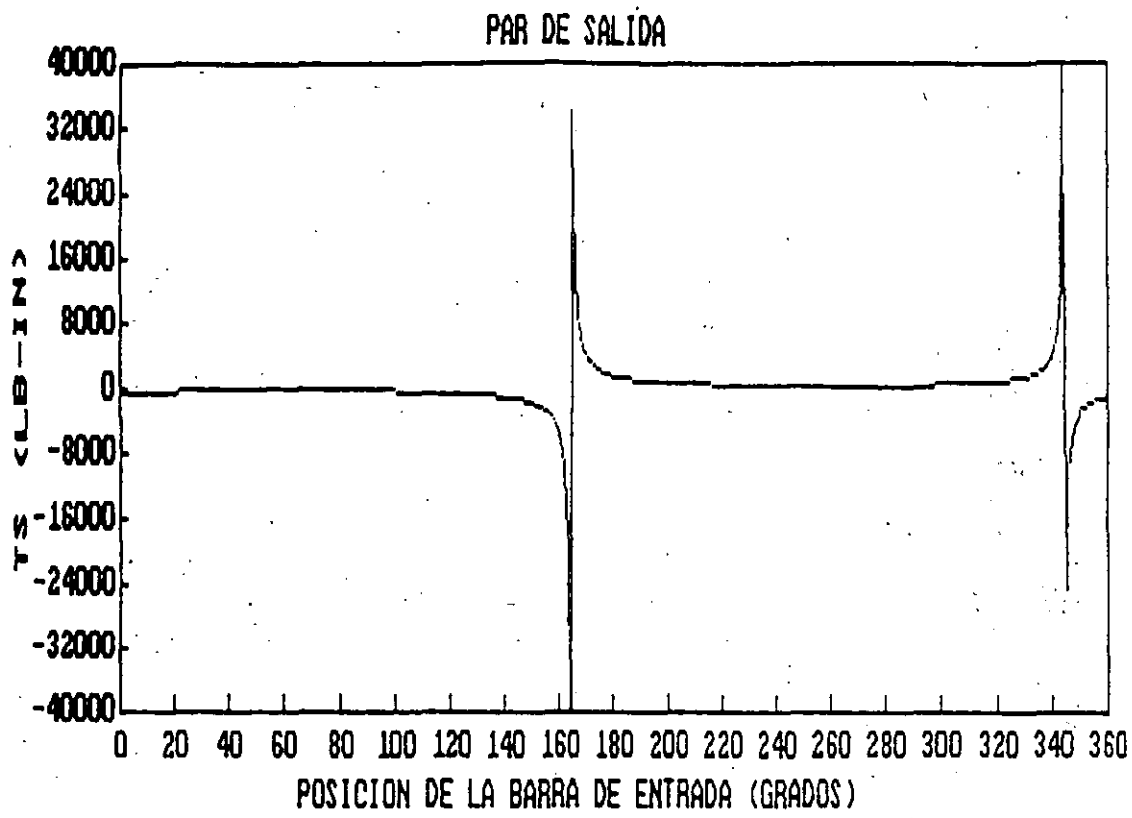
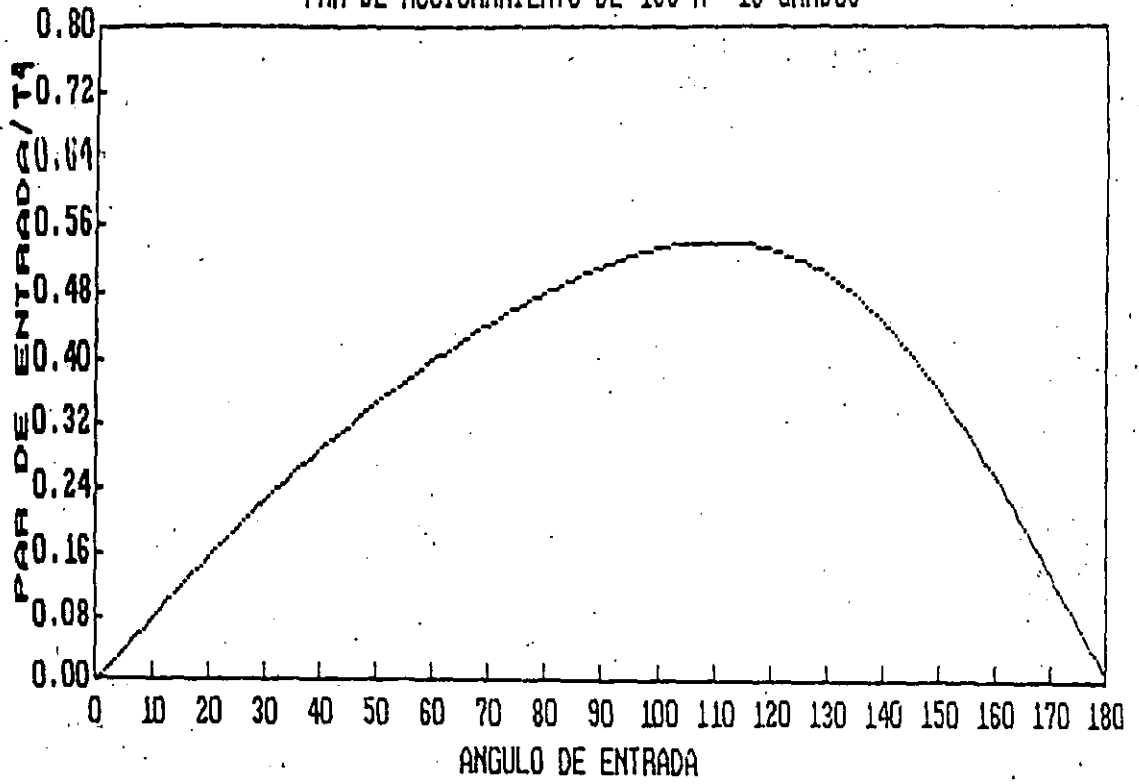


Fig. 9 Par - Análisis Estático.

PAR DE ACCIONAMIENTO DE 165 A -15 GRADOS



PAR DE ACCIONAMIENTO DE -15 A -195 GRADOS

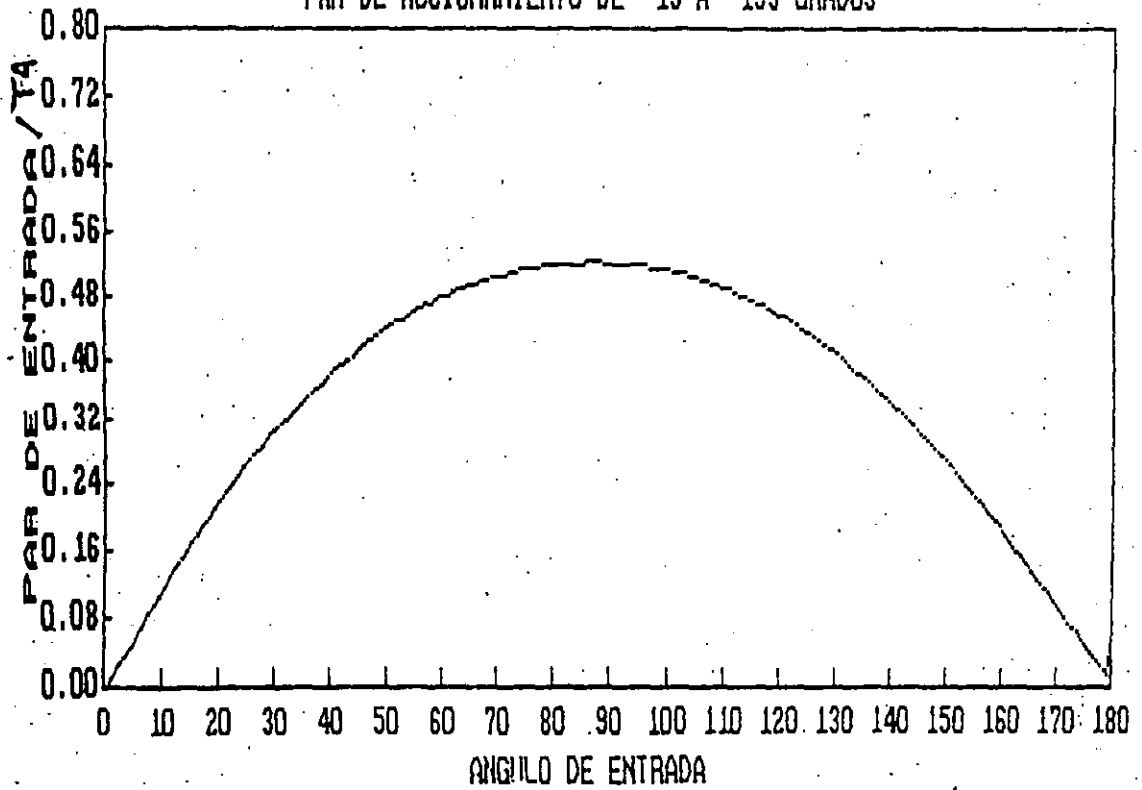
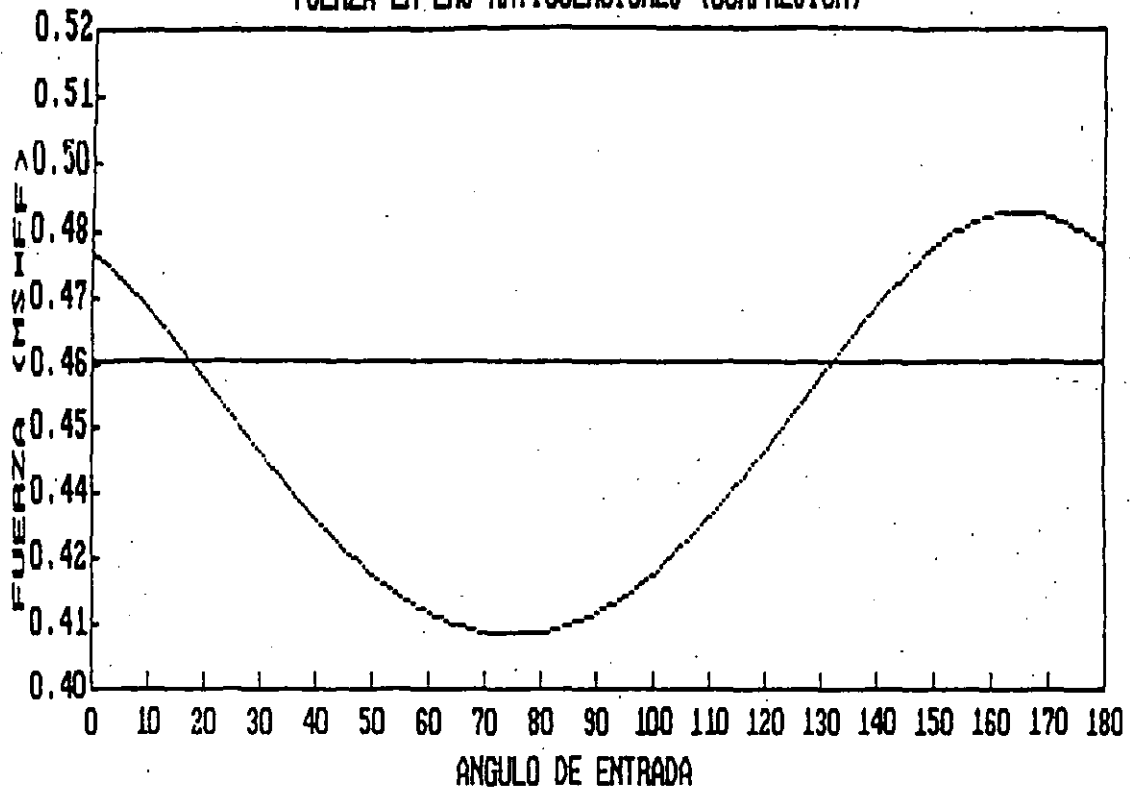


Fig. 10 Relación T<sub>2</sub> / T<sub>1</sub>.

FUERZA EN LAS ARTICULACIONES (COMPRESION)



FUERZA EN LAS ARTICULACIONES (TENSION)

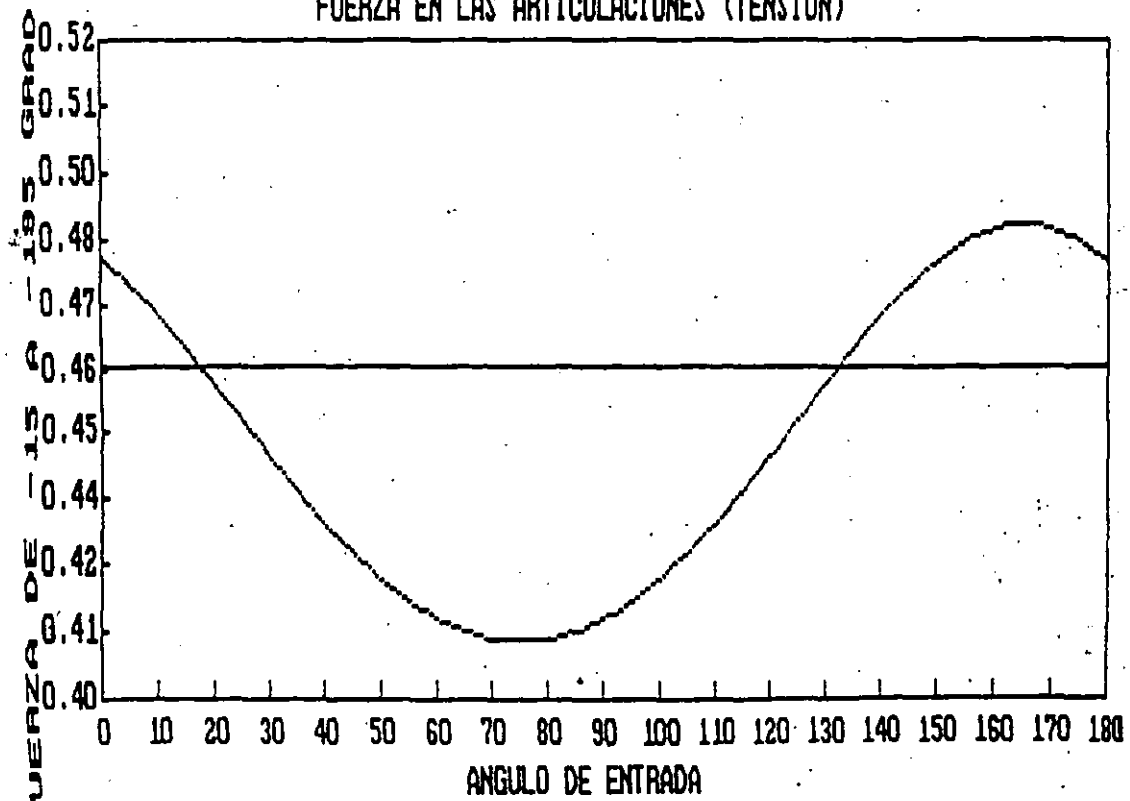


Fig. 11 Relación  $F_1 / T_1$ .

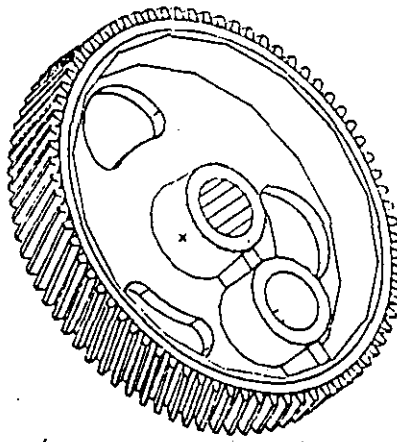


Fig. 12 Engrane de entrada.

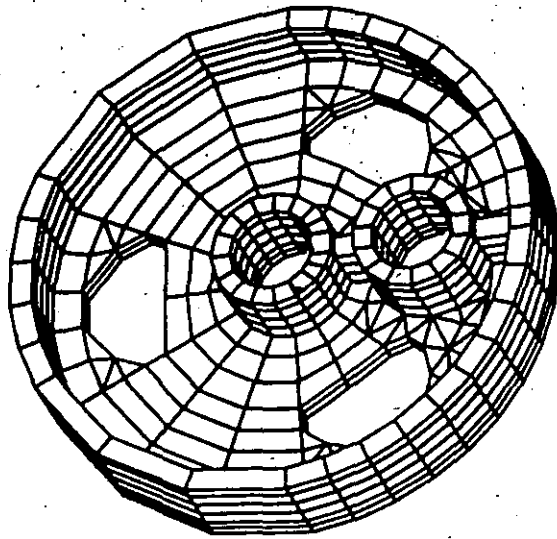


Fig. 13 Modelo de elementos finitos.

