

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

*La Automática y la Robótica Aplicada a
la Medicina*

Víctor F. Muñoz Martínez

**I Workshop Español de Robótica, ROBOT 2007
Zaragoza, Septiembre 2007**

I Workshop Español de Robótica, ROBOT 2007
Grupo de Robótica Médica

La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

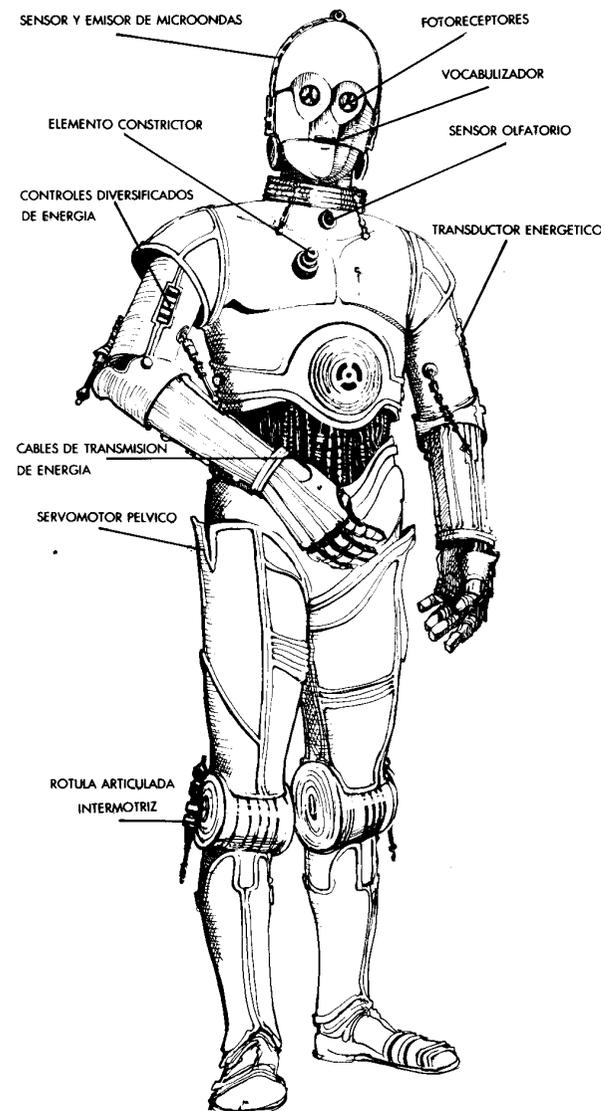
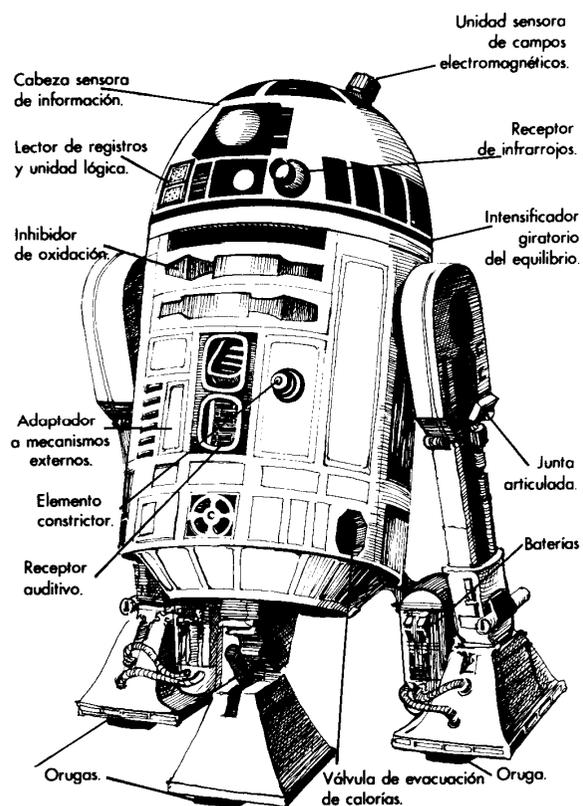
Contenido

1. Robótica.
2. Cirugía mínimamente invasiva.
3. Cirugía integrada por computador.
4. Asistentes robóticos.
5. Diseño cinemático de un robot laparoscópico.
6. Control de movimientos.
7. Implantación y experimentos.
8. Conclusiones.

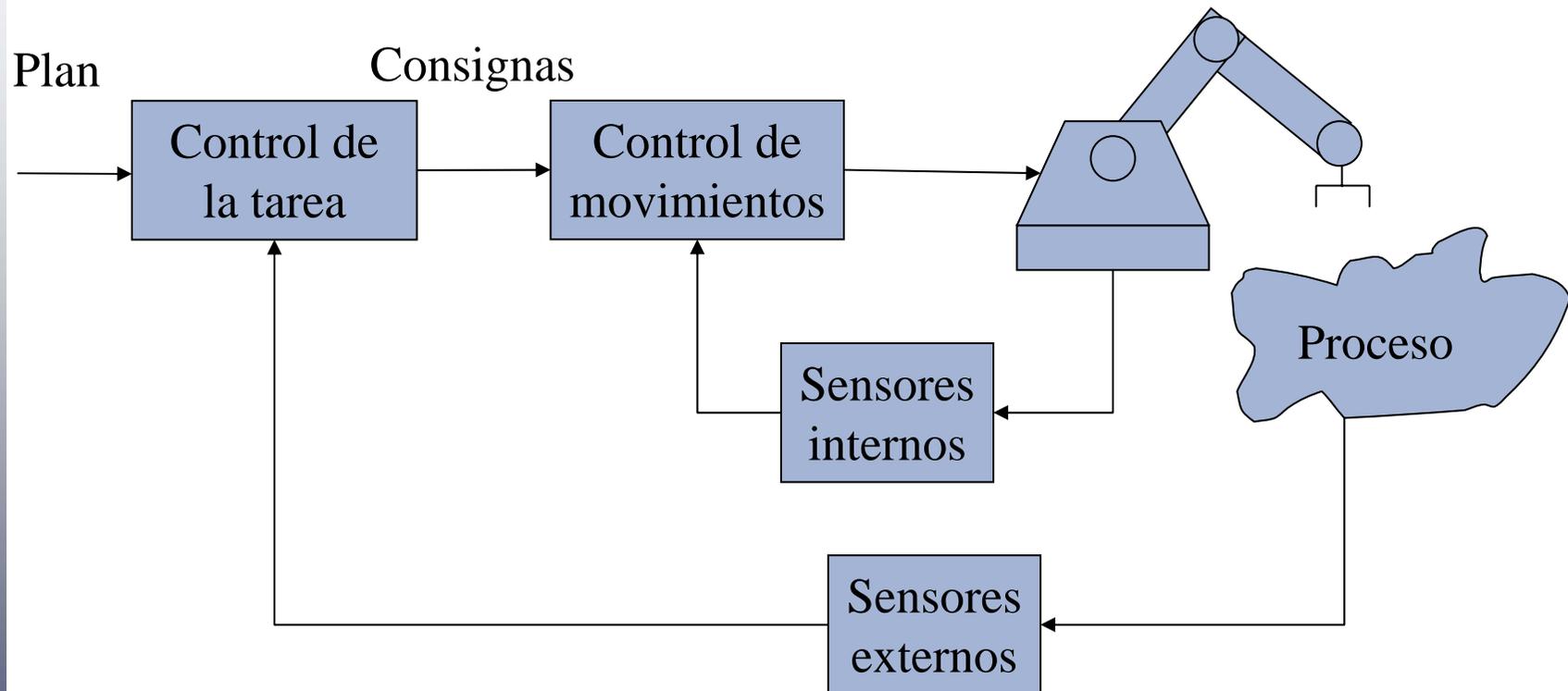
La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

1. Robótica.

Idea de robot



Robot

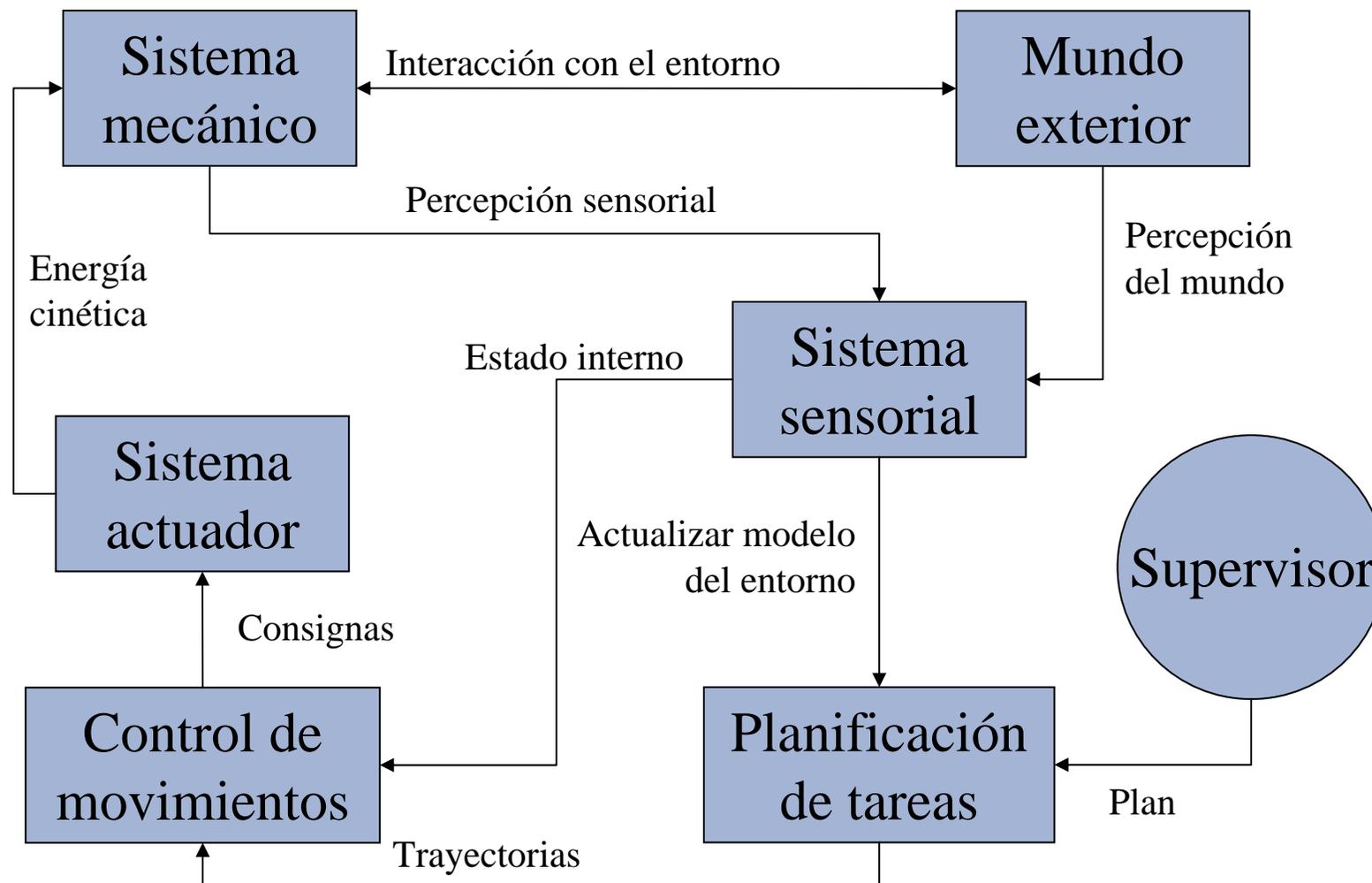


Concepto de robot

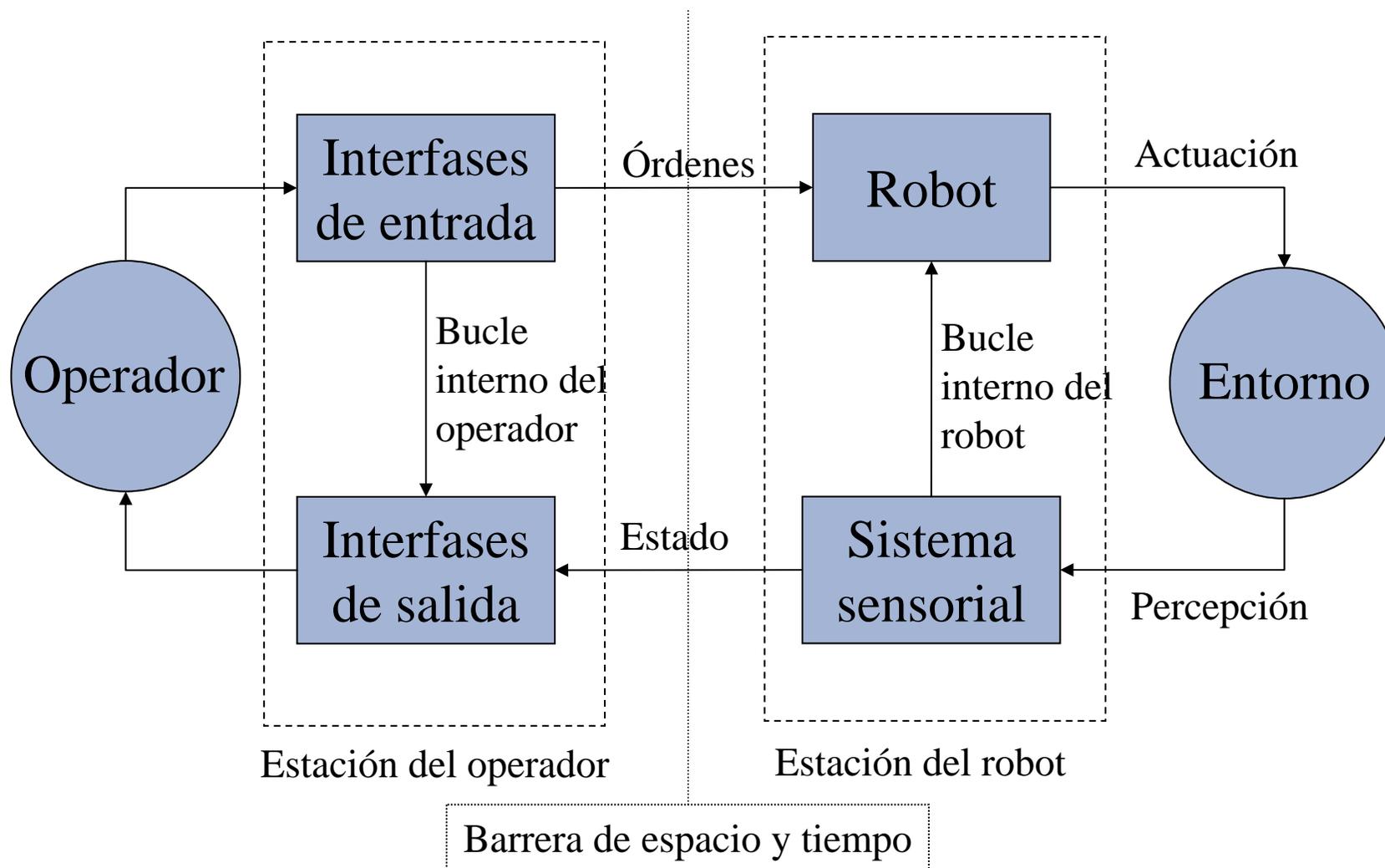
- Cualquier dispositivo que reemplace a un operador humano (japonesa).
- Manipulador programable multifuncional, diseñado para mover material, piezas, o dispositivos especializados a través de movimientos variables programables para realizar un gran conjunto de tareas (americana).
- Máquina que puede ser programada para realizar una gran variedad de tareas, de la misma forma que un computador es un circuito electrónico que puede ser programado para efectuar cualquier algoritmo (McKerrow, 1991).
- No sabemos lo que es, pero cuando lo vemos, lo reconocemos (Khatib, 2000).

Robótica: conexión inteligente entre la percepción y la acción.

El sistema robot



Tele-robótica



La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

2. Cirugía mínimamente invasiva

Orígenes

- La mayor parte de las **complicaciones** post-operatorias están relacionadas con las **incisiones** abiertas para acceder a la región de interés.
- **Hipótesis:** reducir el tamaño de las incisiones reducirá también el número e importancia de complicaciones post-operatorias.
- Beneficio adicional: reducción del tiempo de recuperación, mejoras estéticas (cicatrices menores).
- Una larga búsqueda:
 - Iluminación.
 - Entrada en la anatomía del paciente.
 - Visión.

Orígenes

- **Iluminación:**



- **Abulcasís** (Córdoba, ca. 1000 d.C.): instrumentos para examinar el interior de los pacientes.



- **Bozzini, Desormeaux, Bruck** (s. XIX):
 - Endoscopios que permiten observar el interior del paciente.
 - Luz generada mediante velas (Bruck: platino incandescente).
 - Conducción de la luz mediante lentes y espejos.
 - Generalmente no se practican incisiones en el paciente.
- **Edison:** acopla luz eléctrica a los endoscopios existentes. Problema: calor desprendido.

Orígenes

- **Entrada en la anatomía del paciente:**
 - **Kelling:** inspección de la cavidad peritoneal de un perro (1901). Desarrolla el **neumoperitoneo** (manual).
 - **Jacobaeus:** inspecciona la cavidad torácica mediante un endoscopio (1911).
 - **Kalk:** mejora los endoscopios y crea la técnica de las dos punciones (endoscopio más instrumento). Se centra en la laparoscopia de diagnóstico.
 - **Veress:** perfecciona la aguja de neumoperitoneo existente. Se sigue usando en la actualidad.



La laparoscopia moderna



- **Kurt Semm:**
 - Primeras intervenciones por laparoscopia (sin cámaras de vídeo, años 1960).
 - Propuesta de nuevas técnicas: apendicectomía laparoscópica (1983).
 - Diseño de nuevas herramientas (Stryker).
 - Introduce la luz fría (1964).
 - Desarrolla simuladores para laparoscopia (1988).
- Introducción de las **cámaras de vídeo**: 1982.
 - Escuela alemana y casi simultáneamente, la escuela francesa.
 - Madurez de la laparoscopia: el quirófano incluye equipo de vídeo (cámara, adaptador, monitor).
 - Se desarrolla el modo de trabajar vigente hasta la actualidad.
- Primera **colecistectomía laparoscópica**: en el mundo, en 1985 (RFA, E. Mühe). En España, en 1988 (Vicent, J. Álvarez Fdez.-Represa).

Principios generales

- **Laparoscopia:** procedimientos quirúrgicos mínimamente invasivos que se desarrollan en el abdomen.
- **Laparotomía:** cirugía abdominal convencional.
- **Forma de trabajo:**
 - Se accede al campo quirúrgico mediante pequeñas incisiones.
 - Se emplean instrumentos de caña larga.
 - Visión indirecta del campo quirúrgico a través de una cámara de vídeo.
 - No hay contacto directo con las estructuras anatómicas tratadas.

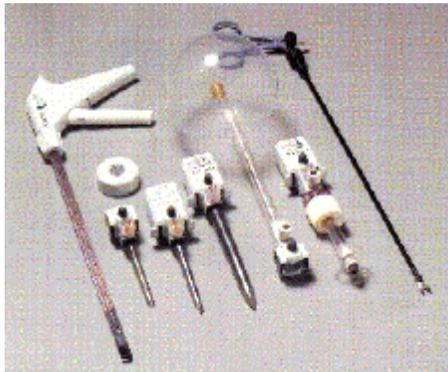


Principios generales

- Primer procedimiento realizado rutinariamente: **colecistectomía**.
- Prácticamente todas las intervenciones pueden realizarse mediante estas técnicas.
- En la práctica, sólo unas cuantas gozan de buena aceptación:
 - Colecistectomía.
 - Funduplicatura gastroesofágica.
 - Reparación de hernia inguinal, recidivada.
 - Adrenalectomía.
 - Esplenectomía.
 - Laparoscopia exploradora de urgencia (abdomen agudo).
- La limitación en la aceptación: conservadurismo, dificultad de aprendizaje de la nueva técnica, necesidad de adquisición de nuevos equipos.
- Útil para el paciente, y suficientemente cómoda para el cirujano, cuando:
 - El campo quirúrgico es relativamente pequeño.
 - La mínima vía de abordaje y tiempo de exposición.

Materiales especiales

- Mesa de operaciones eléctrica.
- Sistema de laparoscopia.
 - Monitor de alta resolución.
 - Cámara de vídeo y acondicionador.
- Fuente de luz y cable.
- Insuflador.
- Instrumental.
- Columna de laparoscopia.



Ventajas e inconvenientes

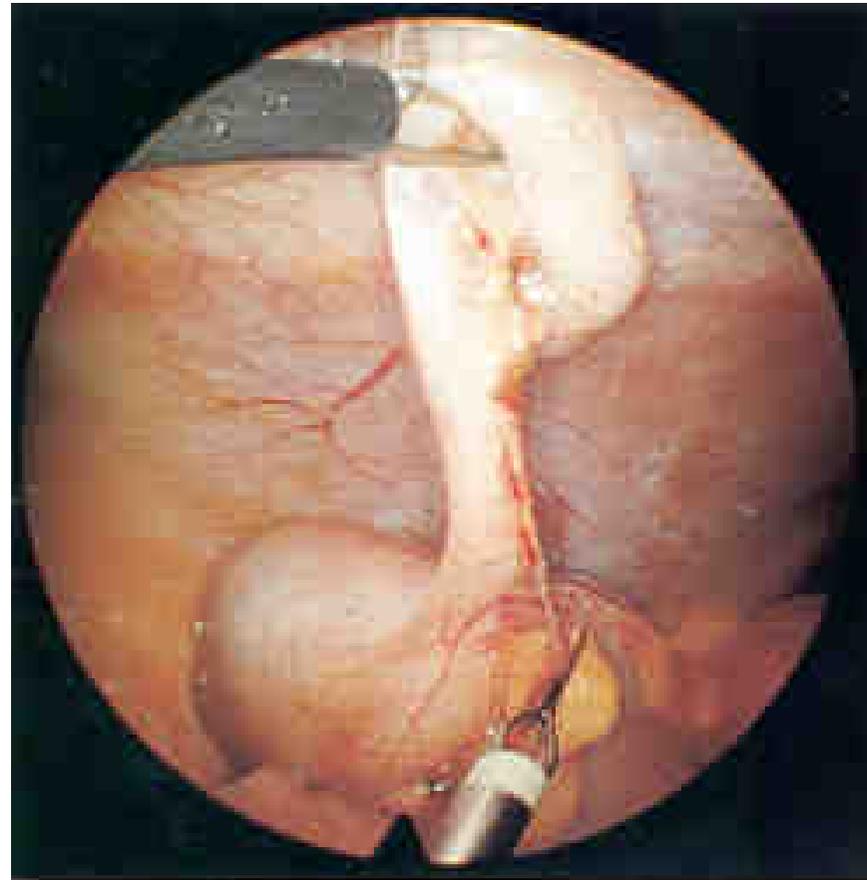
Características de la cirugía laparoscópica:

- Acceso restringido al campo quirúrgico: instrumentos de caña larga e incisiones reducidas => menor tiempo de recuperación, menor riesgo de complicaciones, mejores resultados estéticos.
- Visión indirecta del campo quirúrgico.
- Pérdida del tacto directo sobre las estructuras intervenidas.
- Coordinación entre cirujano principal y asistente (instrumental y cámara).



Como consecuencia de estas características, se desprenden una serie de dificultades en la práctica quirúrgica, ligadas a cada una de las características mencionadas.

Visión

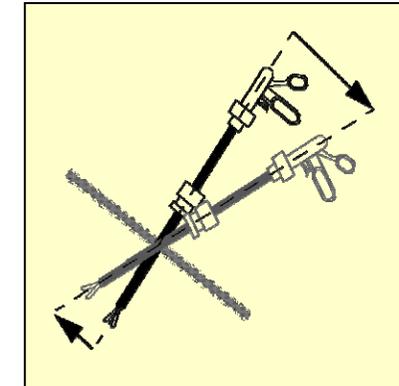
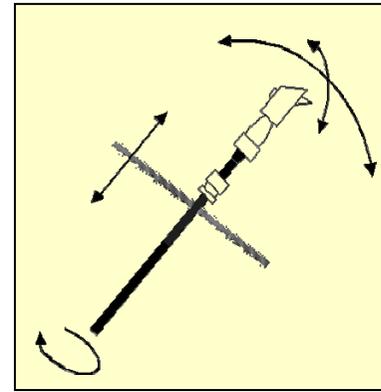


Visión

- **Visión indirecta** del campo quirúrgico: la calidad de la imagen de vídeo es vital.
- **Endoscopio**: cámara CCD con óptica alargada (de 5 a 10 mm de diámetro) que se introduce en el abdomen del paciente.
- De la forma de obtener la imagen y la dependencia de ésta, se desprenden varios **problemas**:
 - **Visión plana**: deficiencia en la percepción del volumen. Incluso las tareas sencillas de manipulación requieren más tiempo. Los intentos de introducir endoscopios estereoscópicos no han tenido buena acogida.
 - **Iluminación**: se conduce la luz a través de la óptica. Es un tipo de iluminación antinatural, que no sirve para mejorar la percepción del volumen.
 - **Campo de visión**: siempre mucho menor que el del ojo humano. A veces se utilizan ópticas con ángulo.
 - **Resolución, contraste y fidelidad de la imagen**: afectadas por la calidad de la cámara, el monitor y la iluminación. También influidas por la posición del monitor.

Manipulación

- Instrumentos de caña larga a través de incisiones reducidas: 4 grados de libertad.
- Problemas:
 - Inversión del movimiento.
 - Escalado del movimiento (en desplazamientos y fuerzas).
 - Pérdida del tacto.
 - Coordinación ojos-manos.
- Pueden solucionarse en gran parte mediante un intenso aprendizaje.



Coordinación

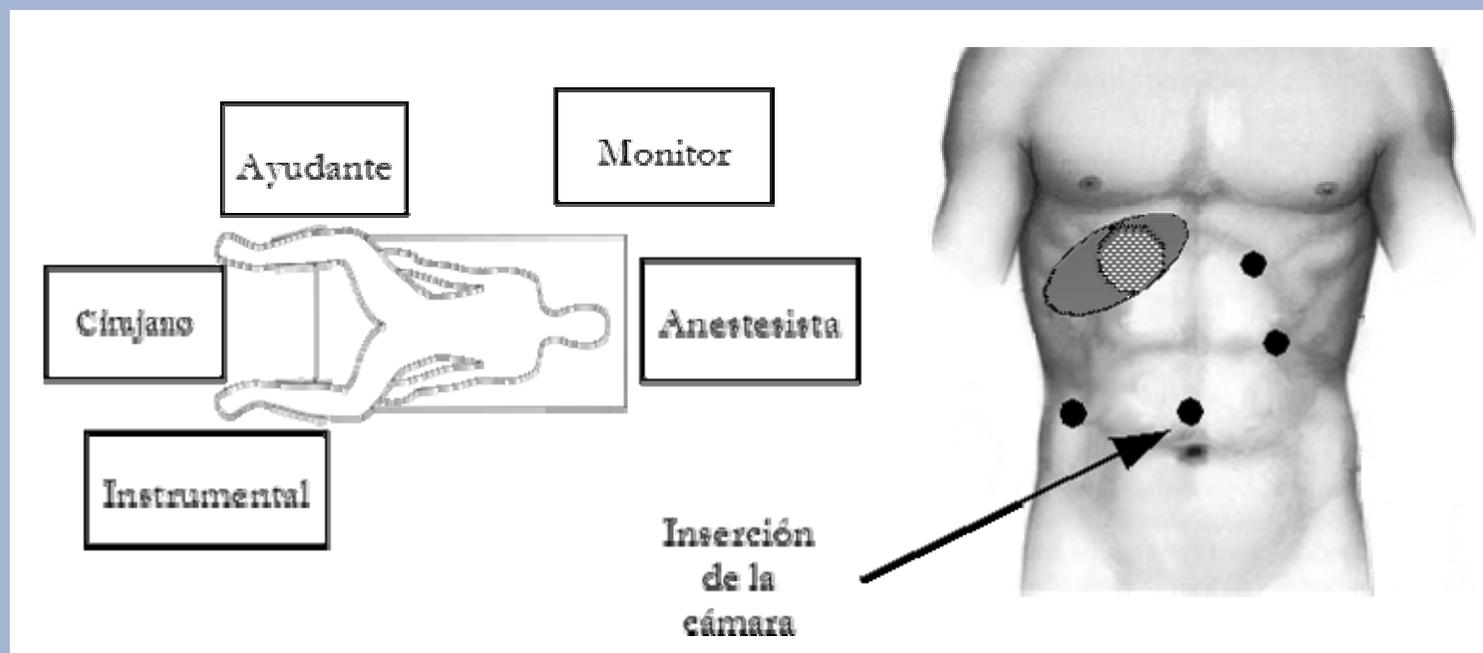
- Instrumentos: endoscopio más al menos dos útiles => es necesaria más de una persona.
- Generalmente, el cirujano principal maneja el instrumental y el asistente la cámara.
- Problemas:
 - Comunicación verbal.
 - Imagen afectada por el pulso, tanto más cuanto más se prolonga la operación.
 - Movimiento impreciso de la óptica: manchado.



