

Actuador mecatrónico

Es un sistema dedicado a controlar el movimiento de un cuerpo que se debe trasladar en forma controlada de un estado inicial, definido por el conjunto de variables

$P_i(X_i, Y_i, Z_i, t_i, v_i, a_i, da_i/dt, \text{orientación angular en tres ejes de giro, etc}),$
a uno final, definido por el conjunto de variables

$P_f(X_f, Y_f, Z_f, t_f, v_f, a_f, da_i/dt, \text{orientación angular en tres ejes de giro ,etc}).$

Las tres coordenadas espaciales (X,Y,Z) y las tres de orientación angular definen la posición del cuerpo en el espacio tridimensional al comienzo y al final del traslado

Las coordenadas temporales (t) de principio y final definen el tiempo disponible para realizar el traslado.

Las coordenadas operativas de velocidad (v), aceleración (a) y su derivada (da/dt), lineales y de rotación definen condiciones (usualmente límites) que se deben cumplir durante el traslado.

El traslado puede ser directo, o a través de una serie de puntos de referencia intermedios.

Para todas las coordenadas se debe definir los rangos de error tolerable.

El actuador puede manejar un nivel de energía considerable, e involucra movimientos posiblemente rápidos; por lo tanto el diseño siempre debe procurar que la operación sea segura en todas las condiciones que puedan ser evaluadas tanto para el actuador en si mismo como para el entorno y los posibles operadores o pasajeros.

La evaluación de los factores de riesgo busca agruparlos en tres categorías de riesgo:

1.- Riesgo insignificante: Son eventos altamente improbables o de tan poca magnitud que no ameritan mayor consideración, ya que tratar de evitarlos a todos haría totalmente inviable el proyecto.

2.- Riesgos considerables: Son eventos de mayor probabilidad, o de efectos mas graves. Debe hacerse todo lo "razonable" desde el punto de vista técnico-económico para evitarlos.

3.- Riesgos inaceptables: La probabilidad de que ocurran es tan alta, o sus efectos tan graves que no pueden ser aceptados; si no es posible eliminarlos dentro de lo que resulta factible desde el punto de vista técnico-económico, el proyecto debe ser abandonado.

El "actuador" no es un fin en si mismo, sino un medio para lograr el objetivo, que es el cambio deseado el estado del cuerpo.

Por lo tanto el diseño del actuador debe realizarse siempre en función del fin que se desea lograr, y será evaluado en primer lugar en base al grado de precisión con que se lograron los objetivos que definen el traslado deseado y en segundo lugar en función de su seguridad de operación.

Como en todo proyecto de ingeniería, el diseño del actuador debe realizarse teniendo en cuenta el costo, y siempre se debe considerar la reducción del costo del actuador como un objetivo implícito del proceso de diseño, secundario solo al logro del objetivo fundamental, que es realizar el traslado deseado, dentro de los parámetros establecidos por el usuario, y a la seguridad de operación.

Normalmente el costo está directamente asociado con la complejidad (un sistema complejo tiene mas componentes y su diseño requiere mas tiempo y recursos), y esta se relaciona inversamente con la fiabilidad (un sistema complejo tiene mas elementos que puedan fallar que uno simple), por lo tanto, la simplificación del diseño usualmente implica una reducción de costos y un aumento en la fiabilidad del mismo.

Idealmente el actuador debe ser "inteligente", esto es, debe contener todos los elementos de control local necesarios para que su operación interna "normal" sea "transparente" desde el punto de vista del control central o del operador directo del actuador.

Tipos genéricos de controles mecatrónicos.

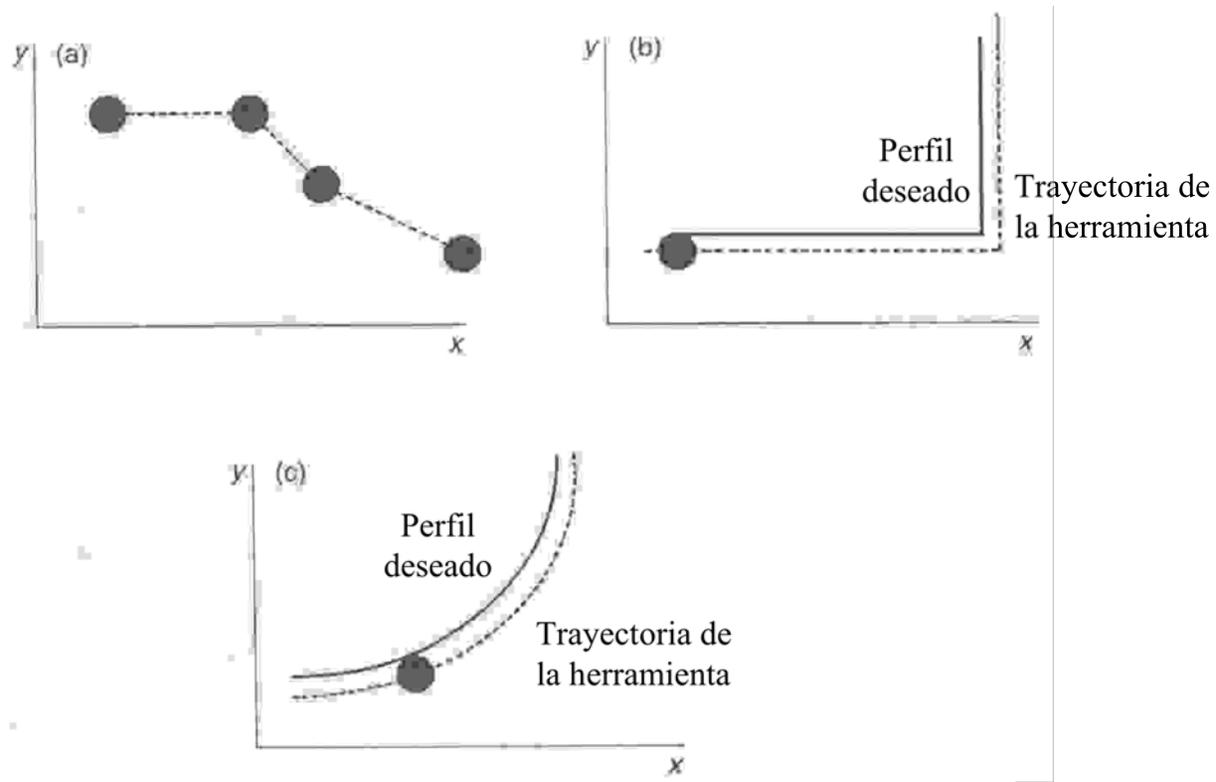
I.- Control de posición.

A.- Control de la posición y orientación final (control de llegada, o control "punto a punto").

En este caso la trayectoria seguida en cada caso no tiene interés, y puede ser fijada para lograr el tiempo de tránsito mínimo.

B.- Control de la posición y orientación en todo momento (control de trayectoria), en uno, dos o tres ejes de coordenadas espaciales.

La trayectoria está definida con todo detalle en todo momento, y debe ser seguida sin errores.



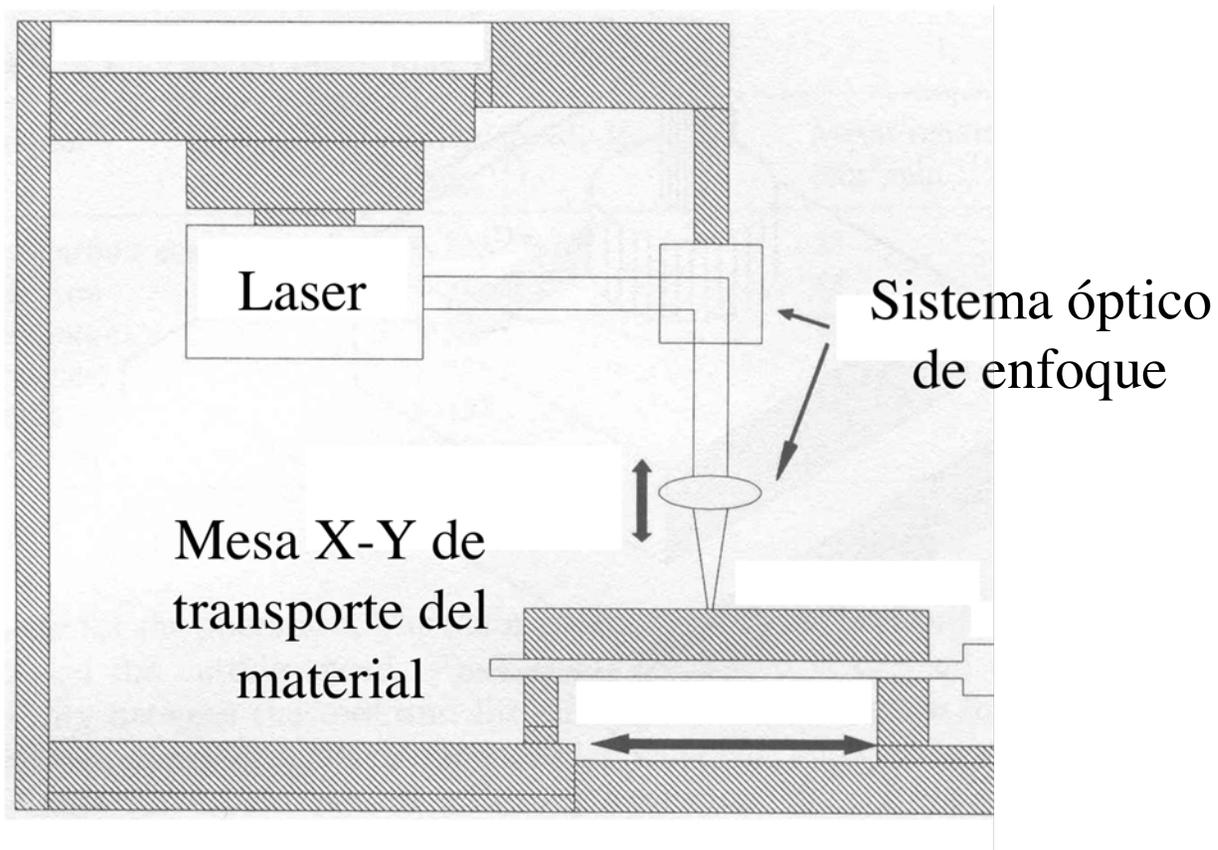
a) Movimiento punto a punto.

b) Trayectoria definida por desplazamientos secuenciales en cada eje.

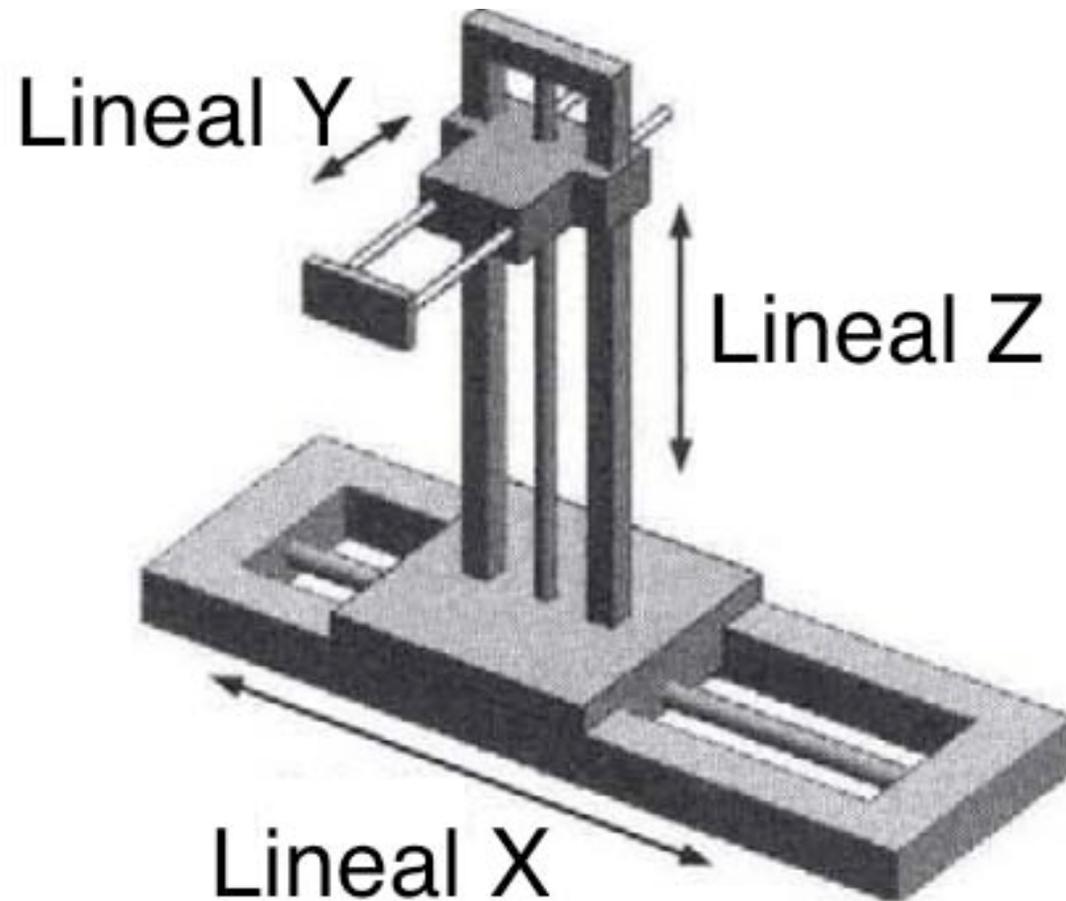
c) Trayectoria definida por desplazamientos simultáneos en todos ejes.