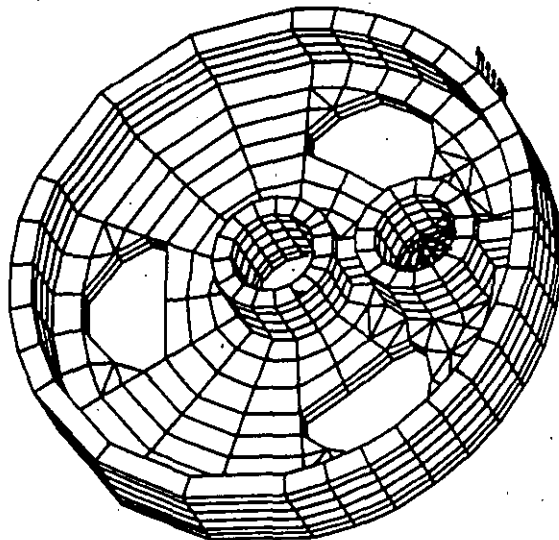


Fig. 14 Condiciones de carga.



DATABASE: CUERPO ENGRANE-FEM  
VIEW : ARS (modified)  
Task: Post Processing  
Model: 1-FE\_MODEL1

UNITS : IN  
DISPLAY : No stored OPTION

Associated Workset: 1-WORKING\_SET1

CUERPO ENGRANE-FEM

LOADCASE: 1  
FRAME OF REF: GLOBAL  
STRESS - VON MISES MIN: 7.71E+00 MAX: 1.73E+03

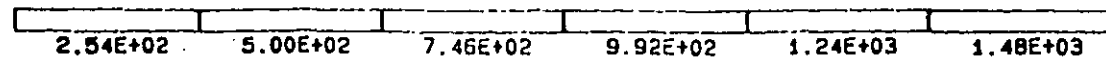
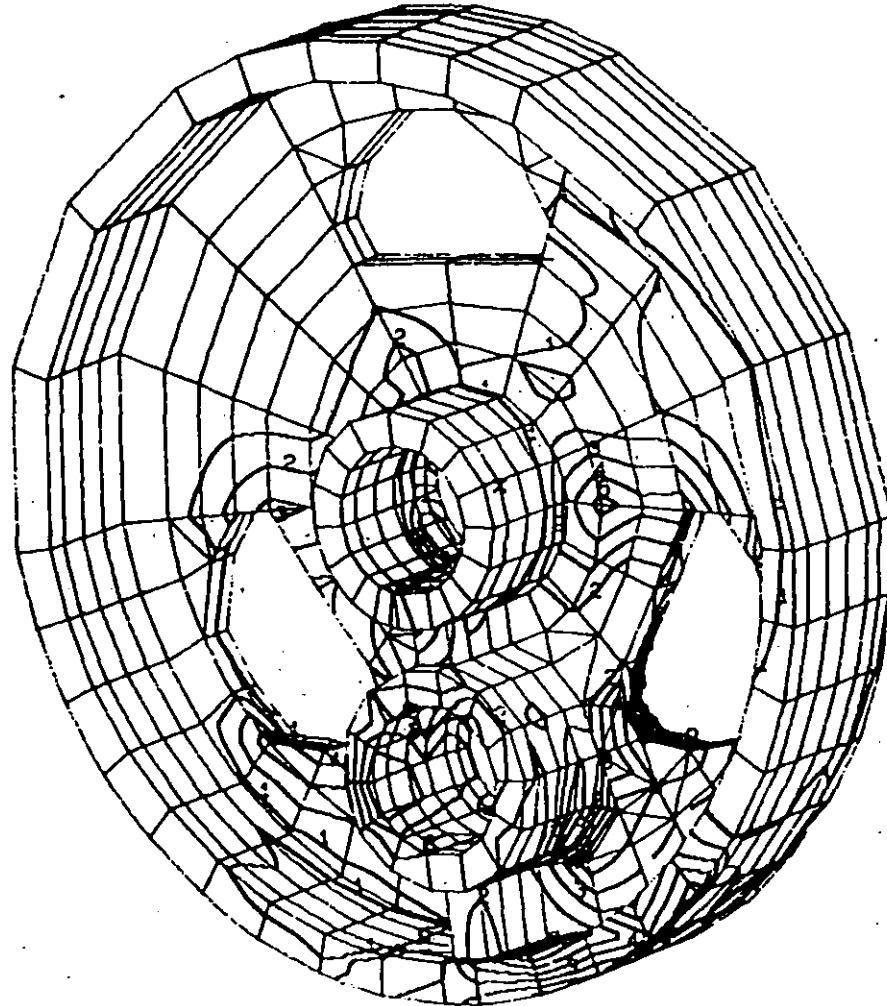


Fig. 15 Estado de esfuerzos - Hierro Fundido.

40

I-DEAS 4.1: Pre/Post Processing

14-SEP-90 16:23:02

DATABASE: CUERPO ENGRANE-FEM  
VIEW : ARS (modified)  
Task: Post Processing  
Model: 1-FE\_MODEL1

UNITS : IN  
DISPLAY : No stored OPTION

Associated Workset: 1-WORKING\_SET1

CUERPO ENGRANE-FEM

LOADCASE: 1  
FRAME OF REF: GLOBAL  
STRESS - VON MISES MIN: 1.69E+00 MAX: 1.44E+03

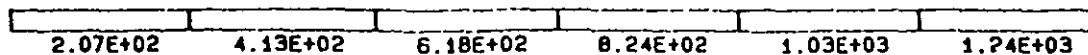
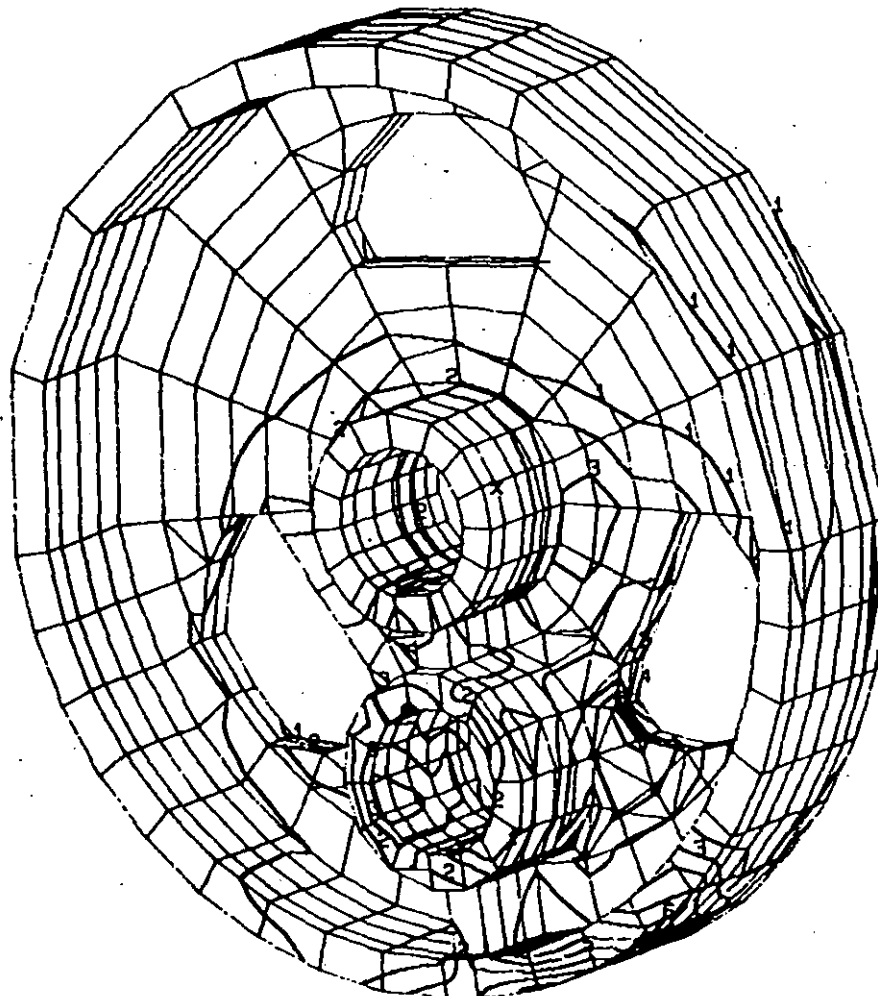
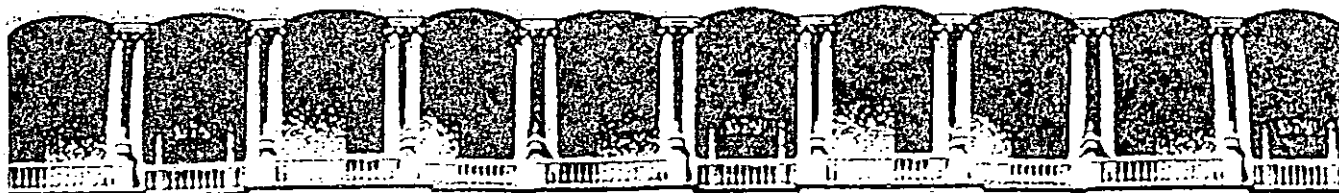


Fig. 16 Estado de esfuerzos - Acetal.

41



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**TECNICAS DE MANUFACTURA AVANZADA**

**ING. JESUS ROVIROZA LOPEZ**

**PALACIO DE MINERIA**

**ANTECEDENTES:**

Dentro de las primeras máquinas-herramienta de control numérico podemos mencionar una máquina tejedora que trabaja a base de tarjetas perforadas en las cuales previamente se había realizado un programa de trabajo.

Pero es hasta el año de 1942 que las máquinas de control numérico propiamente dichas aparecen como tal a instancias del ejército norteamericano el cual crea un programa particularmente enfocado al maquinado de líneas para motores de inyección de sus aviones de guerra.

El maquinado de dichas piezas se consideraba en ese entonces como irrealizable con las máquinas convencionales que se tenían, ya que una de las dificultades mayores consistía en poder cambiar los movimientos de una herramienta en varias direcciones a la vez, siendo esto imposible para un operador el poder tener la coordinación necesaria de varios movimientos y que adicionalmente contarán con una buena precisión.

Con esto, para la resolución del problema y asegurar la precisión de la trayectoria a seguir por la herramienta, se definía por un gran número de puntos. Moviéndose posteriormente la herramienta sucesivamente según la trayectoria, de un punto a otro. Como el número de información que se manejaba era bastante grande se exigió la asociación de un calculador electrónico con la máquina-herramienta.

Siguiendo el desarrollo de las máquinas de control numérico tenemos que alrededor de 1945 fue construida de manera experimental la que se puede considerar primera en su tipo, máquina-herramienta de control numérico creada en el Instituto Tecnológico de Massachussetts, no siendo sino hasta 1952 en una exposición de Chicago, su verdadero arranque y en Europa el inicio entre 1960-61.

Asimismo podemos mencionar que los armarios de control utilizados en esta primera generación de máquinas, fueron realizados gracias a una lógica cableada que tenía un mínimo de funciones: memorización de un sólo bloque e interpolación lineal únicamente.

El programa era leído a través de una cinta perforada siendo necesario para su elaboración un programa que requería de largos y fastidiosos cálculos.

Posteriormente aparecen los lenguajes de asistencia a la programación pero el principal inconveniente en estos es que funcionaban únicamente sobre grandes computadoras.

Así la complejidad de la programación de los sistemas cableados condujeron a la investigación de dos nuevas técnicas que son:

- a) D.N.C. (Directal Numerical Control) que consiste en asegurar el control de varias máquinas a la vez mediante una computadora central.
- b) C.N.C. (Computerized Numerical Control) conlleva los mismos principios que los sistemas cableados y adicionalmente un minicalculador garantiza diferentes funciones tales como:  
la memorización del programa, los cálculos de corrección de la trayectoria, tomando en cuenta las dimensiones de la herramienta, etc.

Todos los cambios y el desarrollo que se ha dado en torno a los comandos numéricos apoyados por computadoras (CNC) nos ofrecen una concepción de una enorme comodidad operacional tanto para el programador como para el operario de la máquina herramienta.

Así, vemos la evolución tan rápida que se dió dentro del área de la microelectrónica, misma que impulsó a grandes cambios dentro del área metalmeccánica, ofreciéndonos con esto sensibles reducciones, tanto en el tamaño del equipo como en su costo.

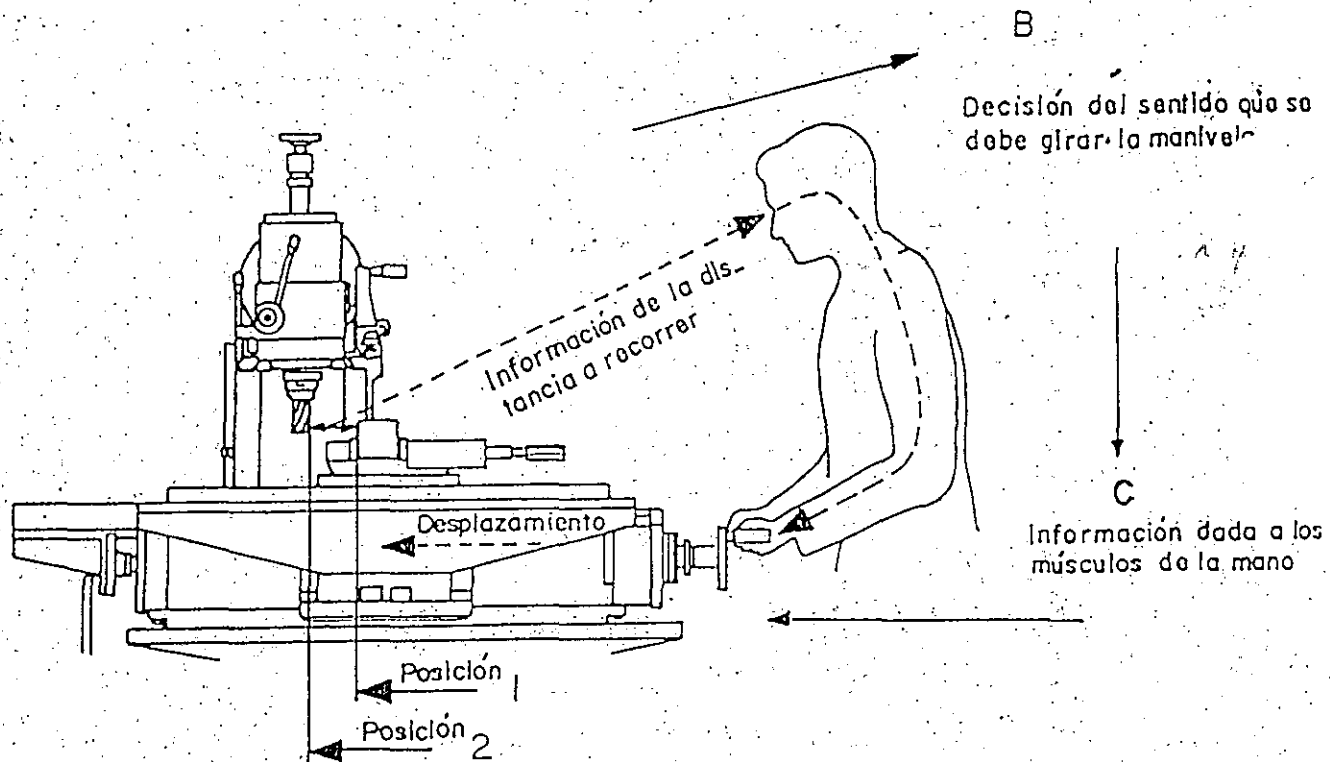
Pero cuáles fueron las tendencias más importantes (con un enfoque en la tendencia substancial a los cambios que marcan de manera definitiva el desarrollo de los mandos y controles CNC

- En la parte electrónica los elementos constructivos formados principalmente de memorias y microprocesadores, presentaron un aumento bastante considerable.
  - Los costos tanto de elementos y componentes descendieron, obteniéndose con esto mayores producciones, abilitándose de este modo una tendencia general a las reducciones de costo y presentando globalmente una influencia total en el precio final, mejorando así tanto el costo de los equipos como su tamaño y capacidad.
  - El software fue presentando un cambio a la par de los elementos electrónicos con cambios como la implementación de bibliotecas, haciendo posible el poder llamar bloques enteros de software mediante mejores sistemas de operación, teniendo de este modo un mejor conocimiento del software en su acelerado desarrollo...
  - La microelectrónica moderna, también permite el desarrollo del hardware siendo así más eficaces para los mandos CNC.
- Así, un crecimiento de palabras y un aumento simultáneo de velocidades de cálculo de los microprocesadores, que en la mayoría de los casos también son interconectados a un sistema multiprocesador que permite el empleo de enormes cantidades de datos por unidad de tiempo.
- Muchas unidades de control numérico (CN) se basan en un sistema de multiprocesadores altamente eficaces, por tanto cada procesador debe de cumplir con un determinado número de funciones. Siendo algunas de estas funciones:

- a) El panel de operación y unidad de mando de la pantalla
- b) Pre-procesamiento (preparación de información, cálculo y administración).