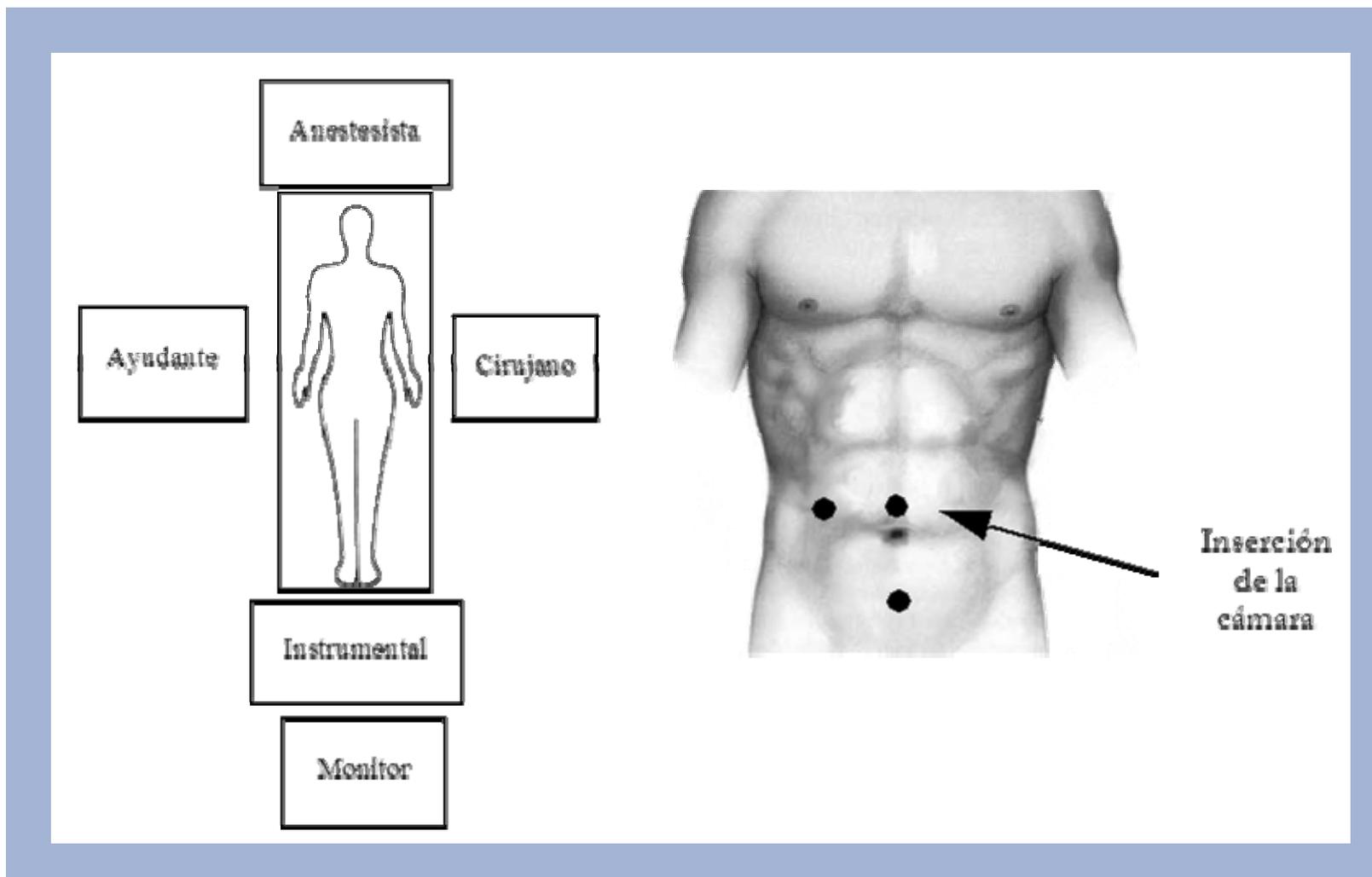
Algunas técnicas habituales

- En la práctica, sólo unas cuantas técnicas gozan de la aceptación general:
 - Colectomía.
 - Funduplicatura gastroesofágica.
 - Reparación de hernia inguinal, recidivada.
 - Adrenalectomía.
 - Esplenectomía.
 - Laparoscopia exploradora de urgencia (abdomen agudo).
- La naturaleza de la intervención, y la localización de la región afecta, determina el número y posición de las incisiones necesarias.
- Estas incisiones definen a su vez la posición respecto al paciente del equipo humano y material.

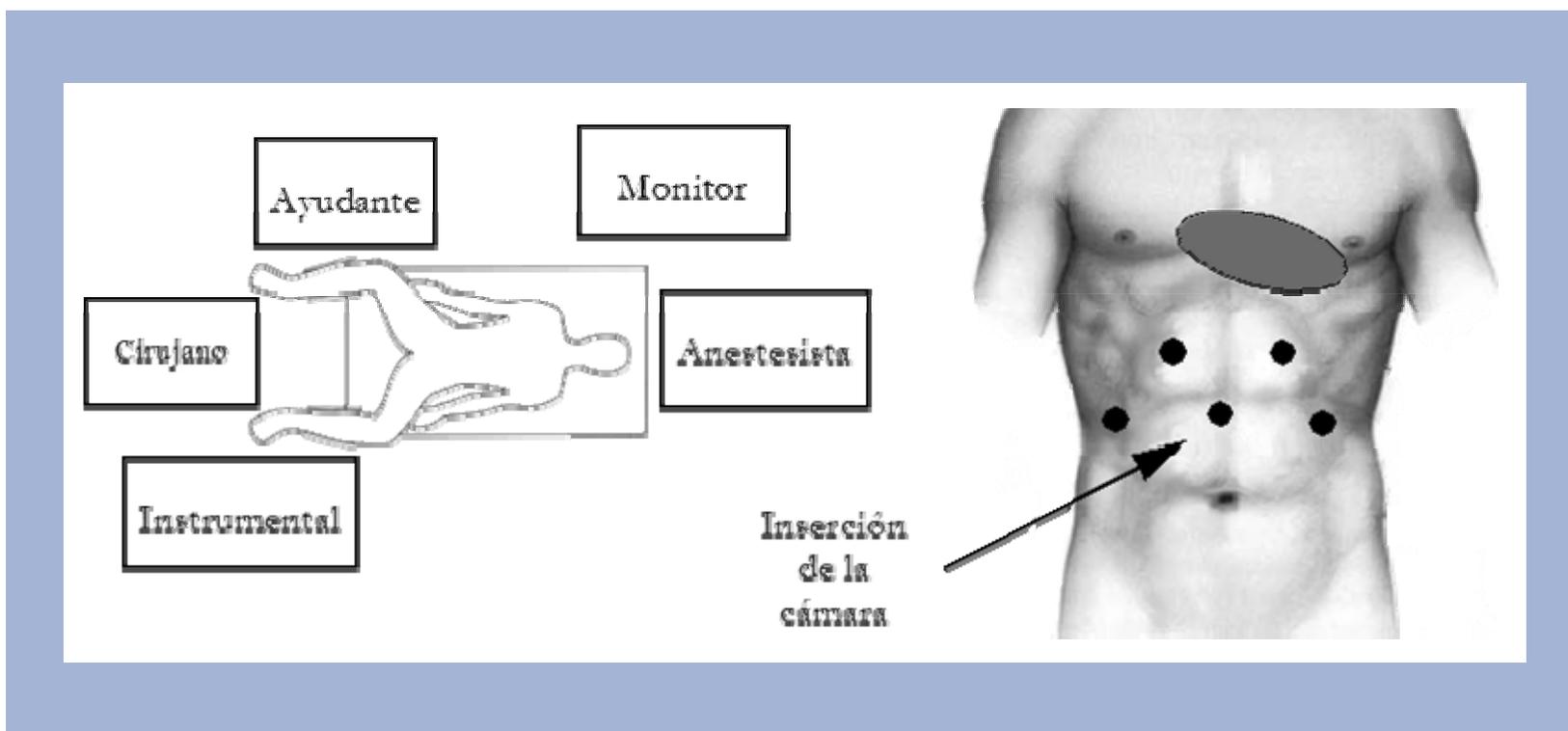
Colecistectomía



Hernia inguinal

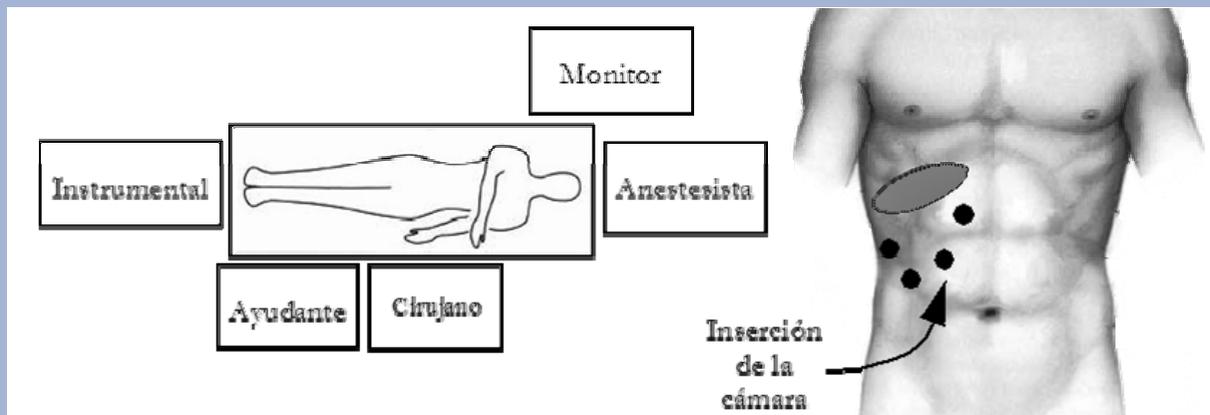


Funduplicatura gastroesofágica

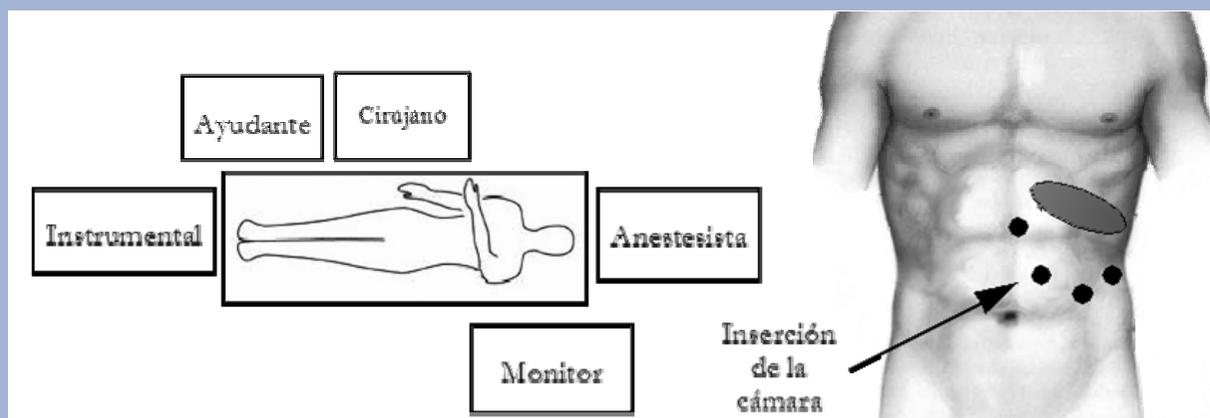


Adrenalectomía

A la derecha



A la izquierda

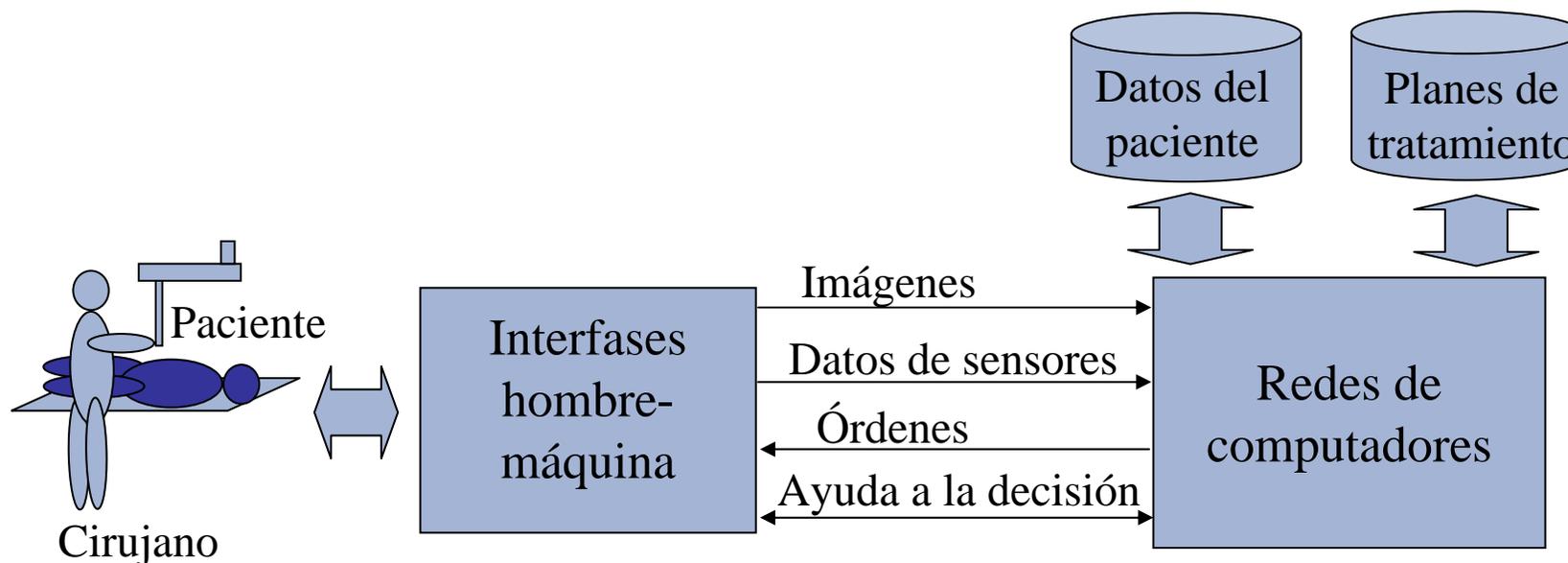


La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

3. Cirugía integrada por computador

Introducción

- Asociación de gente y máquinas para hacer ciertas tareas delicadas mejor de lo que lo harían solos.



Una clasificación:

- Sistemas CIS (Cirugía Integrada por computador)
- Sistemas asistentes quirúrgicos

Cirujanos

- **Habilidades :**
 - Diestros, bastante fuertes y rápidos.
 - Variedad de habilidades táctiles y visuales.
 - Adaptables.
 - Comprensión del proceso.
 - Analizan su rendimiento y aprenden mejorando con la práctica.
- **Limitaciones:**
 - No poseen precisión geométrica (posición trayectoria, esfuerzos).
 - No toleran las radiaciones ionizantes.
 - No están bien en espacios reducidos ni durante mucho tiempo.
 - Pequeños temblores inadecuados para pequeñas estructuras.
 - Envejecen y pierden parte de su habilidad manual.
 - Se cansan y cometen errores.

Máquinas

- **Ventajas:**
 - Precisas e incansables.
 - Sensores para posicionar instrumentos en 6 GDL y controlar esfuerzos.
 - Pueden ser miniaturizadas y soportar grandes dosis de radiación.
 - Pueden ser fiables.
 - Pueden registrar sus movimientos para análisis.
- **Debilidades:**
 - Deben obedecer los deseos del cirujano (responsable de todo lo que pasa en quirófano).
 - Requieren información geométrica difícilmente expresable lingüísticamente.
 - ¿Cómo se sabe que la máquina ha “comprendido”?.
 - ¿Cómo puede ayudarnos a evitar dañar al paciente?.

Orígenes de la robótica médica

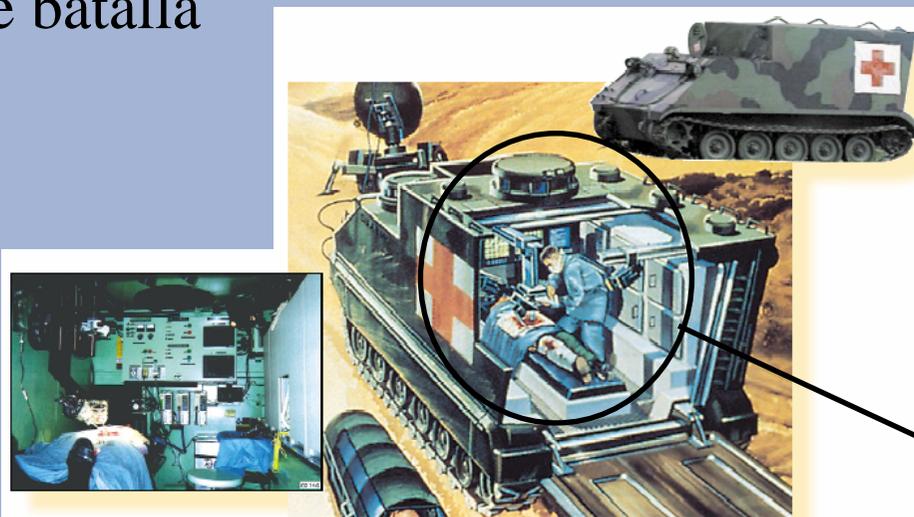
- Ames Research Center (NASA): desarrollo de conceptos de realidad virtual en la segunda mitad de los 1980.
- Colaboración con P. Green, del SRI (Stanford Research Institute, después SRI International) en la aplicación de realidad virtual para mejorar la precisión de anastomosis vasculares y nerviosas en cirugía. El objetivo era enviar la *presencia* del cirujano a otro lugar. El sistema resultante se denominó *Green Telepresence Surgery System*.
- En 1988-89 se introduce la laparoscopia como técnica quirúrgica viable en los EE.UU. (colecistectomía).
- R. Satava (cirujano endoscópico militar) se incorporó al grupo Ames-SRI, proponiendo aplicaciones del sistema Green a la laparoscopia.
- Por la influencia de Satava, se transfiere el proyecto a la ARPA (*Advanced Research Projects Agency*, luego DARPA), que provee fondos para 7 años.

Orígenes de la robótica medica

- Paralelamente, hacia 1990, Barger (cirujano ortopédico) y Taylor (IBM) inician su colaboración para desarrollar un sistema robótico para implantar prótesis de cadera.
- Inicialmente se utiliza un robot IBM Puma, y se dedica a implantes en veterinaria.
- Una evolución del sistema, que incluye planificación de la operación, recibe la autorización de la FDA (*Food and Drug Administration*) para la clínica humana.
- DiGioia desarrolla HipNav, un sistema de navegación para planificar las operaciones de implante, que luego se realizan con RoboDoc.
- Simultáneamente, Wickham y Brian Davies desarrollan en el Imperial College de Londres un sistema para la resección trans-uretral de la próstata, bajo los mismos principios que RoboDoc. El nuevo sistema elimina al cirujano de la operación, una vez se ha planificado. Sólo llega a la experimentación sobre animales.

Orígenes de la robótica médica

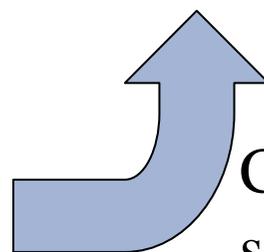
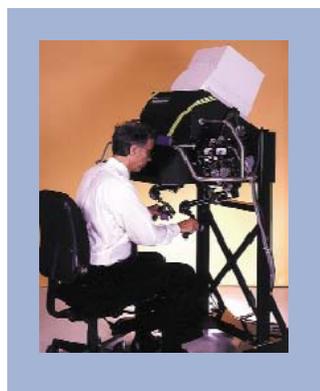
Campo de batalla



Quirófano local

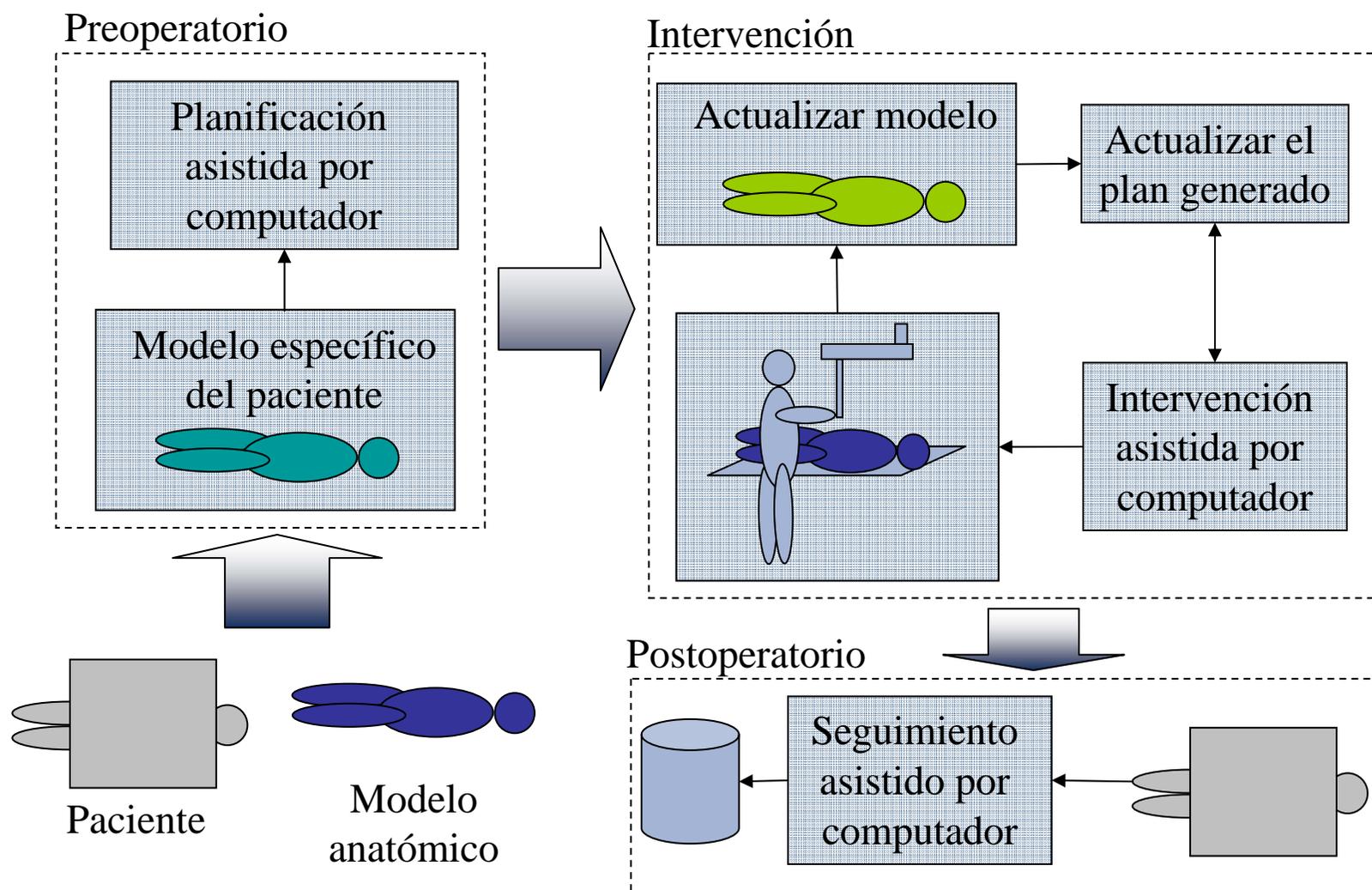


Cirujano
remoto



Conexión
satélite

Cirugía basada en CAD/CAM



Ventajas

- Sinergia entre planificación y ejecución cuando los médicos desarrollan un plan quirúrgico.
- Plan como una simulación cualitativa mental.
- Utilidad si el sistema es capaz de proporcionar una imagen en tiempo real como referencia con información cuantitativa geométrica.
- Ayuda por ordenador a ejecución del plan.

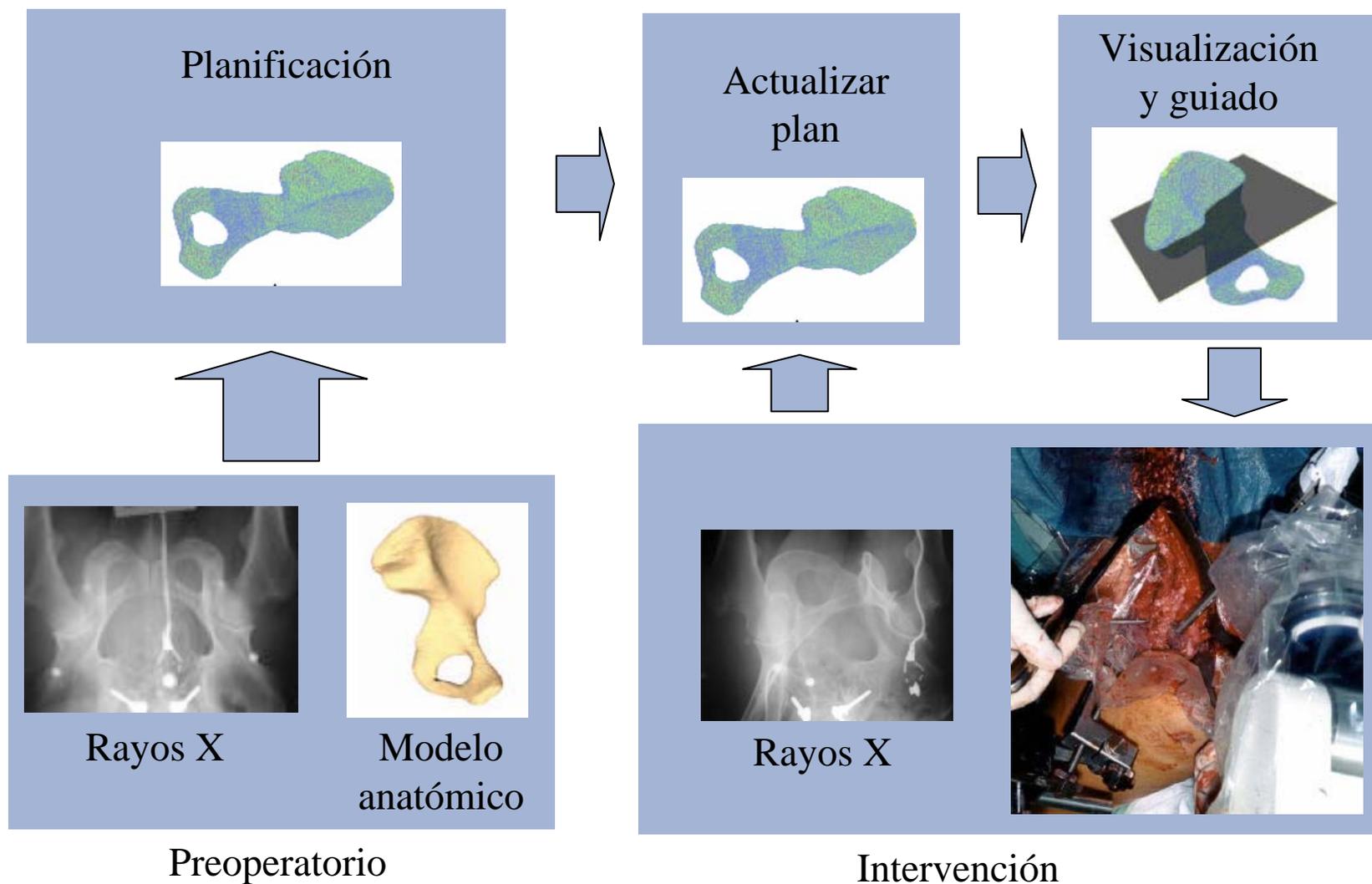
Conceptos derivados

- **CAS:** Cirugía asistida por computador. Se refiere normalmente al preoperatorio.
- **Tele-medicina:** Sistemas de vídeo-conferencia o transmisión de imágenes para el diagnóstico.
- **Solo-surgery:** Intervención en solitario.
- **Cybersurgery:** Intervención mediante el uso de herramientas de telepresencia.
- **Tele-cirugía:** Uso de la tele-robótica en las intervenciones.
- **CIS:** Cirugía integrada por computador. Cuando se integran el preoperatorio, la intervención y el postoperatorio.