La trayectoria puede estar definida por movimientos secuenciales en cada eje, o por movimientos combinados en dos (trayectoria en el plano) o tres (trayectoria en el espacio).

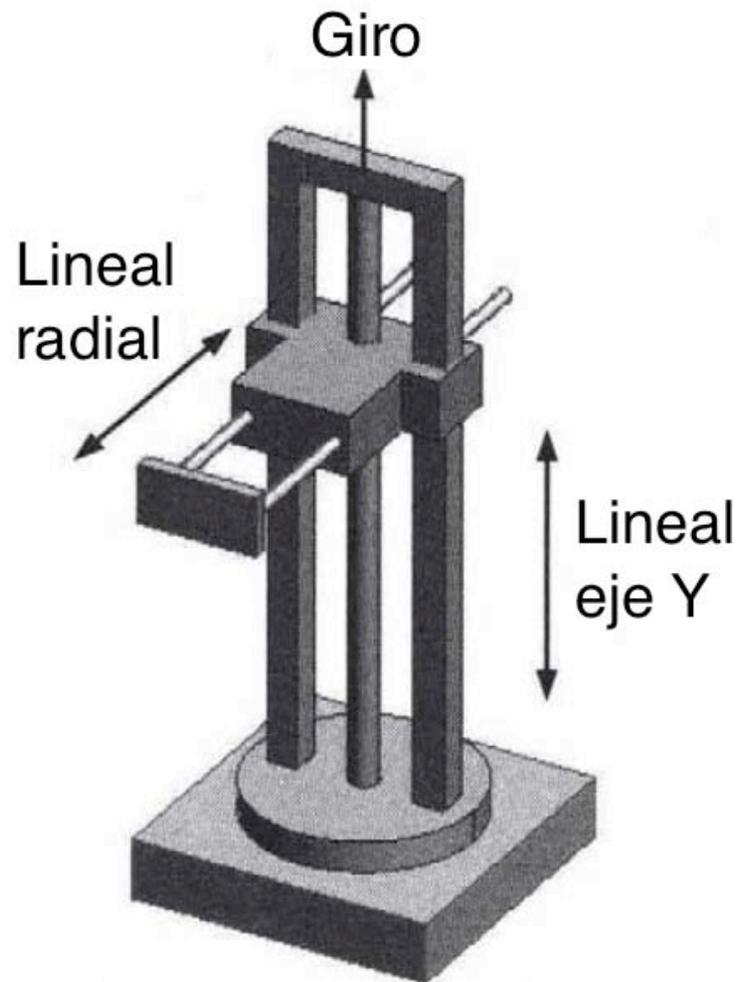
El desplazamiento tridimensional depende de la estructura de la máquina que debe ser actuada, y no necesariamente se puede resolver solo con la combinación de tres desplazamientos básicos, uno en cada uno de los ejes X, Y y Z.



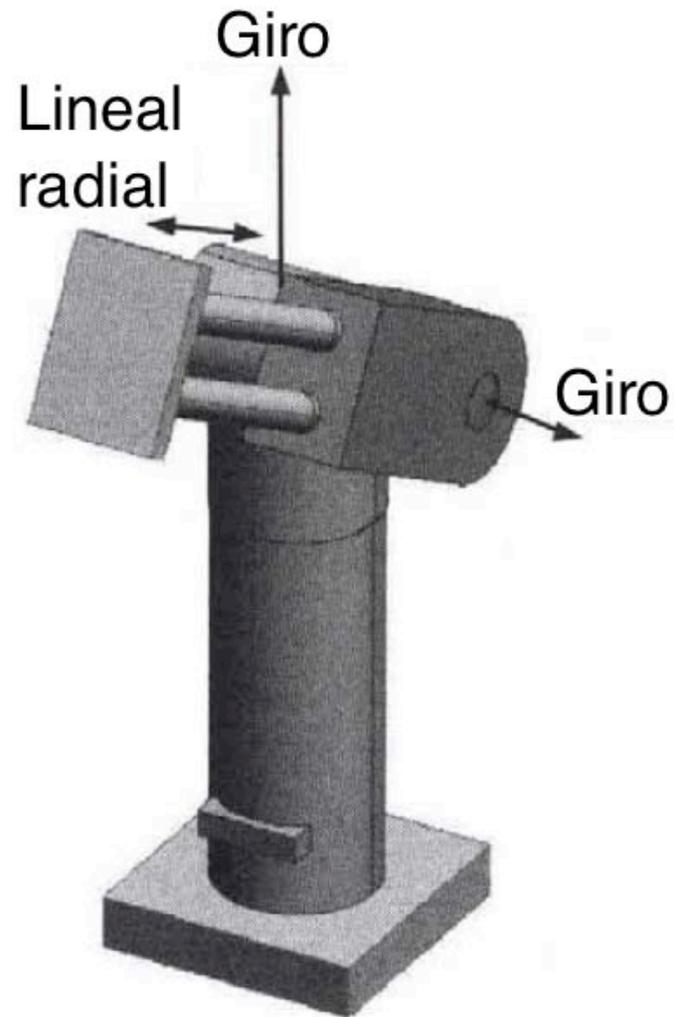
Control simultáneo de posición en los tres ejes: X, Y (cama de transporte) y Z (la lente, para variar la profundidad de enfoque de corte).



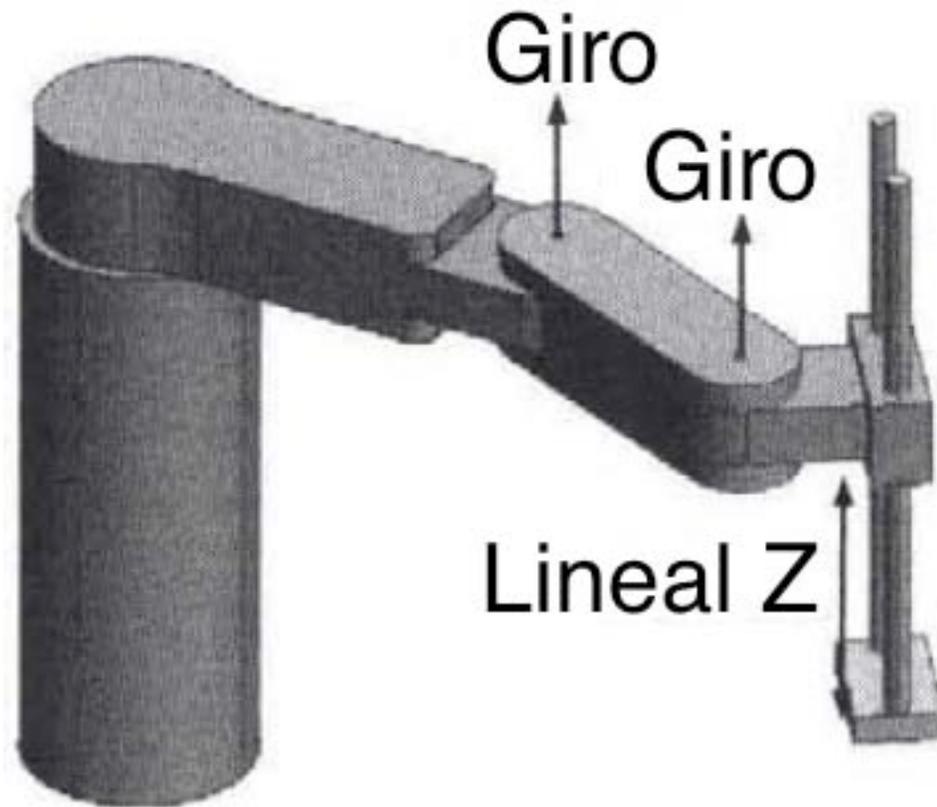
Coordenadas cartesianas: Tres desplazamientos ortogonales.



Coordenadas cilíndricas: Un desplazamiento vertical, un giro y un desplazamiento radial.



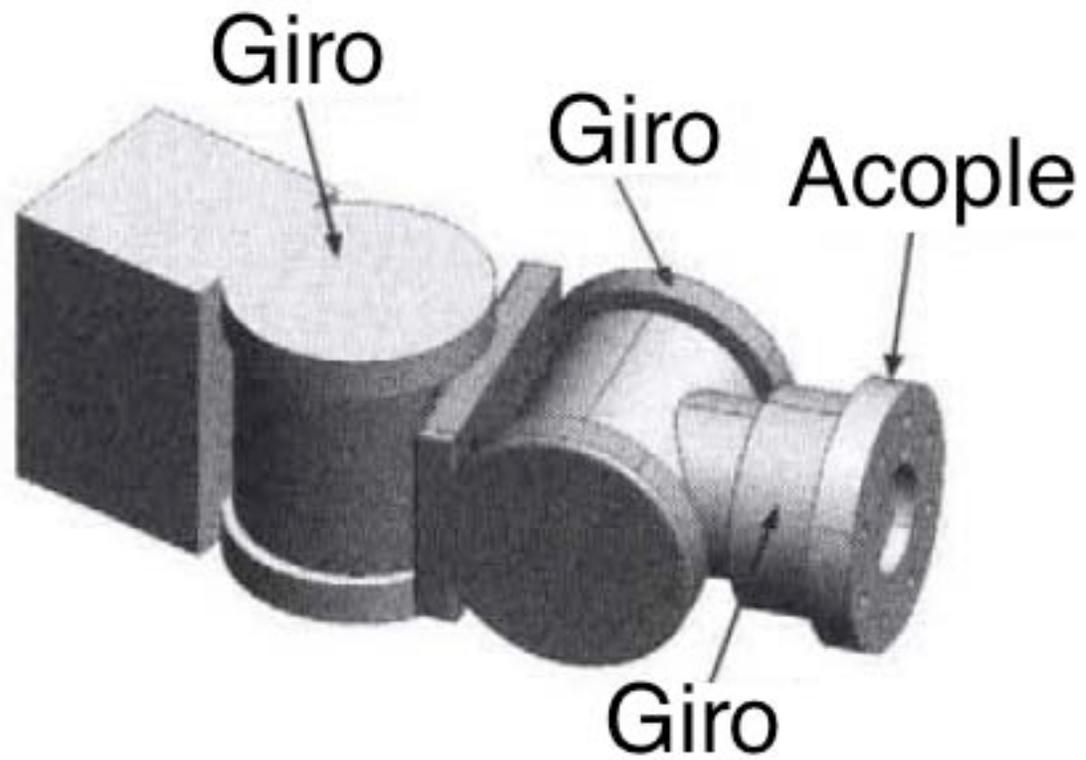
Coordenadas polares (dos giros y un desplazamiento radial)