## 2.4 CONSTITUCION DE LAS MAQUINAS-HERRAMIENTA DE CONTROL NUMERICO.

De manera a tener una visión sobre lo que es una máquina herramienta de control numérico, antes de presentar sus elementos constituyentes, nos apoyaremos sobre una máquina tradicional y analizaremos los diferentes elementos tomados en cuenta por el operador para realizar el contacto entre la herramienta y la pieza (figura 2.4)



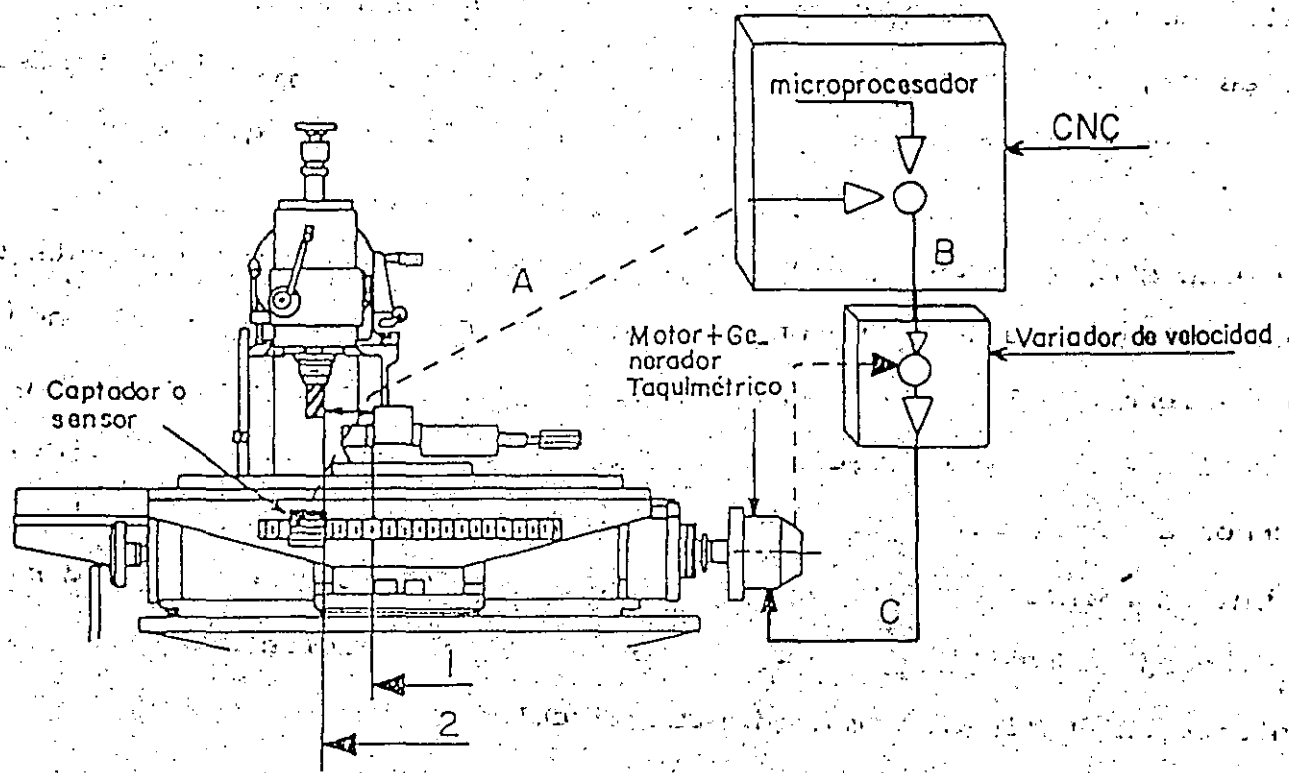


FIGURA 2.5 B

- A: La información sobre la posición de la mesa está dada por un captador o sensor de posición.
- B: Este captador transmite una señal de error de posición al armario de control
- C: Las órdenes de movimiento son transmitidas por la electrónica



1. N = Numeración de bloque o numeración progresiva de programación.
2. G = Función preparativa o geométrica
3. X, Y, Z = Ejes de desplazamiento en direcciones principales.
4. U, V, W = Ejes de desplazamiento en direcciones secundarias.
5. P, Q, R = Ejes de desplazamiento en direcciones terciarias.
6. I, J, K = Coordenadas de centros y círculos.
7. A, B, C = Ejes de rotación alrededor de los ejes principales.
8. D, E = Ejes de rotación alrededor de los ejes secundarios.
9. F = Velocidad de avance.
10. S = Velocidad de giro o rotación del husillo principal
11. T = Función de herramienta codificada.
12. L, F = Código de fin de bloque
13. M = Función auxiliar codificada o miscelánea.

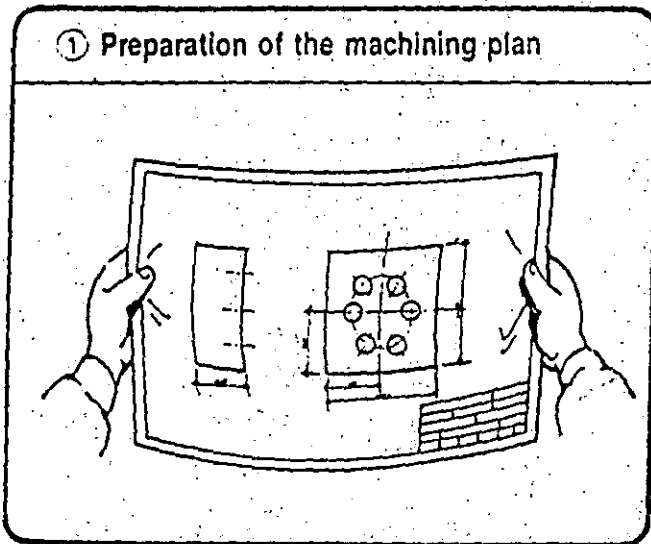
El tiempo tan reducido del cambio de operación de las máquinas herramienta convencionales a el control numérico, es frecuentemente citado como material en proceso o en curso de fabricación.

Además como una consecuencia de la rapidez de cambio de estas máquinas se menciona como una de sus ventajas mas importantes, la reducción de los inventarios ya que se fabrica lo estrictamente necesario.

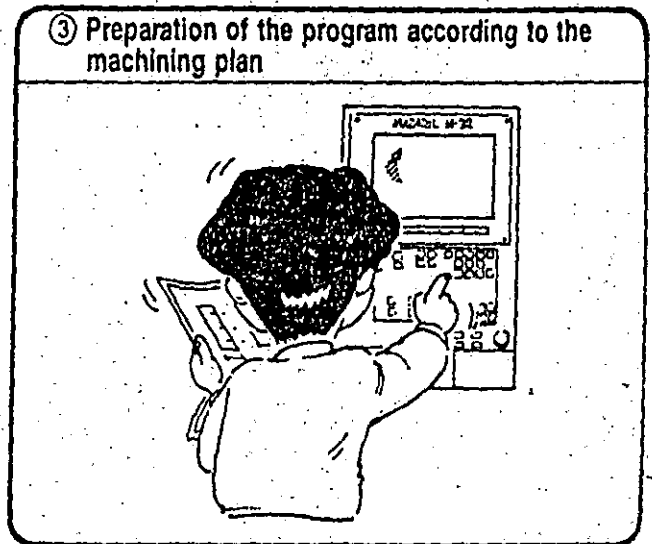
*Ing. Jesús Recinza Lopez*

# PROCESO DE FABRICACION DE UN PRODUCTO.

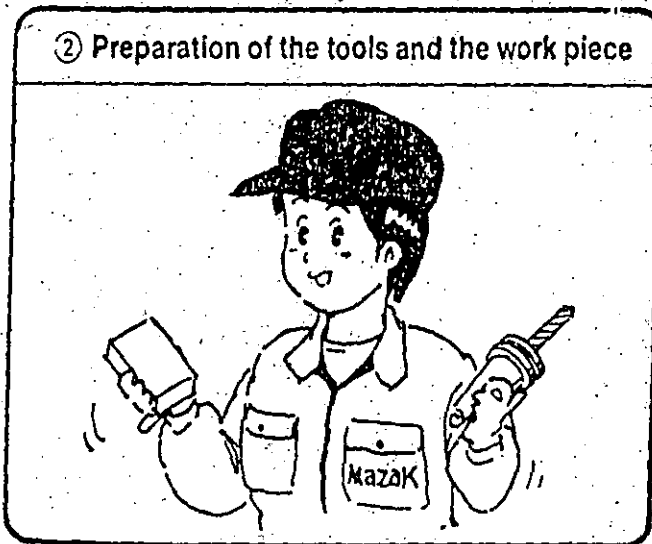
① Preparation of the machining plan



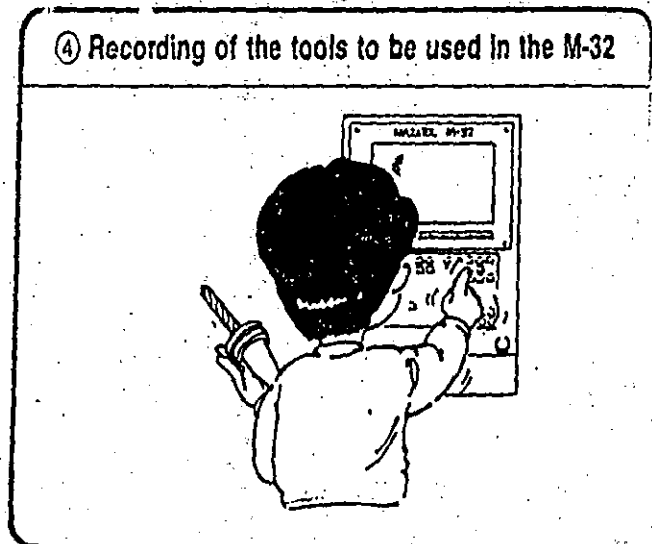
③ Preparation of the program according to the machining plan



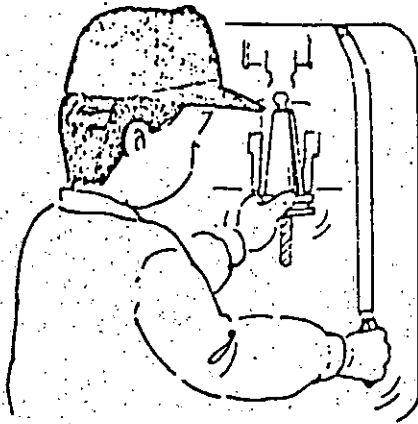
② Preparation of the tools and the work piece



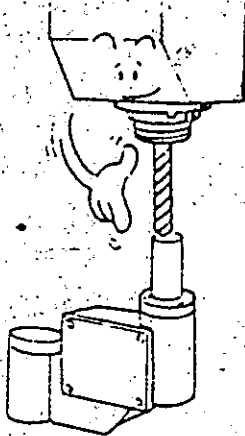
④ Recording of the tools to be used in the M-32



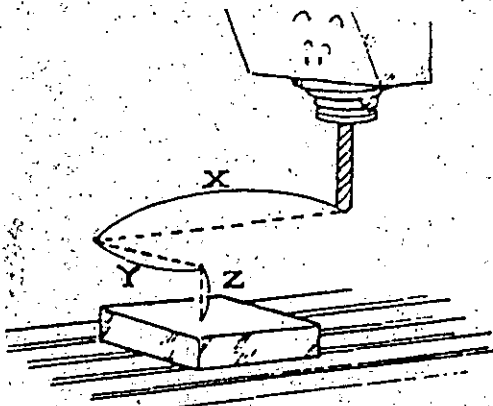
5. Mounting of the tools in the tool magazine



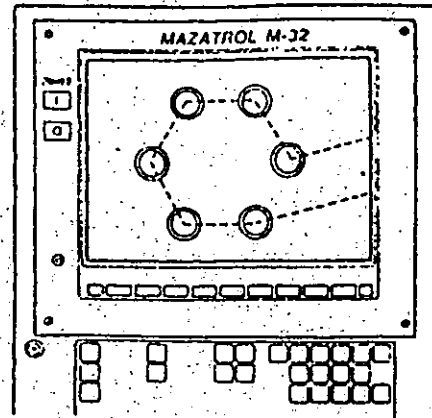
6. Measurement of the lengths of the tools



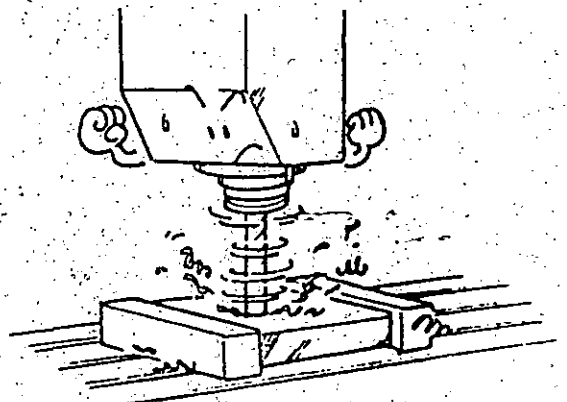
7. Input of the basic coordinates



8. Checking of the content of the machining on the display

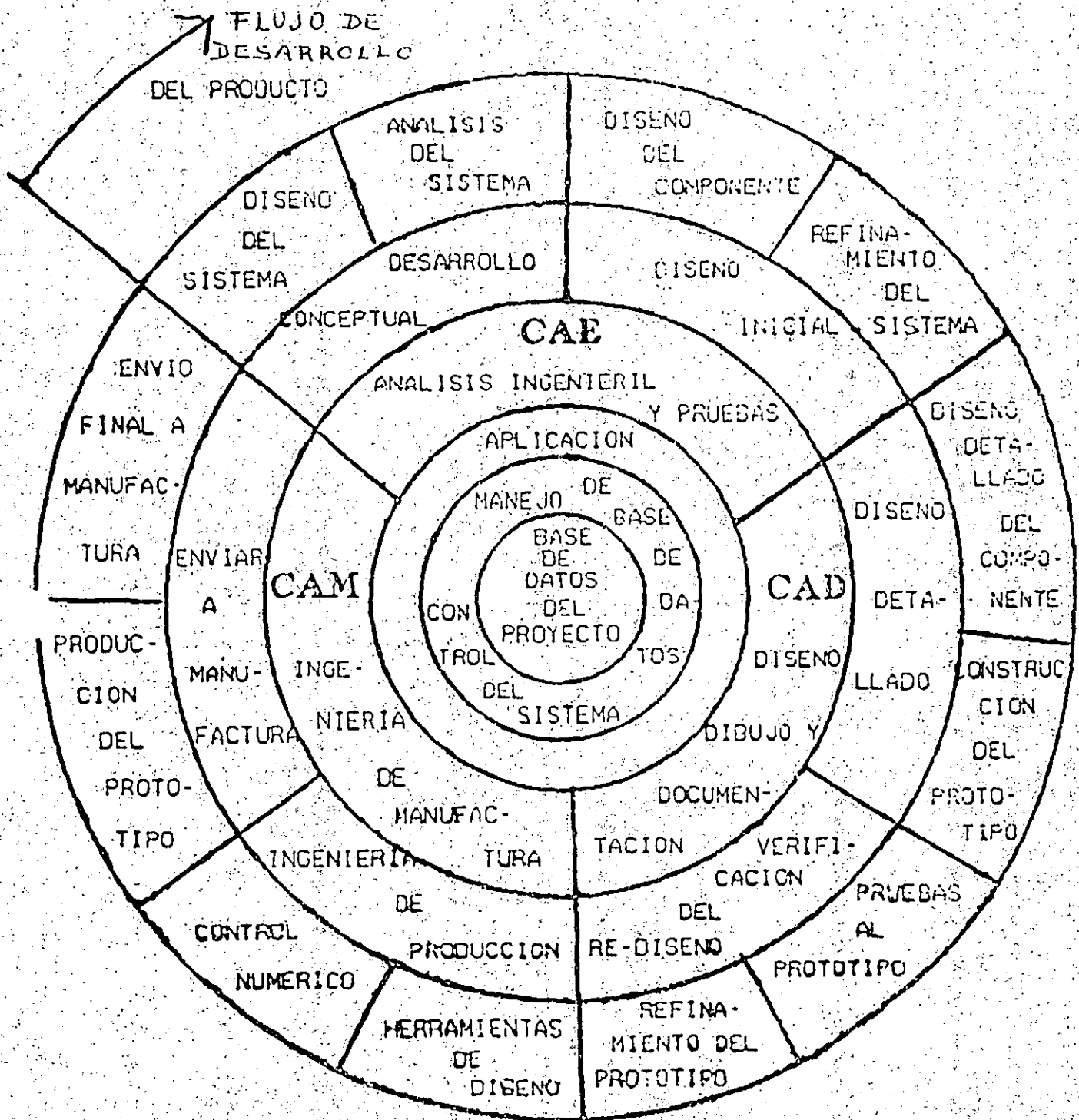


9. Machining in automatic operation mode



10. Fabrication of a product





T Q C

A G V

M R P

G T

C A D

F M S

C A P P

N C

C N C

D N C

A M H

C A M

C I M

C A E

C A D A M

A E C

M C A E

I G E S

F E M / F E A

C A D D

C A E D S / I D E A S

## TERMINOLOGIA

Dentro de área CAD/CAM/CAE como toda línea de trabajo, son utilizadas abreviaturas que en general, resultan difíciles de comprender, y aún más para las personas ajenas al campo de trabajo.