¿Es todo esto nuevo?



Ejemplo: Cirugía ortopédica

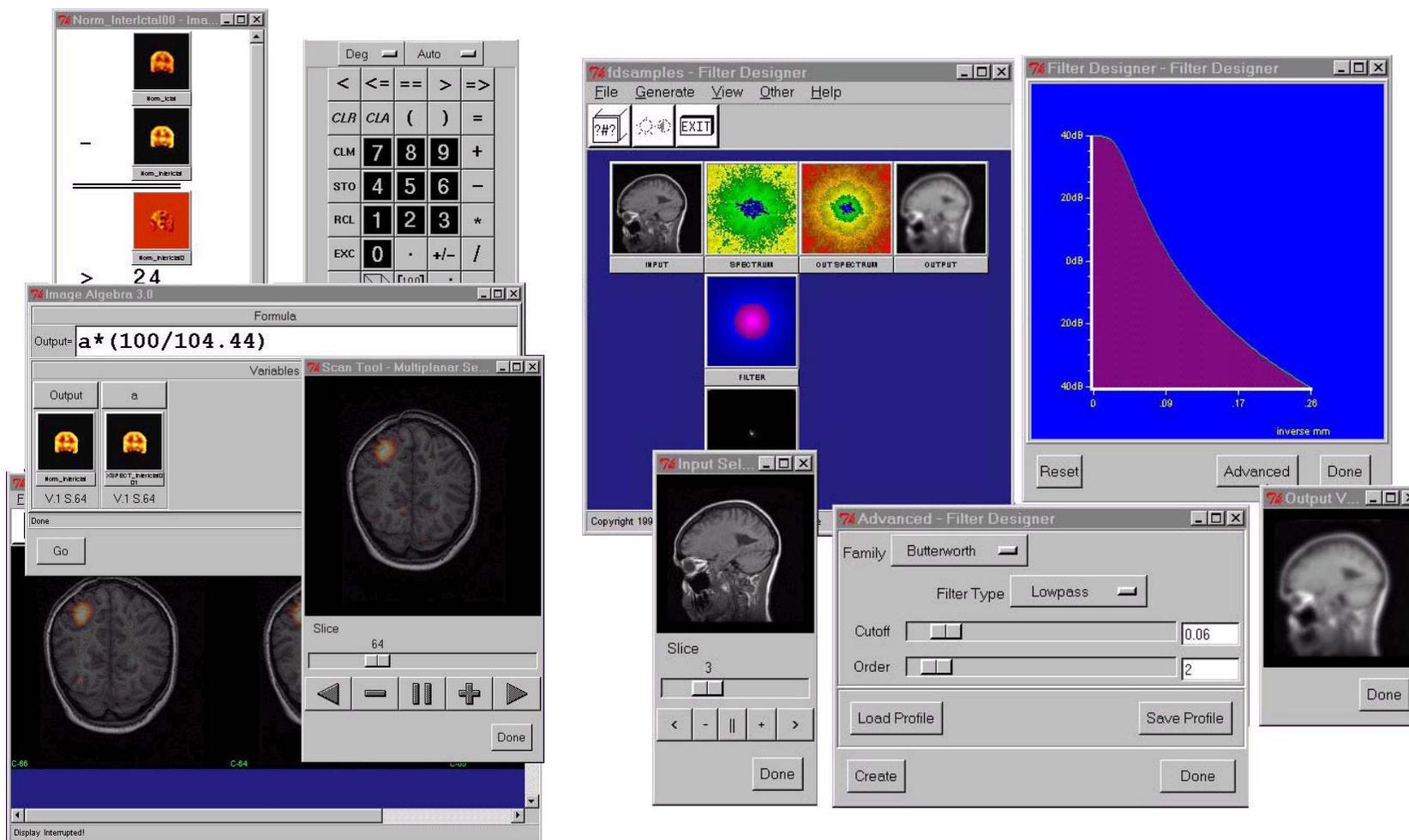


Adquisición de imágenes

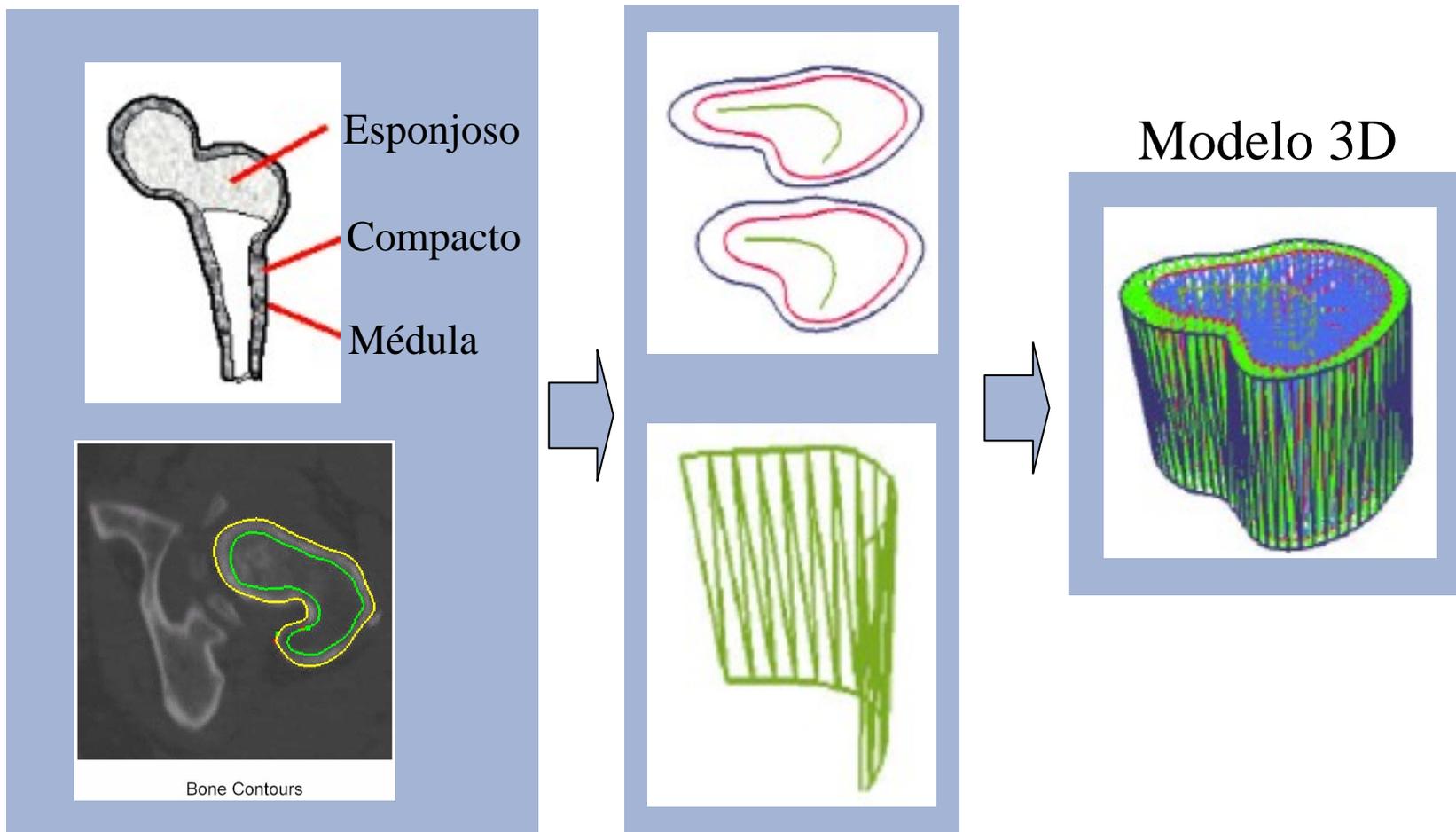
- Imágenes por Rayos X (CT)
- Resonancia magnética (MRI).
- Medicina nuclear (SPECT, PET)
- Ultrasonidos (US), 3D y Doppler
- Vídeo (Microscopios, endoscopios).
- Otros: Magnetoencefalografía (MEG).
- Datos clínicos.



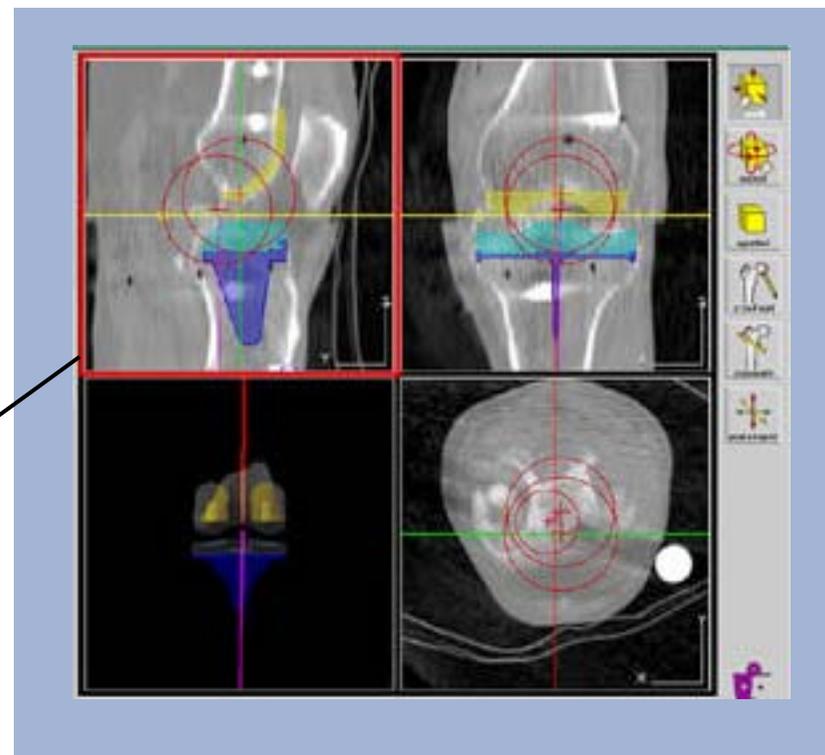
Procesamiento y filtrado



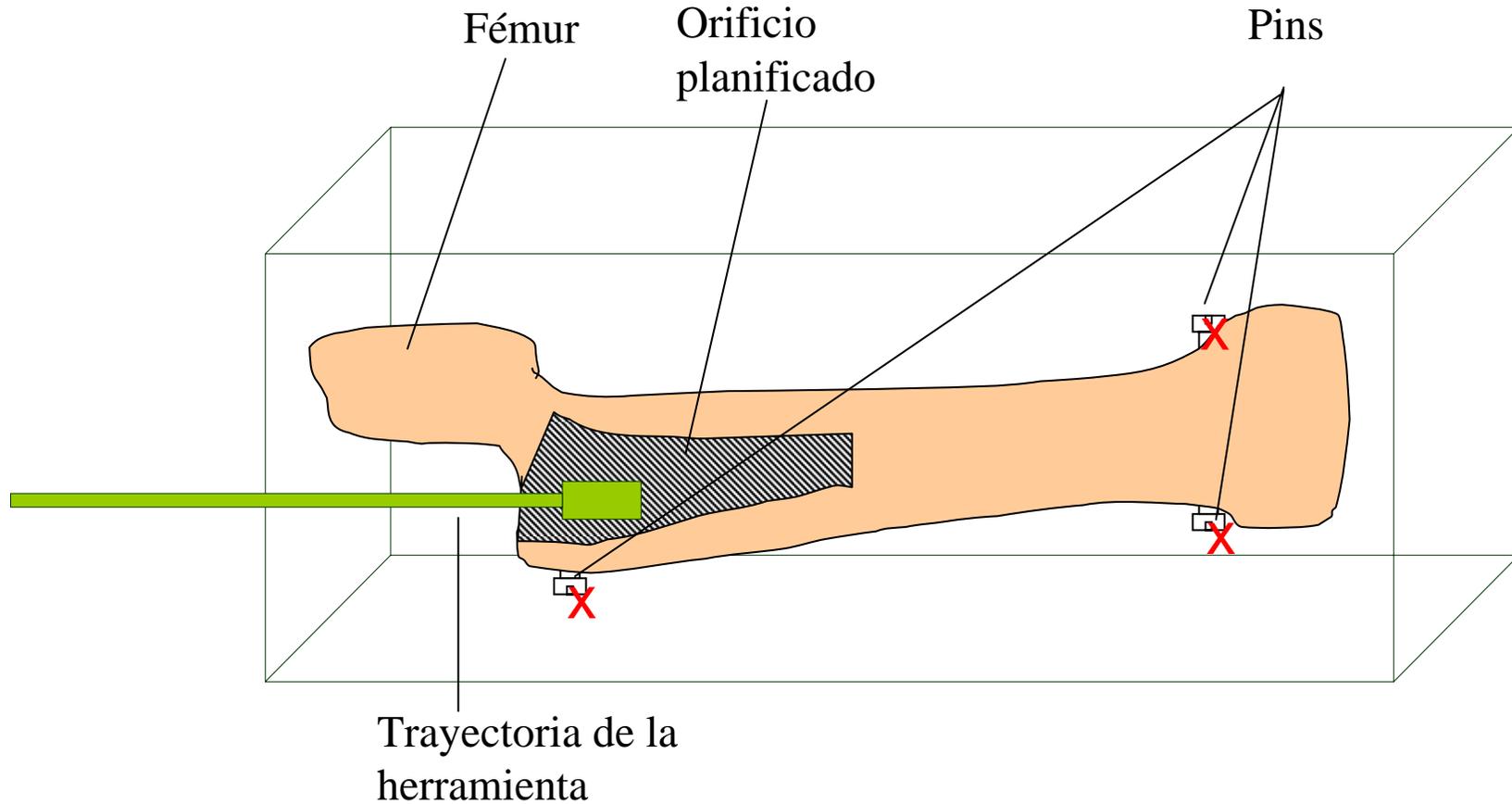
Segmentación



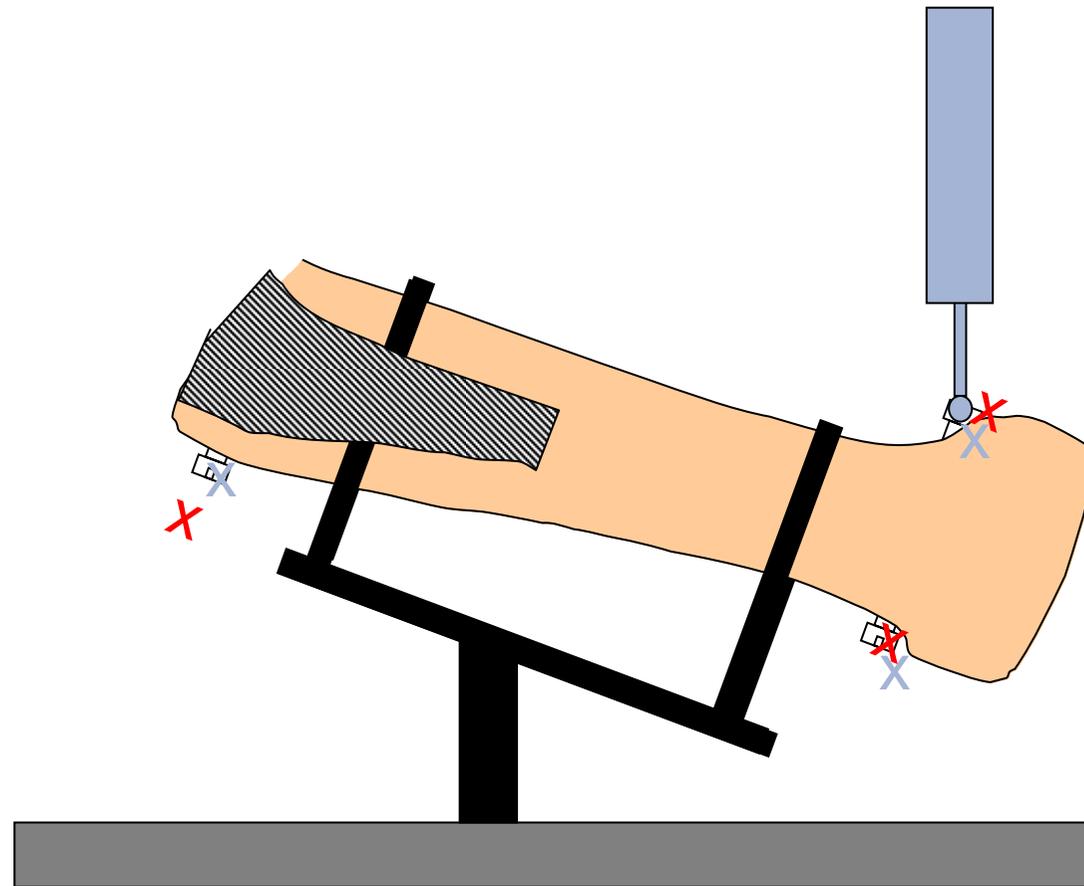
Planificación



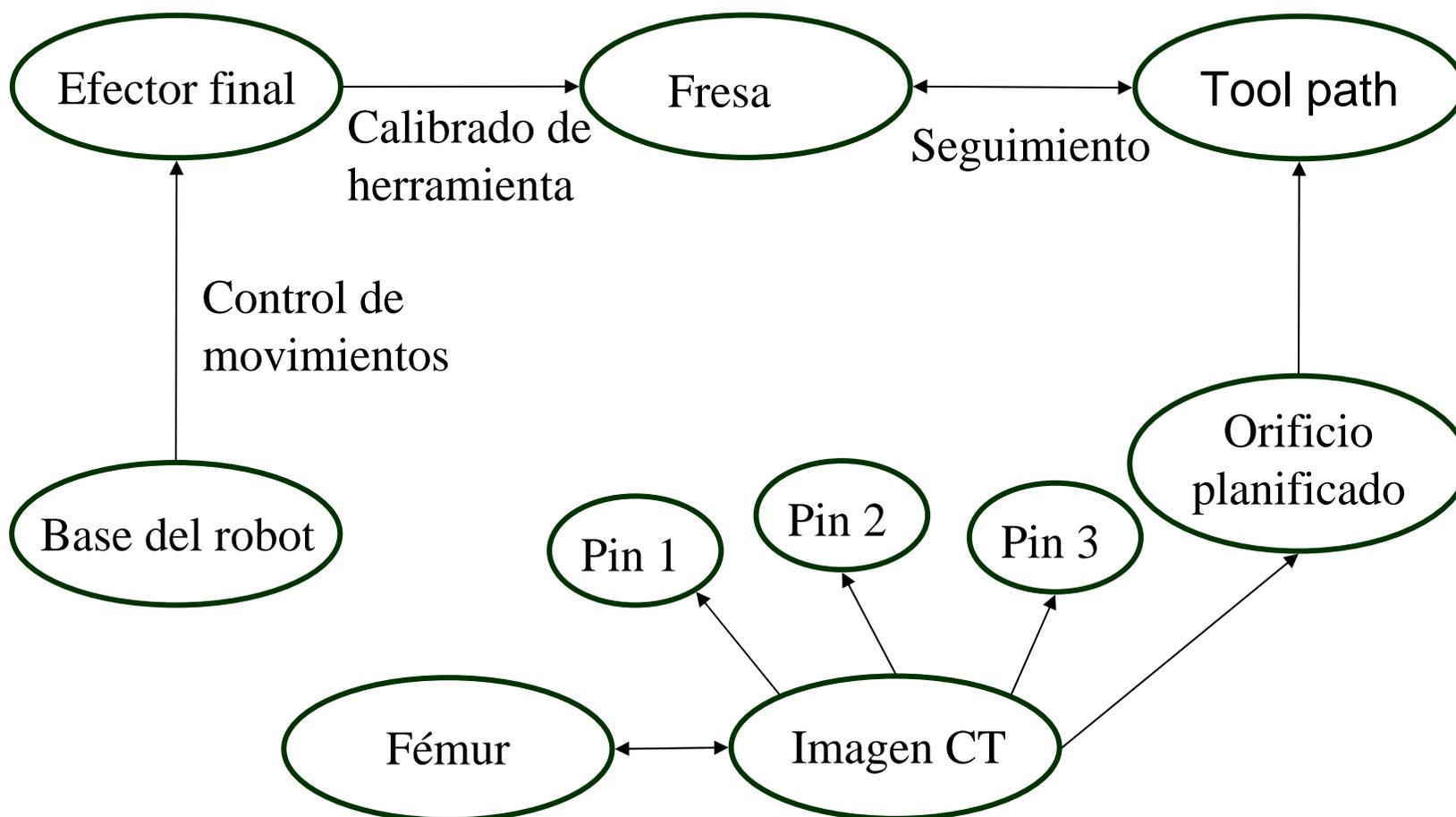
Registro



Calibración



Modelo geométrico de la tarea



Robodoc (Integrated surgical systems)

- 1990: Experimentos con animales con un prototipo de IBM.
- 1992: Clínica humana en EE.UU.
- 1994: Clínica humana en Europa.
- 30 unidades en Europa y Japón.
- Cirugía de la cadera y rodilla (2000).



Caspar (Ortho MAQUET)

- Basado en un robot industrial de Staubli.
- Introducido en el mercado en 1997.
- 50 unidades instaladas en Europa.
- Utilizado en mas de 500 casos.



La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

4. Asistentes robóticos

Sistemas asistentes quirúrgicos

- Es una de las partes integrantes de un sistema C/S.
- No trata de reemplazar al cirujano, sino trabajar de forma cooperativa con él.
- Se clasifican en dos tipos:
 - Asistentes quirúrgicos auxiliares. Trabajan “codo con codo” con el cirujano.
 - Amplificadores de las habilidades del cirujano (*surgeon extenders*). Aumentan la destreza del cirujano para manejar ciertos instrumentos.

Asistentes quirúrgicos comerciales

Computer Motion

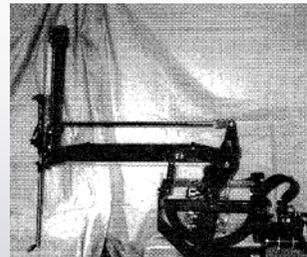


AESOP



ZEUS

Intuitive Surgical



Black Falcon

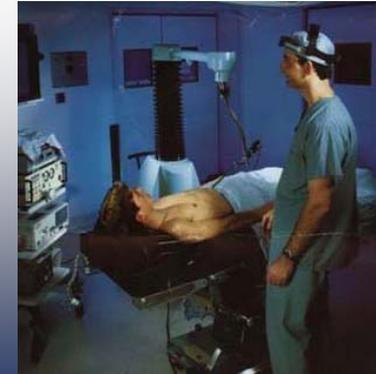


SRI



Da Vinci

Armstrong Healthcare



Endoassist

MedSys



Lapman

Características deseables

- Compatibles con el quirófano.
- Cualquier parte del robot en contacto con el paciente, debe esterilizarse.
- Seguridad y redundancia.
- Capacidad para portar varias herramientas.
- Tamaño reducido, ligero y con movimientos limitados.

Da Vinci (Intuitive surgical)

Visión estéreo

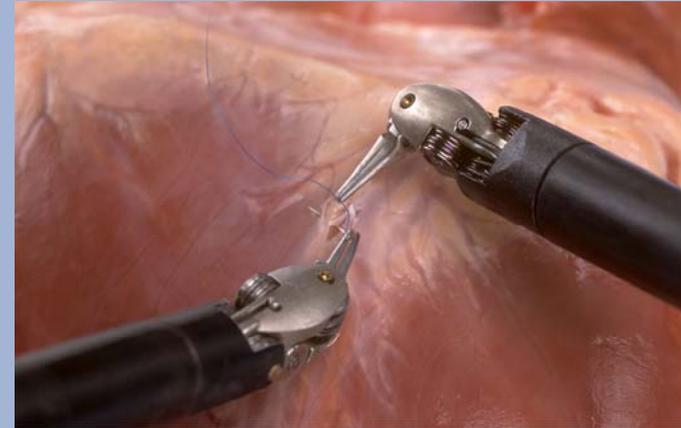


- Manejo de cámara e instrumental.
- Interfaz basado en tele-presencia.
- Capacidad de tele-operación.

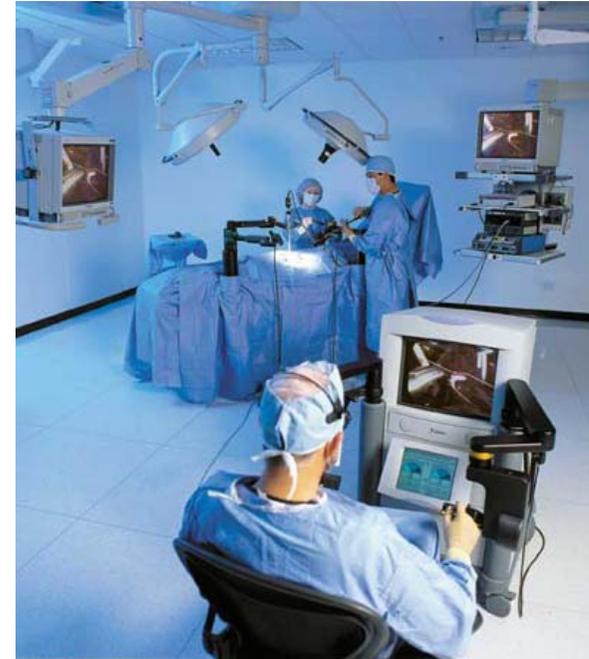
Instrumental



Da Vinci (Intuitive surgical)

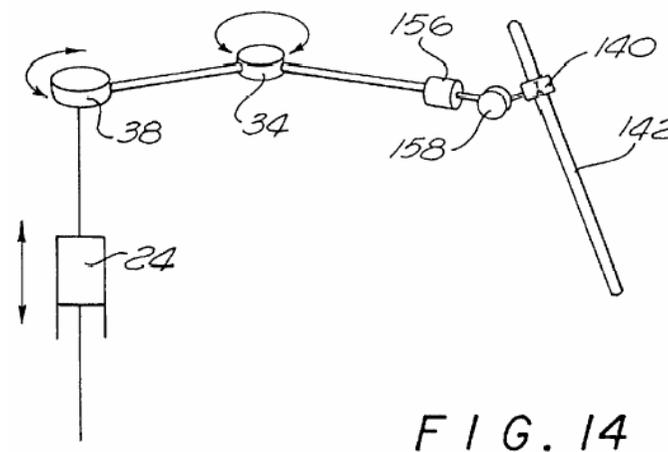
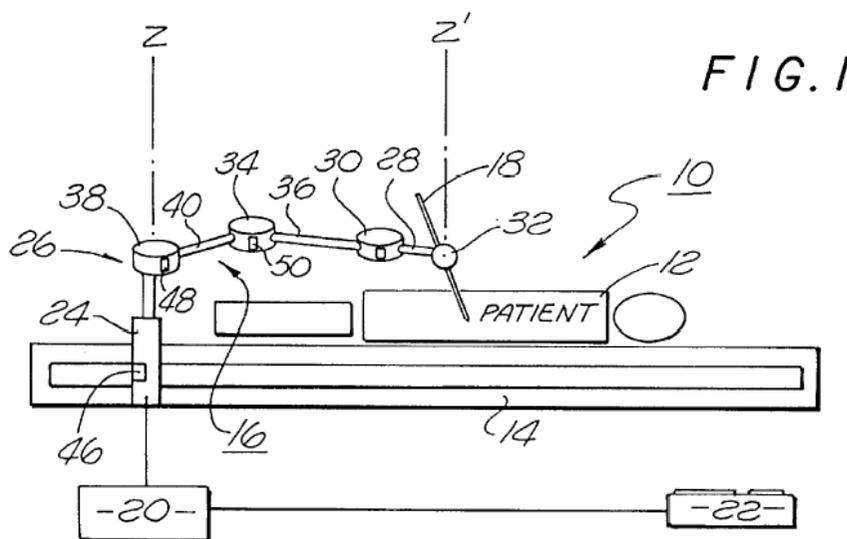


Aesop y Zeus (Computer motion)



- Aesop fue el primer sistema comercial (1998).
- Varios de estos brazos forman el sistema Zeus.
- Capacidad para el manejo de la cámara, instrumental y teleoperación.