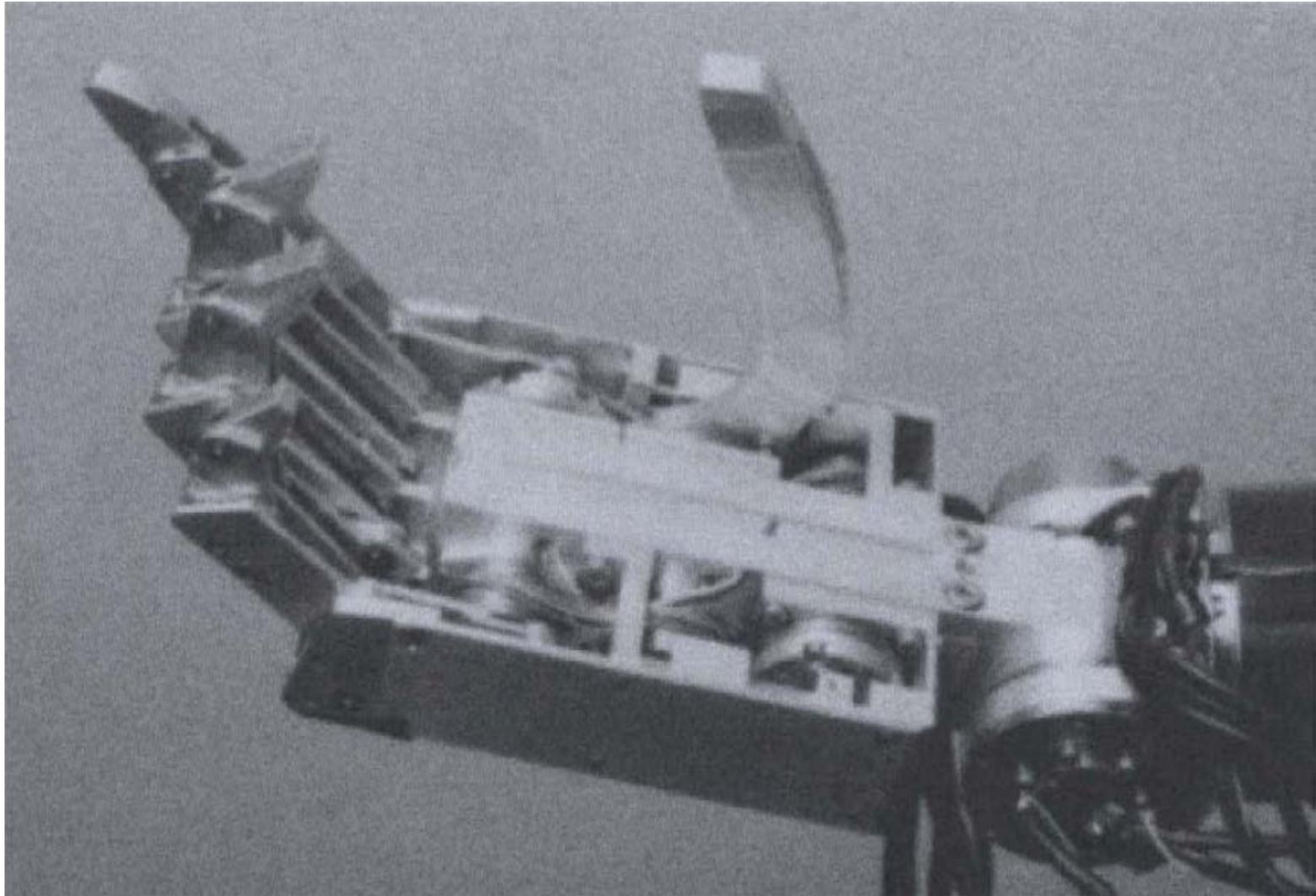
Dos giros y un desplazamiento vertical.



"Brazo humano": Tres giros



"Muñeca humana": Tres giros.



"Mano humana": Por lo menos 19 giros.

II.- Control de Velocidad

- A.- Control del vector velocidad (control de velocidad), en uno, dos o más ejes de coordenadas espaciales o angulares.
- B.- Control del vector aceleración (control de aceleración), en uno, dos o más ejes de coordenadas espaciales o angulares.
- C.- Control del vector de la derivada de la aceleración (control de “jerk”), en uno, dos o tres ejes de coordenadas espaciales o angulares.

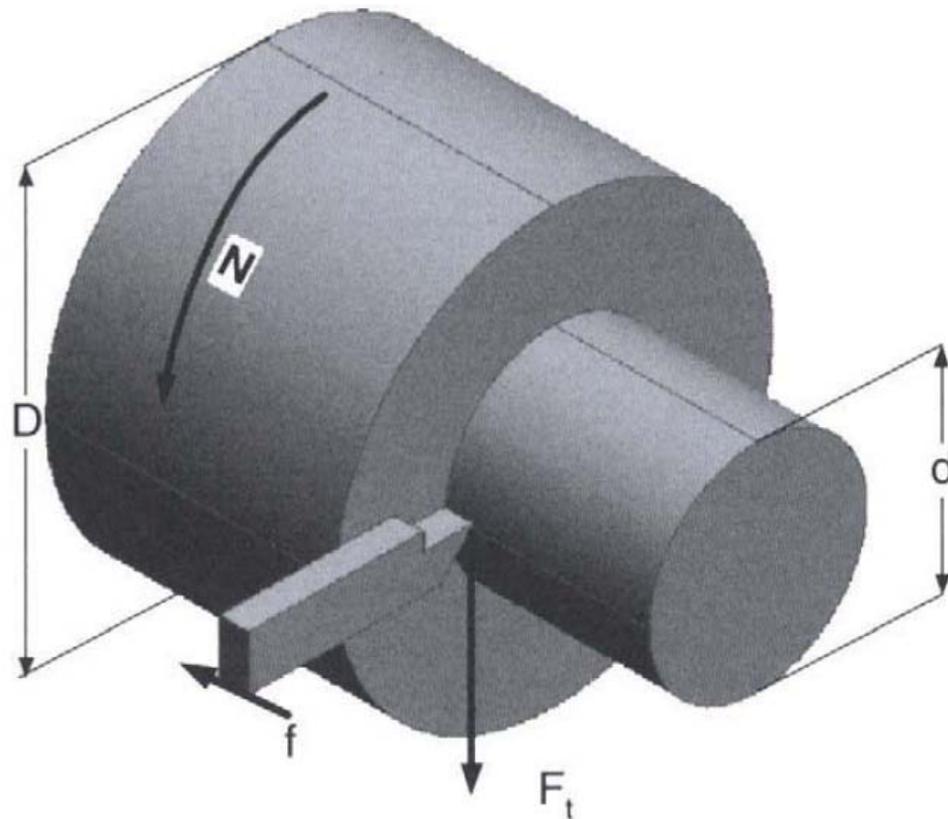


Control de la velocidad del motor eléctrico
(tranvía, principios siglo XX, control manual).

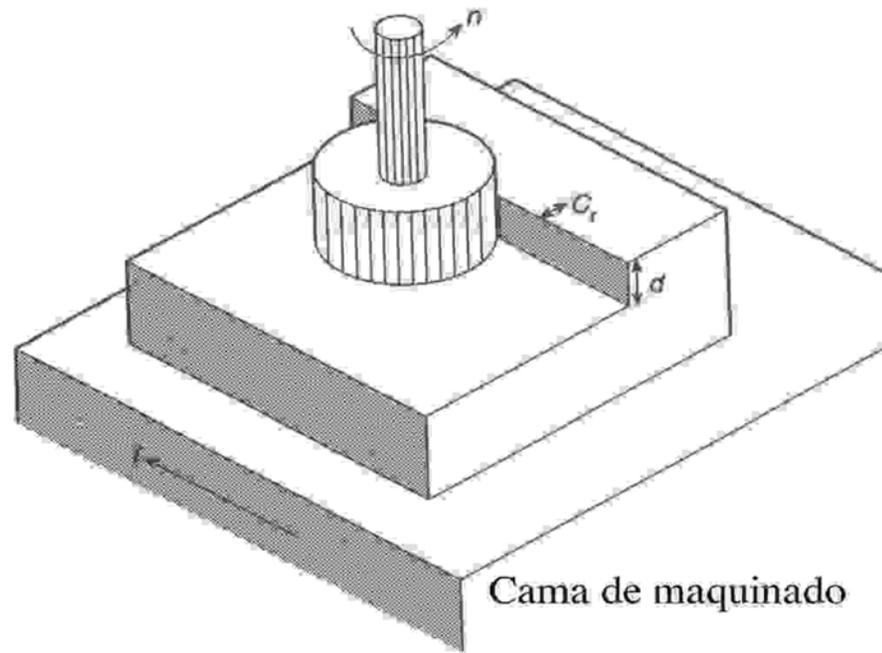


Control de velocidad y aceleración/desaceleración para aumentar el confort de los pasajeros
(Zaragoza, tranvía moderno híbrido pantógrafo-baterías).

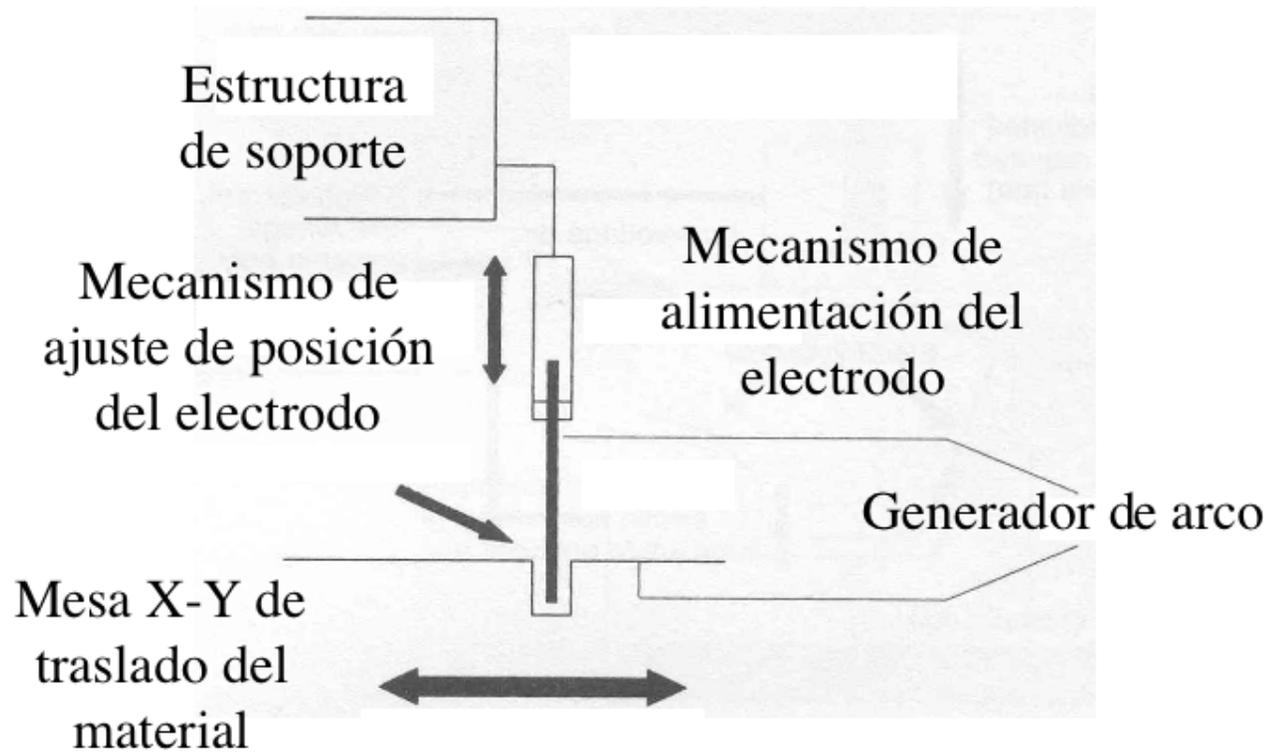
Por supuesto, es usual que en una aplicación sea necesario realizar una combinación de dos o más de los controles básicos.



Torno: Control de posición de la cuchilla en ejes X-Y y de velocidad angular en el eje de la pieza.



Fresadora: Control de posición de la pieza en los ejes X, Y (en la cama de soporte), control de posición de la broca en el eje Z, y de la velocidad angular de la broca en el eje n .