El objetivo de esta sesión, es familiarizarse con las diferentes terminologías que se utilizan actualmente dentro del área específica.

A). -AGV ==> (Automated Guided Vehicle) Vehículo guiado automáticamente

B). -TQC ==> Control de calidad total.

C). -MRP ==> Protocolo de automatización en manufactura.

D). -GT ==> Grupos tecnológicos. Agrupación de diferentes piezas que llevan un sistema de manufactura similar.

E). -CAD ==> (Computer Aided Desing), Dibujo auxiliado por computadora. Es la actividad que consiste en substituir al estirador, plumillas y tinta por la computadora, el ratón y el plotter.

F). -FMS ==> Sistema de manufactura flexible.

G). -NC ==> Control numérico. Conjunto de técnicas que se encargan de controlar equipo para maquinado por medio de información codificada. En la mayoría de los sistemas NC la programación (información para maquinado codificada), es almacenada en cintas de papel, magnéticas, ect.

H). -CNC ==> (Computer Numerical Control) Control numérico computarizado. En estos, la máquina es controlada por una computadora y las instrucciones de NC son almacenadas en memoria.

- I) -DNC ==> (Direct Numerical Control). Control numérico directo. Aquí el control de las máquinas está distribuido en una red de computadoras, organizadas por una computadora central. En este caso las celdas de manufactura están conectadas a la red y dependiendo de las actividades de las celdas, la computadora central les asigna el trabajo a éstas.
- J) -AMH ==> (Automated Material Hand). Manejo de material automatizado. Cualquier dispositivo que nos permite manejar a los diferentes elementos mediante la automatización.
- K) -CAM ==> (Computer Aided Manufacturing). Manufactura asistida por computadora. Incluye control numérico, robótica y cualquier otra aplicación de la computadora en la fábrica.
- L) -CIM ==> (Computer Integrated Manufacturing). Manufactura integrada por computadora. Filosofía de trabajo que pretende integrar a la computadora, MCN, robots, etc., en todas las etapas del proceso de manufactura.
- M) -CAE ==> (Computer Aided Engineering). Ingeniería asistida por computadora. Desarrollo ingenieril donde la computadora puede jugar un papel importante tal y como cálculo del centro de masa, análisis de interferencia y análisis de esfuerzos y desplazamientos.
- N) -CADAM ==> (Computer Graphics Augmented Design and Manufacturing). Paquete de diseño, dibujo, ingeniería y manufactura apoyados por computadora, desarrollado originalmente para uso interno de Lockheed que corre en una computadora grande. Actualmente existen el Professional CADAM y MicroCADAM que corren en plataformas más pequeñas.
- ND) -AEC ==> (Architecture Engineering Construction). Arquitectura, ingeniería y construcción. Término que se utiliza para referirse a aplicaciones de CAD en estas áreas.

- O) -MCAE ==> (Mechanical CAE). Análisis ingenieril por computadora aplicado a mecánica. Significa CAD + FEM más sólidos con facilidades adicionales para facilitar todo el proceso de diseño.
- P) -IGES ==> (Initial Graphics Exchange Specification). Especificación y cambio de gráficos iniciales. Formato de archivo neutral que permite el intercambio de dibujos entre sistemas.
- Q) -FEM/FEA ==> (Finite Element Method Analysis). Método/análisis de elemento finito. Una herramienta muy poderosa para analizar propiedades físicas de tipo estructural, térmicas y magnética. Los objetos están representados por medio de mallas; se asume que la masa se distribuye sobre los nodos. Las propiedades físicas de los objetos pueden derivarse resolviendo ecuaciones lineales simultáneamente.
- R) -CADD ==> (Computer Aided Design and Drafting). Diseño y dibujo auxiliado por computadora.
- S) -CAEDS/IDEAS ==> (Computer Aided Engineering Design, System Integrated Design Engineering Analysis Software). Paquete de CAE, con las siguientes capacidades: modelación de sólidos, ensamble de sistemas, cinemática, pre y post procesado de elementos finitos, solución de elementos finitos, dinámica de sistemas y dibujo.
- T) -CAPP ==> (Computer Aided Process Planning). Planeación de procesos auxiliados por computadora. Etapa intermedia entre el CAD y el CAM.



2.3 Nomenclatura de ejes y movimientos para el control numérico de las máquinas.

A continuación se representan esquemáticamente varias máquinas con los sistemas de ejes y movimientos normalizados, según UNE 71-018 — ISO-841.

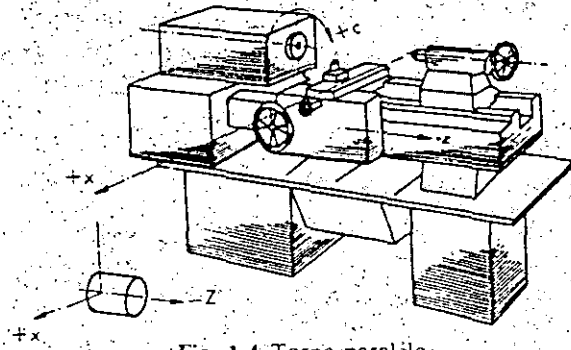


Fig. 1-4 Torno paralelo.

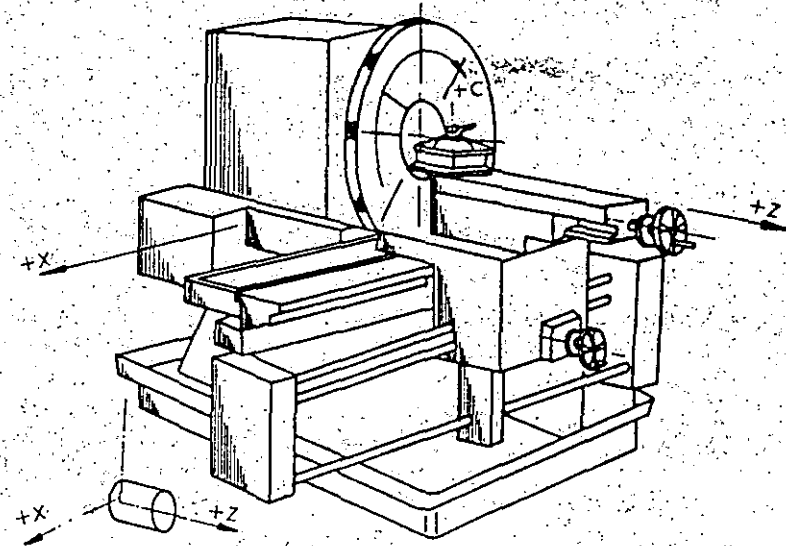


Fig. 1-5 Torno frontal.

20

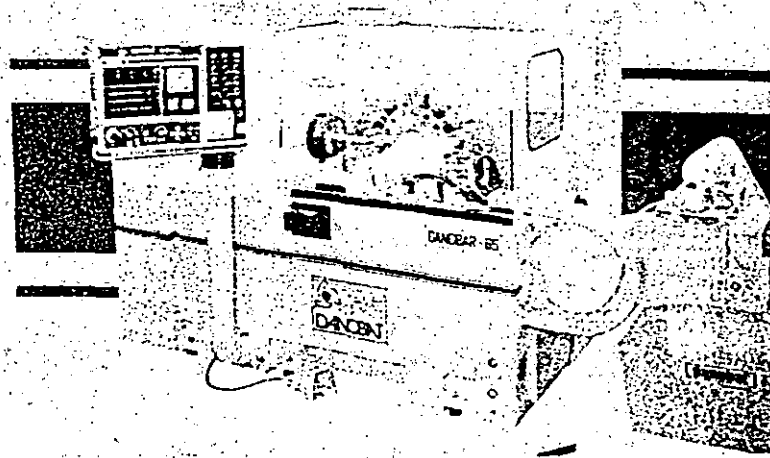


Foto 1-1 Torno con control numérico Mca. "DANOBAT" Modelo DANOBAR-65, con torre de 12 herramientas y paso de barra hasta 65 mm, equipado con sistema de medición, engrase automático de herramientas y piezas y control NUMÉRICO SIEMENS. Se pueden incorporar herramientas motorizadas y controlar la parada angular del cabezal, comercializado y distribuido por DANOBAT MEXICANA.

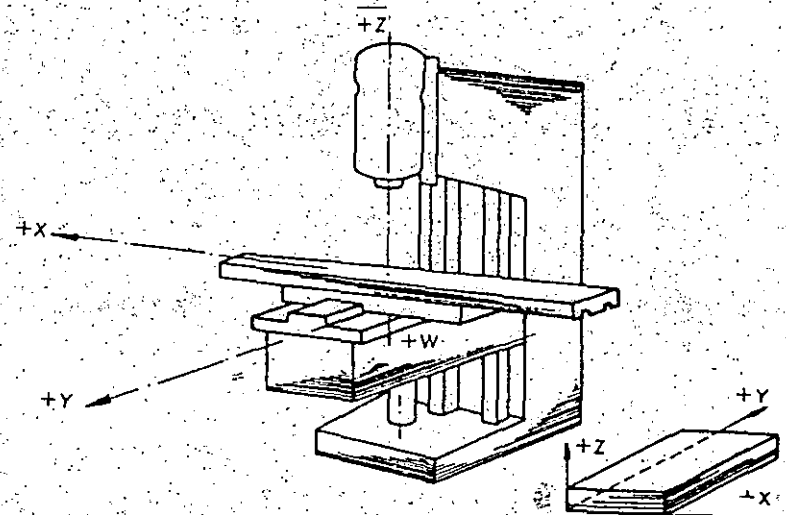


Fig. 1-6 Fresadora de consola de husillo vertical.

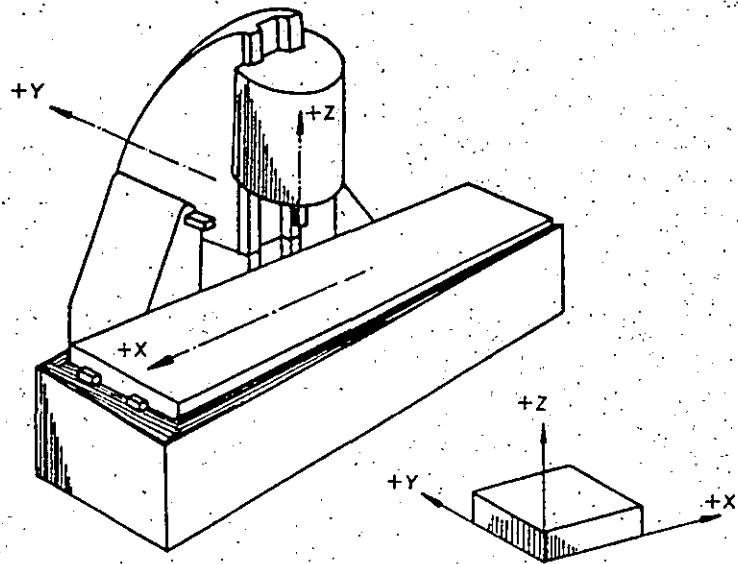


Fig. 1-7. Fresadora de bancada de husillo vertical.

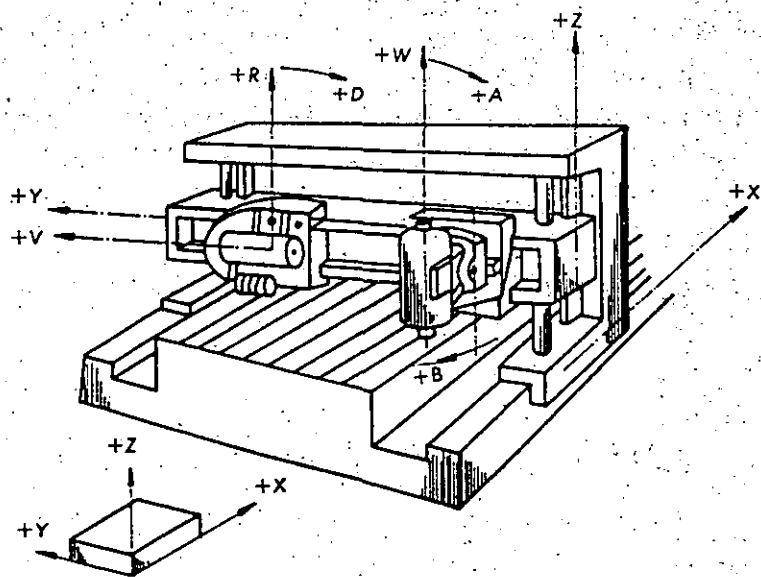


Fig. 1-8. Fresadora de cabezal inclinable.

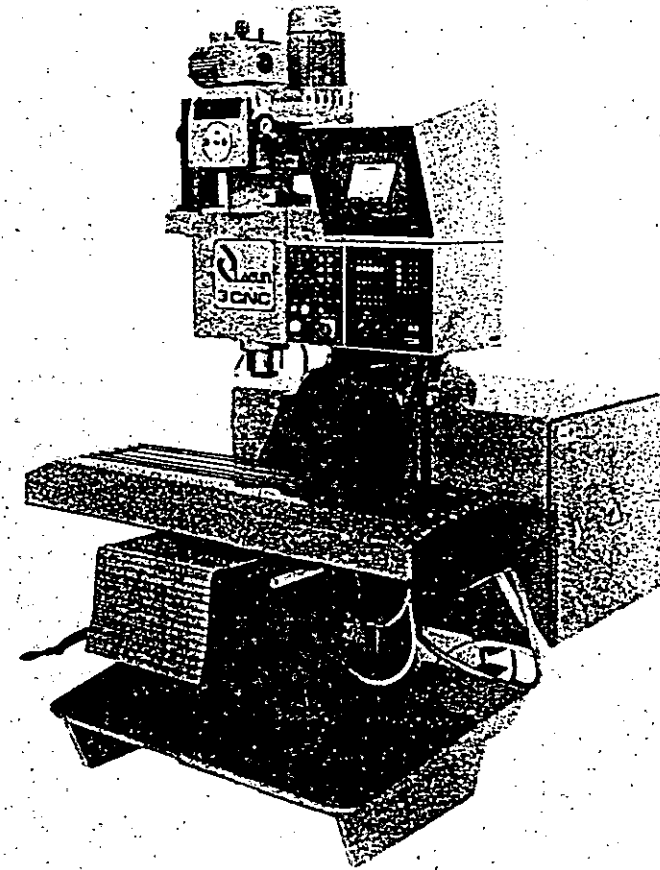


Foto 1-2. Fresadora con control numérico de Torreta Vertical Mca. "LAGUN" Modelo LAGUN-3CNC, especialmente diseñada para el maquinado de piezas pequeñas, se puede adaptar el control que desee el cliente. Comercializada y distribuida por DANO-BAT MEXICANA.