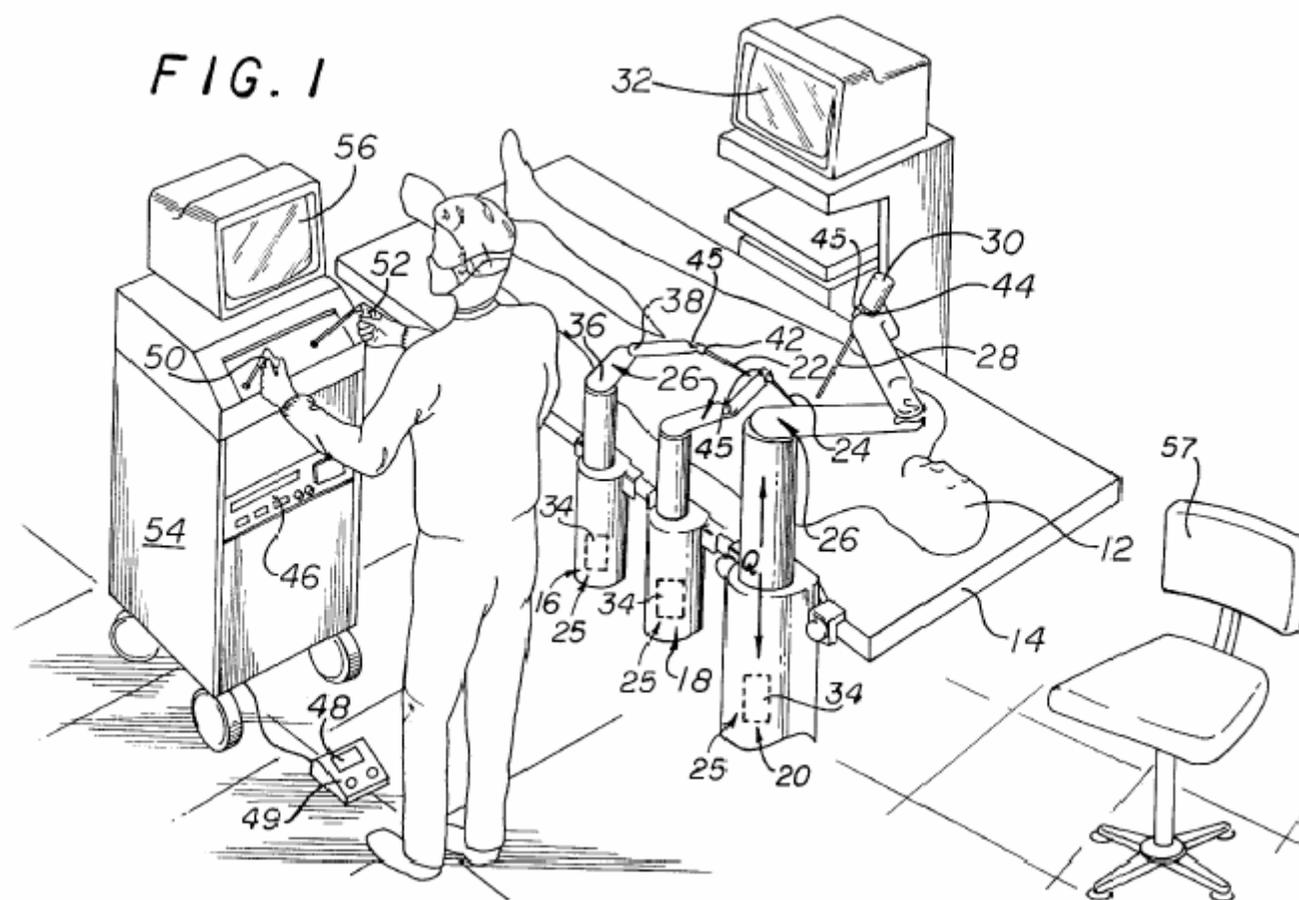
Aesop (Computer motion)



Aesop (Computer motion)



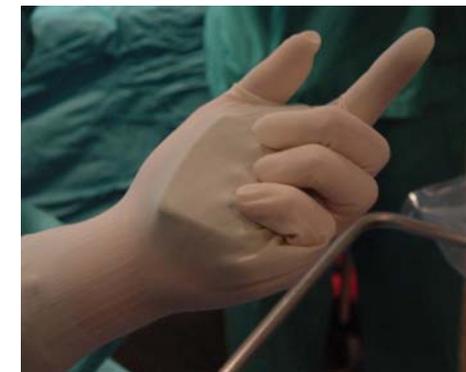
Zeus (Computer motion)



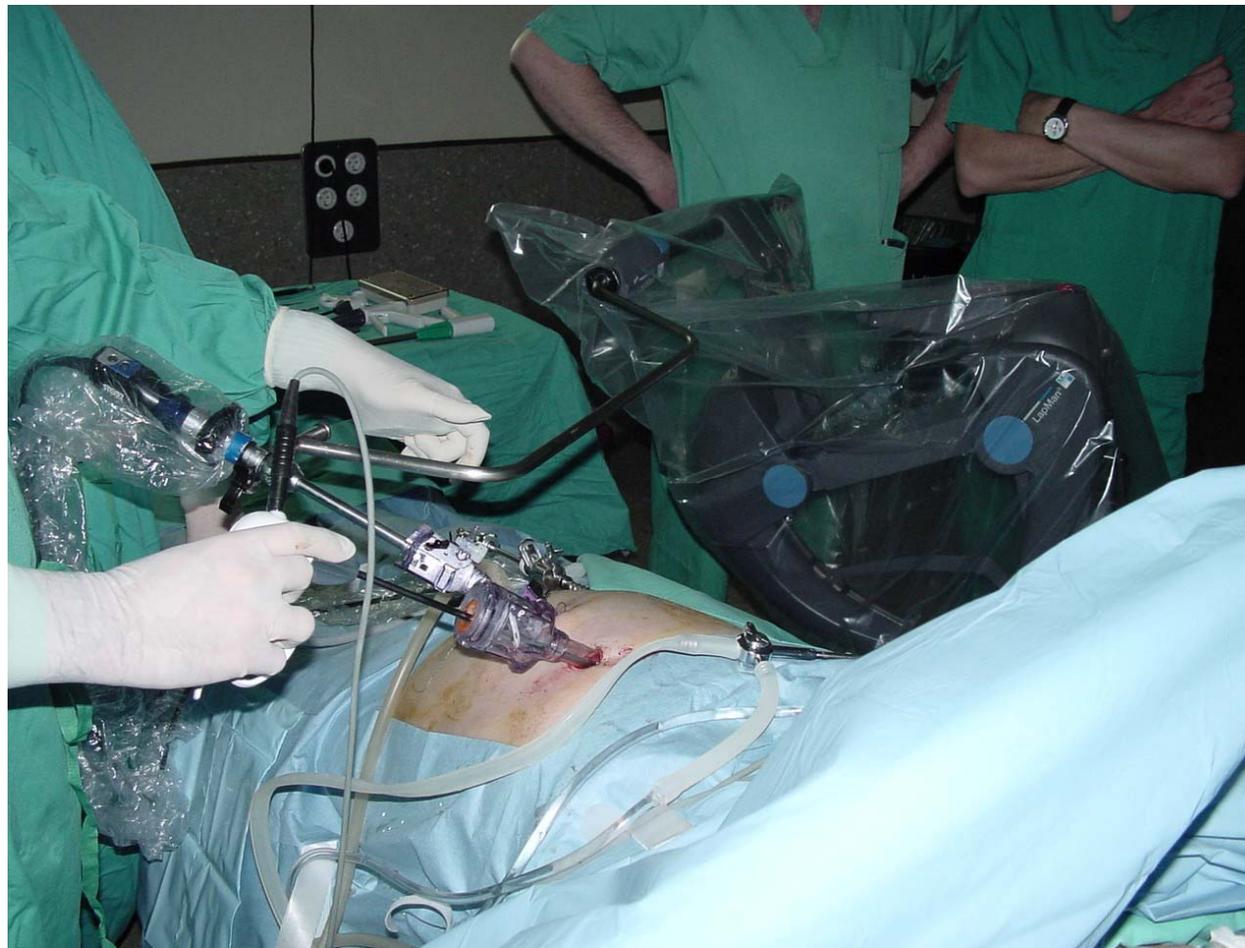
Zeus (Computer motion)



Lapman (MedSYS)



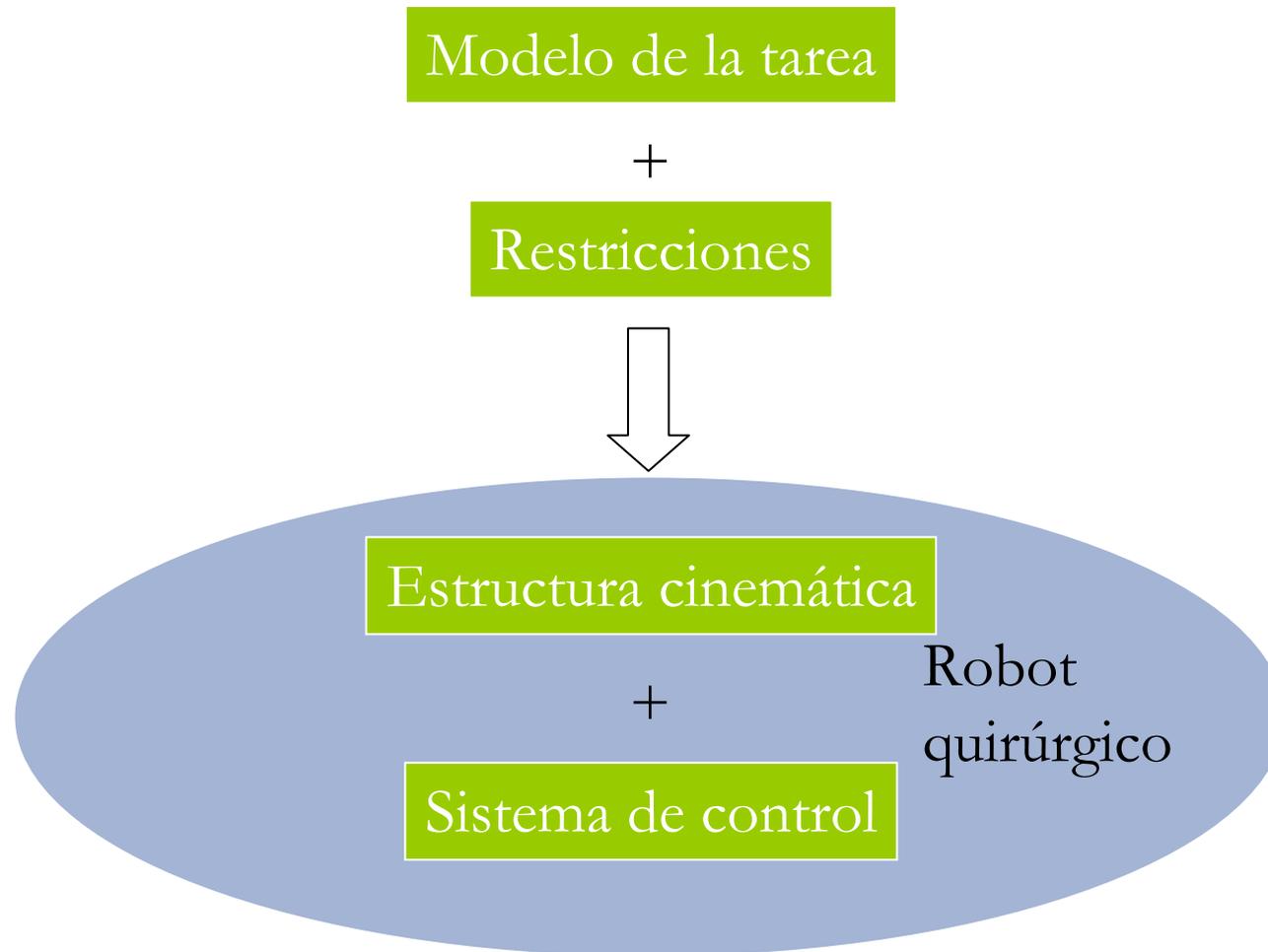
Lapman (MedSYS)



La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

5. Diseño cinemático de un robot laparoscópico.

Diseño cinemático del robot



Especificaciones

- No exigir que el cirujano cambie su técnica
- Polivalencia
- Aumentar las capacidades del cirujano
- Fácil integración en un quirófano
- Seguridad

Especificaciones

- No exigir que el cirujano cambie su técnica
 - Polivalencia
 - Aumentar las capacidades del cirujano
 - Fácil integración en un quirófano
 - Seguridad
- Compatible con las restricciones cinemáticas del punto de entrada.
 - Posicionamiento independiente de la mesa de operaciones.
 - Múltiples configuraciones de trabajo.
 - Espacio de trabajo suficiente.

Especificaciones

- No exigir que el cirujano cambie su técnica
- Polivalencia
- Aumentar las capacidades del cirujano
- Fácil integración en un quirófano
- Seguridad

- Mejorar la calidad de la imagen.
- Mejorar la coordinación.

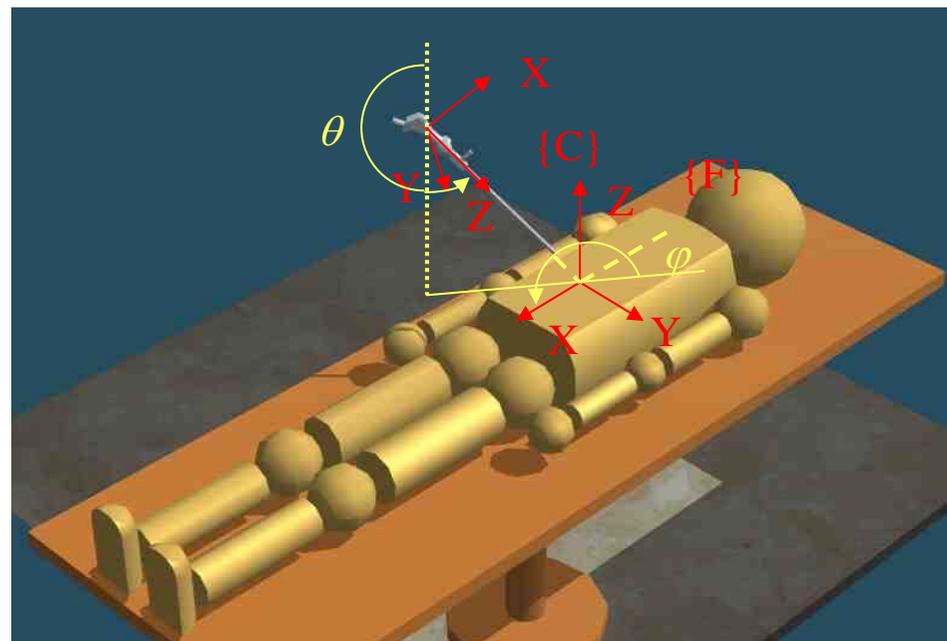
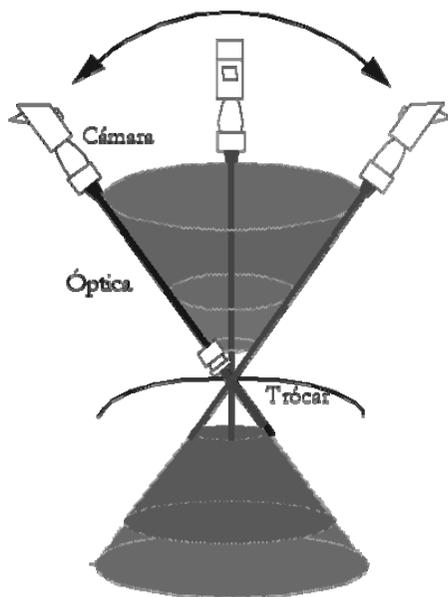
Especificaciones

- No exigir que el cirujano cambie su técnica
 - Polivalencia
 - Aumentar las capacidades del cirujano
 - Fácil integración en un quirófano
 - Seguridad
- No interferir con el personal quirúrgico.
 - Poco voluminoso.
 - Esterilizable y de fácil limpieza.
 - Fácil conversión del procedimiento.
 - Capacidad de funcionar plenamente con los medios disponibles en un quirófano convencional.

Especificaciones

- No exigir que el cirujano cambie su técnica
 - Polivalencia
 - Aumentar las capacidades del cirujano
 - Fácil integración en un quirófano
 - Seguridad
- Mínima necesidad de atención del cirujano.
 - Seguridad tanto para el paciente como para el equipo médico.
 - Mínimo número de grados de libertad articulares, y de actuadores.

Modelo geométrico de la tarea



Restricciones:

$$105^\circ \leq \theta \leq 255^\circ$$

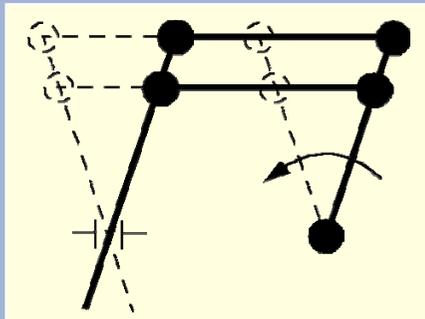
$$L_{ET} \leq p \leq L_{lap}$$

$$\psi = 0$$

Diseño de la muñeca

- Obtener una estructura cinemática compatible con el modelo de la tarea.
- Desacoplo cinemático.
- Tres alternativas en el diseño de la muñeca: sólo dos utilizadas en la literatura.

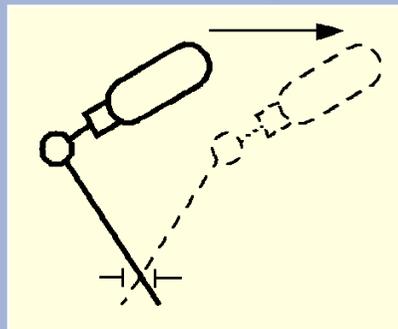
Centro remoto de rotación



Características:

- Control más fácil.
- Diseño y construcción simple.
- Mayor volumen.
- Mayor número de uniones articuladas.

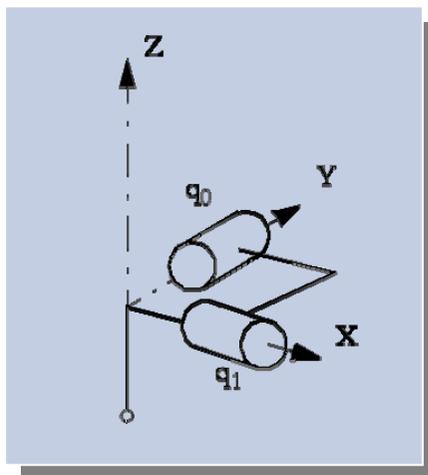
Articulaciones pasivas



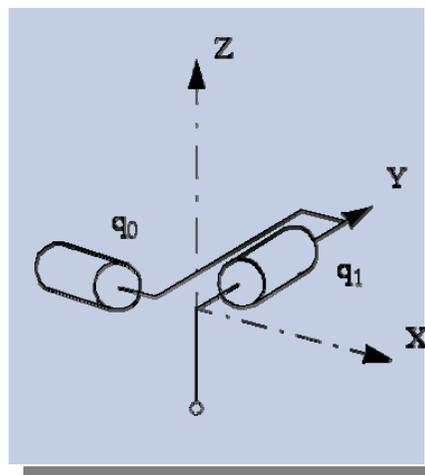
Características:

- Acomodación natural a las restricciones del punto de entrada.
- Orientación ligada a la posición de la muñeca.
- Menor número de actuadores.
- Volumen reducido.

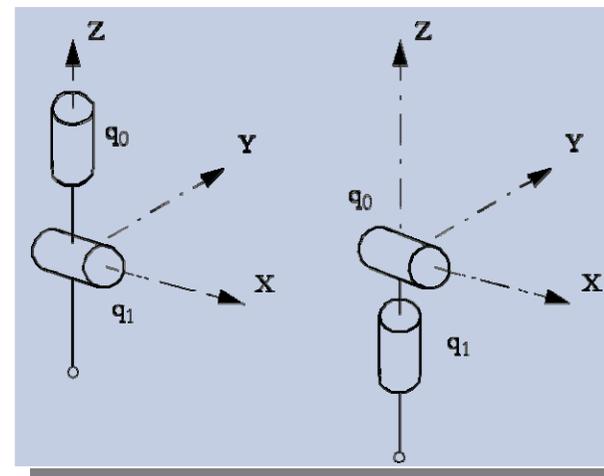
Configuración de la muñeca



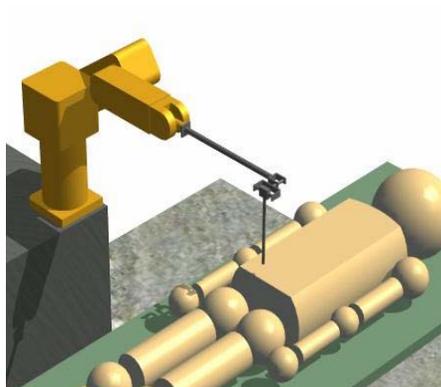
Sistema ISA



Sistema AESOP

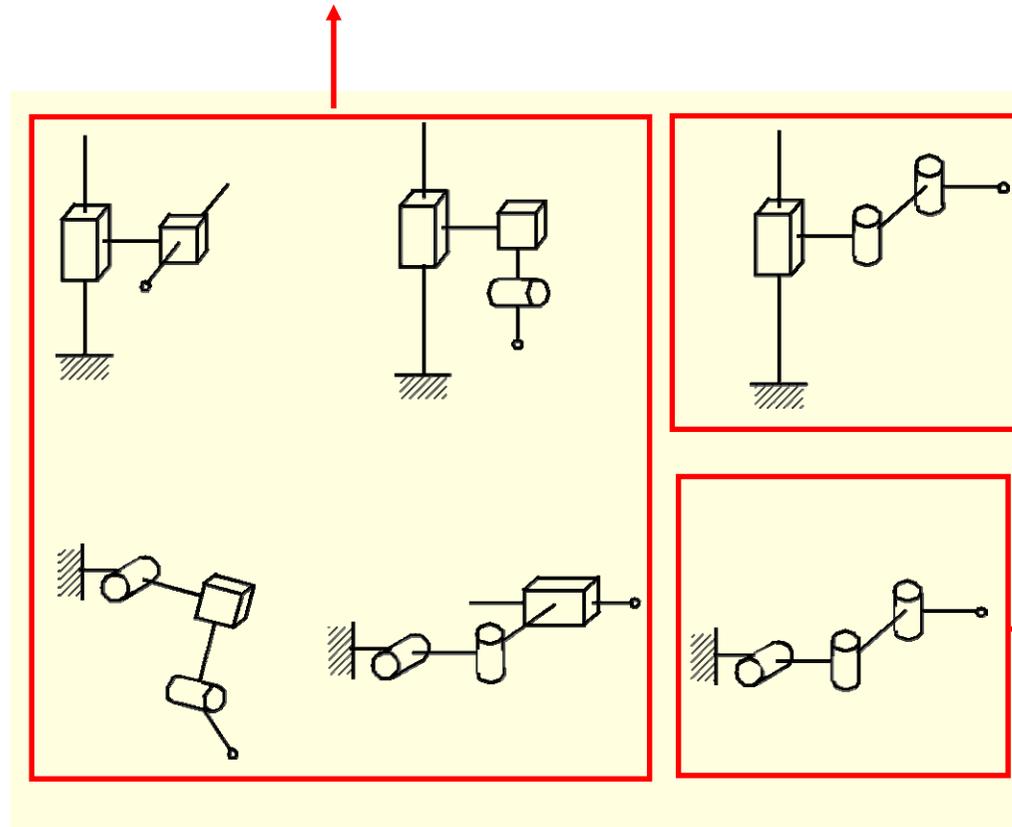


Sistema ERM



Configuración de la posición

- Pueden equilibrarse estáticamente.
- Articulaciones prismáticas sobre el campo quirúrgico.

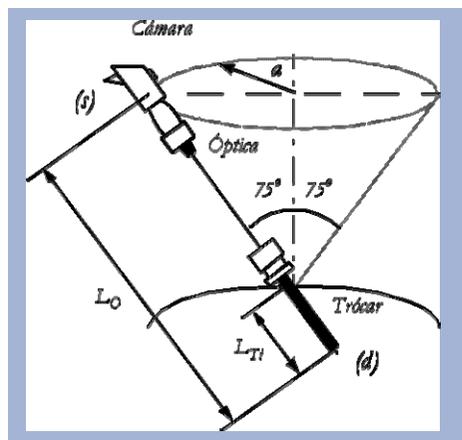


ERM

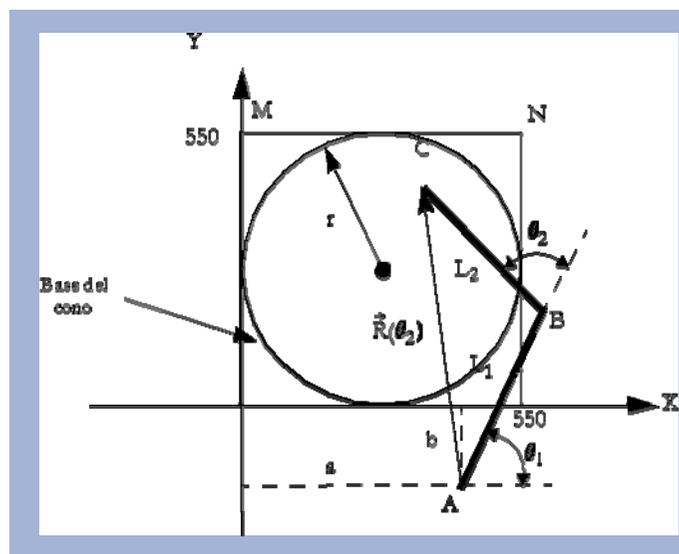
- Equilibrado de forma natural, salvo en la primera articulación.
- Puede dimensionarse para obtener una estructura compacta y ligera.

- Mayor potencia de actuación.
- También puede equilibrarse estáticamente.

Dimensiones de la posición



Espacio de trabajo del laparoscopio



El robot debe situar el laparoscopio en cualquier punto del espacio de trabajo de éste.

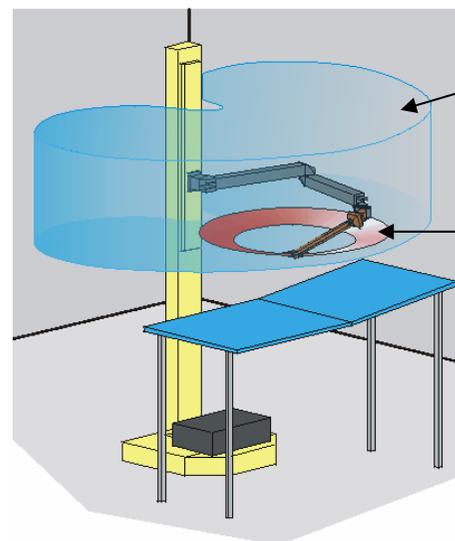
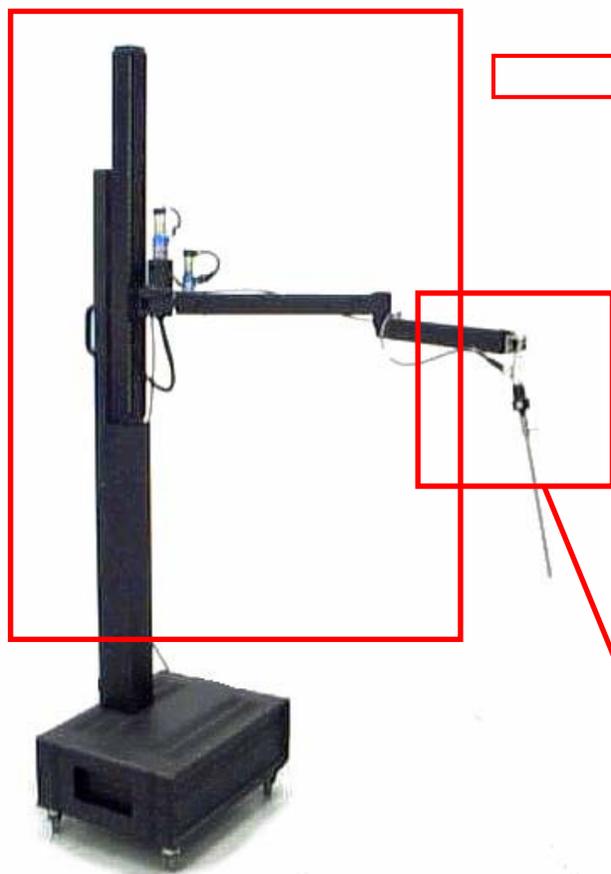
Consideración del caso más desfavorable:

$$L_1 = L_2 \approx 530 \text{ mm}$$

Grado de libertad prismático:

- Recorrido al menos igual a la profundidad de un abdomen humano.
- ERM: desplazador lineal de 700 mm.