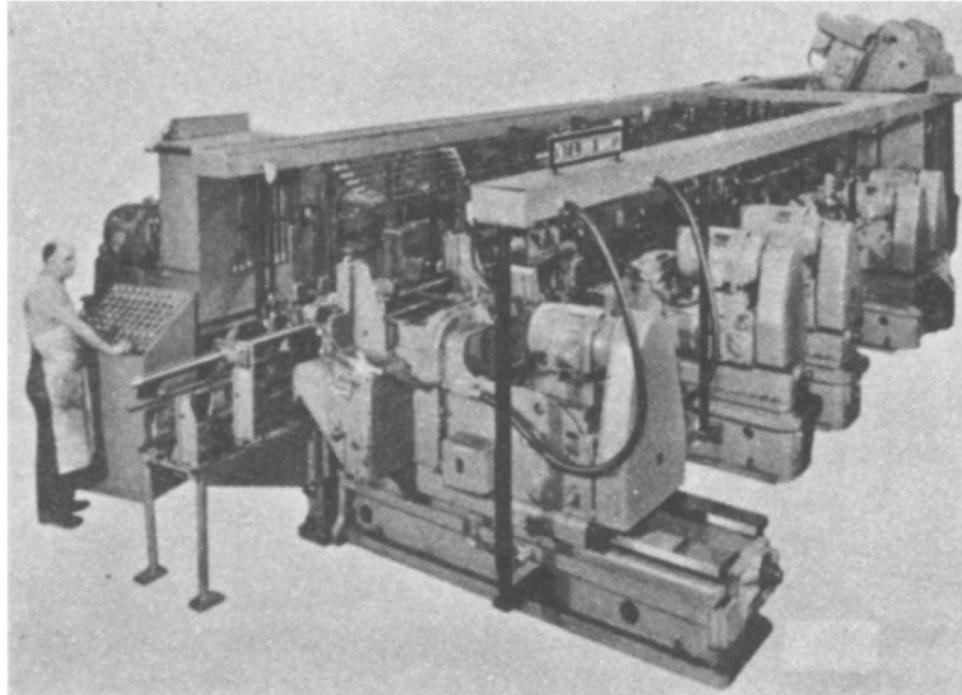
Taladro de electrodoscarga



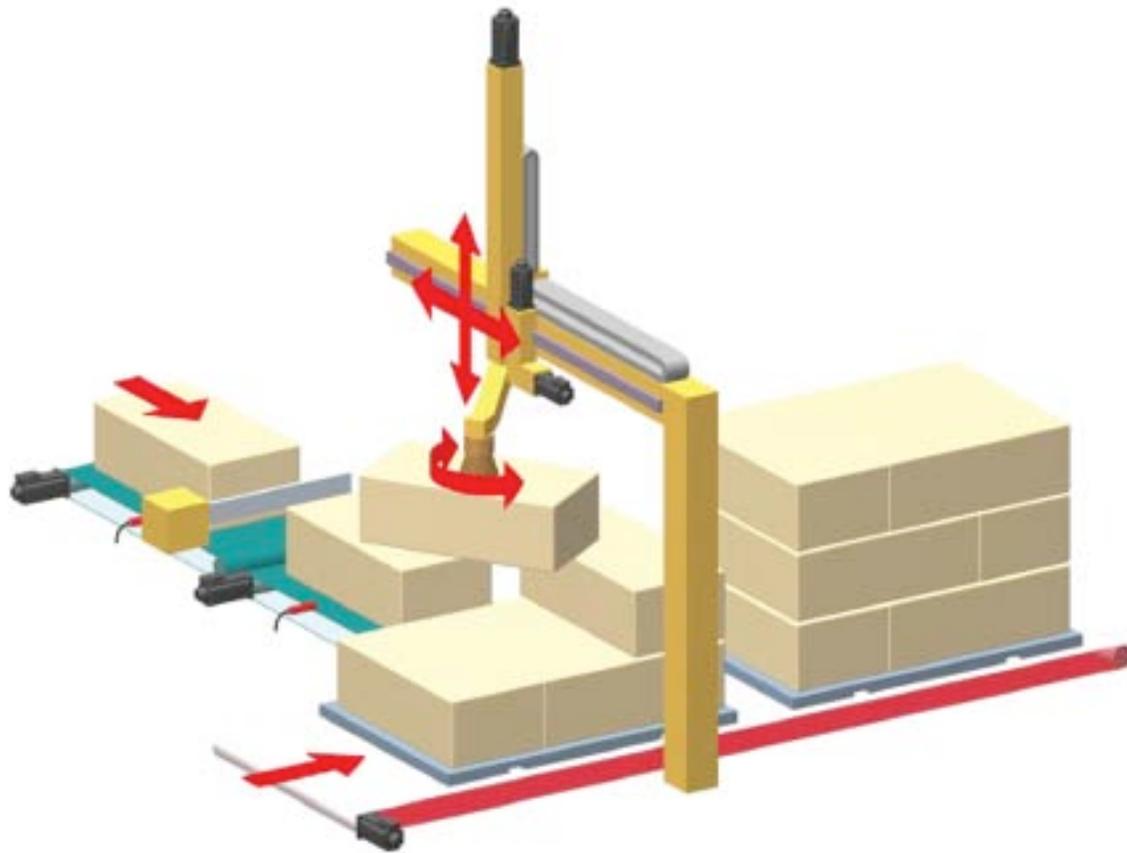
Celda de manufactura

Bridgeport Machine Tools, Leicester, U.K.

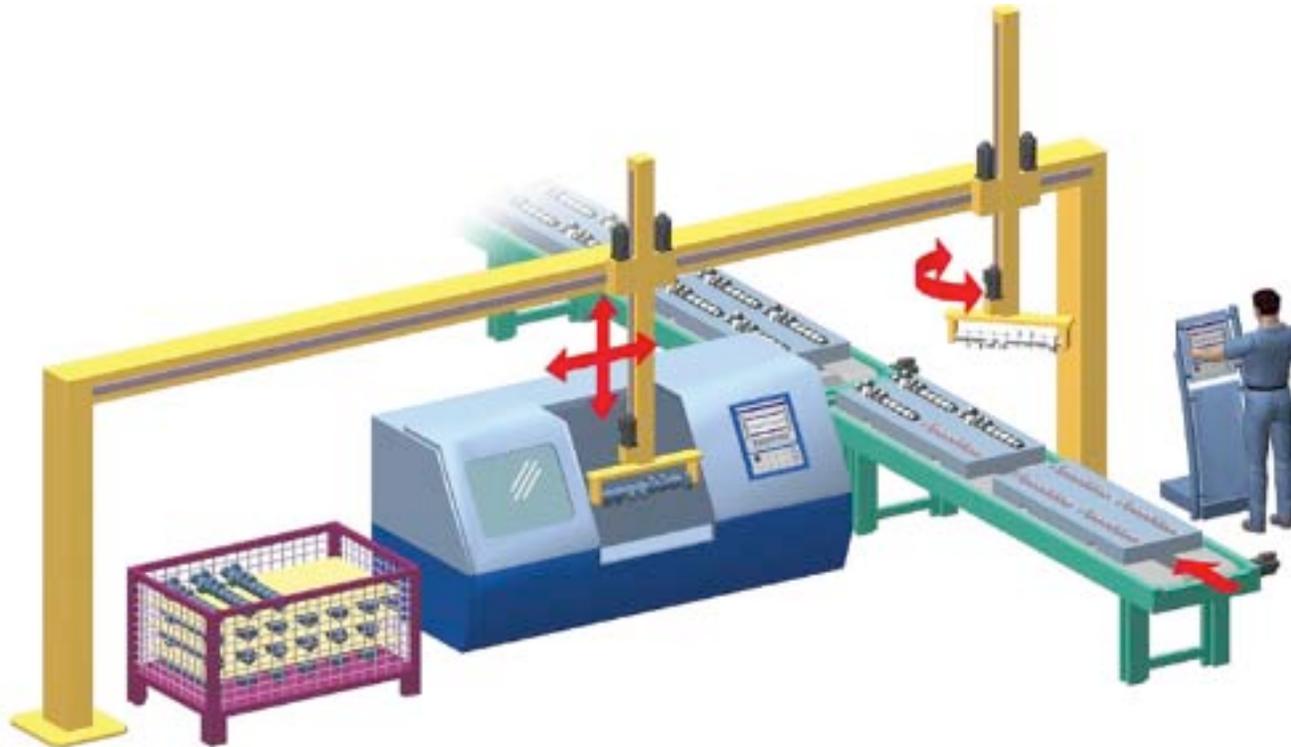
Control de la fresadora mas control del carrusel de herramientas,
control del cambiador de herramientas, control de la mordaza de
herramientas.



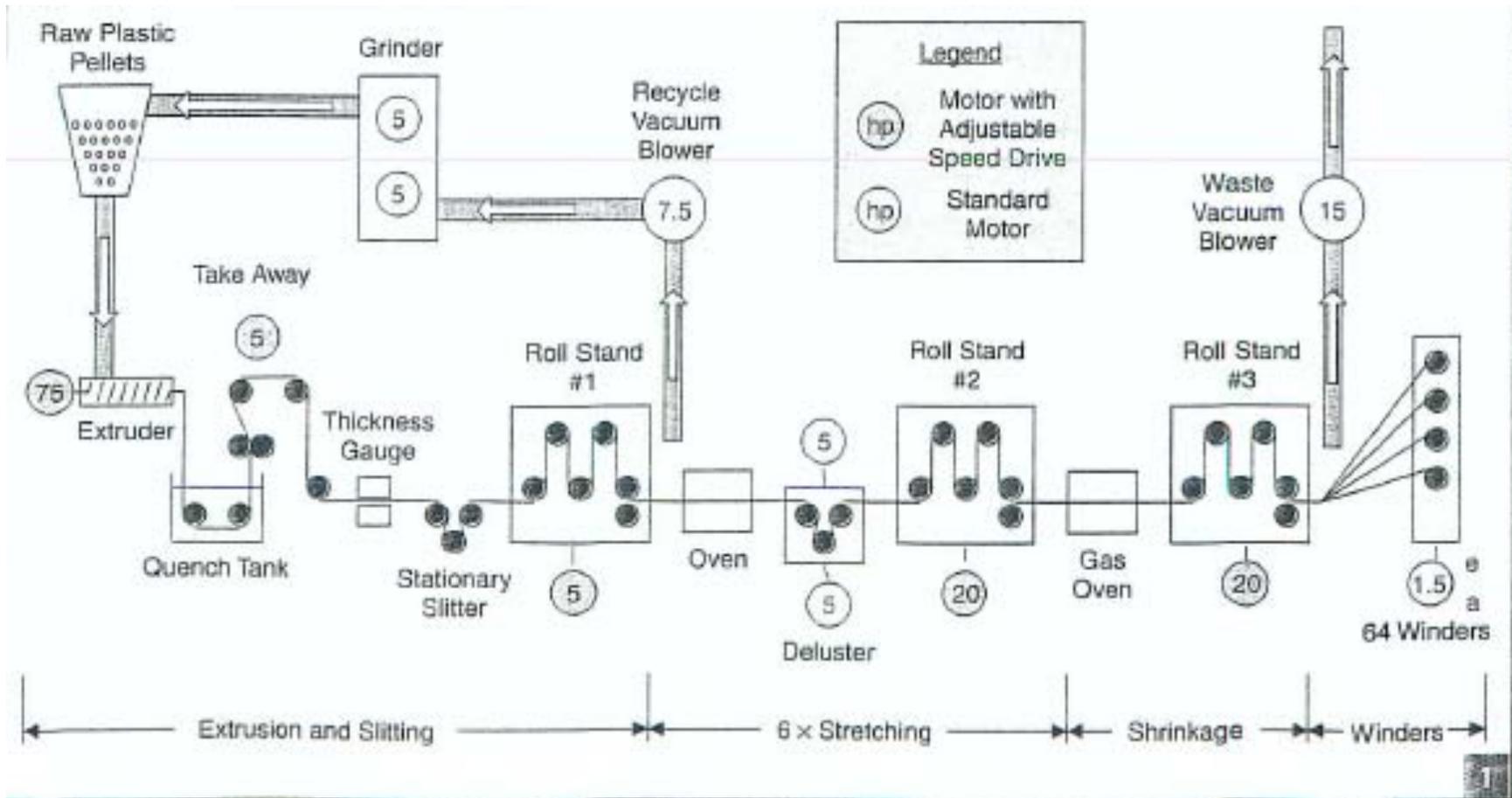
Máquina para fabricar cilindros, con quince
estaciones de trabajo
W. F. & John Barnes Corp.



Sistema de manejo de cajas.
Robot cartesiano X-Y con giro y dos correas transportadoras
ortogonales.