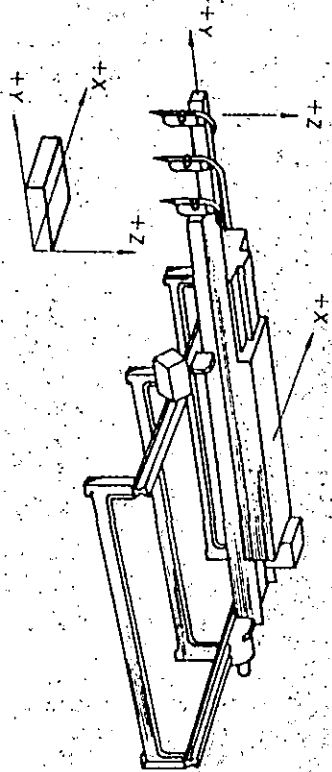


Fig. 1-12 Máquina de oxicoorre.

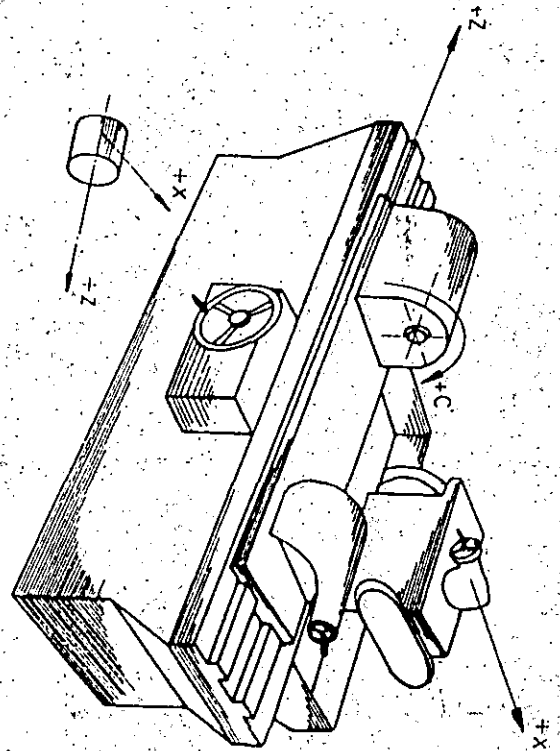


Fig. 1-11 Rectificadora cilíndrica.

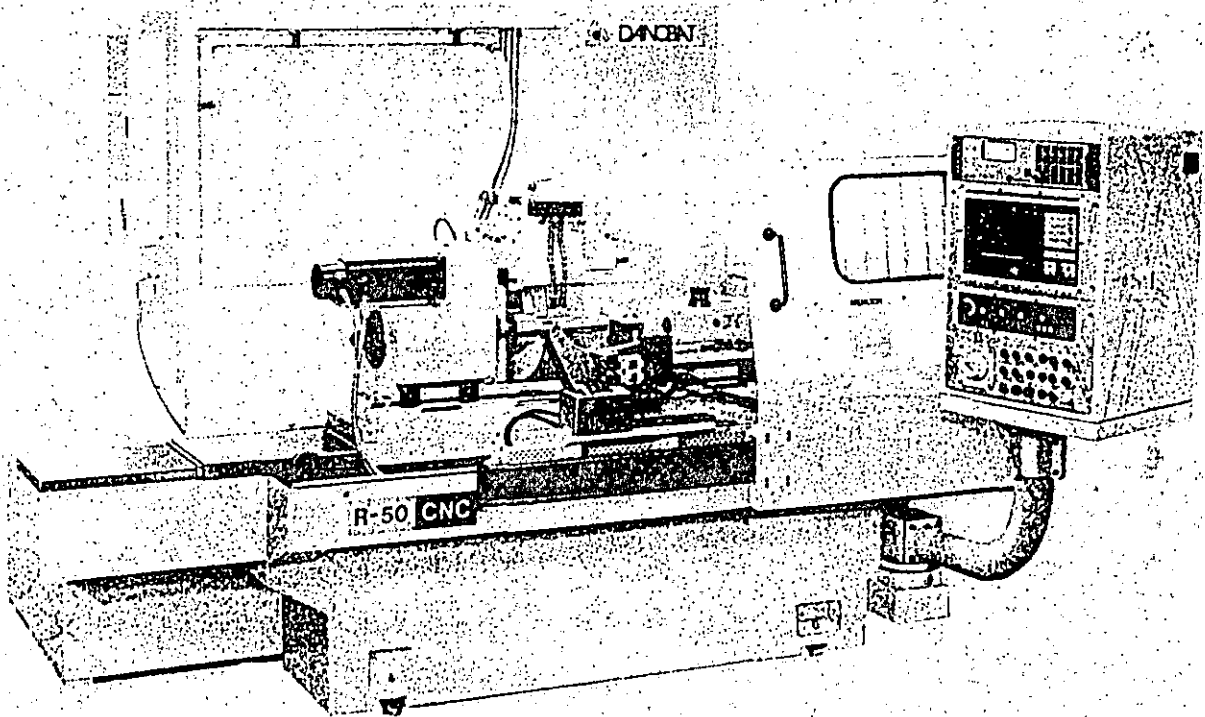


Foto 1-5 Rectificadora de Control Numérico Marca "DANOBAT" Mod. R-50 CNC con medición automática de piezas y CNC SIEMENS Mod. SINUMÉRIK 3G, con capacidad para piezas de  $\varnothing 200 \times 500$  mm, puede ser equipada con alimentación automática de piezas y control estadístico de piezas buenas. Comercializada y distribuida por DANO-BAT MEXICANA.

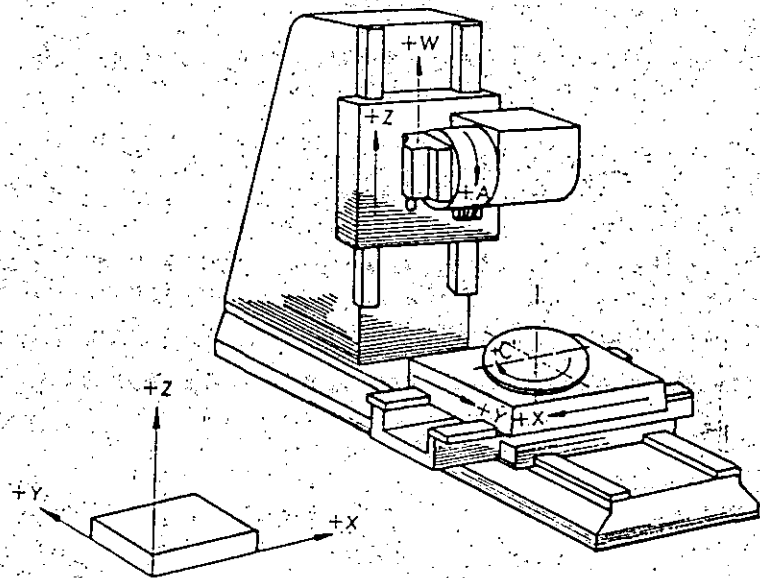


Fig. 1-9. Fresadora de cabezal inclinable.

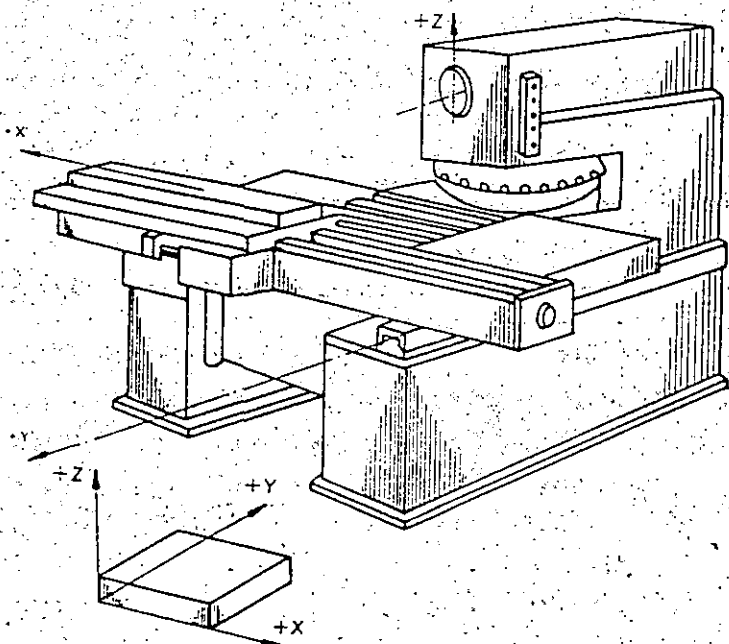


Fig. 1-10. Punzonadora.

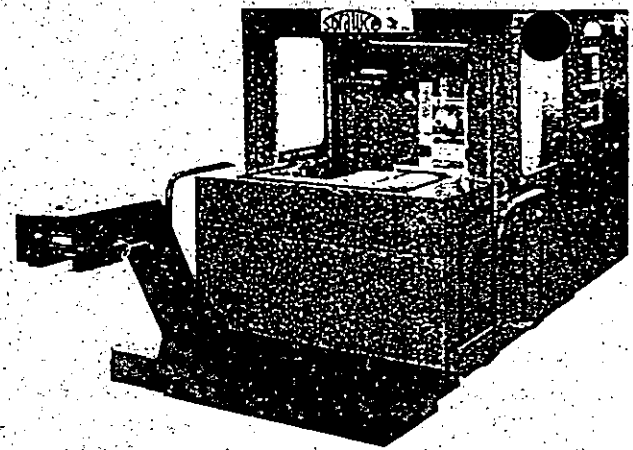


Foto 1-3. Centro de Maquinado Horizontal Mca. "SORALUCE" Mod. CMH-45, d. 15 Kw., equipado con almacén de 30 herramientas con ISO-40, intercambiador automático de Pellets y mesa giratoria gobernada con CNC como el 4º eje. Dimensiones de la pieza a maquinar, 400x400x400. Control Numérico SIEMENS ó FAGOR. Comercializado y distribuido por DANOBAT MEXICANA.

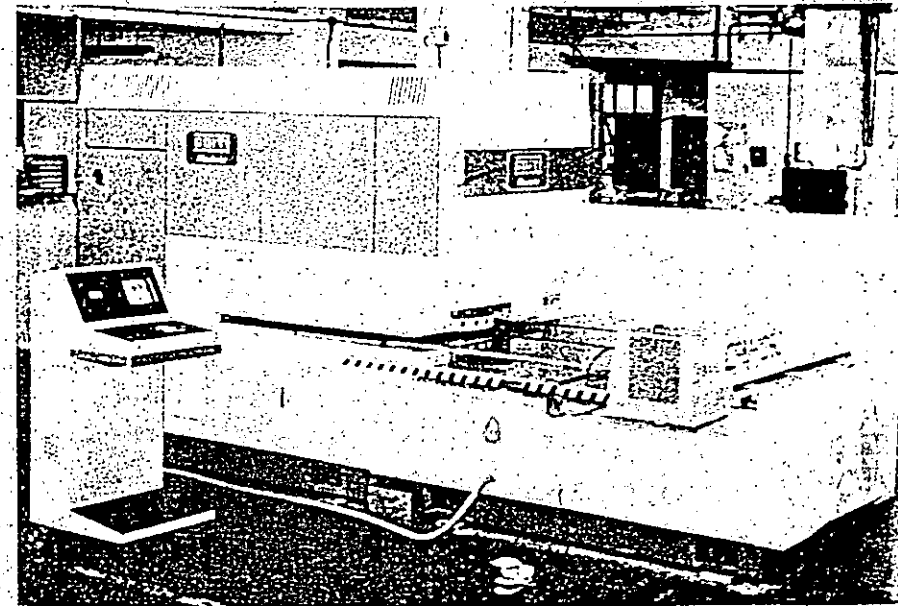


Foto 1-4. Punzonadora con control numérico Mca. "GOITI" Mod. CPM-1250, equipada con torreta de 20 herramientas y hasta 2 autoindex, reposicionado automático y alimentación automática de la chapa para trabajar en espesor hasta 6 mm, velocidad en continuo de 390 golpes por minuto. Comercializada y distribuida por DANOBAT MEXICANA.

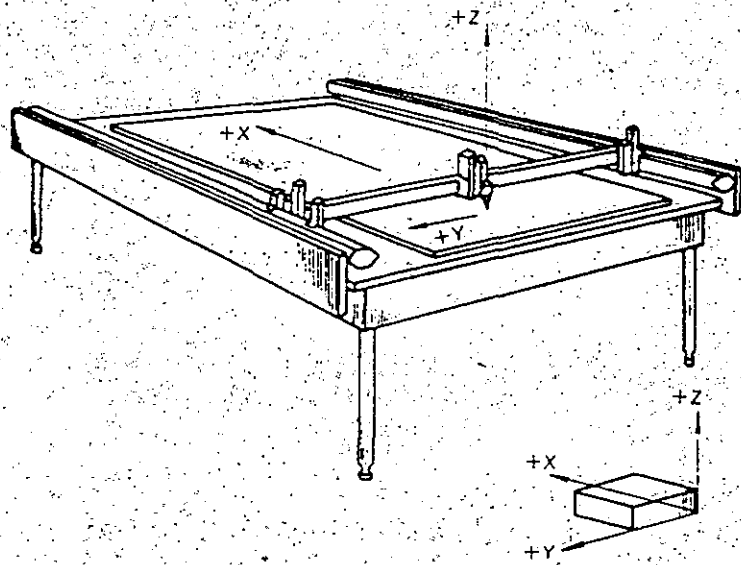


Fig. 1-13 Máquina de dibujar.

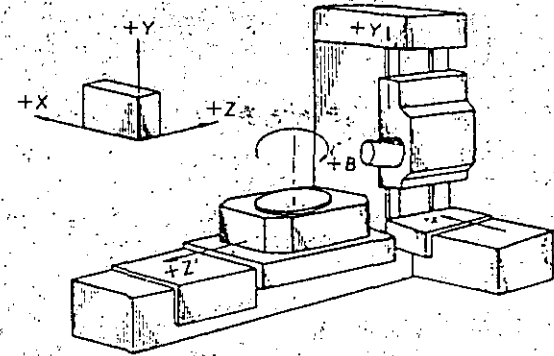


Figura 1-15.

24

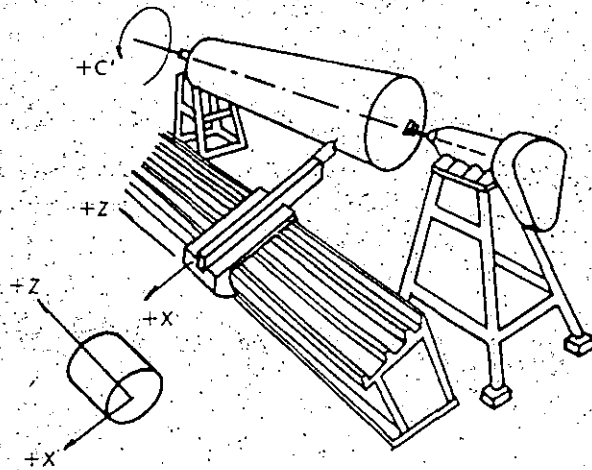


Fig. 1-14 Bobinadora horizontal.