El sistema ERM



Espacio de
trabajo del
manipulador

Espacio de
trabajo
exterior del
laparoscopio

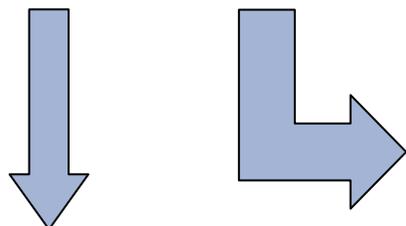


Validación cinemática

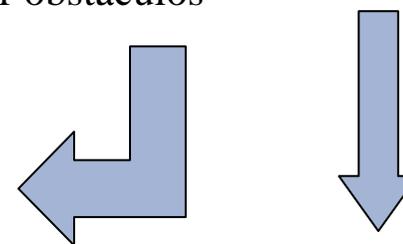
Espacio de configuraciones C del robot

Subconjunto $T(q)$ de todas las configuraciones $q = (q_1, q_2, q_3)$ que adopta el robot para completar la tarea

Subconjunto $B(q)$ de todas las configuraciones del espacio C ocupadas por obstáculos

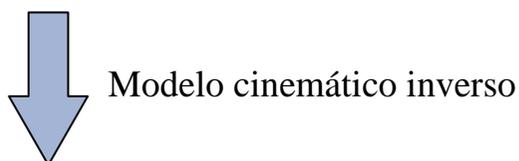


Si $T(q) \cap B(q) = \emptyset$, entonces el robot es compatible con la tarea



Espacio de trabajo cartesiano de la tarea

Obstáculos considerados:
cirujano principal y su ayudante



Coordenadas articulares

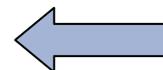
Test de colisiones



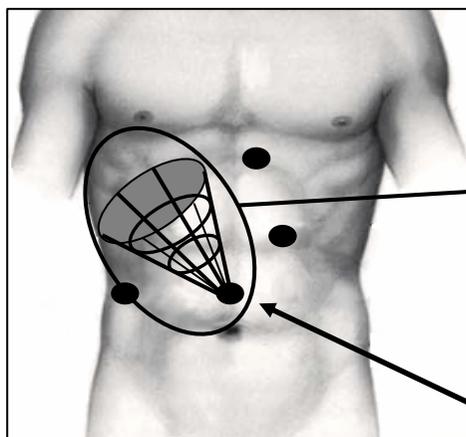
Configuraciones límite del robot para evitar una colisión



Representación gráfica

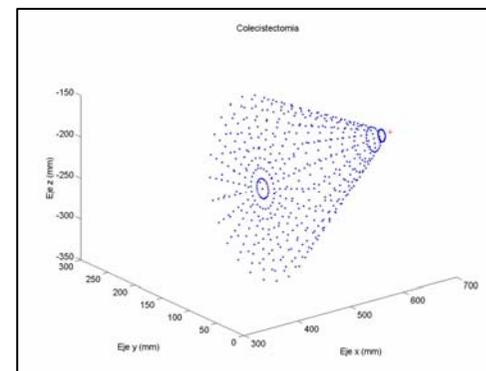


Validación cinemática



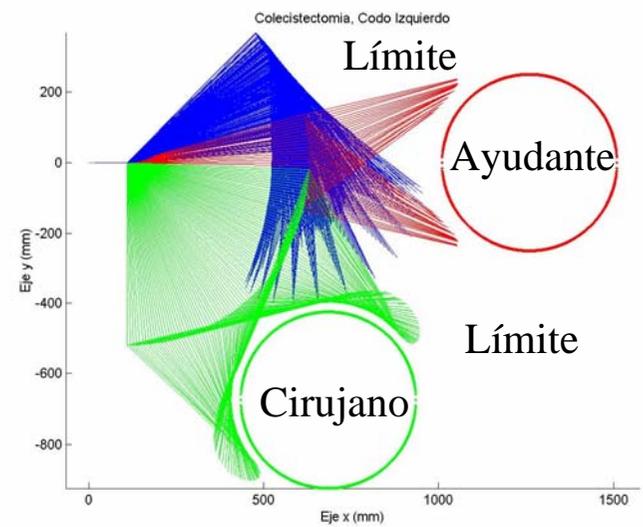
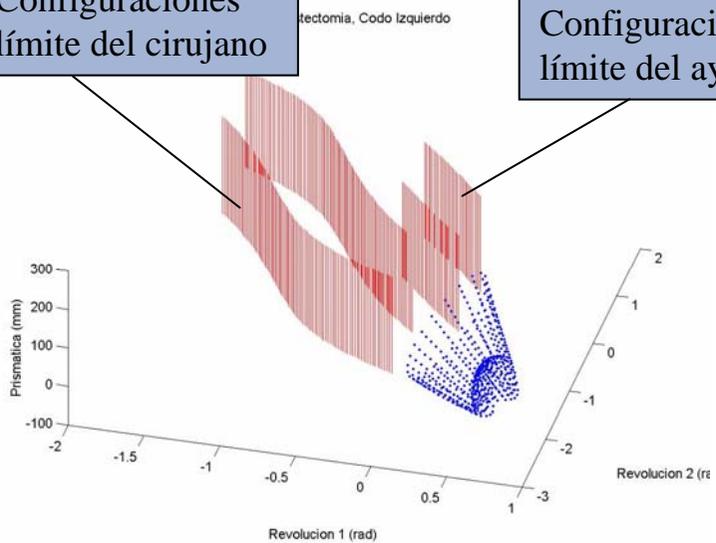
Espacio de trabajo requerido

Inserción de la cámara



Configuraciones límite del cirujano

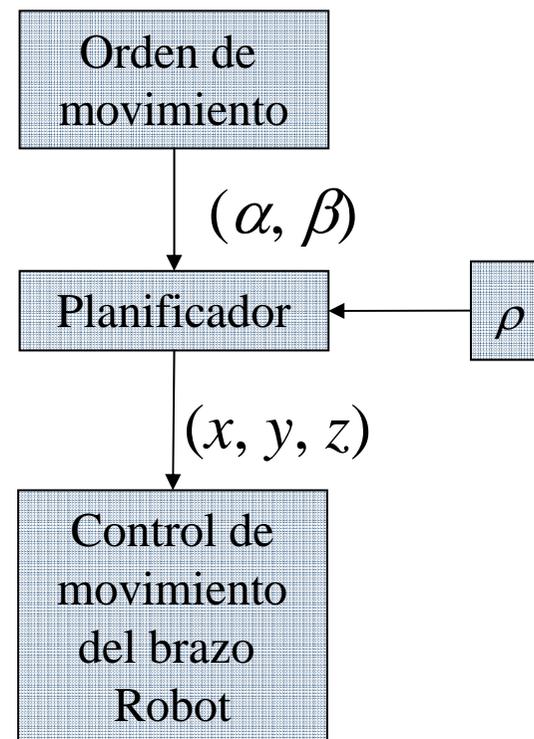
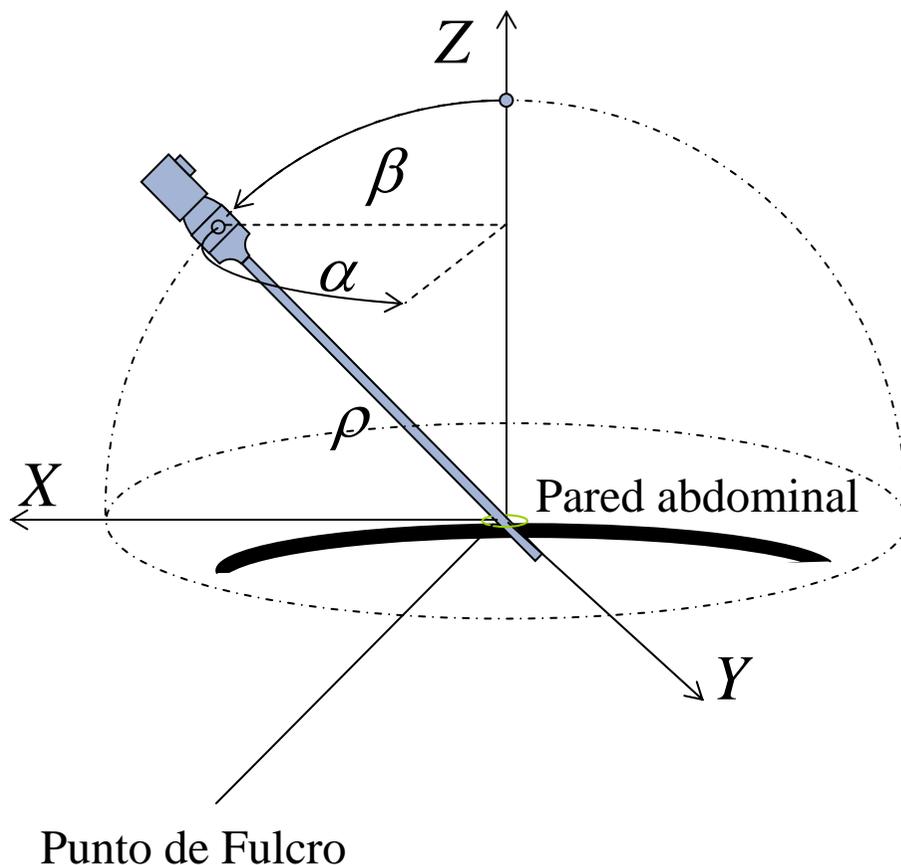
Configuraciones límite del ayudante



La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

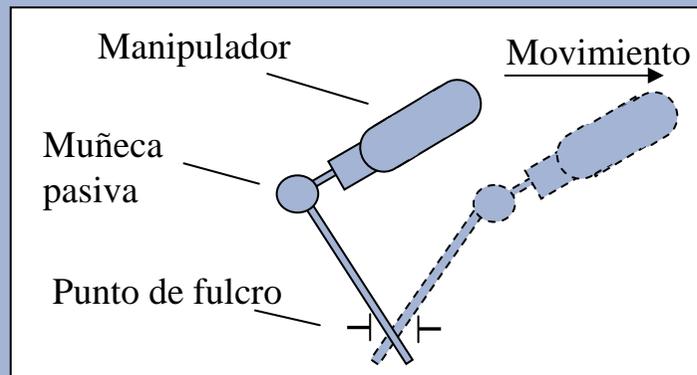
6. Control de movimientos

Movimientos esféricos de la herramienta



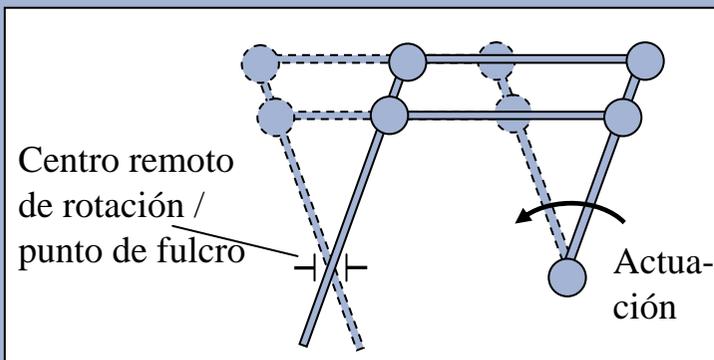
Diseño de la muñeca

Muñeca pasiva



- Acomodación al punto de fulcro.
- No se ejercen fuerzas en el fulcro.
- El error de posición depende de la penetración estimada.

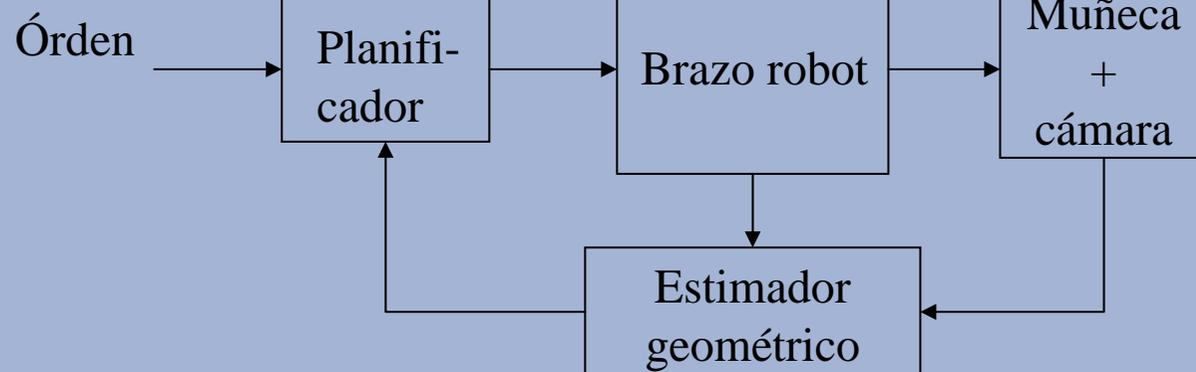
Muñeca activa



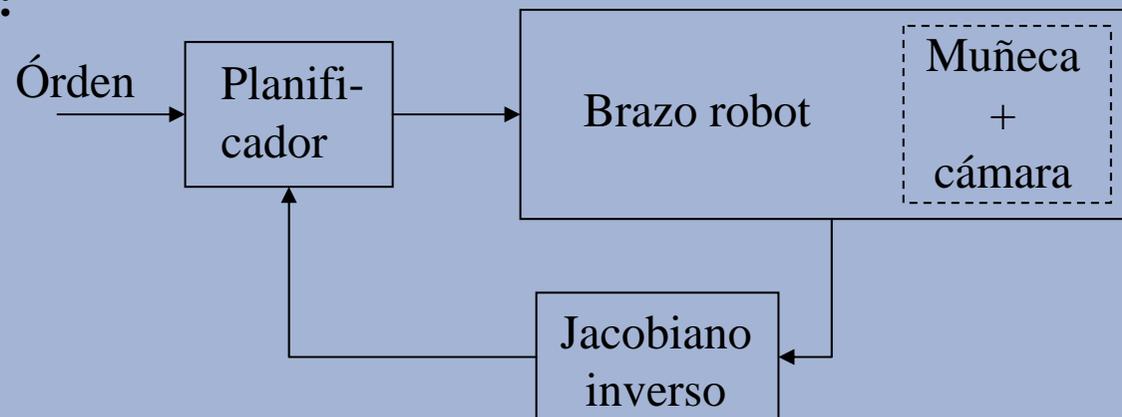
- Centro de rotación remoto.
- El fulcro se encuentra localizado.
- Se requiere calibrar el robot.
- Posibles fuerzas no deseadas.

Esquemas de control clásicos

Muñeca pasiva:



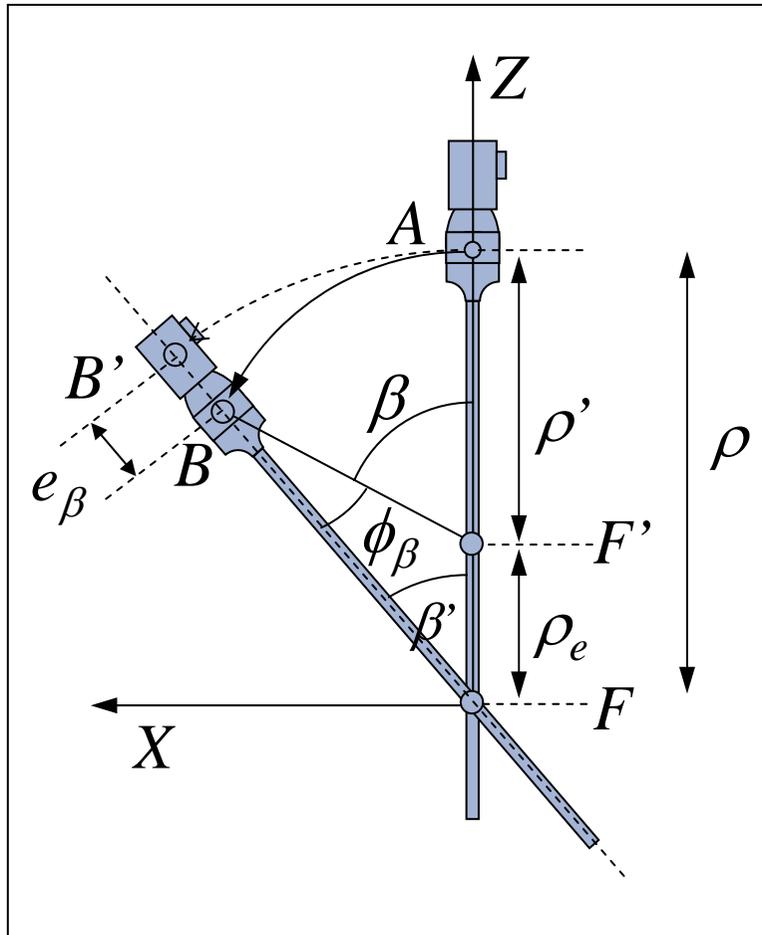
Muñeca activa:



El error de penetración

- Influencia del error ρ en la posición:
 - Errores de Orientación/altitud (α y β).
 - Cambios en la penetración.
 - Acoplamiento de los dos efectos anteriores.
- Conclusiones:
 - Posee una influencia considerable sobre la precisión de la orientación y de la altitud.
 - Efecto despreciable de acoplamiento.

Modelo geométrico del error



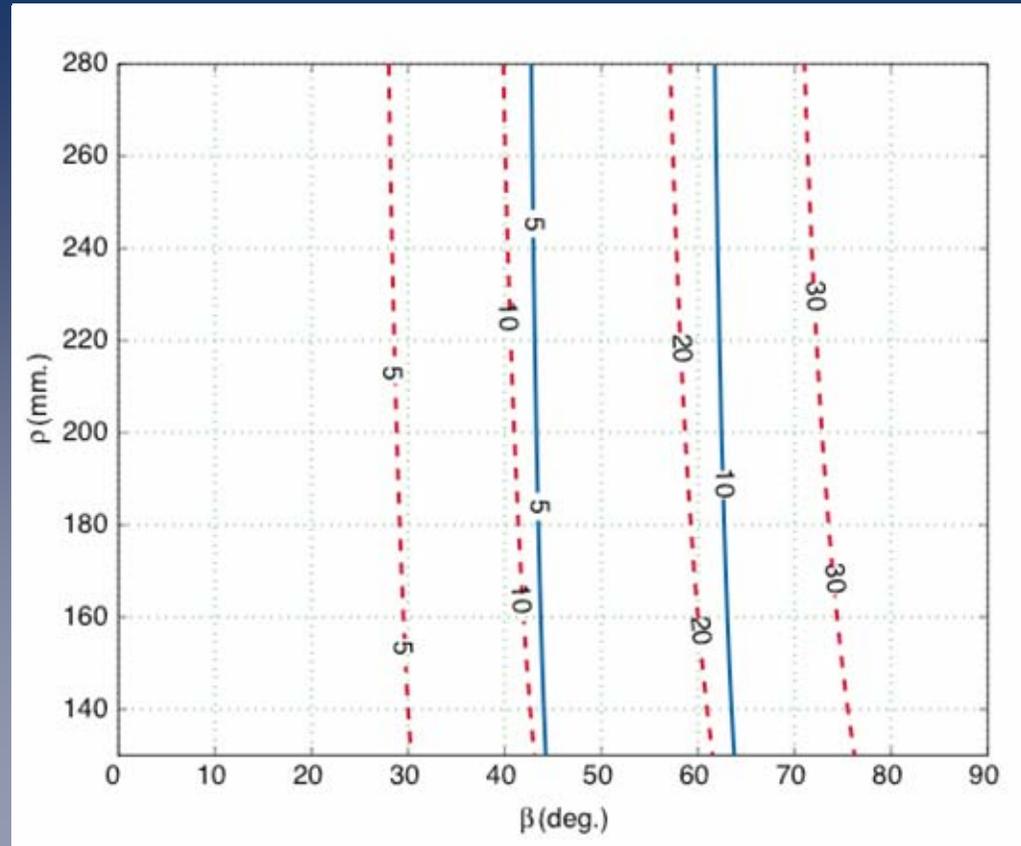
- Error de altitud ϕ_β :
 - Si ρ_e es positivo, entonces ϕ_β es mayor que cero.
- Error de inserción e_β :
 - Un valor de ρ_e positivo implica una penetración excesiva del extremo de la óptica.

Error en orientación

Para $\rho_e = 20$ mm ————

 Para $\rho_e = 50$ mm - - - -

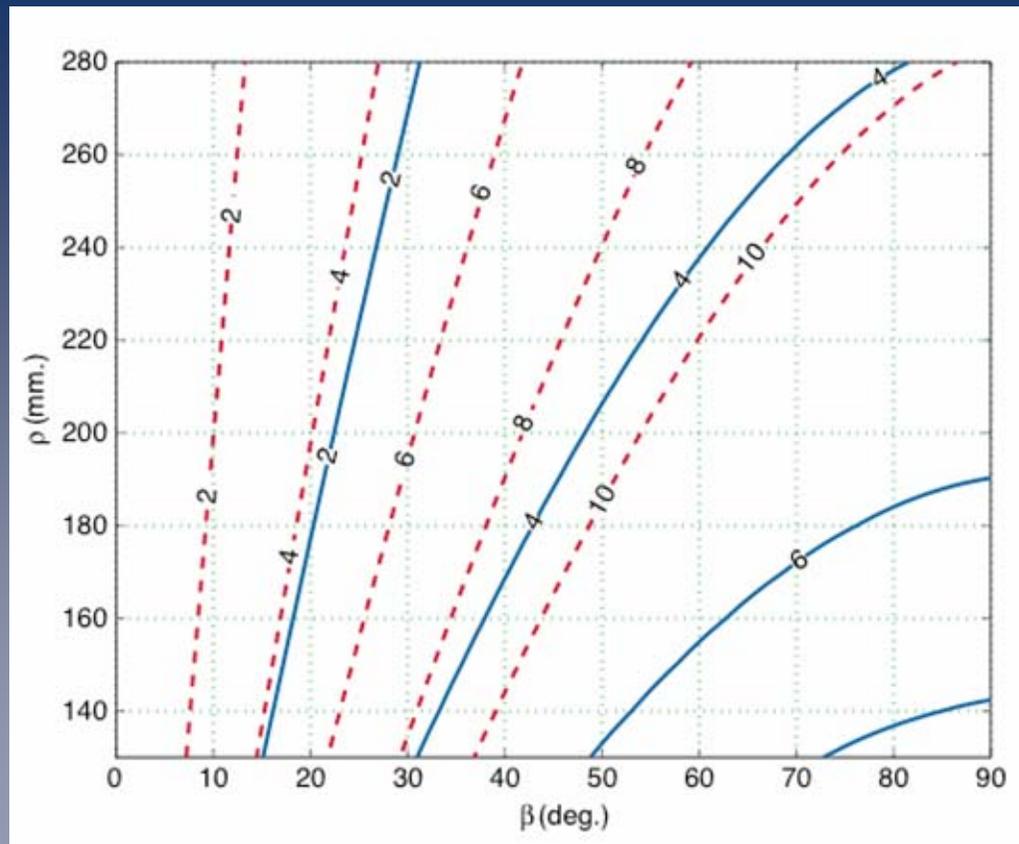
$$\phi_\beta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\rho_e \cdot \sin(\beta)}{\rho + \rho_e \cdot \cos(\beta)} \right)$$