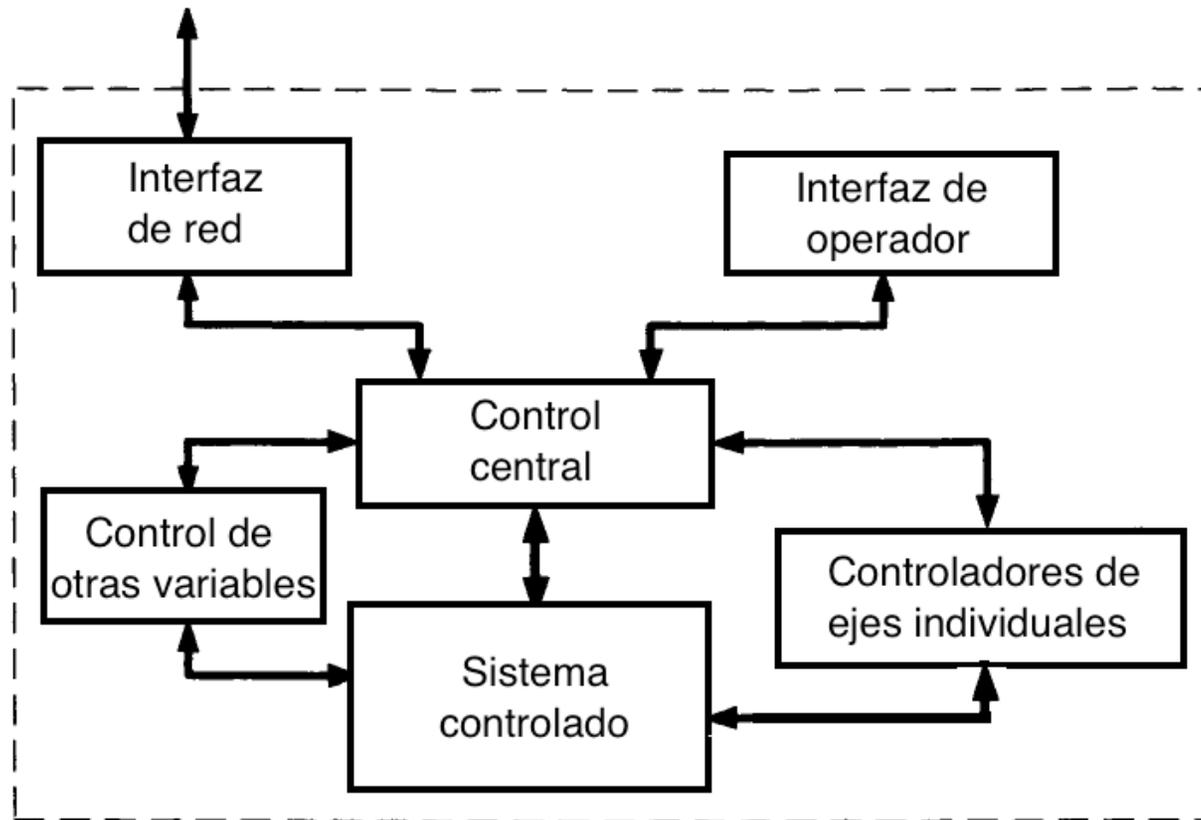
Combinación Celda de manufactura con robot cartesiano con giro y correa transportadora.



Línea continua de fabricación de cinta plástica; la velocidad angular de cada cilindro debe ser controlada.



Control de velocidad de avance y posición X-Y del vehículo, y de orientación de las antenas y demás sensores móviles en uno o mas ejes de giro (cortesía NASA).



Esquema genérico de un control jerárquico de un sistema complejo, multi-eje y multi-variable.

En general, en las aplicaciones donde deben ser combinadas múltiples acciones en forma armónica, cada movimiento individual esta controlado por un actuador de un eje.

El problema de definir las órdenes que debe cumplir cada uno de los n actuadores individuales se resuelve a un nivel jerárquico superior, así que desde el punto de vista del diseño de final de los actuadores el problema requiere diseñar n actuadores individuales, cada uno con sus características específicas.

Áreas de aplicación (lista no exhaustiva).

A.- Tradicionales:

- Máquinas-herramienta.
- Equipos industriales.
- Ascensores, grúas, elevadores.
- Posicionamiento de sensores (antenas, telescopios, etc.).
- Sistemas de transporte urbanos (metro, tranvía, trolebús).
 - Ferrocarriles electrificados.
- Sistemas de bombeo, compresión y refrigeración industriales.
 - Propulsión de submarinos.

B.- Nuevas áreas.

Vehículos híbridos y eléctricos (área reactivada).

Propulsión naval (área reactivada).

Actuadores aviónicos (área reactivada).

"Drones".

Robots.

Generación de energía eléctrica con fuentes renovables en sistemas VSCF (eólica, mareas, olas, corrientes marinas, corrientes fluviales de flujo libre).

Electrodomésticos de alta eficiencia.

Levitación magnética,
ETC. (pica y se extiende)



Camión de volteo híbrido diésel-eléctrico de alta capacidad (100T)
para minería.

El motor diésel actúa un generador eléctrico.
Tracción totalmente eléctrica en las 4 ruedas.



Camión híbrido diésel-eléctrico para servicio de aseo urbano.



Camiones híbridos diésel-eléctricos de carretera con conexión opcional a la red eléctrica mediante pantógrafos.
Tracción combinada diésel y eléctrica.



Camión eléctrico de reparto urbano, modelo 1914
(¿Nihil sub sole novum?).



The NIZn cells from PowerGenix offer a safe alternative for hybrid and electric vehicles. The cells are replacing lead-acid batteries in the Veloteq electric scooter.

Vehículos urbanos: carro híbrido (motor de combustión interna y motor eléctrico); moto eléctrica.



Chasis del carro eléctrico de Ferdinand Porsche, 1898
Potencia de crucero: 3cv; autonomía: 79km, velocidad máxima:
34km/h



Detalle del motor y la suspensión, carro eléctrico de Porsche, 1898.



Detalle del tablero de instrumentos, carro eléctrico de Porsche, 1898.



Plataforma experimental de desarrollo de tecnologías híbridas para vehículos, Laboratorio de Dinámica de Máquinas, USB.



Todo terreno eléctrico autónomo.



Chasis de autobús urbano eléctrico mostrando el arreglo de las baterías.

MS Harmony of the Seas



Propulsión naval híbrida diésel-eléctrica.

Motores diésel actúan generadores eléctricos.
Empuje totalmente eléctrico en todas las hélices.

Características generales

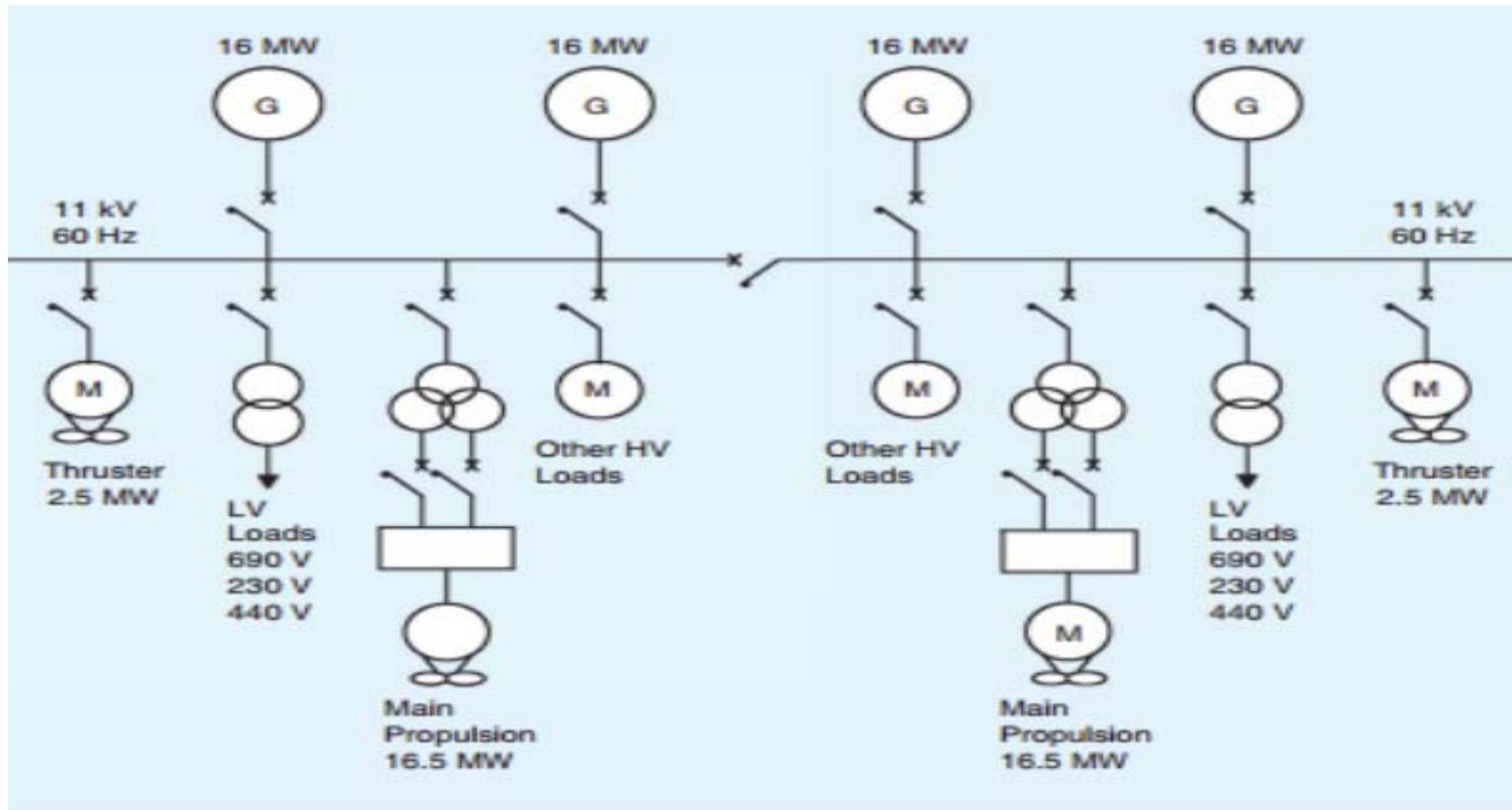
Desplazamiento	• 120 000 t
Tonelaje de peso muerto	• 226 963 t de registro bruto
Eslora	362,12 m
Manga	47,42 m
Puntal	22,60 m
Calado	9,3 m
Calado aéreo	70 m
Cubiertas	18 cubiertas de pasajeros
Propulsión	• 3 Pods azimutales de 20 MW ABB Azipod • 4 empujadores transversales Wärtsilä CT3500 de 5,5&MW en proa
Potencia	97.000kW
Velocidad	22,6 nudos (41,9km/h)



Siemens Schottel propulsores
azimutales



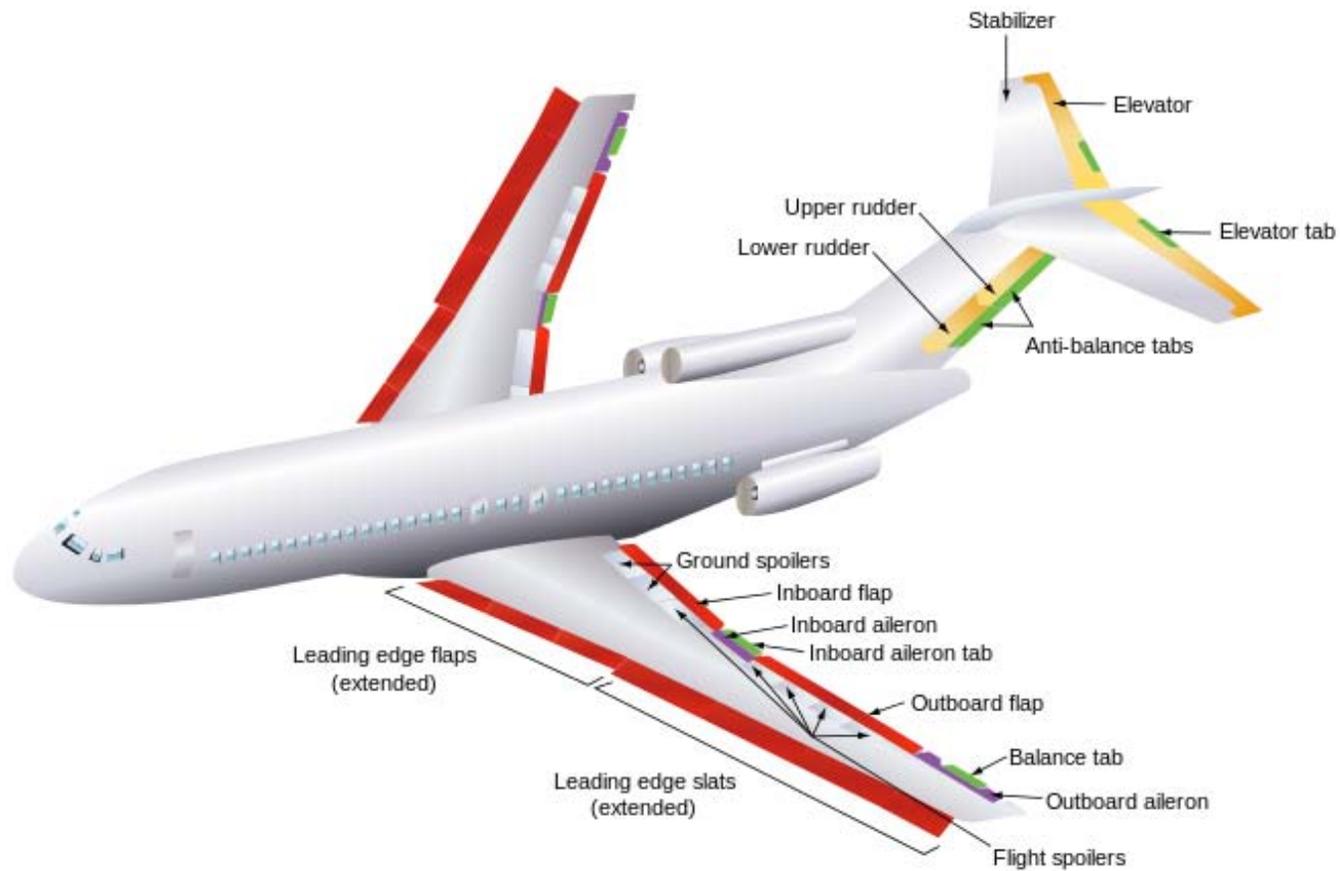
Propulsores azimutales
del remolcador *Oued el Kebir*.
Unas toberas Kort recubren
las hélices.