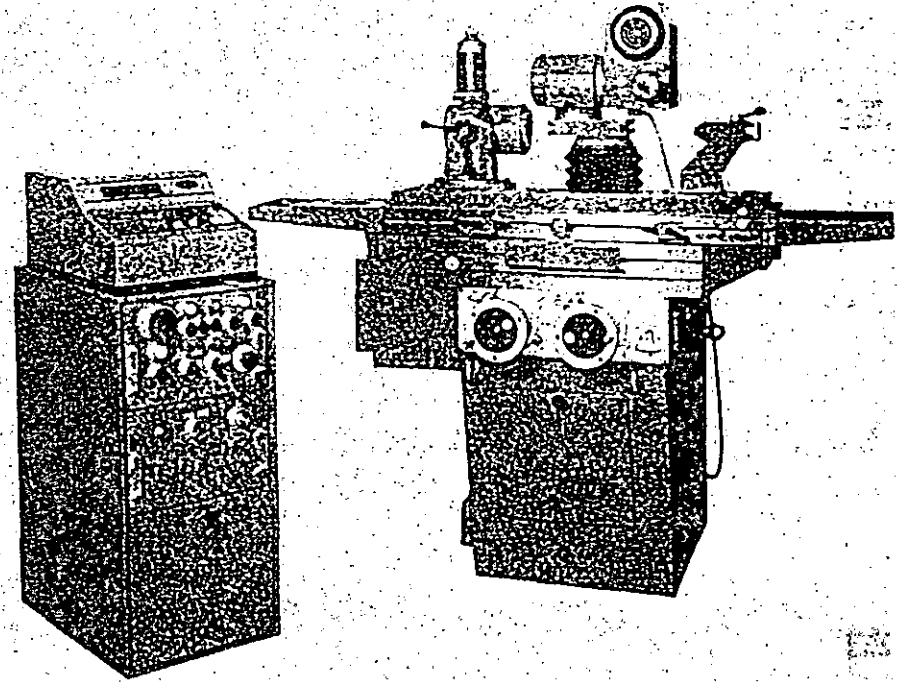
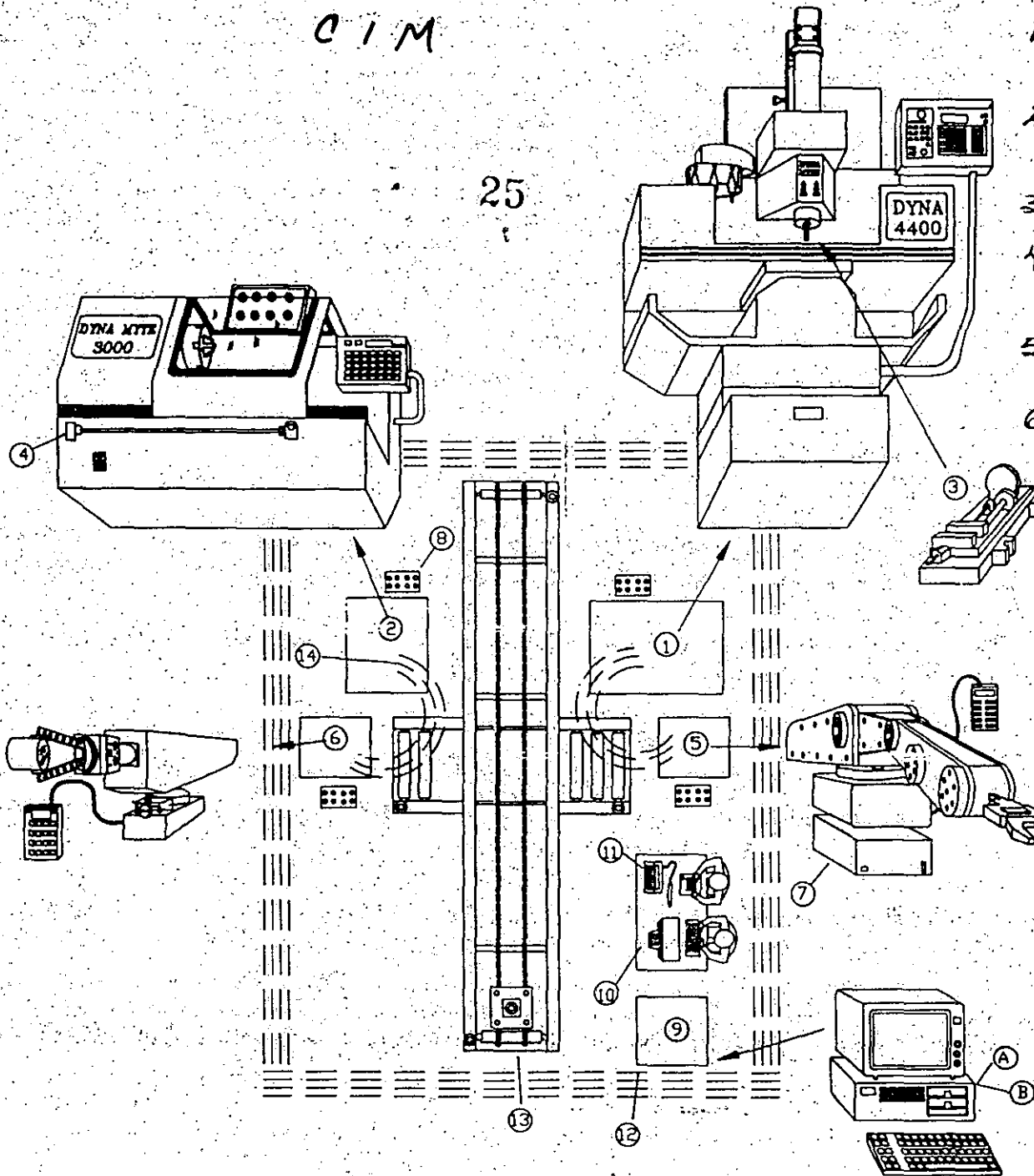


Figura 1-16 Afiladora de herramientas Mca. "ELITE" Mod. 70-CN2 equipada con control numérico. Se puede programar el afilado automático para producción. Comercializada y distribuida por DANOBAT MEXICANA.

C I M

25



- 1- Centro de maquinado con herramientas.
- 2- Torno con puerta automática y base
- 3- Elemento neumático.
- 4- Abridor automático de Puerta.
- 5- Robot 4400 con base y controlador
- 6- Robot 3000 con base y controlador.
- 7- Controlador de robot.
- 8- Cajas de sincronización
- 9- PC
- 10- 2º PC
- 11- Controlador con barra lectora
- 12.-
- 13- Sistema transportador
- 14- Movimiento del robot.

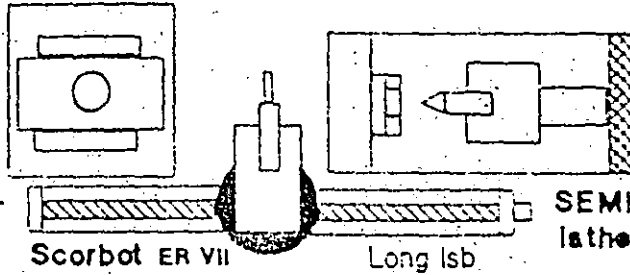
# COMPUTER INTEGRATED MANUFACTURING

Final processing stations

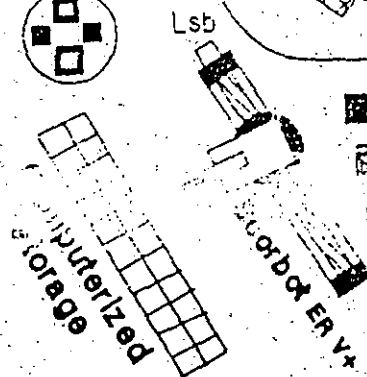
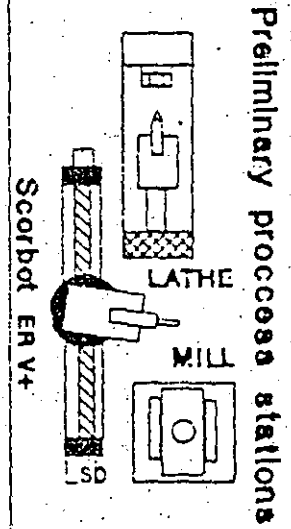
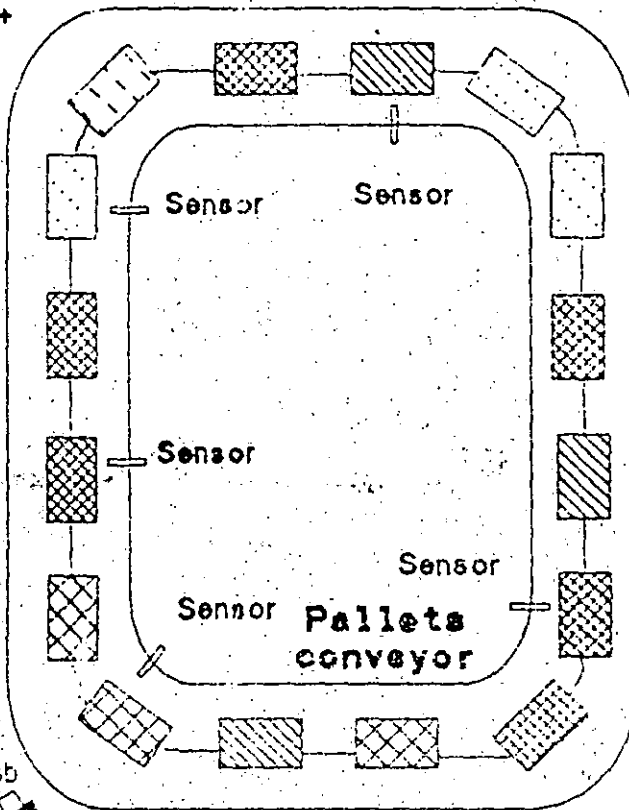
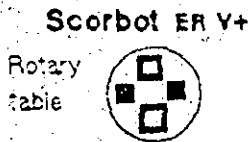
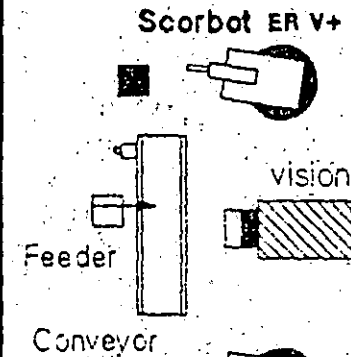
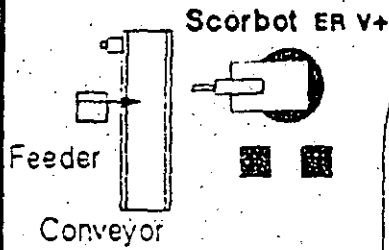
## Work stations

Press  
Painting  
Dispensing  
Assembly  
Welding  
Quality control

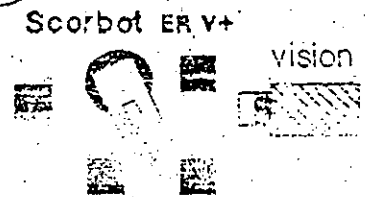
SEMI INDUSTRIAL  
mill



SEMI INDUSTRIAL  
lathe



- Ordered products
- Reprocessing
- Raw materials



Unloading Loading

ESHED ROBOTEC



# G-Codes - Extensions

A6C 114 003		A6C 114 004	
G00	Rapid traverse →		
G01	Linear interpolation →		
G02	Circular interpolation Clockwise		<u>New:</u> - Programming with center point coordinates DIN 66025 - Each desired circle arc possible; no limitation in angles.
G03	Circular interpolation Counter clockwise		
G04	Dwell		<u>New:</u> Input of dwell period.
G20	Intermediate Stop	M00	(G20 replaced)
G21	Empty Line →		
G22	End of program	M30	(G22 replaced)
G24	Radius programming →		
		G25	Sub-routine call-up
G26	Tool correction and tool call-up	M06	(G26 replaced)
		G27	Jump instruction
G33	Threading with constant pitch		<u>New:</u> Input of thread pitch under address K.
G64	Feed motors currentless →		
G65	Cassette operation →		
G66	RS 232 operation →		
		G73	Chip breakage cycle
G78	Threading cycle		<u>New:</u> Automatic division of cut.
		G81	Drilling cycle
		G82	Drilling cycle with dwell
		G83	Drilling cycle, deep hole with withdrawal



A6C 114 003		A6C 114 004	
G84	Longitudinal turning	→	New: Automatic division of cut (parameter H)
		G85	Reaming cycle
		G86	Grooving with division of cut (parameter H)
		G88	Facing with division of cut (parameter H)
		G89	Reaming and drilling with dwell
G90	Absolute value programming	→	
G91	Incremental value programming	→	
G92	Set register (zero point offset)	→	
G94	Feed in mm/min	→	
G95	Feed in mm/rev.	→	

M-Codes

CPU as per No. A6C 114 003	CPU as per No. A6C 114 004	
G20	→ M00	Programmed stop
	M03	Main spindle ON, right hand direction run
	M05	Main Spindle OFF
G26	→ M06	Tool length compensation
	M08	Switch exit X62 PIN 15 HIGH
	M09	Switch exit X62 PIN 15 LOW
	M17	Return command to the main program
	M22	Switch exit X62 PIN 18 HIGH
	M23	Switch exit X22 PIN 18 LOW
	M26	Switch exit X62 PIN 20
G22	→ M30	End of Program
	M98	Automatic compensation of play
	M99	Circle parameter

Addresses

(Extension SW-A6C 114 004)

CPU as per NO: A6C 114 003	CPU as per No: A6C 114 004
N Block number	NEW: N00 to N209
G Traverse function	
M Miscellaneous function	
X Z Traverse coordinates	
F Feed	
	I K Center point coordinates
	X Dwell
	L Jump address
T Tool address	
	H Parameter division of cut
	H Parameter impulse edit
	K Thread pitch

Summary of Max. Values  
Input size

(SW-A6C 114 004)

Address	Metric		Inch	
	Value	Dimension	Value	Dimension
N Block number	00-209	1	00-209	1
G Traverse function (G-Codes)	00-95	1	00-95	1
M Miscellaneous function (M-Codes)	00-99	1	00-99	1
X Coordinate CNC-input	0-±5999	$\frac{1}{100}$ mm	0-±1999	$\frac{1}{1000}$ "
Z Coordinate CNC-input	0-±32760		0-±12900	
X Coordinate hand input	0-±89999		0-±29999	
Z Coordinate hand input	0-±89999		0-±29999	
F Feed	2-499		2-199	
	With G94	mm/min		$\frac{1}{10}$ "/min
	With G95	$\frac{1}{1000}$ mm/U		$\frac{1}{10000}$ "/U
I Circle point coordinate in X	0-5999	$\frac{1}{100}$ mm	0-1999	$\frac{1}{1000}$ "
K Circle point coordinate in Z	0-2270			
X Dwell (time)	0-±5999	$\frac{1}{100}$ sec	0-±1999	$\frac{1}{100}$ sec
L Jump address	0-221	1	0-221	1
T Tool address	0-499		0-199	
H Parameter division of cut	0-999		0-999	
H Parameter width of turning tool (G86)	10-999	$\frac{1}{100}$ mm	10-999	$\frac{1}{1000}$ "
H Parameter impulse edit	0-999		0-999	
K Thread pitch	2-499		2-199	

## Format A6C 114 004

## G-Codes

N	G (M)	X (I)	Z (K)	F (T)(L)(K)	H	Remarks
...	00	± .....	± .....	.....	.....	
...	01	± .....	± .....	.....	.....	
...	02	± .....	± .....	.....	.....	
...	03	± .....	± .....	.....	.....	
...	04	.....	.....	.....	.....	
...	21	.....	.....	.....	.....	
...	24	.....	.....	.....	.....	
...	25	.....	.....	L...	.....	
...	27	.....	.....	L...	.....	
...	33	.....	± .....	K...	.....	
...	64	.....	.....	.....	.....	
...	65	.....	.....	.....	.....	
...	66	.....	.....	.....	.....	
...	73	.....	± .....	.....	.....	
...	78	± .....	± .....	K...	.....	
...	81	.....	± .....	.....	.....	
...	82	.....	± .....	.....	.....	
...	83	.....	± .....	.....	.....	
...	84	± .....	± .....	.....	.....	
...	85	.....	± .....	.....	.....	
...	86	± .....	± .....	.....	.....	
...	88	± .....	± .....	.....	.....	
...	89	.....	± .....	.....	.....	
...	90	.....	.....	.....	.....	
...	91	.....	.....	.....	.....	
...	92	± .....	± .....	.....	.....	
...	94	.....	0	.....	.....	
...	95	.....	.....	.....	.....	

## M-Codes

...	M 00	.....	.....	.....	.....	
...	M 03	.....	.....	.....	.....	
...	M 05	.....	.....	.....	.....	
...	M 06	± .....	± .....	T...	.....	
...	M 08	.....	.....	.....	.....	
...	M 09	.....	.....	.....	.....	
...	M 17	.....	.....	.....	.....	
...	M 22	.....	.....	.....	.....	
...	M 23	.....	.....	.....	.....	
...	M 26	.....	.....	.....	.....	
...	M 30	.....	.....	.....	.....	
...	M 98	.....	.....	.....	.....	
...	M 99	I .....	K .....	.....	.....	