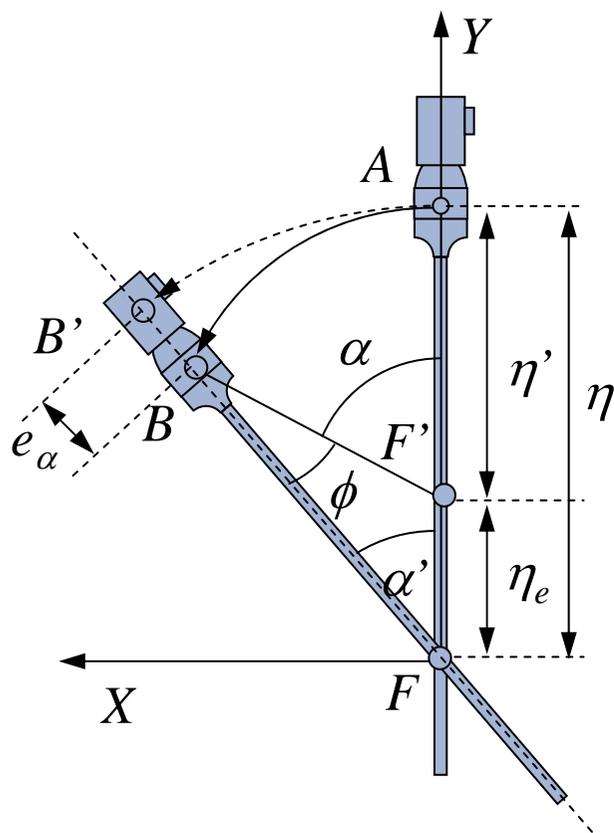
Cambios en la penetración

Para $\rho_e = 20 \text{ mm}$ ————
 Para $\rho_e = 50 \text{ mm}$ - - - -

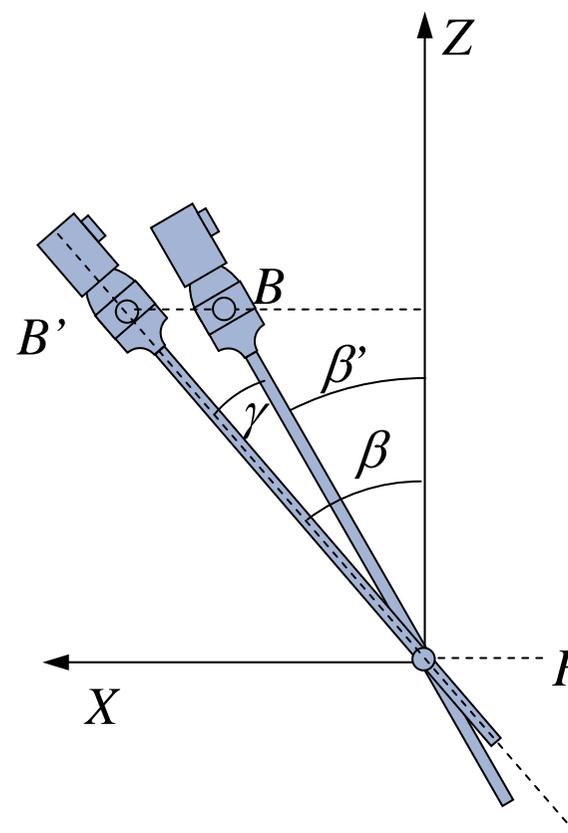
$$e_\beta = \rho' - \|B\|$$



Acoplamiento orientación/altitud



Vista en planta

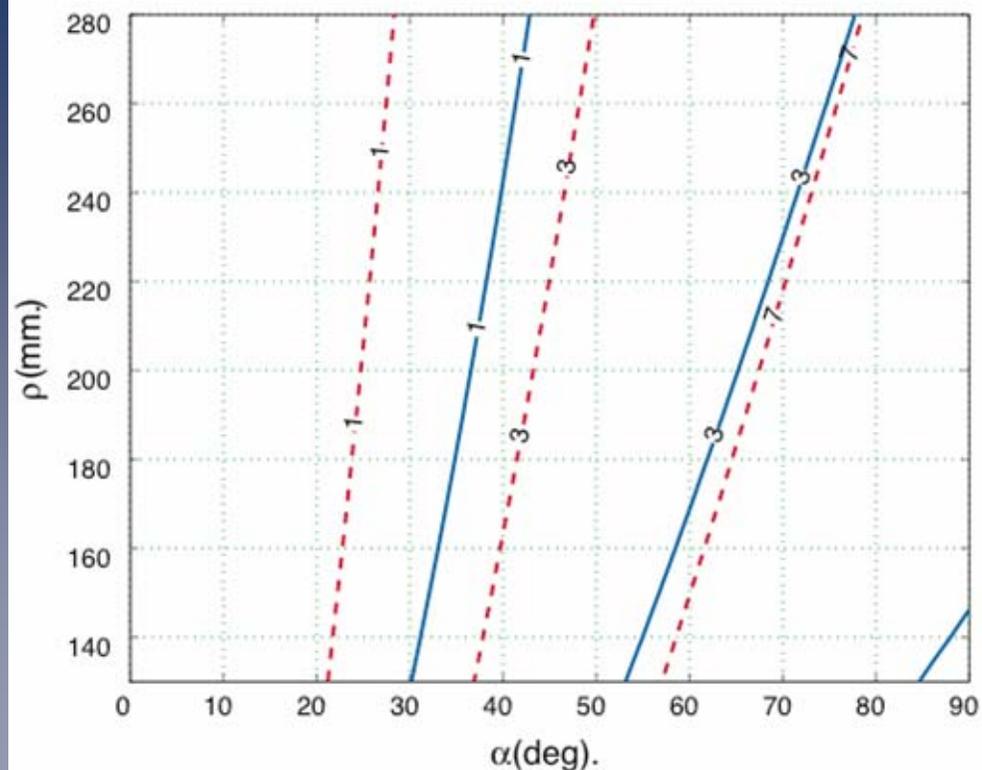


Vista de perfil

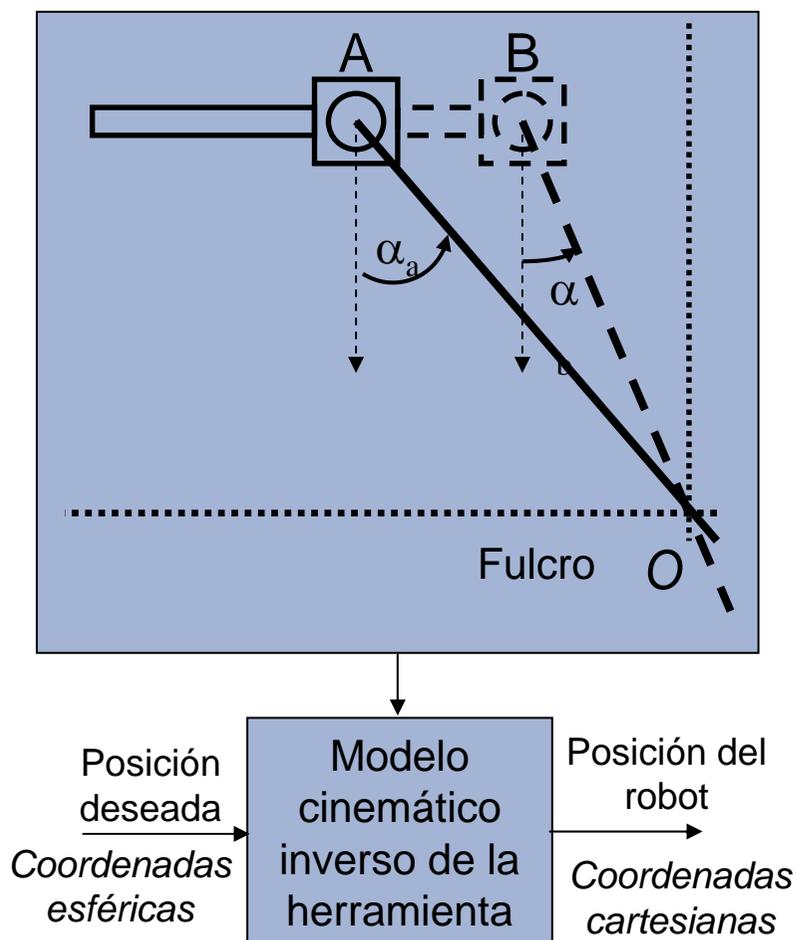
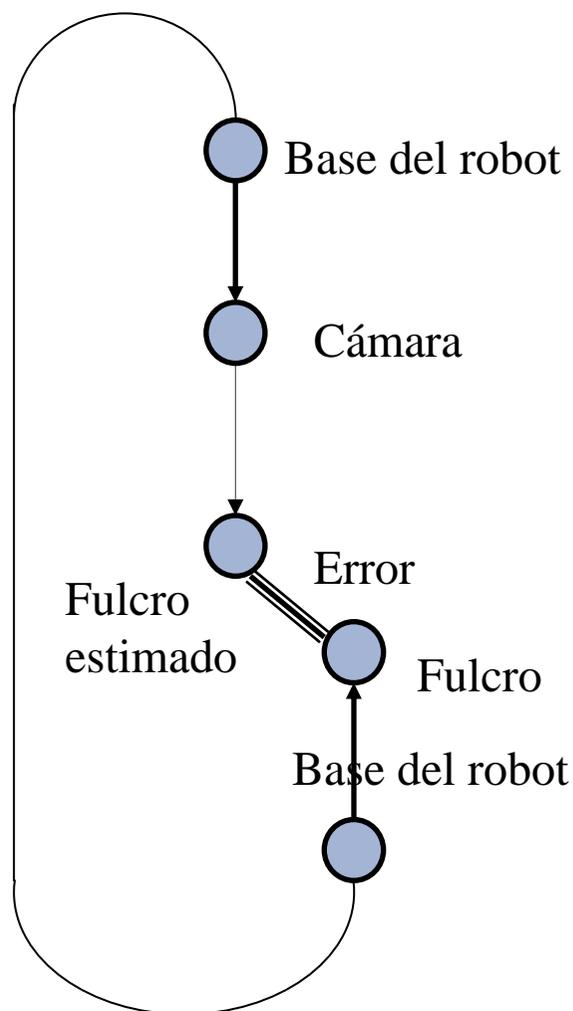
Acoplamiento entre α y β para $\beta=10$ grados

Para $\rho_e = 20$ mm ————
 Para $\rho_e = 50$ mm - - - -

$$\gamma = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\sin(\beta - \beta')}{\cos(\beta - \beta')} \right)$$



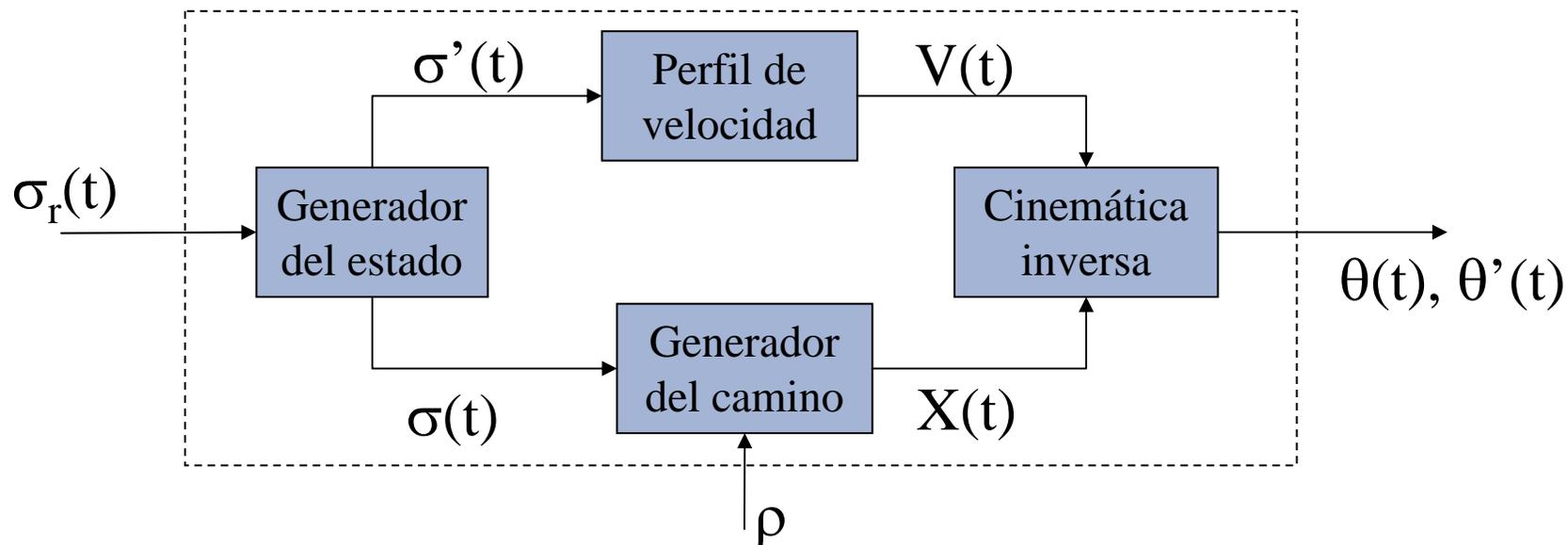
Control en bucle abierto



Controlador cartesiano adaptativo

- Compensa los errores de orientación y altitud debidos a la incertidumbre en la posición del punto de fulcro.
- Control desacoplado para las variables esféricas de movimiento α y β .
- Asegura un comportamiento dinámico deseado en el transcurso de los movimientos.
- Utiliza un estimador de la distancia exterior ρ para ajustar de manera automática los parámetros del controlador.

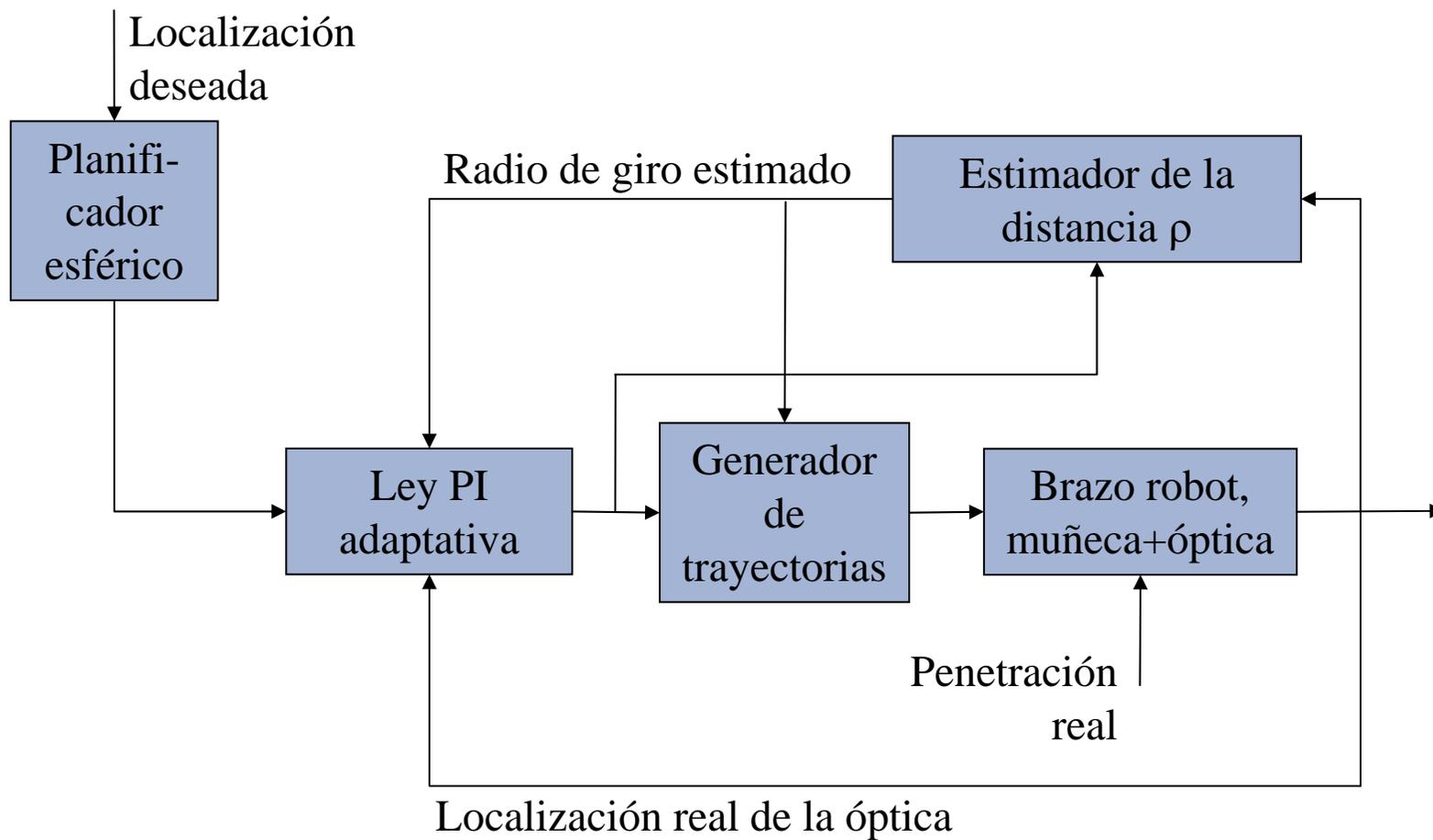
Generador de trayectorias



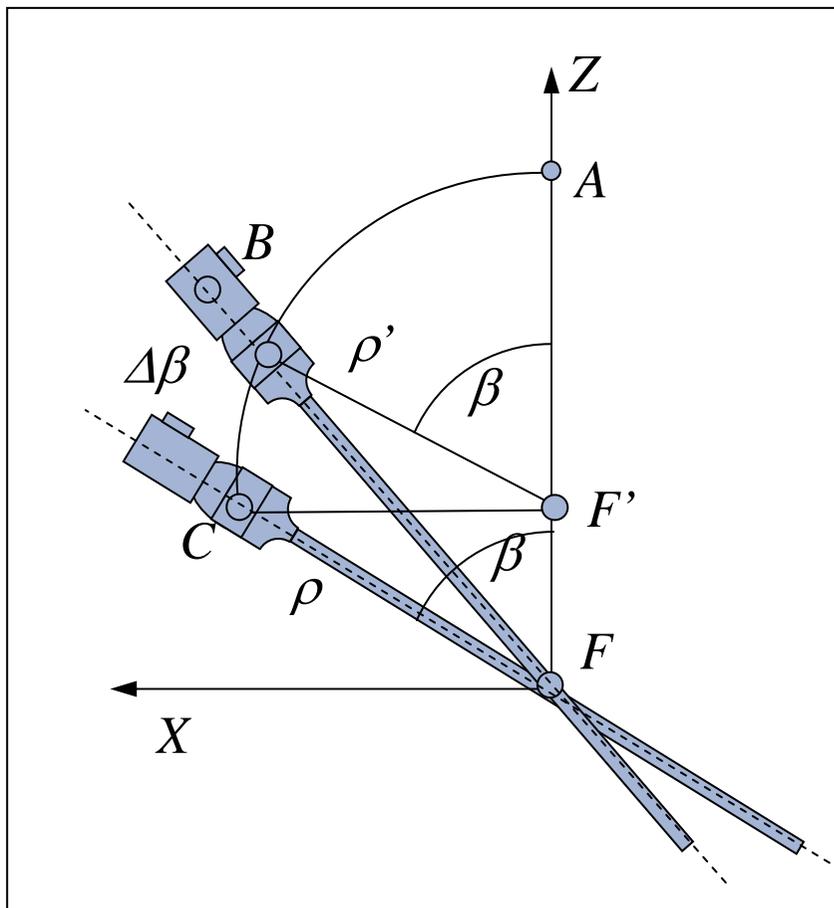
$$\sigma(t+T) = e^{\frac{-T}{\tau}} \sigma(t) + K \left(1 - e^{\frac{-T}{\tau}} \right) \sigma_r(t)$$

$$K = \frac{\rho}{\rho'} = \frac{\rho}{\rho + \rho_e} = 1$$

Esquema de control



Estimador de ρ



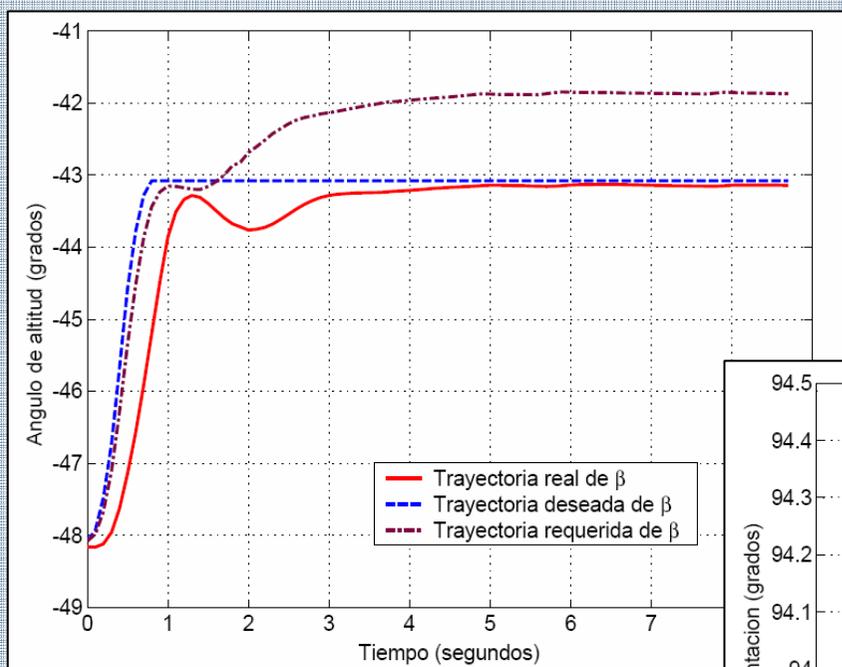
En la posición C:

$$\rho \cdot \sin(\beta) = \rho' \cdot \sin(\beta + \Delta\beta)$$

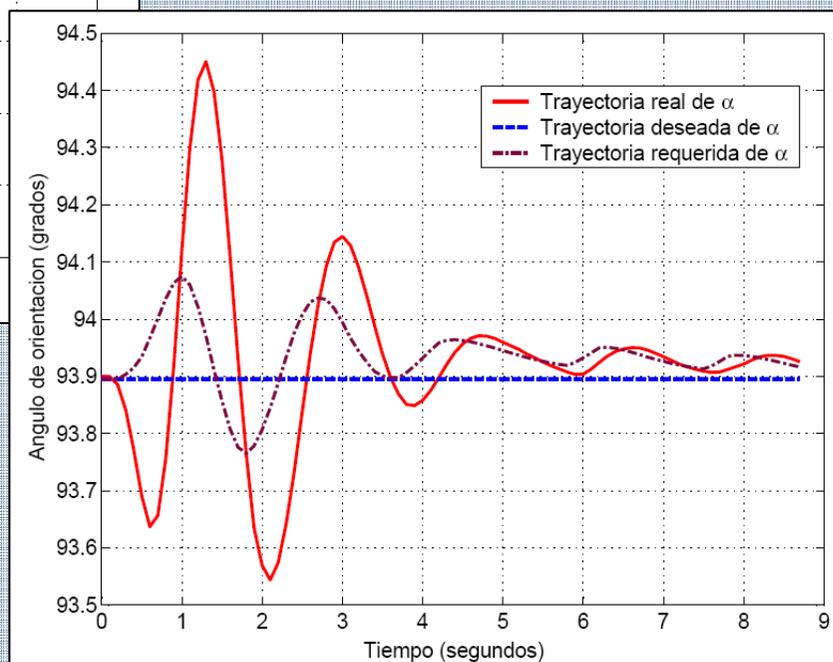
El estimador geométrico:

$$\rho = \rho' \cdot \left(\cos(\beta) \cdot \frac{\sin(\Delta\beta)}{\sin(\beta)} + \cos(\Delta\beta) \right)$$

Cambio de altitud

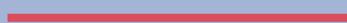


Resultados obtenidos para un movimiento de altitud de 5° , con $\rho_e=50$ mm y $\rho=260$ mm.



Cambio de orientación ($\rho_e = 50\text{mm}$)

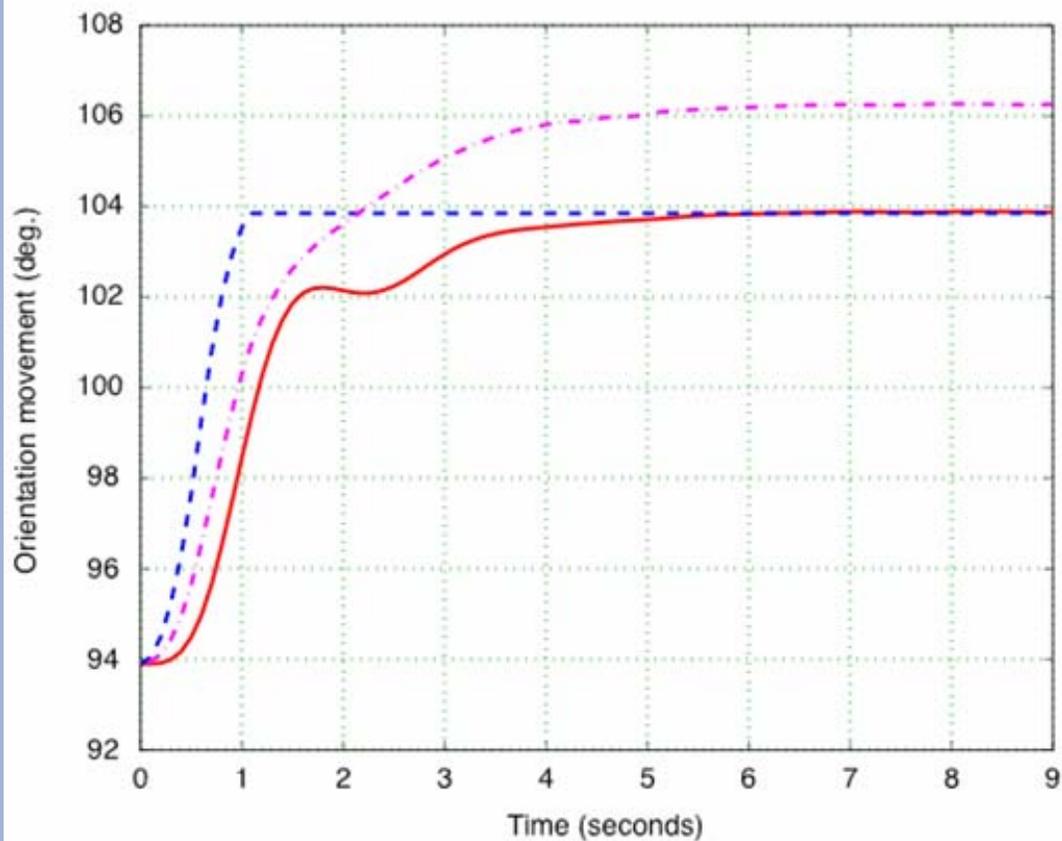
Trayectoria α



Referencia α



Control α

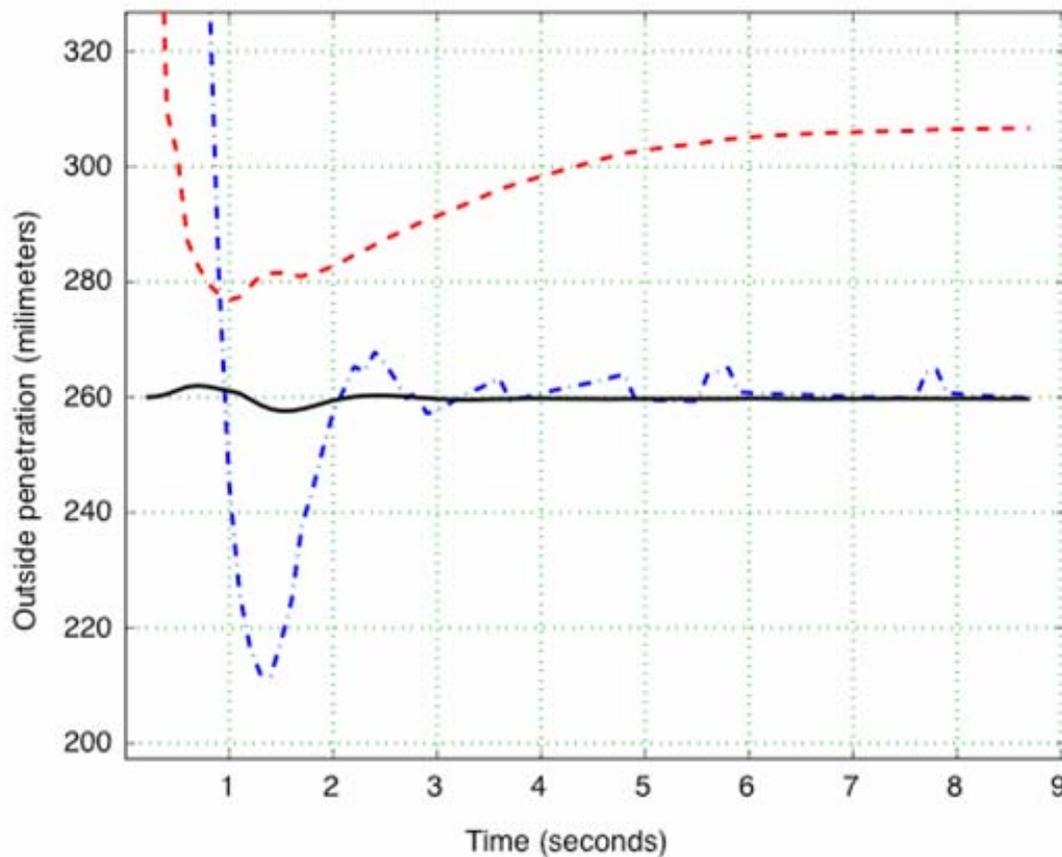


Estimador propuesto

ρ real

Mínimos
cuadrados

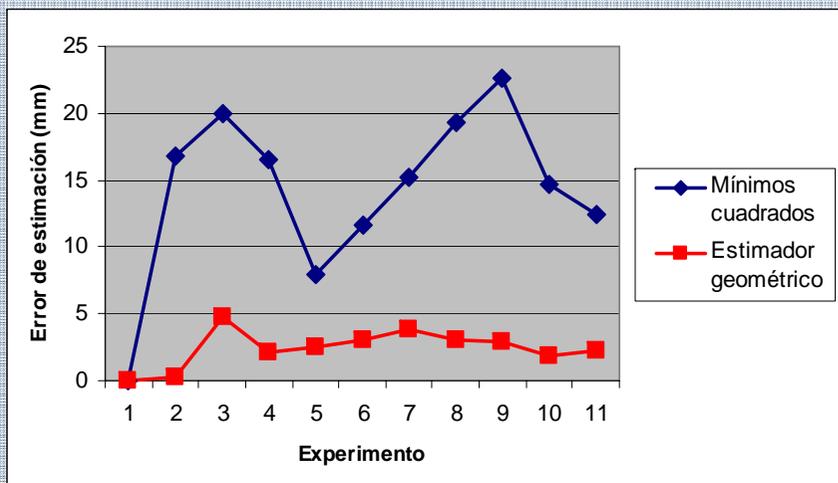
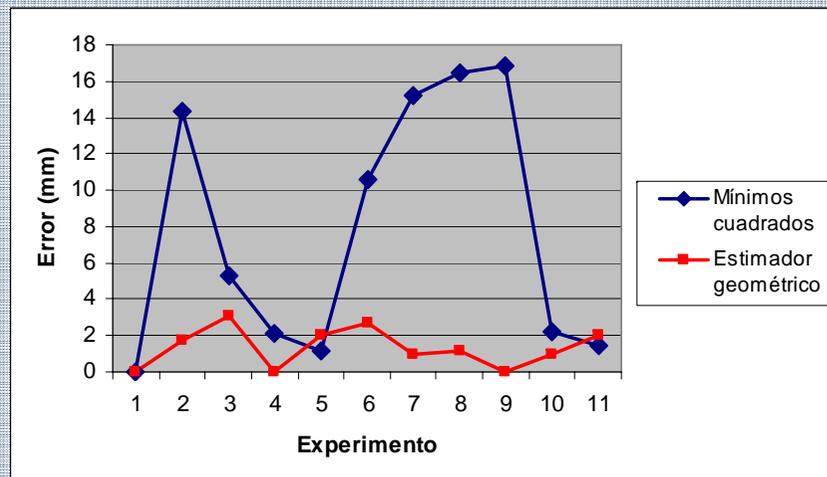
Estimador



Comparativa del estimador

Resultados en la estimación de la distancia exterior ρ

Estimación en un movimiento de orientación de 10° , con $\rho_e=50$ mm y $\rho=260$ mm.