Esquema eléctrico de un barco con propulsión híbrida diésel-eléctrica.



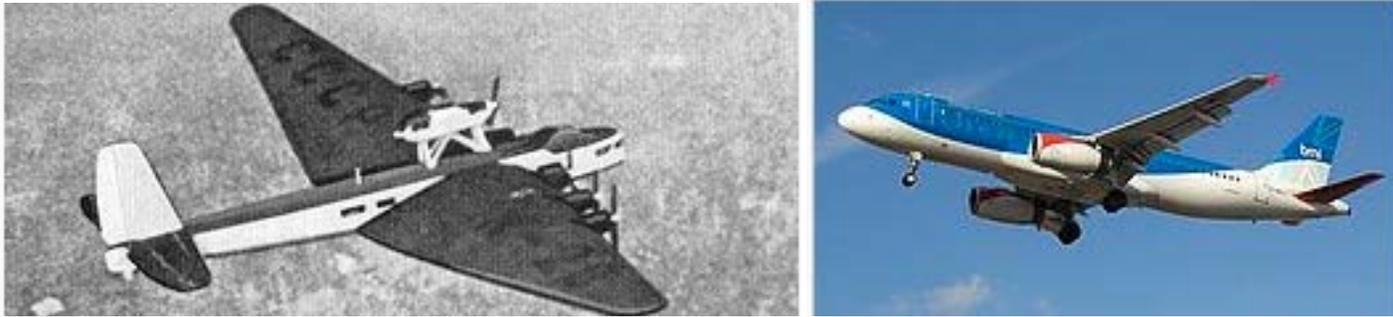
Acorazado Mississippi, clase "New Mexico", USN, 1915
Propulsión turbo-eléctrica, hélices convencionales.
Desplazamiento 31.000 toneladas, velocidad 21 nudos-



Control de la posición de las superficies de control de un avión:

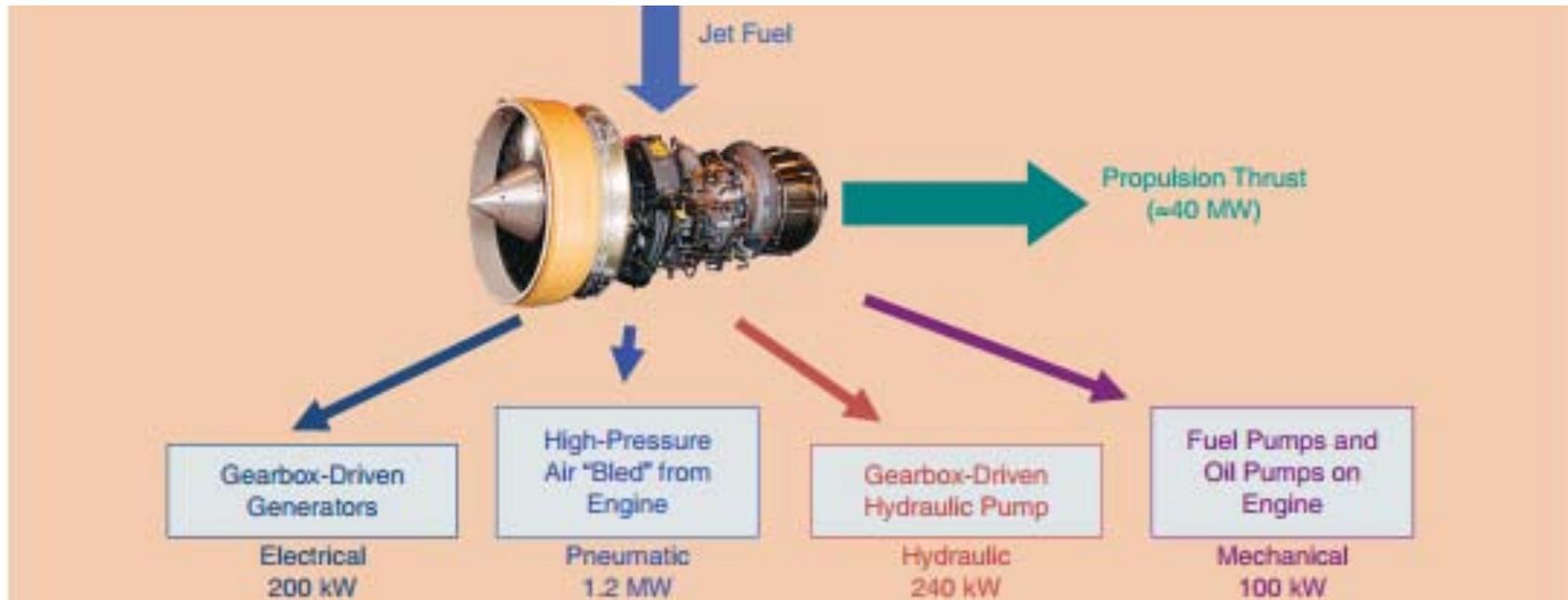
“Fly-by-wire”: comunicación piloto-actuador por cable

Fly-by-light”: comunicación piloto-actuador por fibra óptica

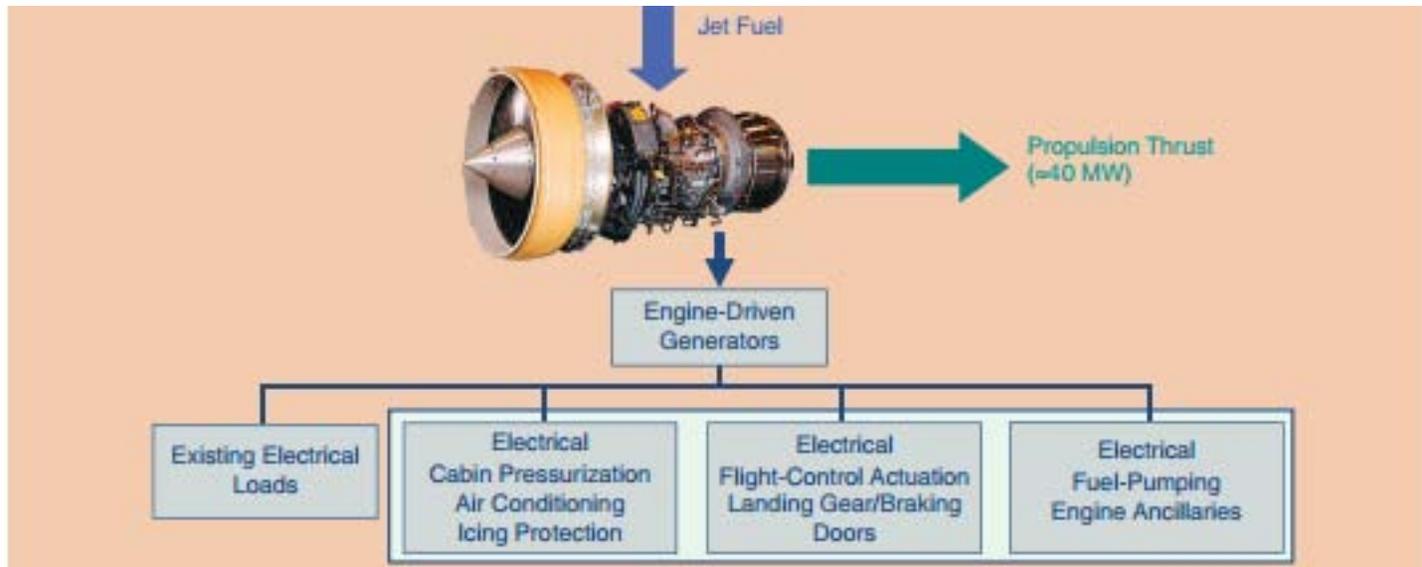


Izquierda: Tupolev ANT-20 "Maxim Gorky", primer avión con control eléctrico de la posición de las superficies de control (1934).

Derecha: Airbus A320, primer avión de pasajeros moderno con control eléctrico de la posición de las superficies de control (1987).



Distribución actual de la potencia generada por un motor jet de aviación para impulsar el avión alimentar los servicios auxiliares con energía neumática, hidráulica, mecánica y eléctrica.



Distribución futura de la potencia generada por un motor jet de aviación para impulsar el avión alimentar todos servicios auxiliares con energía eléctrica.

DUALCOOL

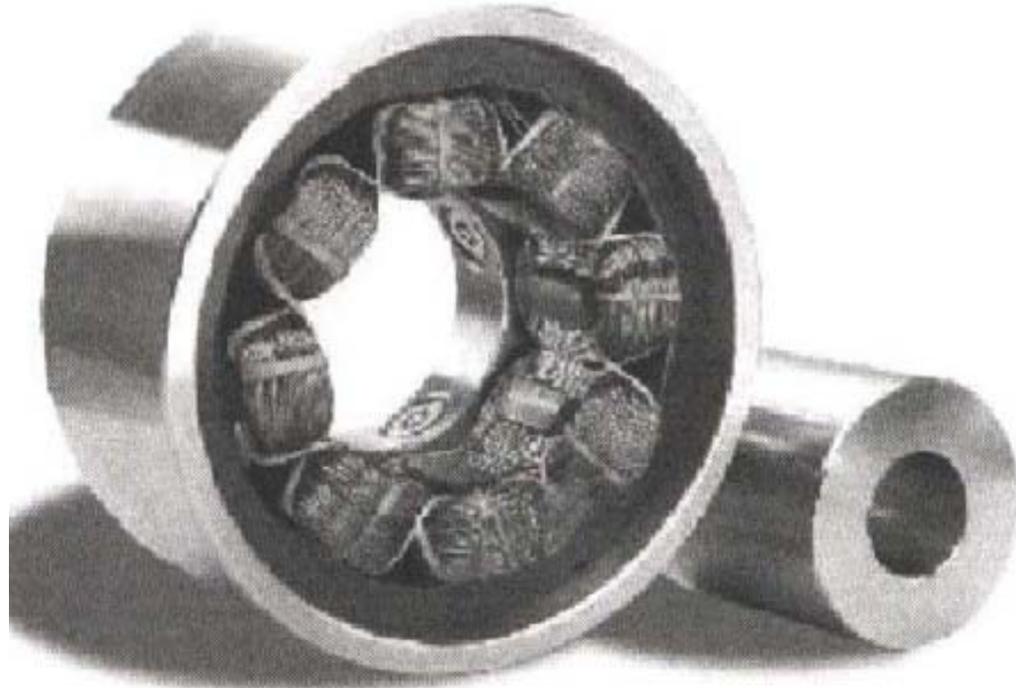
Más Ahorro Energético &
Enfriamiento más rápido.

Refresca tu hogar con
un aire acondicionado DUAL COOL,
potente, eficiente y con un diseño
elegante. Explora los últimos aires
acondicionados LG DUALCOOL



Control electrónico de la velocidad en los compresores de aires acondicionados, frigoríficos, etc., para optimizar la operación y reducir el consumo de energía.

Cortesía LG.

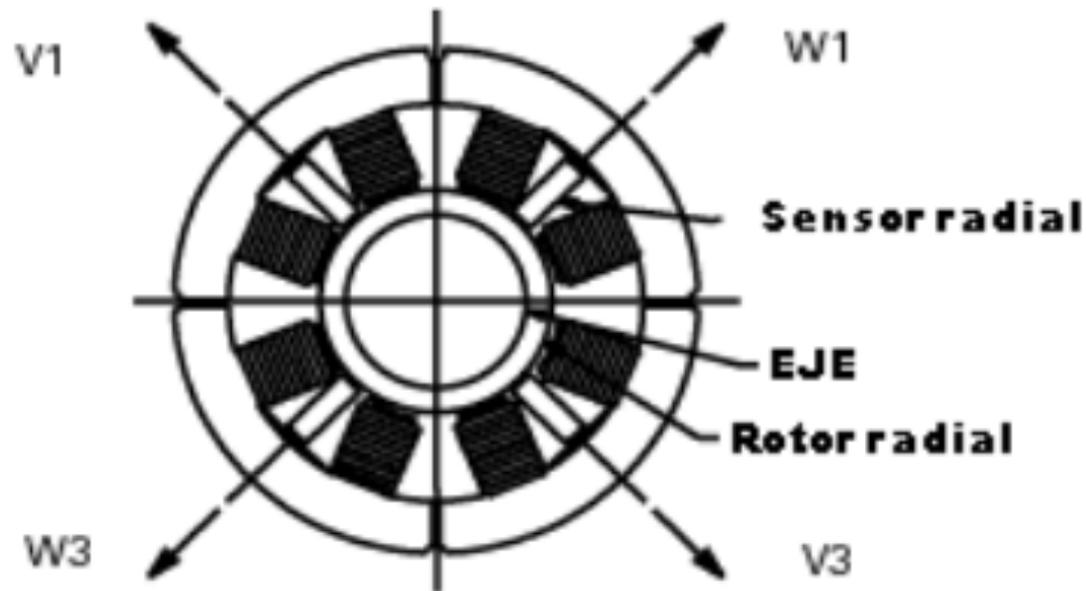


Cojinete magnético.