Compendio de los valores límite  
Dimensiones de entrada  
(SW-A6C 114 004)

Dirección	Métricamente		En pulgadas	
	Valores	Dimensión	Valores	Dimensión
N Número de registro	00-209	1	00-209	1
G Función de recorrido (Función G)	00-95	1	00-95	1
M Función adicional (Función M)	00-99	1	00-99	1
X Coordenadas Entrada CNC	0-9999		0-1999	
Z Coordenadas Entrada CNC	0-32760	$\frac{1}{100}$ mm	0-12900	$\frac{1}{1000}$ "
X Coordenadas Entrada manual	0-99999		0-19999	
Z Coordenadas Entrada manual	0-99999		0-19999	
F Avance	2-499		2-99	
	En G94	mm/min		$\frac{1}{10}$ "/min
	En G95	$\frac{1}{1000}$ mm/U		$\frac{1}{10000}$ "/U
I Coordenadas del centro del círculo en X	0-5999	$\frac{1}{100}$ mm	0-1999	$\frac{1}{1000}$ "
K Coordenadas del centro del círculo en Z	0-22700			
X Indicación del tiempo de permanencia	0-19999	$\frac{1}{100}$ sec	0-1999	$\frac{1}{100}$ sec
L Dirección de salto	0-221	1	0-221	1
T Dirección de herramienta	0-499	1	0-199	1
H Parámetro Subdivisión graduada de corte	0-999		0-999	
H Parámetro Anchura de cuchilla de tornear (CB5)	10-999		10-999	
H Parámetro Salida de impulso	0-999	$\frac{1}{100}$ mm	0-999	$\frac{1}{1000}$ "
K Paso de rosca	2-499		2-199	

Max. Main Spindle R.P.M.  
when Threading  
(SW-A6C 114 004)

Thread pitch		max. r.p.m.
metric [mm]	inch ["]	
0,02 - 0,5	0,002 - 0,02	950
0,5 - 1	0,02 - 0,04	500
1 - 1,5	0,04 - 0,06	320
1,5 - 2	0,06 - 0,08	250
2 - 3	0,08 - 0,12	170
3 - 4	0,12 - 0,16	120
4 - 4,99	0,16 - 0,199	100

Figura 1: Peón

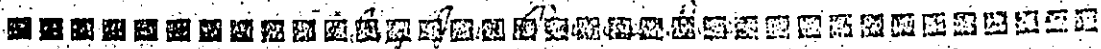
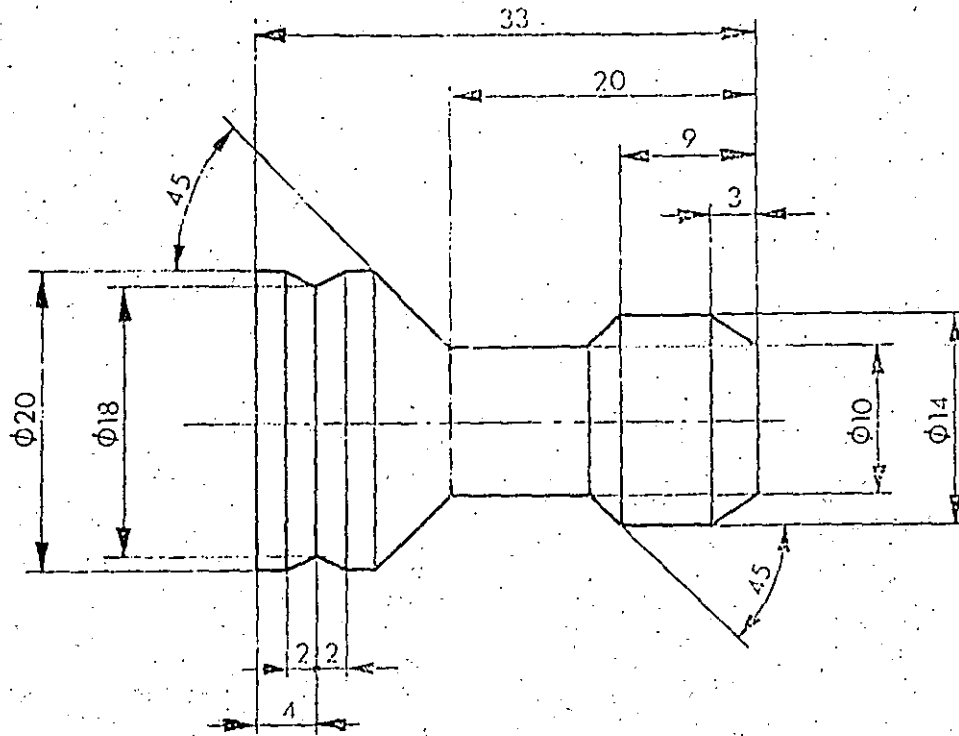
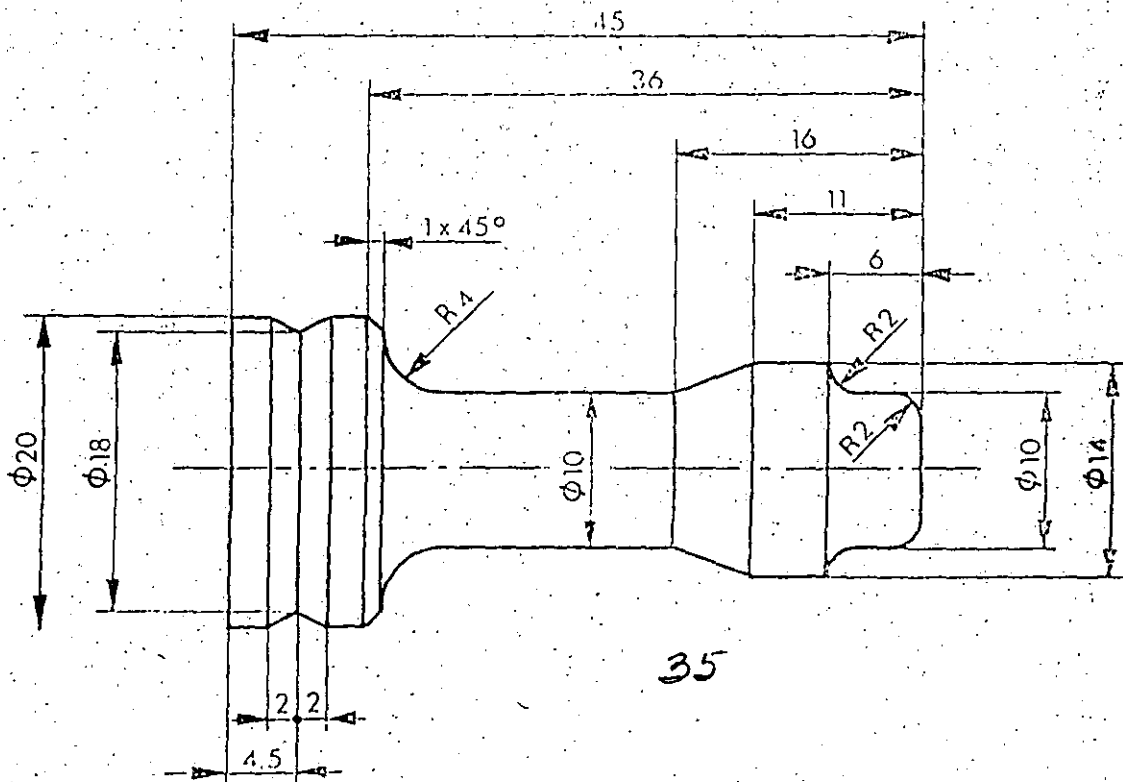
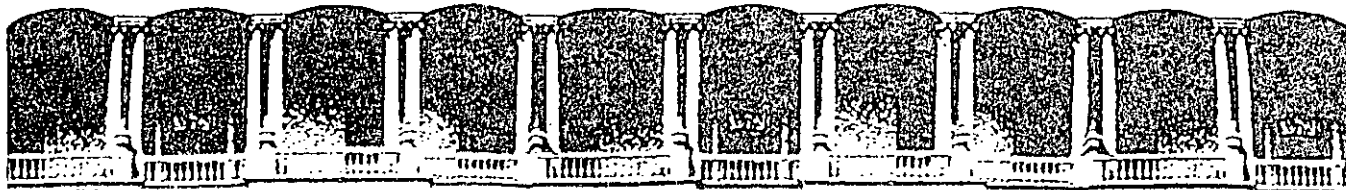


Figura 2: Alfil







**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS**

**DISEÑO DE MAQUINAS INDUSTRIALES**

10 al 21 de febrero de 1992.

**CONCEPTOS BASICOS DE INNOVACION  
TECNOLOGICA Y AVALUO DE PROYECTOS  
DE DESARROLLO TECNOLOGICO**

**ING. VICENTE BORJA RAMIREZ  
ING. LEONARDO GONZALEZ GONZALEZ**

**PALACIO DE MINERIA**

## I. CIENCIA VS. TECNOLOGIA: Consideraciones Generales.

*Existe alguna relación entre Ciencia y Tecnología*  
*en común*

- Tienen algo en común: son formas organizadas de conocimientos, pero para fines distintos

*que es Ciencia*

- La Actividad científica está orientada a la satisfacción de la necesidad de conocimientos sobre las leyes de la naturaleza (Saber porqué)

*que es Tecnología*

- La Actividad Tecnológica está orientada a encontrar la forma óptima (en \$ y tiempo) de producir bienes y servicios de utilidad económica y social (saber como)

- No existe relación simple entre la capacidad científica de un país y su liderazgo tecnológico e industrial, ambas son indispensables para el desarrollo integral de la sociedad pero por distintas razones

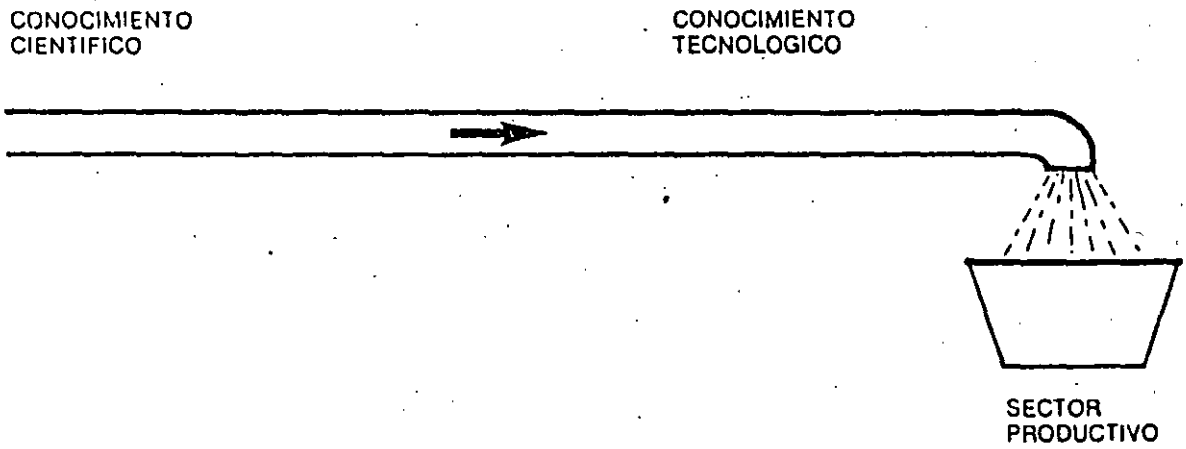
*para que sirva la Ciencia*

- La ciencia sirve para lograr una conciencia crítica de la sociedad; y sienta las bases para un desarrollo tecnológico propio

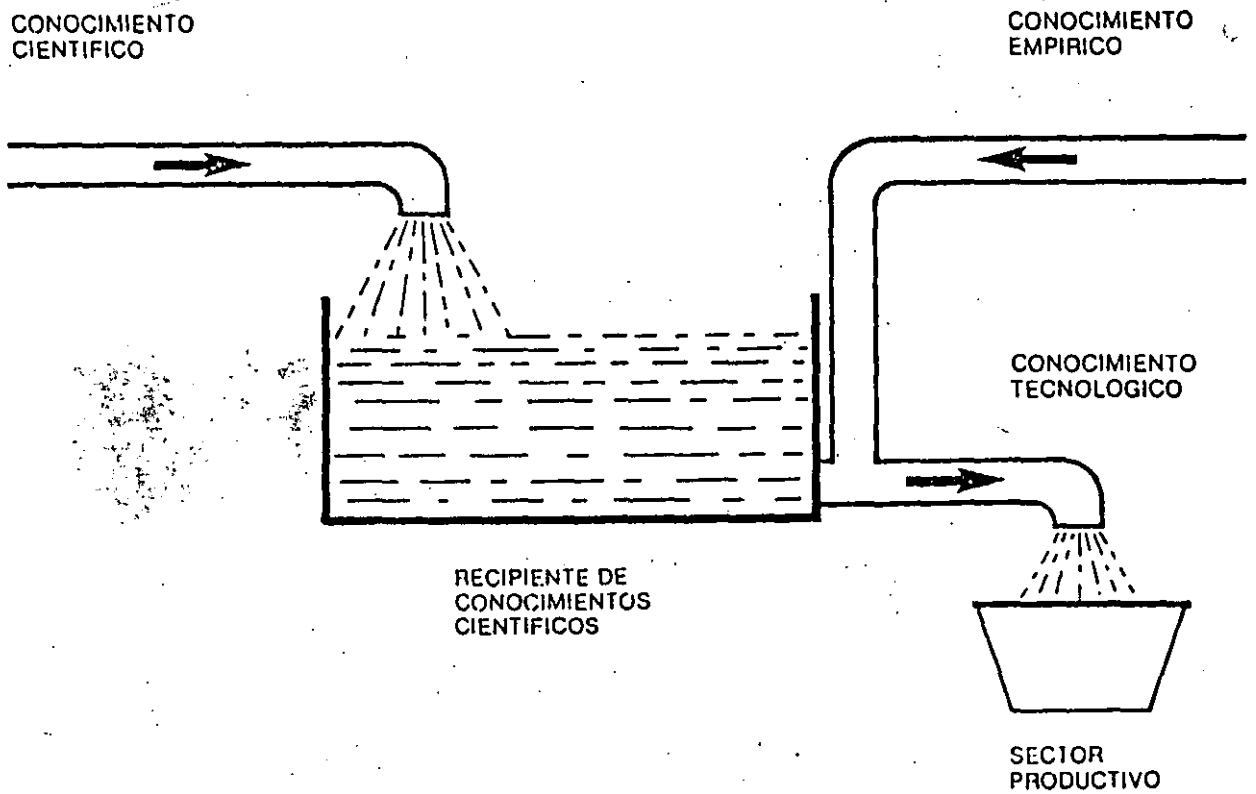
*para que sirva la Tecnología*

- La tecnología sirve para incrementar la eficiencia y crecimiento del aparato productivo, aunque retroalimentar la curiosidad y productividad científica.

FALSO



CORRECTO



## II. INNOVACION TECNOLOGICA. CONCEPTO

distintos conceptos de ↗

- Hacer Innovación Tecnológica implica, entre otras cosas, la estructuración de un paquete tecnológico, necesario para producir un bien o un servicio → Que es un paquete tecnológico
- Consiste en un proceso que pretende conjugarse oportunidades técnicas con necesidades, integrando un paquete tecnológico, que tiene por objetivo introducir o modificar productos o procesos en el sector productivo, con su consecuente comercialización
- Schmoockler dice que "cuando una empresa produce un bien o un servicio, o usa un método o insumo que es nuevo para ella, hace un cambio técnico.... Su acción es una Innovación"
- Drucker sostiene que las Innovaciones Tecnológicas propician un cambio tecnológico en el sector industrial que resulta ser una de las principales motivaciones por la necesidad de competitividad de las organizaciones productivas.

Lo más importante

Necesidad de alguna persona en su empresa, cual es su oportunidad Técnica

## LOS PRINCIPIOS DE LA INNOVACION (SEGUN PETER DRUCKER)

### - Lo que hay que hacer:

- La Innovación Tecnológica comienza con el análisis de las oportunidades generadas por el mercado. *ó en la misma Empresa.*
- La Innovación es conceptual, hay que concretarla en el mercado. *La tecnología debe enfocarse por último a su comercialización.*
- La Innovación debe ser simple, o lo que es lo mismo, debe simplificar a lo que se aplica. (La resistencia al cambio).
- Las innovaciones efectivas son pequeñas.
- Debe orientarse a lograr un liderazgo.

### - Lo que no hay que hacer:

- No tratar de innovar en forma múltiple, hay que concretar a algo objetivo.
- No innovar para el futuro, hay que innovar para el presente, (se sobreestima la evolución del mercado).
- Las innovaciones no deben apartarse del aspecto humano.