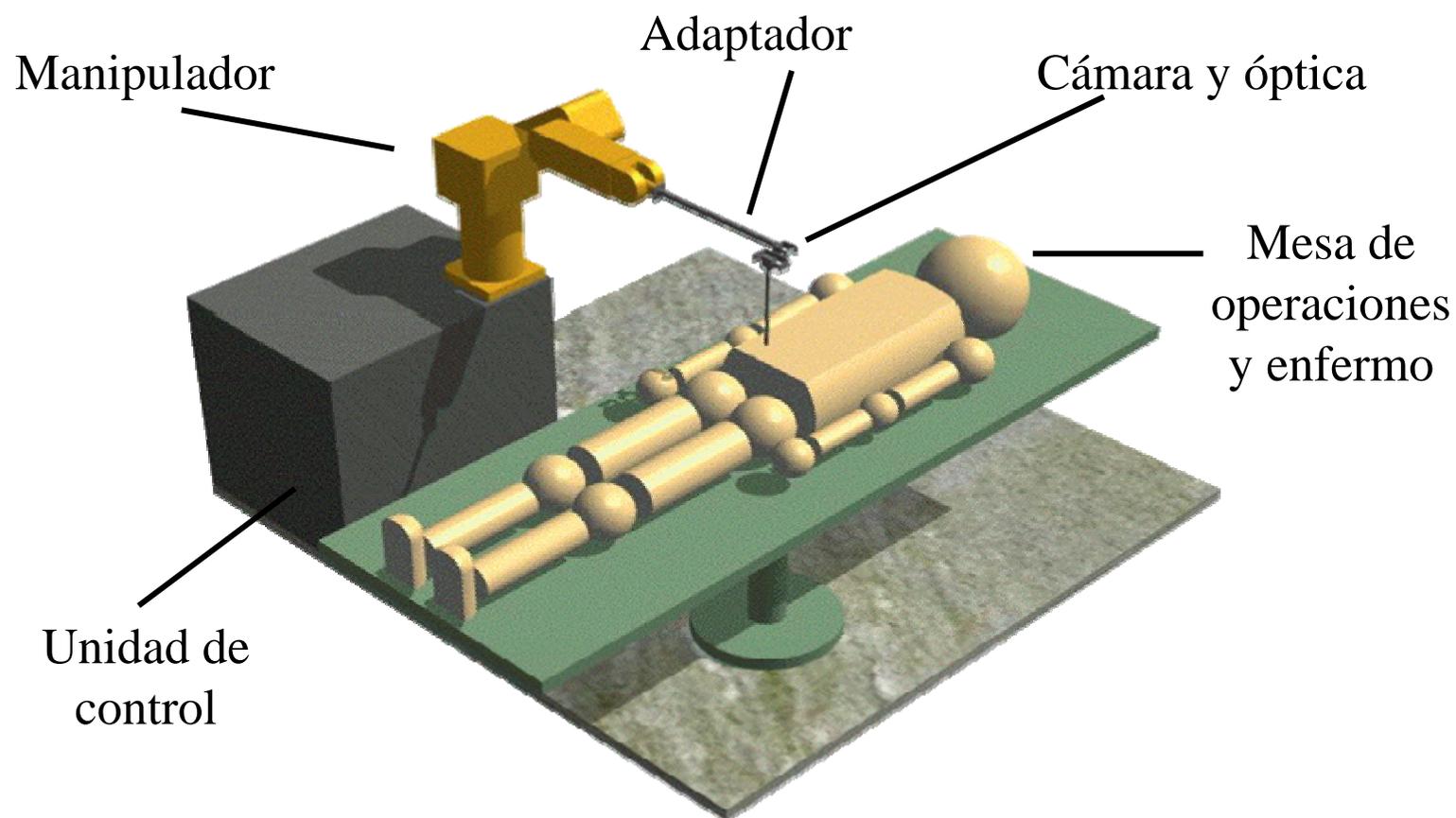


Estimación en un movimiento de altitud de 10° , con $\rho_e=50$ mm y $\rho=260$ mm.

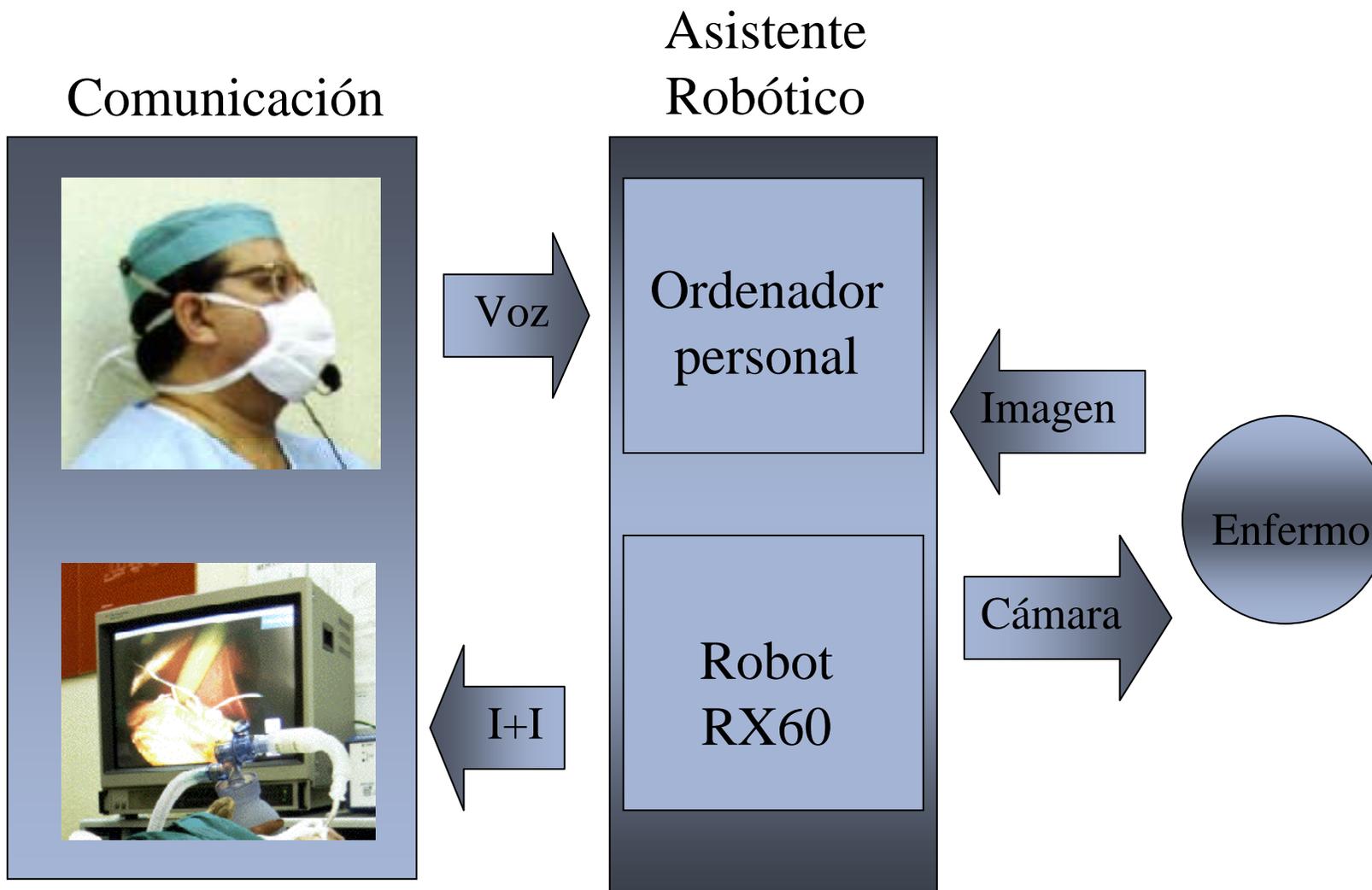
La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

7. Implantación y experimentos

El asistente ISA



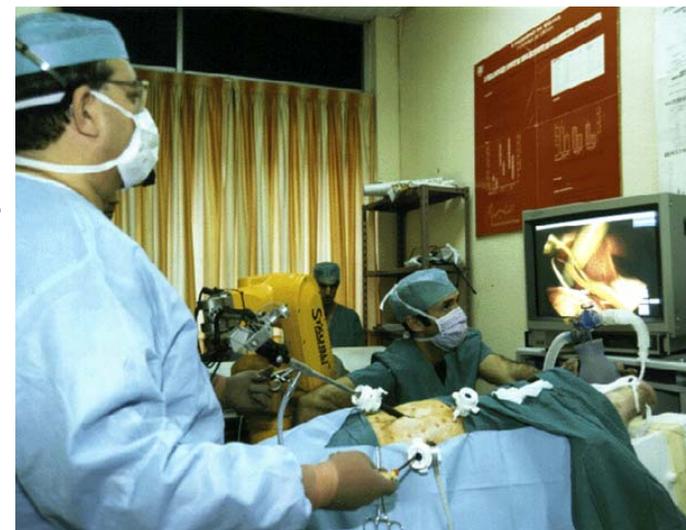
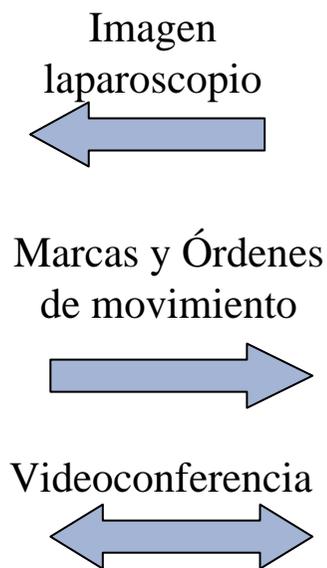
Esquema de funcionamiento



Teleoperación con control supervisor



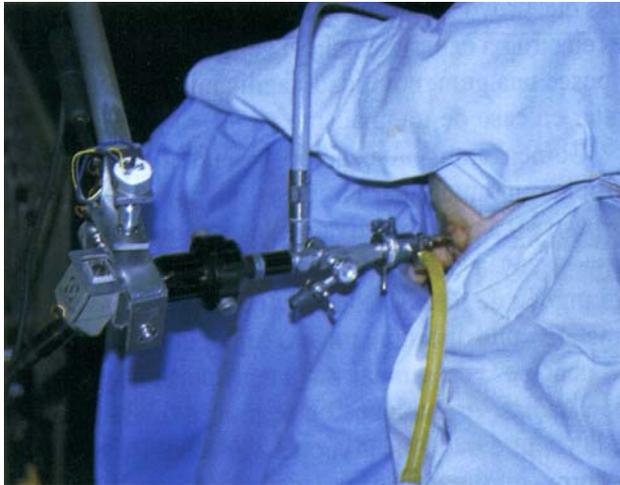
Cirujano remoto



Cirujano local

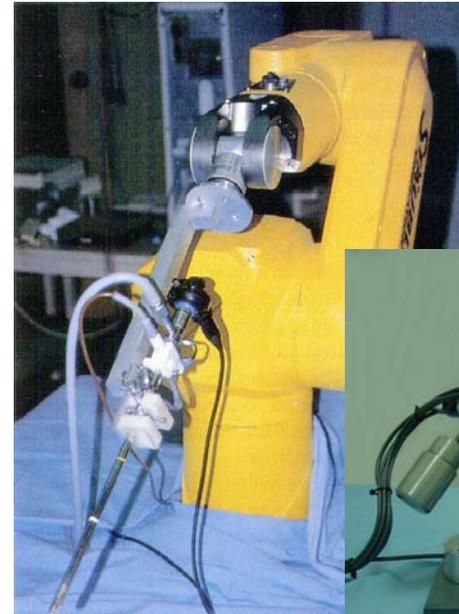
Colaboración.
Enseñanza.
Telediagnóstico activo.

Otras aplicaciones de ISA



- Cistoscopia
 - a) Movimientos menos precisos
 - b) Estimación del fulcro después de cada movimiento.

- Resección transuretral de la próstata:
 - a) Requiere movimientos muy precisos
 - b) Se a diseñado un brazo maestro para manejar el robot.
 - c) Sólo se ha realizado en simuladores de paciente



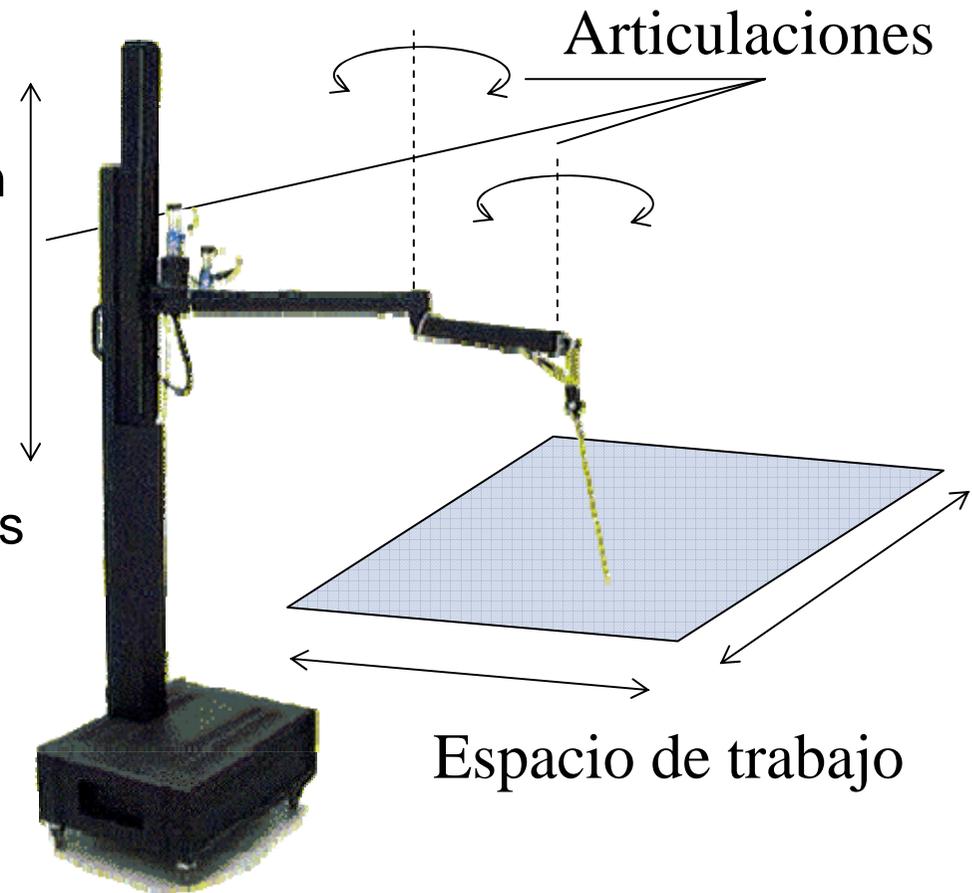
Experimentos con animales



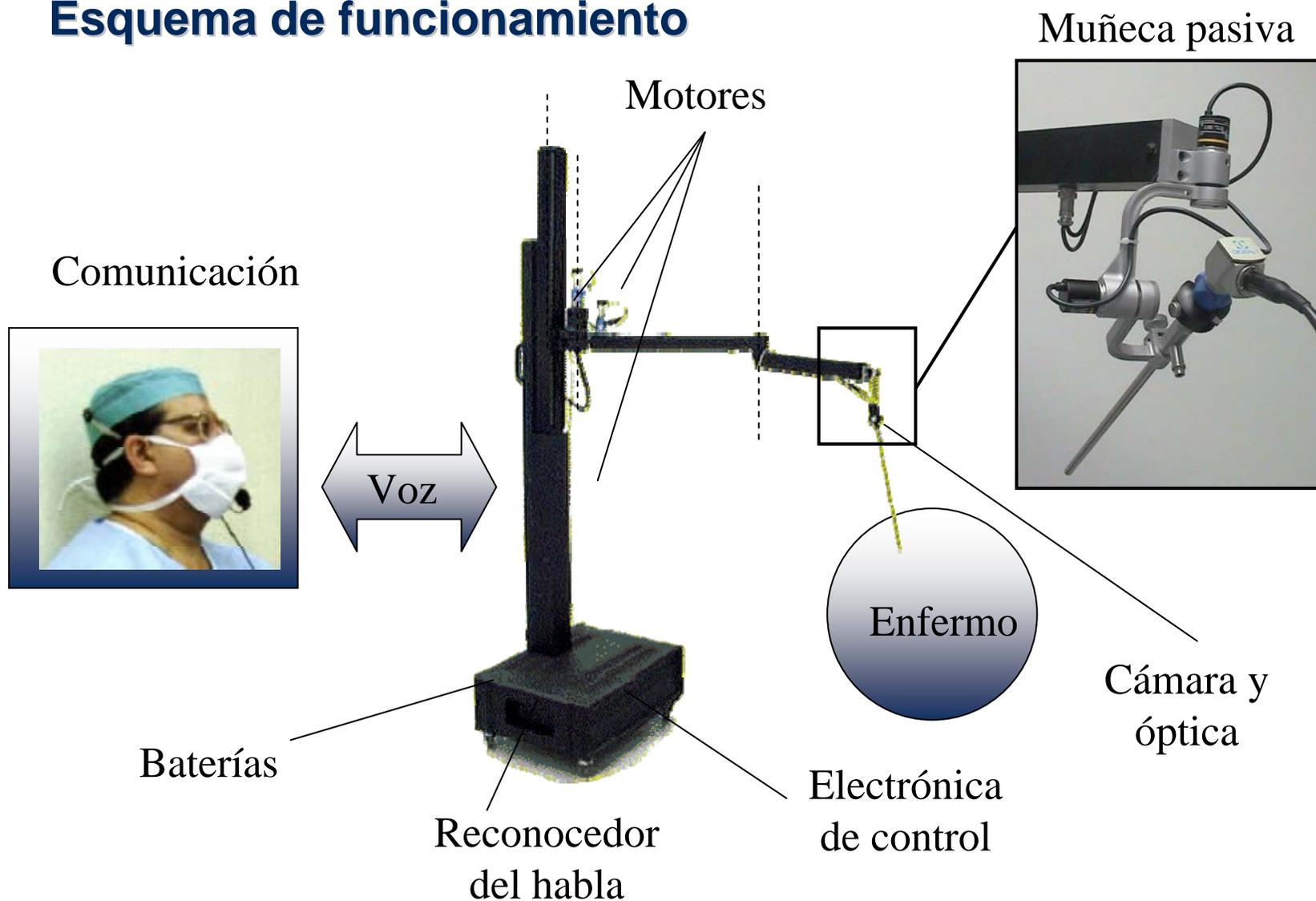
- Muy efectivo en los en los experimentos desarrollados.
- Voluminoso, y consumo elevado
- Requiere un computador externo.
- Alimentación externa.

El asistente ERM

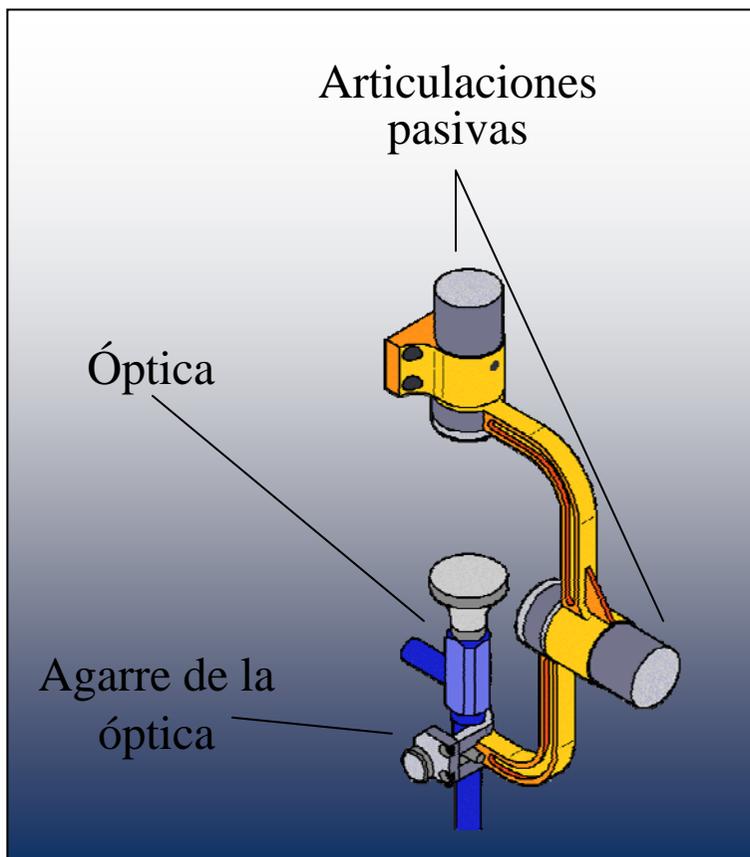
- Conserva las mismas prestaciones del prototipo anterior.
- No requiere de alimentación externa.
- Electrónica de control integrada dentro del propio brazo.
- Se adapta a las necesidades de espacio en el quirófano.



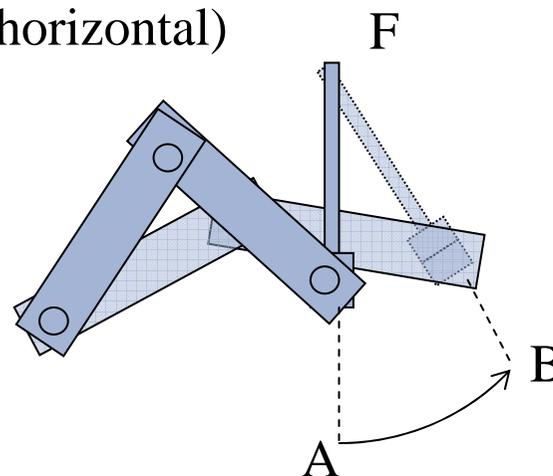
Esquema de funcionamiento



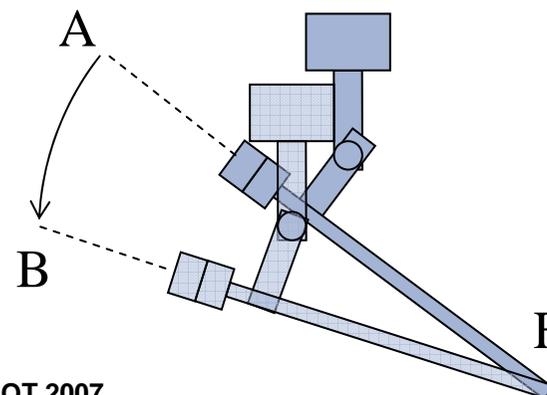
Muñeca pasiva del asistente ERM



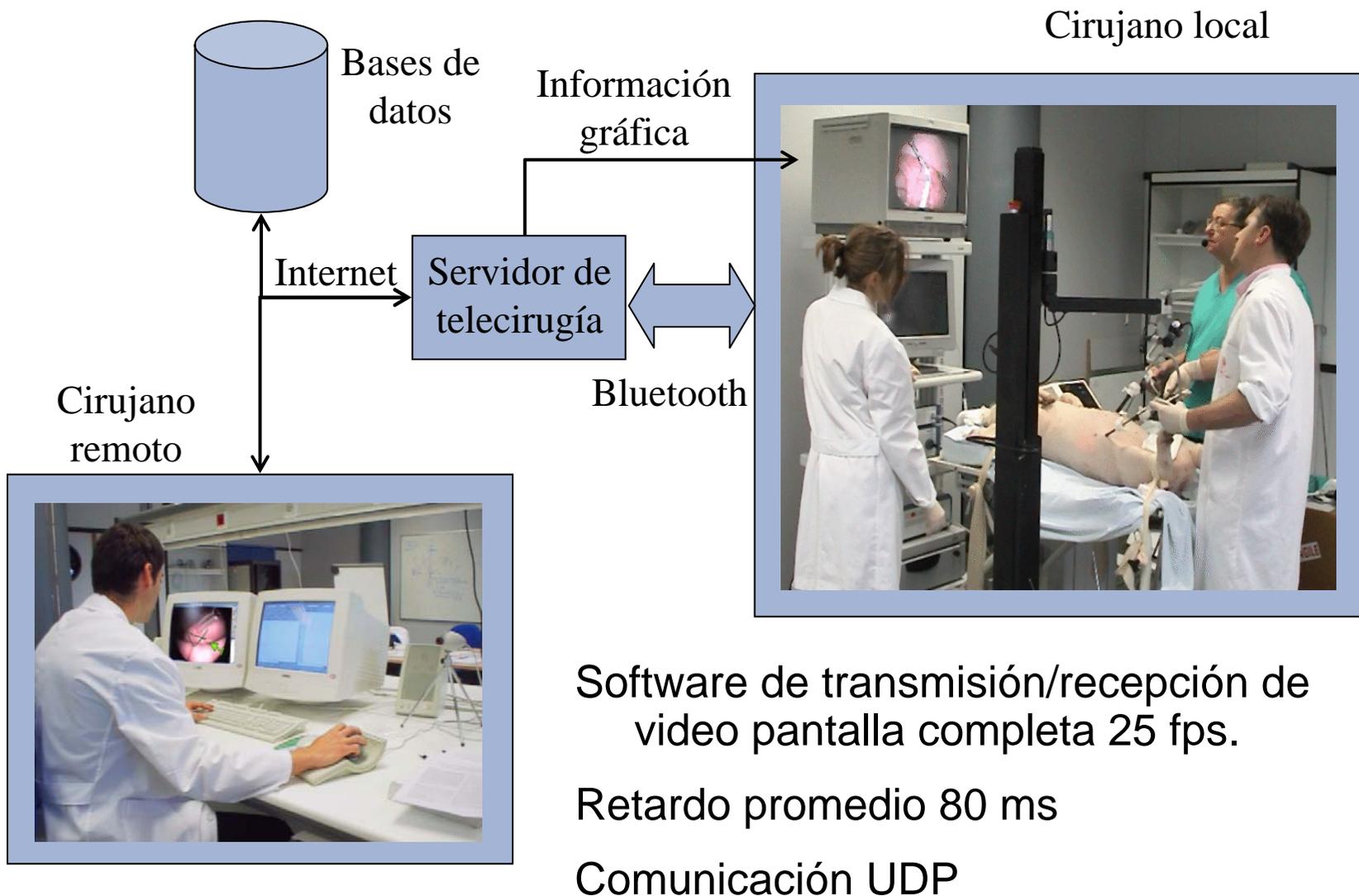
Movimiento de orientación
(horizontal)



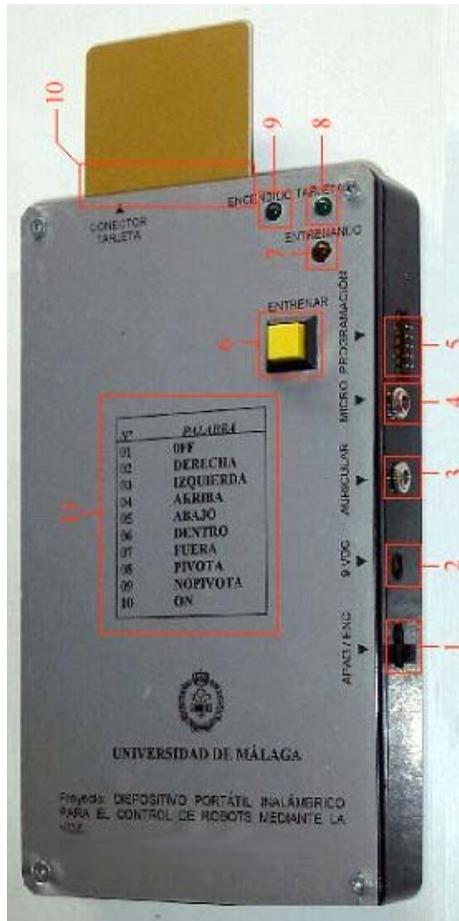
Movimiento de altitud
(vertical)



Esquema de tele-asesoramiento



Control por voz bluetooth



1. Conmutador de encendido/apagado.
2. Conector de alimentación externa. 9Vdc.
3. Conector para auricular.
4. Conector para micrófono.
5. Conector para la programación externa.
6. Pulsador de entrenamiento.
7. Indicador del estado de entrenamiento.
8. Indicador de inserción de tarjeta.
9. Indicador de encendido.
10. Conector para la inserción de tarjetas.
11. Etiqueta para entrenamiento.