Izquierda: Cuerpo fijo

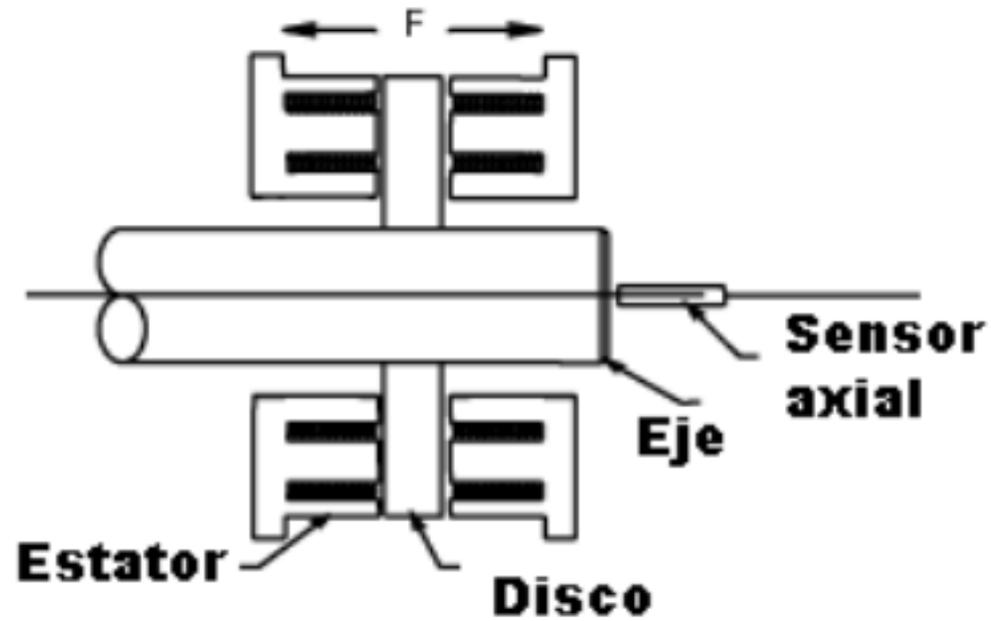
Derecha: Rotor

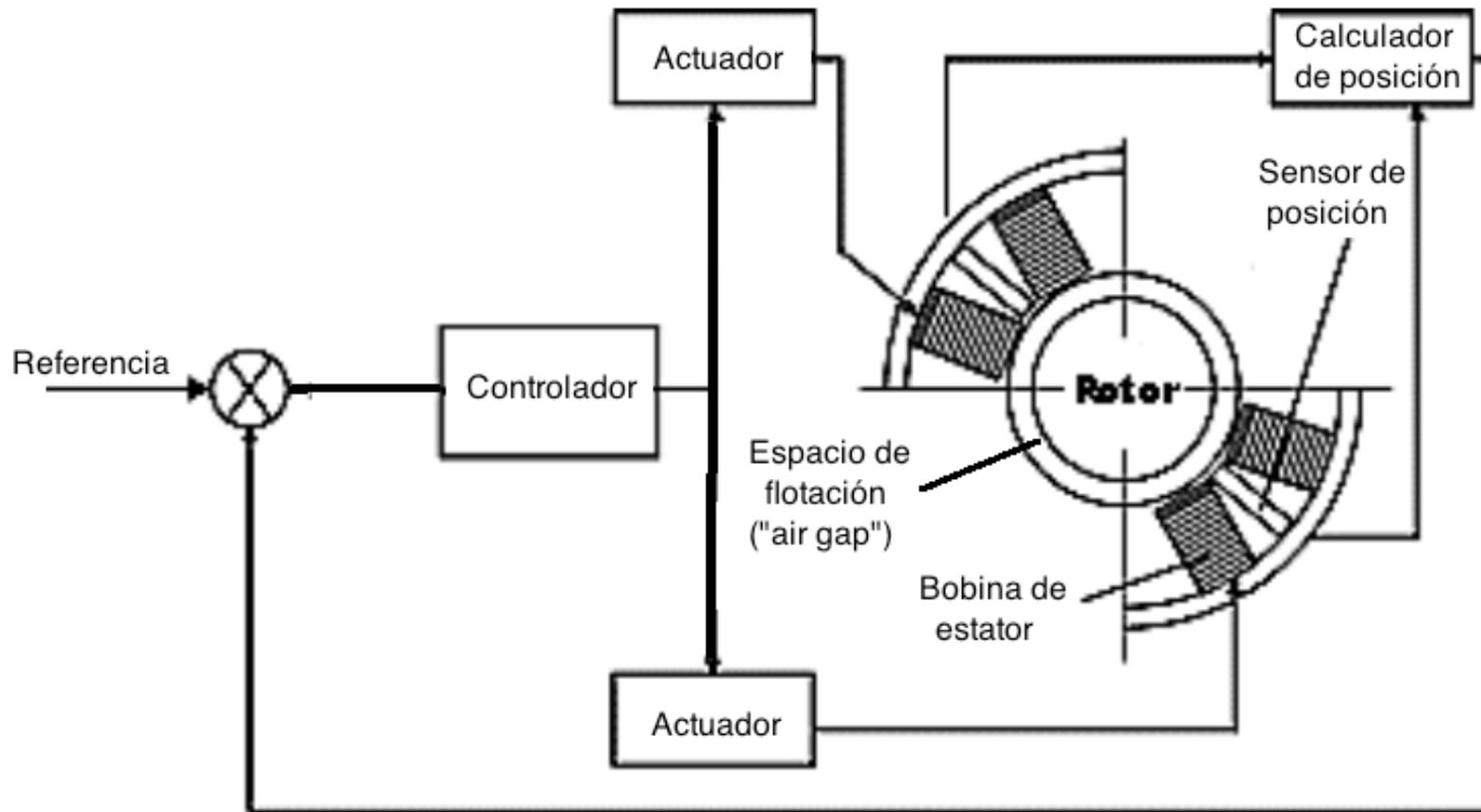
Cortesía SKF Magnetics Bearings de Canadá.



Esquema de un cojinete magnético. El campo magnético es producido por un arreglo de 8 bobinas conectadas en cuatro pares. Los sensores de posición radial cierran el lazo de realimentación para posicionar el eje flotante.

Un cojinete magnético radial no limita el movimiento de traslación del eje, que debe ser bloqueado mediante un cojinete magnético axial.





Sistema de cojinete magnético radial con su actuador mecatrónico



Tren MAGLEV (levitación magnética) en la línea de alta velocidad Shanghai-aeropuerto.



MAGLEV a velocidad de crucero.

Criterios de diseño para el sistema de control del actuador.

1-Mantener en todo el ciclo de operación todos los parámetros (mecánicos y eléctricos) dentro de los límites de seguridad permitidos.

2-Lograr cero error estático en la variable final considerada (usualmente velocidad o posición).

3-Lograr “buena” respuesta dinámica.

“Buena” respuesta dinámica implica, por lo menos:

a- Respuesta transitoria “rápida”.

b- Tiempo de estabilización “corto”.

c- Sobrepasso “mínimo” (o cero).

El cumplimiento de todos los objetivos anteriores requiere de una fuente de energía mecánica (“motor”) que cumpla con:

- 1.- Operar con la mayor eficiencia energética posible (criterio de eficiencia energética).
- 2.- Ser lo más sencilla posible (criterio de simplicidad).
- 3.-Ser lo más económica posible (criterio de economía).

El criterio de eficiencia energética es fundamental en el estado actual de la tecnología. Un estudio de la compañía Microchip Technology, muestra que operando sin actuadores electrónicos la eficiencia promedio de los motores eléctricos en uso está en un 55% y que aplicando el estado actual de la tecnología la eficiencia se podría aumentar por lo menos al 75%, lo que reduciría el desperdicio de energía en un 56%, y el consumo efectivo en un 25%, manteniendo el mismo nivel actual de uso.

Dado que la mayoría de las aplicaciones requieren que el movimiento sea bi-direccional, los criterios de simplicidad y economía a priori favorecen a los motores que sean capaces de operar en dos direcciones.

Todo movimiento acumula energía cinética en el móvil, energía que debe ser removida, por disipación o por recuperación durante el frenado.

Los criterios de eficiencia, economía y sencillez favorecen a motores capaces de actuar como "generadores", recuperando energía durante el proceso de frenado (frenado regenerativo o activo), eliminando o por lo menos reduciendo la necesidad de un sistema de frenado disipativo adicional al motor.

Desde este punto de vista el motor ideal debe ser capaz de operar en forma simétrica en las dos direcciones, tanto entregando como recuperando energía.

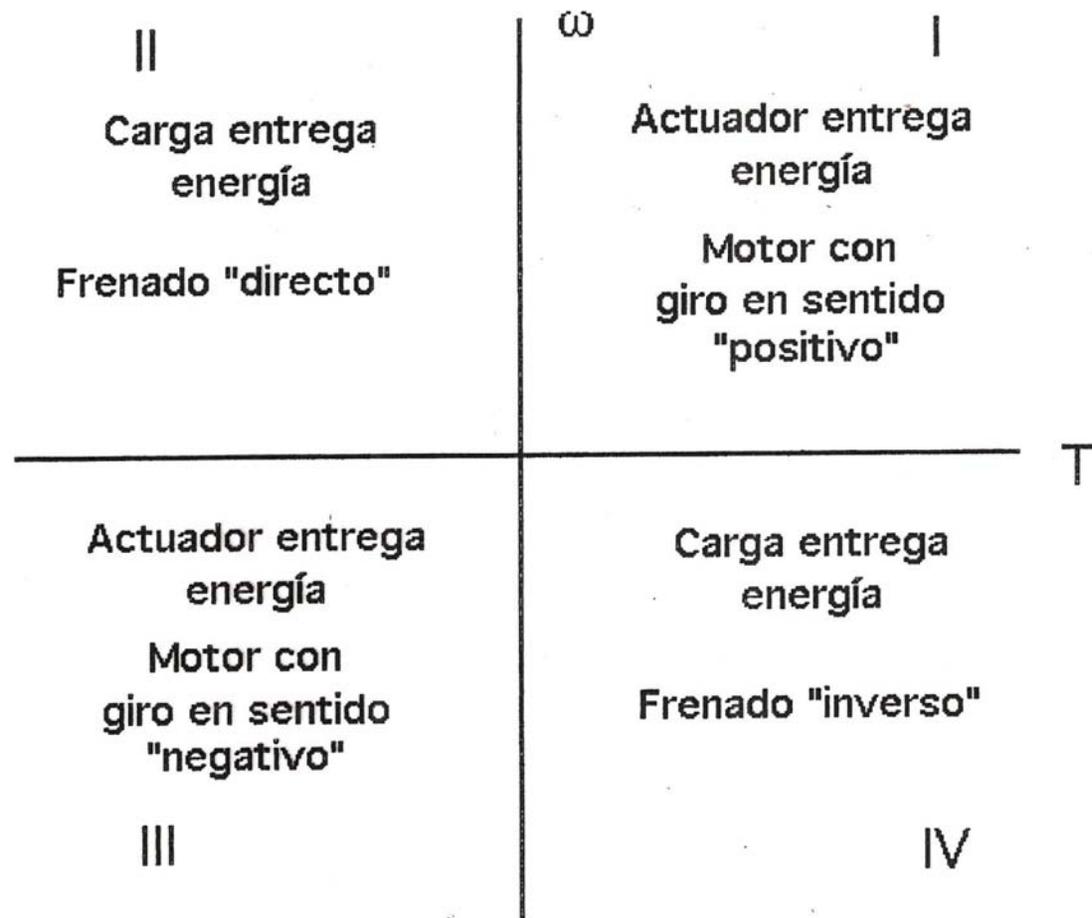


Diagrama genérico de la operación de un motor ideal.