### III. PAQUETE TECNOLÓGICO.

- La Tecnología engloba un paquete sistemático de conocimientos organizados de distintas clases (científico, técnico, empírico, etc.), proveniente de diversas fuentes (descubrimientos científicos, otras tecnologías, libros, manuales, patentes, etc.), a través de métodos diferentes (investigación, desarrollo, adaptación, copia, espionaje, expertos, etc.).

- El paquete tecnológico así visto pretende mostrar un significado del cambio técnico en todas sus facetas y elementos que intervienen en el mismo.

- El paquete tecnológico fundamentalmente engloba cuatro tipos de tecnologías:

Tecnología de Producto: relacionada con las normas, especificaciones, y requisitos generales de calidad y presentación que debe cumplir un producto, (bien o servicio)

Tecnología de Equipo: referente a las características de los bienes de capital necesarias para producir el bien o servicio

Tecnología de Proceso: relacionada con las condiciones, procedimientos y formas de organización necesarios para combinar insumos, recursos humanos y bienes de capital para producir el bien o el servicio.

Tecnología de Operación: normas y procedimientos aplicables a las tecnologías de producto, proceso y equipo para asegurar la confiabilidad, seguridad física y durabilidad de la planta productiva y sus productos.

clase de  
 Que industrias podría indicar algún  
 en donde se aplique algún tipo de  
 tecnología de las cuatro anteriores.

Componente Tecnológico Rama Industrial	Tecnología de Producto	Tecnología de Equipo	Tecnología de Proceso	Tecnología de Operación
Textil	A	A	M	M
Alimentos	A	A	B	M
Metal-Mecánico	A	A	M	M
Petroquímica	B	M	A	A
Colorantes y pigmentos	A	B	M	M
Productos Farmacéuticos	A	M	B	A
Fertilizantes	B	M	A	A

Tabla II-2 Composición tecnológica típica para diversos sectores.

Clave: A Contribución alta al paquete tecnológico  
 M Contribución media al paquete tecnológico  
 B Contribución baja al paquete tecnológico



## ANTECEDENTES

El CIT tiene entre sus objetivos fundamentales realizar estudios de consultoría que satisfagan las necesidades de la industria en temas relacionados con la innovación tecnológica. Una de las consultas concretas que se planteó fue la de fijar el precio de una tecnología. Para responder esta pregunta, se procedió a realizar una revisión bibliográfica sobre el tema y, al no encontrar una metodología satisfactoria, se decidió desarrollar una propia.

Con base en el análisis de la información recopilada, se determinaron tres aspectos que es necesario tomar en cuenta para realizar un avalúo de tecnología. El primer aspecto incluye los antecedentes en el mercado, es decir, considera los precios anteriores a los que se han comercializado tecnologías similares. El segundo, tiene que ver con la rentabilidad del proyecto, es decir, su Tasa Interna de Retorno (TIR) y, finalmente, el tercero consiste en una serie de ajustes al valor antes calculado para tomar en cuenta factores como: calidad de la tecnología, grado de desarrollo, exclusividad, etc.

La metodología base fue sometida a la consideración de reconocidas personalidades del ámbito tecnológico latinoamericano (anexo 1). Sus comentarios sirvieron para afinar el método.

La metodología así obtenida, fue aplicada a un caso real obteniéndose resultados satisfactorios.

### Descripción de la Metodología

Son dos las ecuaciones fundamentales en las que está basada la metodología. En la primera se calcula una tasa de regalías base ( $Z_B$ ) a partir de la tasa de regalías promedio ( $Z_P$ ) que se obtiene del Registro Nacional de Transferencia de Tecnología, revisando los contratos más recientes de transacciones similares dentro de la misma rama tecnológica.

Aunque pudiera pensarse que los valores del Registro Nacional de Transferencia de Tecnología son engañosos debido a las prácticas deshonestas o inocentes de algunos licenciadores, nosotros pensamos que usando el criterio se pueden seleccionar algunos contratos que sí sean representativos. Además, posiblemente sea el Registro Nacional de Transferencia de Tecnología de cada país la fuente más rica en información sobre las transacciones de este tipo, basada en prácticas reales.

Además de la tasa promedio, en esta ecuación se considera la rentabilidad financiera del proyecto a través del cociente  $TIR/IR$  el cual permite conocer qué tanto más atractivo resulta invertir en el proyecto en cuestión contra el valor del dinero en el mercado; esto es, ¿Cuánto se gana arriesgando dinero en el proyecto? contra ¿Cuánto me puede rendir ese mismo dinero en una inversión sin riesgo?.

Este cociente puede constituirse en un factor crítico ya que si no alcanza un cierto valor mínimo que resulte atractivo al inversionista, no tiene objeto continuar con la evaluación del proyecto y debe revisarse la TIR mediante la adquisición de tecnologías más productivas o que requieran de menor inversión o buscar otro proyecto más atractivo.

Las dos ecuaciones son las siguientes:

$$Z_B = \frac{Z_P + \frac{TIR}{IR}}{2} \dots\dots\dots(1)$$

$$Z_F = Z_B \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \dots\dots\dots(2)$$

en donde:

Z<sub>P</sub> = Tasa de regalías promedio de transacciones similares

Z<sub>F</sub> = Tasa de regalías final

Z<sub>B</sub> = Tasa base de regalías

TIR = Tasa interna de retorno del proyecto en cuestión

IR = Interés real del mercado

A = Factor de ajuste por intensidad tecnológica

B = Factor de ajuste por competitividad internacional

C = Factor de ajuste por grado de desarrollo

D = Factor de ajuste por ventajas comerciales asociadas

E = Factor de ajuste por grado de exclusividad

F = Factor de ajuste dependiendo del grado de integración del paquete tecnológico.

El IR se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$IR = \frac{CPP + 1}{i + 1} - 1 \dots\dots\dots(3)$$

en donde:

i = Inflación anualizada

CPP = Costo porcentual promedio del dinero.

Para que la IR tenga valores razonables, es preciso que la inflación sea menor al CPP. Cuando esto no es así, como puede

sucedir en casos de inflación galopante, es mejor evaluar el proyecto en dólares y considerar los índices internacionales de costo del dinero.

Una vez obtenida la  $Z_B$  mediante la aplicación de la ecuación (1), se procede a calcular el valor de los factores de ajuste A, B, C, D, E y F, para calcular la  $Z_F$ .

Con el fin de reducir a un mínimo la subjetividad en la adjudicación de valores a estos factores, resulta conveniente la aplicación de una técnica de tipo Delphi; esto es, se integra un panel de expertos a los que se les presenta el proyecto y en forma individual asignan valores a los factores; posteriormente, los expertos que asignaron valores las calificaciones extremas (altas y bajas) presentan sus argumentos y los motivos que los llevarán a dar esos valores y se repite la evaluación.

Para tener un marco de referencia dentro del cual poder ubicar el caso analizado, se presentan los siguientes criterios para cada uno de los factores de ajuste:

#### A.- Intensidad Tecnológica

Se refiere al grado de dinamismo tecnológico del sector industrial correspondiente.

En este factor de ajuste se le asigna una calificación mayor al área con más intensidad tecnológica ya que en estos casos la tecnología es el insumo con mayor impacto en el precio del producto.

A	Intensidad Tecnológica
1.4	Alta (Ej. Microelectrónica)
1.2	Media Alta
1.0	Media
0.8	Media Baja
0.6	Baja (Ej. Agronomía)

#### B.- Competitividad Internacional

Se refiere a la calidad de la tecnología comparando sus dimensiones tecnológicas más importantes (calidad, rendimientos, consumo de energía y en general el estado técnico y de mercado de la tecnología) con las dimensiones tecnológicas de otras tecnologías similares.

B	Competitividad Internacional
1.6	Techo tecnológico mundial
1.3	Superior al promedio
1.0	Promedio
0.7	Rezago moderado
0.4	Franco rezago

### C.- Grado de Desarrollo

Este es el factor que puede castigar más fuerte el valor de una tecnología. Está relacionado con el riesgo de que la tecnología no funcione de la manera esperada. Su valor máximo es 1 y se aplica cuando existen plantas funcionando con esa tecnología a la misma escala de producción que la que se piensa instalar.

C	Grado de Desarrollo
1.0	Experiencia a nivel industrial
0.8	Experiencia a escala industrial menor a la del proyecto en cuestión
0.5	Nivel de planta piloto
0.2	Proceso a escala de laboratorio

### D.- Ventajas comerciales

Se refiere a las ventajas que presenta el oferente para la comercialización del producto como pueden ser marcas, canales de distribución, publicidad, etc.; así como el suministro de materias primas y/o compras de los productos asegurados.

Con este factor se castiga el precio de la tecnología cuando existen desventajas comerciales asociadas como pueden ser precios controlados de los productos, la necesidad de abrir un nuevo mercado, baja disponibilidad de materia prima, existencia de un mercado muy competido, necesidad de excesivos trámites gubernamentales, e incluso desprestigio de la compañía proveedora de la tecnología.

D	Ventajas comerciales
1.4	Claras ventajas
1.2	Algunas ventajas
1.0	Promedio
0.8	Algunas desventajas
0.6	Claras desventajas

### E.- Exclusividad

Se refiere al grado en que el oferente puede garantizar al usuario el uso exclusivo de la tecnología.

E	Exclusividad
1.4	Internacional con Patentes vigentes por largo tiempo.
1.2	Internacional con secrecía
1.1	Nacional con Patentes
1.0	Nacional con secrecía
0.8	Regional con Patentes
0.6	Regional con secrecía
0.4	Sin exclusividad

## REFERENCIAS

- 1) Adam, Y., Ong, C.H. and Pearson, A.W. 1988. Licensing as an alternative to foreign direct investment. An empirical investigation. The journal of product innovation management. 5 (1) 32-49.
- 2) Arnold, T. and Headley, T. 1987. Factors in pricing license. Les Nouvelles (1) 18-21.
- 3) Baark, E. 1988. The value of technology: A survey of the chinese theoretical debate and its policy implications. Research, Policy 17. 269-282.
- 4) Bowler, J.E. 1980. Payments for technology. Les Nouvelles 15(4) 241-247.
- 5) Cadena, G. et al. 1986. Administración de proyectos de innovación tecnológica. Ediciones Gernika, UNAM-CONACYT, México.
- 6) Goldscheider, R. 1982. Technology management handbook. Clark Boardman Company, Ltd. New York.
- 7) Goldscheider, R. 1984. The art of "Licensing out". Les Nouvelles 19(2) 84-89.
- 8) Grace, S.S., 1984. Case study: 50/50 Joint venture. Les Nouvelles (4) 61-64.
- 9) Guía de Asimilación de Tecnología. 1985. Facultad de Química, UNAM. Cuadernos de Posgrado 17. México.
- 10) Janiszewski, H.A. 1977. Quelques considerations touchant l'evaluation des redevances et d'autres formes de paiements par les preneurs de licence dans les pays en developpement ou par les organismes publics competentes. UNIDO/ ICIS.51
- 11) Matsunaga, Y. 1983. Determining reasonable royalty rates. Les Nouvelles (4) 216-219.
- 12) Orleans, P. 1981. Pricing licensing of Technology. Les Nouvelles (4) 320-324.
- 13) Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial. "Pautas para la evaluación de acuerdos de transferencia de tecnología". ONUDI; New York, 1981.
- 14) Organización Mundial de la Propiedad Intelectual "Guía de Licencias para países en Desarrollo", Ginebra, 1977.
- 15) Registro Nacional de Transferencia de Tecnología.- "Manual de evaluación de contratos"; documento interno. Mimco.

16) Willis, S.I. 1987. Application of business economics to the licensing decision. Licensing Law and Business Report; 10 (2) 157-168.

A N E X O 1

EXPERTOS CONSULTADOS PARA EL ANALISIS DE LA TECNOLOGIA

Ing. Eduardo de la Tijera	(TEXNE)
Ing. Juan Antonio Ramirez Bustos	(FONEI)
Lic. Joaquin Morales	(FOMIN)
Dr. Fernando Machado	(ONUDI)
Quim. Patricia Mead	(GESTEC)
Ing. Arturo Garcia Torres	(Consultor independiente)
Ing. Miguel Angel López Bracho	(SARH Asuntos Internacionales)
Ing. Alberto Gasca	(SARH Asuntos Internacionales)
Lic. José Alfonso Sánchez	(Secretaría de Relaciones Exteriores)
Lic. Roberto Arochi	(Bufete Sepúlveda)
Dr. Roberto Villarreal	(Registro Nacional de transferencia de Tecnología)
Ing. José Antonio Esteva	(LANFI)

A N E X O 2

ELEMENTOS QUE INTEGRAN PAQUETES TECNOLOGICOS

Tecnología de Producto	Tecnología de Proceso	Tecnología de Producción	Tecnología de Equipo
Descripción del producto	Especificación del proceso para control de calidad	Especificaciones del proceso para producción	Especificaciones de maquinaria y equipo
Especificaciones de prueba para control de calidad	Normas oficiales y estándares aplicables al proceso	Especificaciones del proceso para control de calidad	Especificaciones de instrumentos-instrumentación
Dibujos del producto (para producción y ensamble)	Memorias de cálculo del proceso	Hoja de procesos con toda la información relevante para producción	Partes de repuesto
Normas y estándares oficiales aplicables al producto	Análisis de capacidades instaladas	Hojas de proceso con toda la información relevante para control de calidad	Dibujos de herramientas o dispositivos
Memoria de cálculo del diseño del producto	Descripción del proceso paso a paso	Normas oficiales y estándares de protección contra la contaminación	Memorias de cálculo de equipo
Modelo prototipo	Arreglo general	Normas oficiales y estándares de tratamiento de desechos	Memorias de cálculo de instalaciones
Manuales de operación del producto	Diagramas de flujo de proceso de bloques	Normas oficiales y estándares de producción	Memorias de cálculo de las redes de servicios
Manuales de mantenimiento del producto	Balances de materiales y energía	Análisis de producción	Manuales de mantenimiento de equipo
Manuales de control de calidad	Balances de cálculo de rendimientos	Balances de materiales, cálculo diario, rendimientos, control de costos	Manuales de calibración de instrumentos
Información sobre usos y aplicaciones	Especificaciones de materias primas	Hoja de recálculo/postcálculo	Instalación y arranque de maquinaria y equipo
Fórmulas y composiciones	Especificaciones de reactivos auxiliares	Análisis de seguridad industrial	Selección y servicios de adquisición de equipo
Especificaciones de materiales y mezclas	Especificaciones de productos en proceso	Manual de mantenimiento	Distribución de planta
Listado de partes o insumos	Especificaciones de materiales de empaque	Estudio relativo a los inventarios de producto terminado	Especificaciones de la planta-instalación
Instructivos de ensamble	Especificaciones de productos terminados	Análisis de la capacidad instalada en las operaciones clave de transformación, armado y acabado	Especificaciones de las redes de servicios
Especificaciones empaque	Especificaciones de subproductos	Manual de servicios de planta	Diseño arquitectónico-estructural de la planta
Instructivo de su manejo	Balances de materiales y energía		Planos de construcción y puesta en operación de la planta



Continuación

Tecnología de Producto	Tecnología de Proceso	Tecnología de Producción	Tecnología de Equipo
Suministro de información técnica y general sobre productos y mercados	Diseño para tubería Diseño para la instalación mecánica	Formación de Centros de documentación técnica Diseño y puesta en práctica de sistemas de cómputo-procesamiento de datos	Planos de construcción y suministro de maquinaria y equipo
Suministro de información técnica y general sobre economía	Diseño para la instalación civil	Análisis de las situaciones de patentes y restricciones de tipo legal de producción, ventas y usos	
Realización de estudios de investigación y desarrollo sobre productos, mercados, empresas y economía nacional	Diseño para la instalación eléctrica Manuales de operación	Manual de organización y sistemas de ingeniería	
Análisis de las industrias consumidoras	Manuales de mantenimiento Reporte de laboratorio	Manual de seguridad	
Análisis de la competencia	Reporte de planta piloto	Manuales de administración de la producción	
Estudio integral de tarifas, fletes y seguros	Análisis de los subproductos que se obtienen o se obtendrán	Manuales de aseguramiento de calidad	
Pronósticos de mercados potenciales	Análisis de posibilidades de nuevos procesos tecnológicos	Manuales de administración de inventarios, productos terminados, semiterminados y materias primas	
Análisis o evaluación del capital de inversión		Manuales de administración de manejo de materiales	
Especificaciones que requieren los procesos de los consumidores		Diseño de sistema logístico en suministro y materiales	
Servicios de procuración		Diseño de sistemas logísticos de distribución	
Servicios técnicos de venta			