En la selección de un motor para una aplicación mecatrónica se debe considerar una gran cantidad de factores, entre las que se pueden considerar las siguientes:

I.- Referentes a la operación:

- a.- Velocidad máxima requerida.
- b.- Fuerza máxima requerida.
- c.- Respuesta dinámica.

II.- Factores ambientales:

- a.- Seguridad y riesgos de operación.
- b.- Compatibilidad electromagnética.
- c.- Rangos de humedad y temperatura.
- d.- Suministro de energía.
- e.- Generación de contaminantes

III.- Costo de adquisición y operación:

a.- Costo inicial.

b.- Costos de operación.

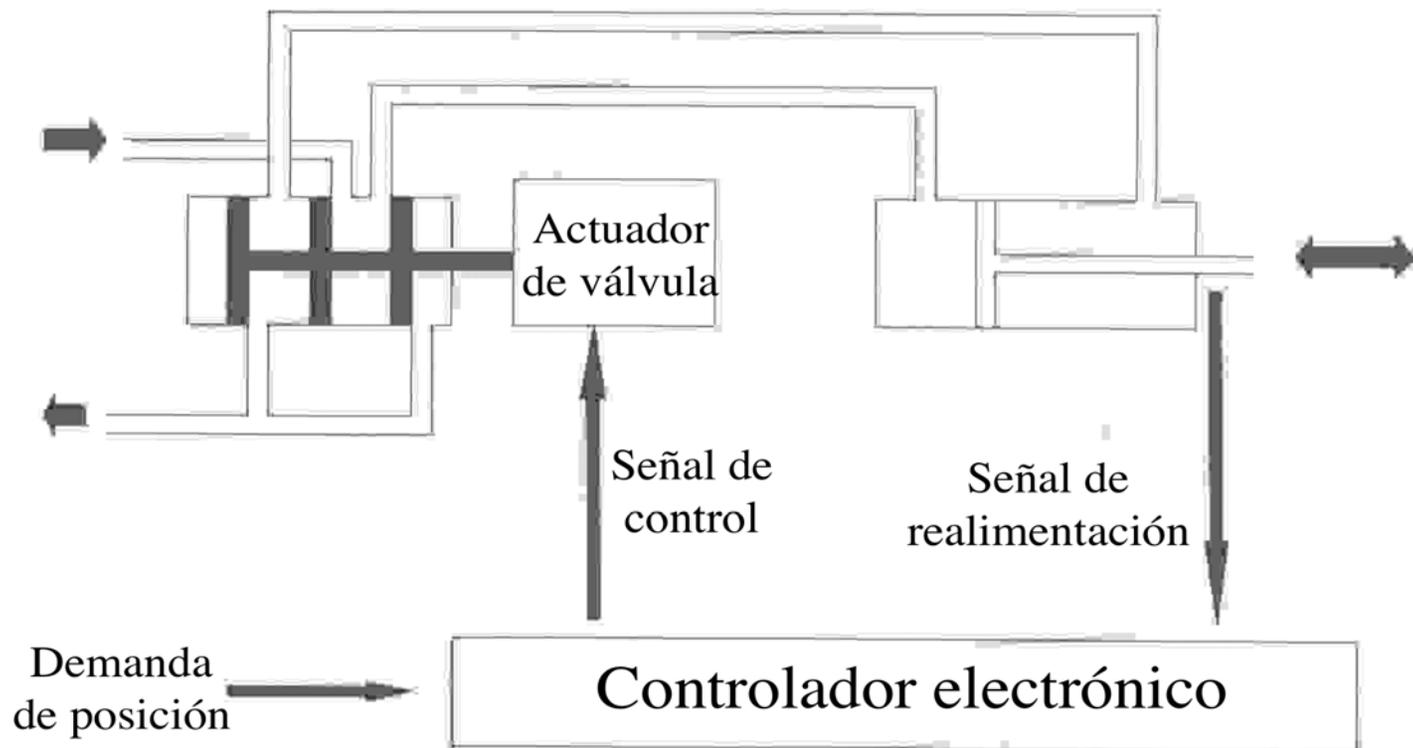
c.- Costo de mantenimiento.

d.- Costo de desinstalación.

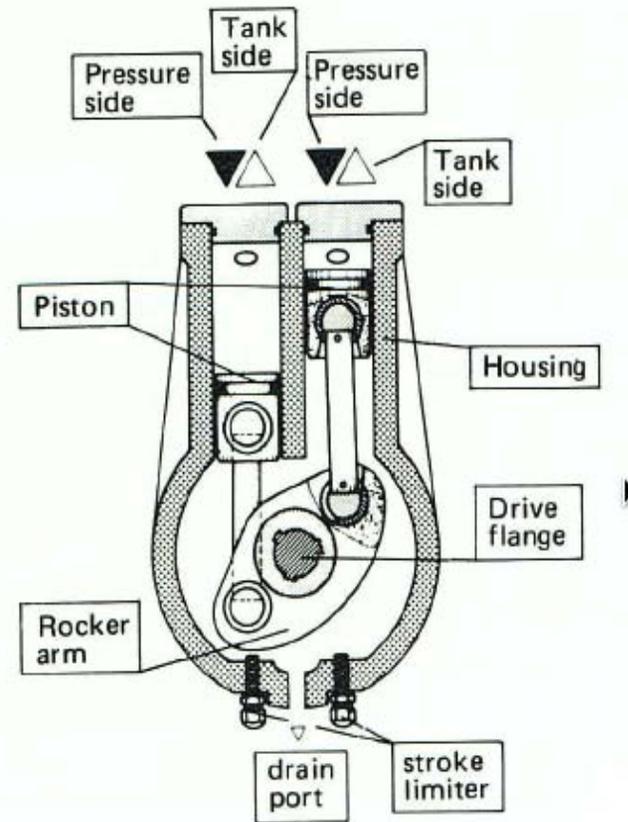
En el estado actual de la tecnología existen dos alternativas para implementar el "motor" de un actuador capaz de operar con precisión en los cuatro cuadrantes:

1.- Electro-hidráulica: motores hidráulicos.

2.- Electro-mecánica directa: motores eléctricos.



Actuador mecatrónico electro-hidráulico con motor lineal hidráulico.



Motor hidráulico rotacional de pistones paralelos (izquierda) y corte mostrando principio de operación (derecha)

Ventajas de los motores hidráulicos:

Potencia muy elevada.

Actuador lineal sin necesidad de convertir movimiento.

Pueden producir “par de retención” (par a velocidad cero) sin consumo de energía.

Operan naturalmente a baja velocidad y alto par.

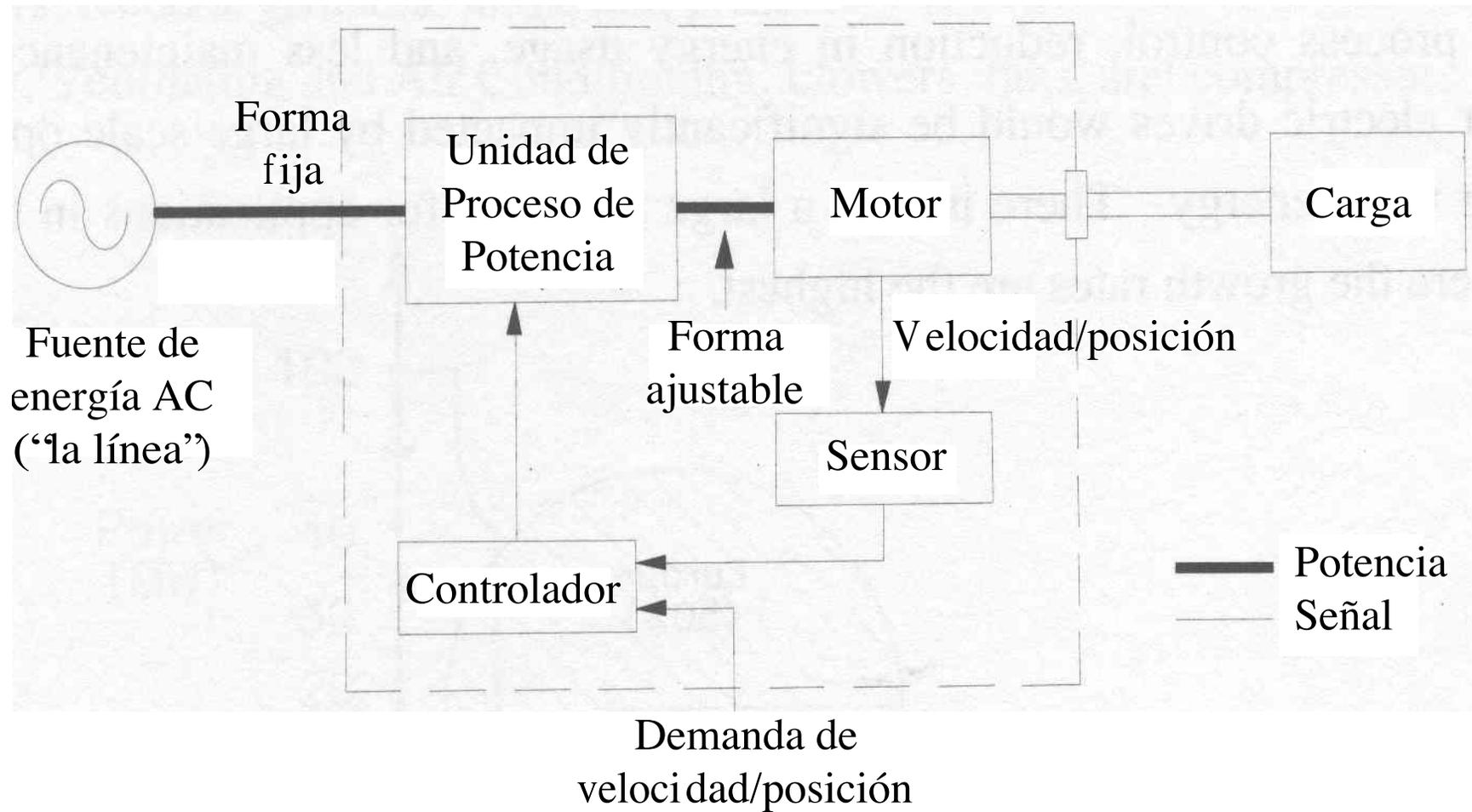
Desventajas de los motores hidráulicos:

Sistema de gran volumen y complejidad al incluir los equipos auxiliares (etapa inicial de conversión de energía eléctrica a hidráulica, bombas, tanques de almacenamiento de fluido, etc.).

Capacidad de recuperación de energía limitada.

Posibles problemas de contaminación por fugas de fluido hidráulico.

Velocidad de respuesta limitada.



Actuador mecatrónico electro-mecánico con motor eléctrico rotacional.

Ventajas de los motores eléctricos:

Gran rango de potencias disponibles, desde pocos vatios hasta multi MW.

Sistema de menor volumen.

Facilidad para recuperación de energía, en cantidad en principio ilimitada.

Alta velocidad de respuesta dinámica.

No contaminante (no hay fugas de fluidos, emisiones de gases, etc.).

Gran rango de frecuencias, desde cero hasta decenas de miles de r.p.m.

Se alimenta directamente de energía eléctrica.

Pueden operar en múltiples ambientes.

Respuesta inmediata a la aplicación de energía.

Bajo mantenimiento.

Alta eficiencia (puede ser mayor al 90%).

Bajo ruido acústico.

Alta controlabilidad.

Desventajas de los motores eléctricos:

Obtención de movimiento lineal requiere en general de un sistema de transformación mecánico adicional.

En general operan a alta velocidad y bajo par.

Operando a baja velocidad pueden requerir ventilación forzada adicional.

No pueden producir “par de retención” (par a velocidad cero) sin consumo de energía.

En el estado actual de la tecnología, el equilibrio de las ventajas y desventajas favorece ampliamente a la adopción de actuadores mecatrónicos con motores eléctricos, salvo en nichos donde la potencia a controlar es muy elevada, tales como grandes máquinas de movimiento de tierra.

Dado que la electricidad es la forma mas versátil y controlable de la energía, es predecible que la tendencia a que todo movimiento tenga un actuador eléctrico, y todo actuador eléctrico tenga un control electrónico será cada vez mas fuerte e inclusiva.

Tipos de motores eléctricos en uso:

1.- De tensión continua (DC).

2.- De tensión AC

2.a.- Asíncronos (motores de inducción).

2.b.- Síncronos de alimentación sinusoidal.

2.c.- Síncronos de alimentación por onda cuadrada ("Brushless DC").

2.d.- De pasos.