Interfase basado en PDA

Experimentos realizados in-vitro:

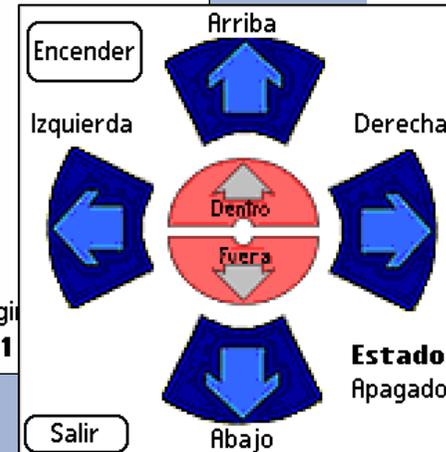
- Permite los mismos movimientos que la interfase de voz, además de otras prestaciones.
- Puede utilizarse de forma remota por el asistente.
- Se pueden extraer más datos sobre el estado del robot.



Datos Inicialización Ayuda
Inicializar teléfono móvil
Restablecer tel. móvil

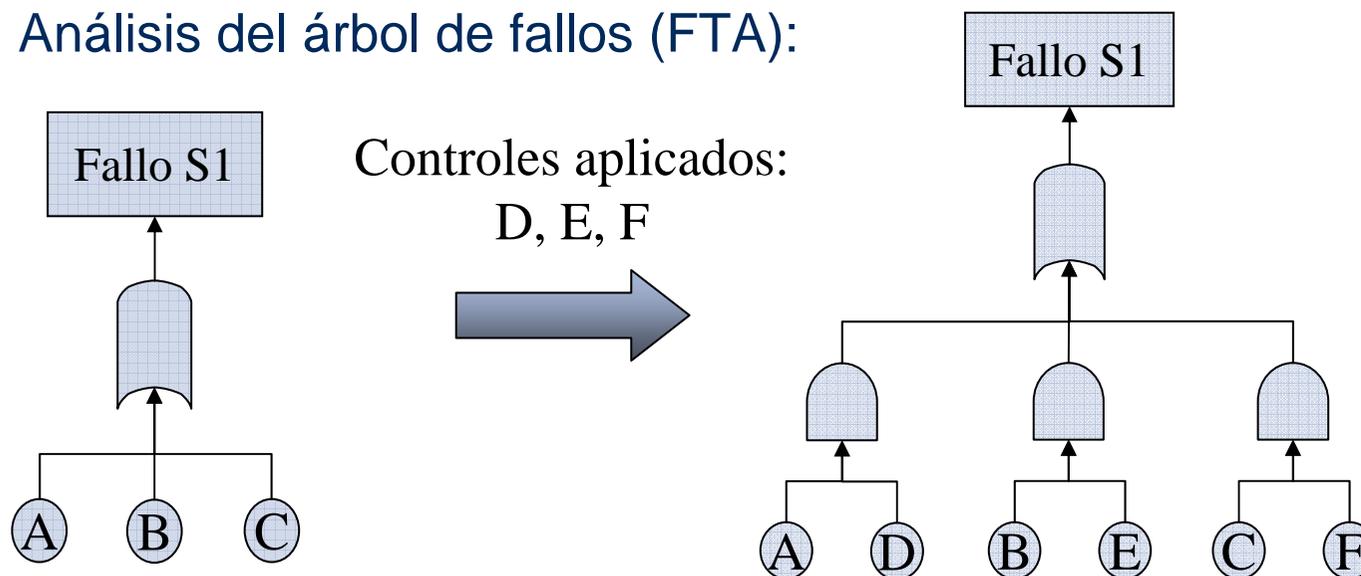
Ver

tipo	tiempo	radio est.	error
1	1		
1	2		
3	3		
3	4		
3	5		
8	6		
8	8		
255	0		
1	11		



Análisis de riesgos

Análisis del árbol de fallos (FTA):



Análisis de los modos de fallo y sus efectos (FMEA):

Modo de fallo	Efecto en el sistema	Control aplicado
A	Fallo S1	D
B	Fallo S1	E
C	Fallo S1	F

Análisis de riesgos

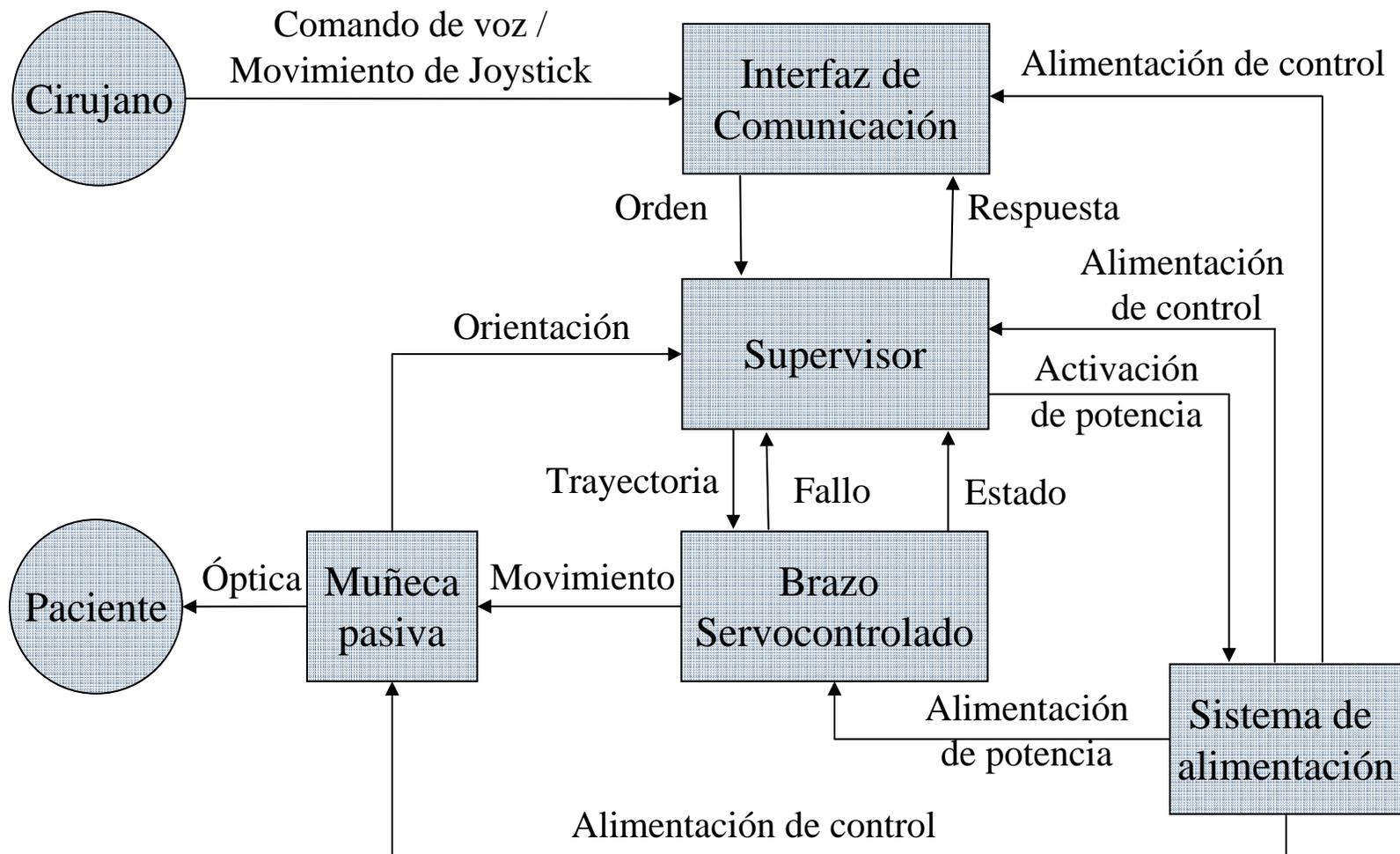
Índice de riesgos basado en la norma EN60601-1-4:1996

	Daño despreciable	Daño marginal	Daño crítico	Daño catastrófico
Frecuente	2	3	4	4
Probable	2	2	3	4
Ocasional	2	2	2	3
Remoto	1	2	2	2
Improbable	0	1	2	2
Inexistente	0	0	1	1

- Zona de riesgo inaceptable (4)
- Zona *ALARP* (2)
- Zona de riesgo ampliamente aceptable (0)

Análisis de riesgos

Descomposición funcional del sistema ERM



Análisis de riesgos

Tabla *FMEA* del brazo servocontrolado

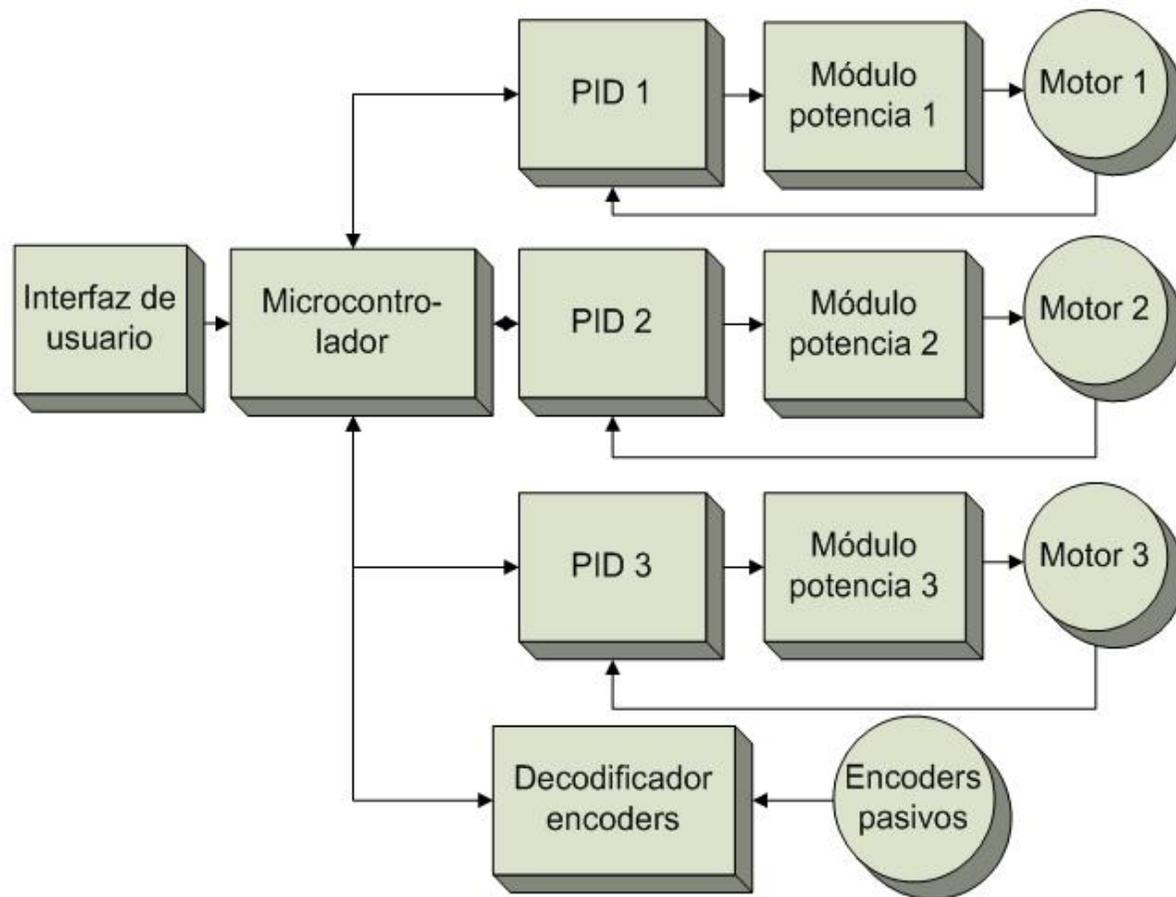
Modo de fallo	Efectos en el sistema	Posibles peligros	Índice de riesgo
A. Fallo en los actuadores reductores o transmisiones.	La articulación afectada deja de moverse y el brazo ejecuta una trayectoria errónea.	El brazo servocontrolado no realiza la trayectoria deseada. Puede tocar un tejido.	Ocasional y daño marginal (2)
B. Fallo en los encoders.	El brazo comienza a ejecutar una trayectoria errónea.	El movimiento de la óptica dentro de la cavidad abdominal es diferente al esperado. Puede tocar un tejido.	Remoto y daño crítico (2)
C. Fallo en el controlador articular de bajo nivel.	El brazo comienza a ejecutar una trayectoria errónea.	El movimiento de la óptica dentro de la cavidad abdominal es diferente al esperado. Puede tocar un tejido.	Remoto y daño crítico (2)

Análisis de riesgos

Tabla *FMEA* del brazo servocontrolado (Cont.)

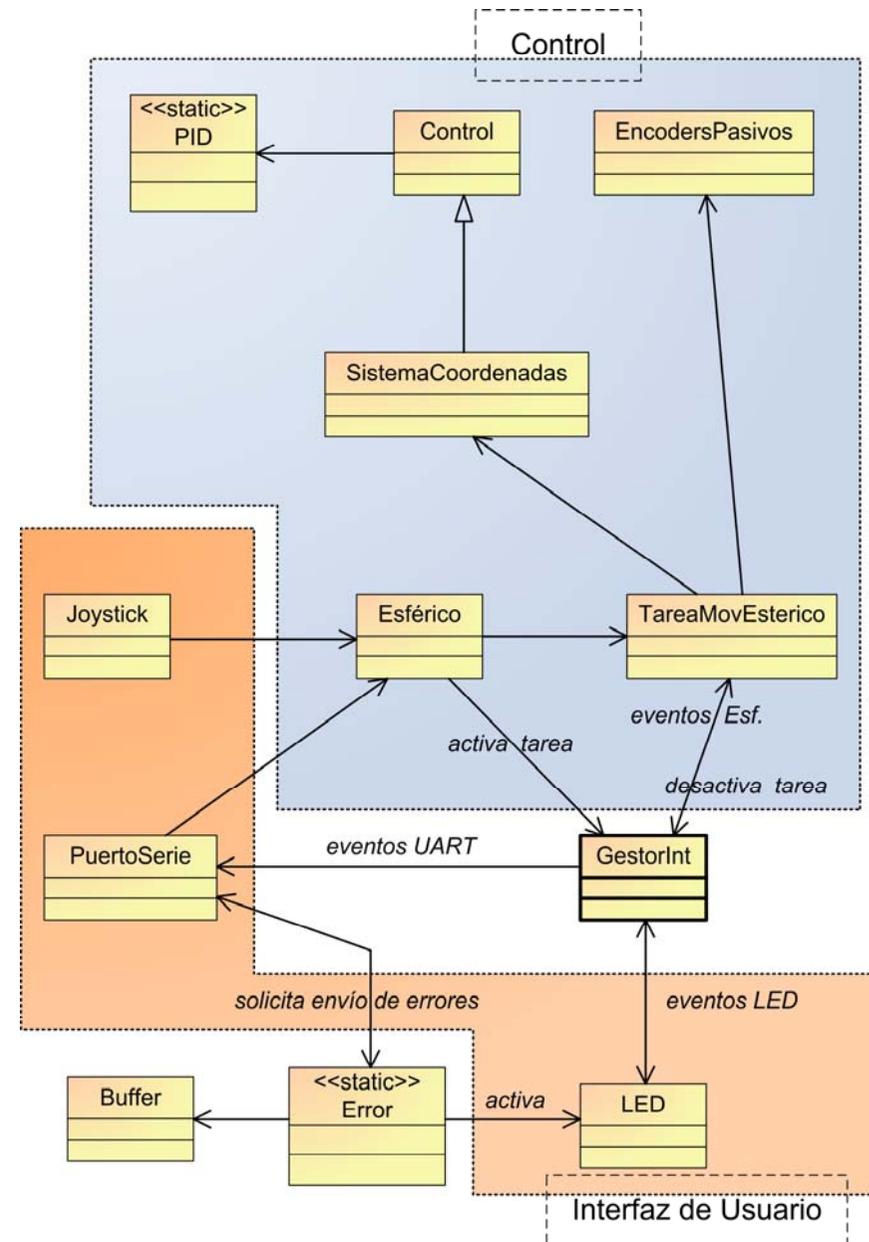
Modo de fallo	Detección	Controles aplicados
A. Fallo en los actuadores reductores o transmisiones.	Se enciende la luz roja y el usuario detecta un movimiento extraño del brazo.	Si la articulación afectada queda trabada, la electrónica del control articular lo detecta y se lo comunica al supervisor para que entre en modo de fallo.
B. Fallo en los encoders.	Parpadea la luz roja.	El control articular del brazo detecta un acúmulo anormal de error de posición en la articulación afectada al intentar ejecutar la trayectoria, y se lo comunica al supervisor para que entre en modo de fallo.
C. Fallo en el controlador articular de bajo nivel.	Parpadea la luz roja.	El controlador correspondiente no contesta de la forma adecuada al supervisor, por lo que este entra en modo de fallo y desactiva la potencia de los motores.

Arquitectura de control del ERM



Diseño Software

Diagrama de clases UML simplificado



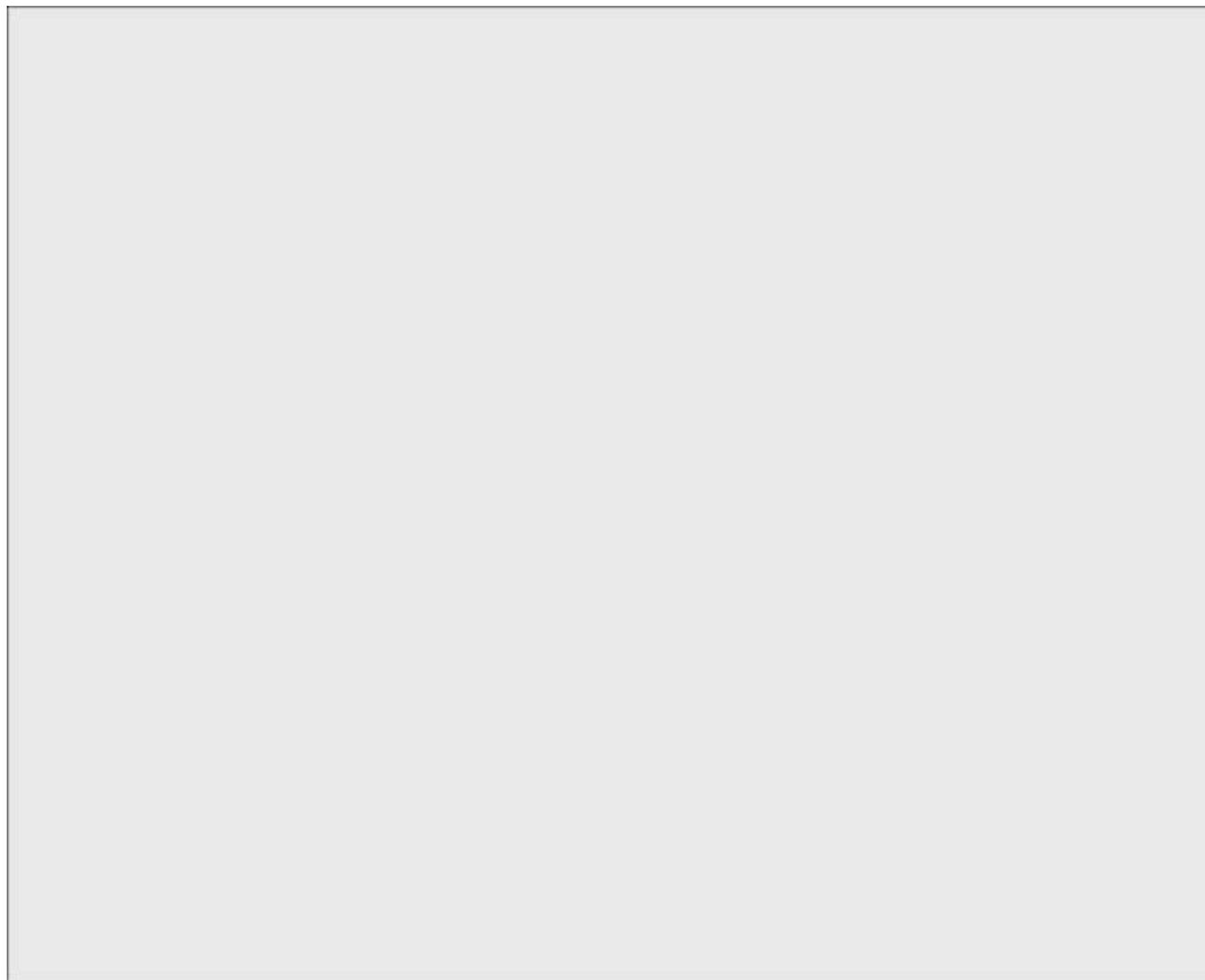
Experimentos con animales

Sistema ERM
Ensayo in vivo

Ensayos clínicos

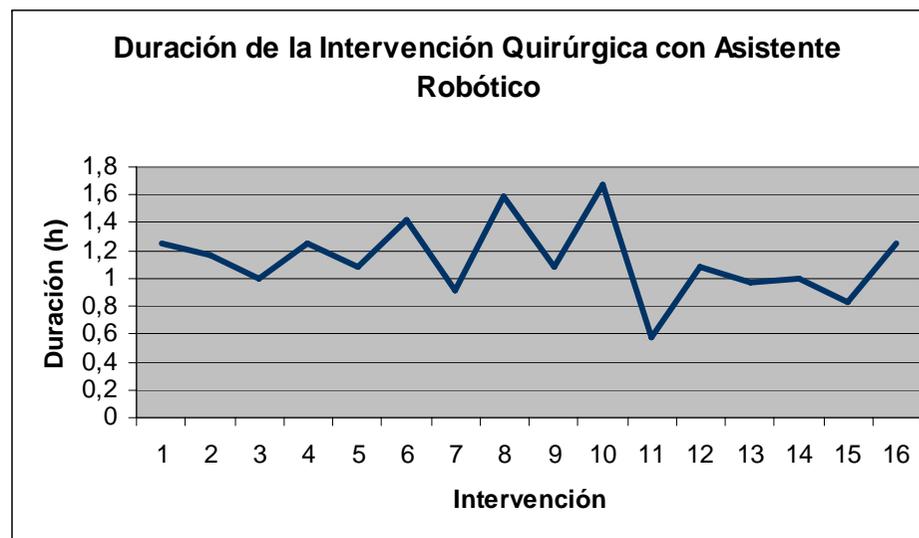
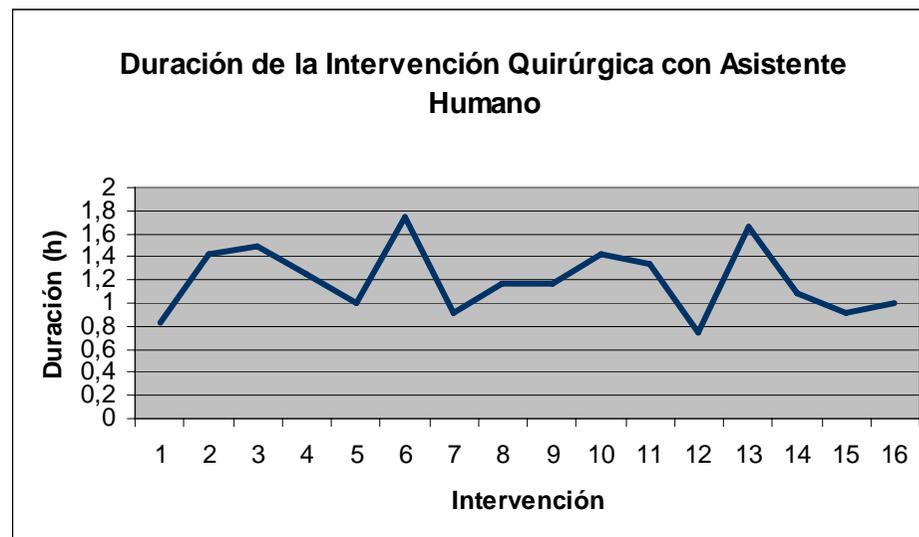
- Intervenciones de colecistectomía laparoscópica
- Dos grupos de pacientes, cada uno formado por 16 enfermos:
 - Primer grupo: cirugía laparoscópica convencional.
 - Segundo grupo: con asistente robótico.
- Datos recogidos:
 - Objetivos: tiempo de intervención, limpieza de la óptica.
 - Subjetivos: nivel de fatiga del cirujano, calidad de la imagen.

Ensayos clínicos



Ensayos clínicos

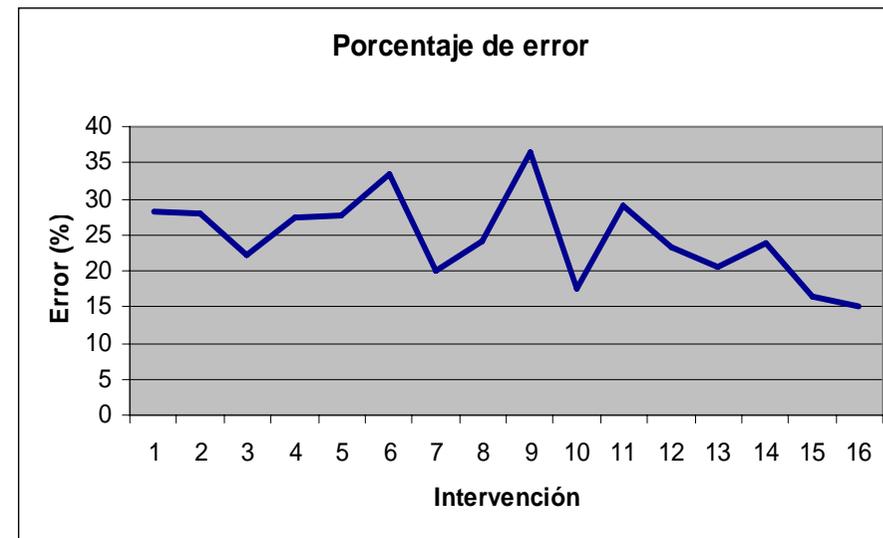
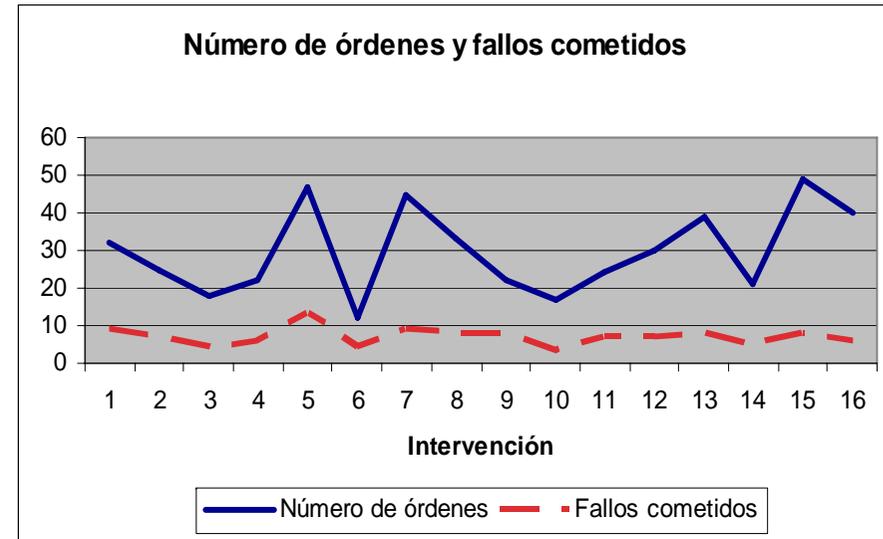
- Tiempo de operación:
 - Muestra insuficiente.
 - Influencia del tiempo de aprendizaje del cirujano.
- Decremento del número de veces que se extrae la óptica para su limpieza.



Ensayos clínicos

- Sistema de reconocimiento de voz:
 - Error de reconocimiento elevado.
 - Influencia del tiempo de aprendizaje del cirujano.
 - Mejoras: algoritmo de reconocimiento y metodología de entrenamiento.

- Datos subjetivos:
 - Mejora de la estabilidad de la imagen.
 - Decremento del nivel de cansancio del cirujano.



La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

8. Conclusiones

Conclusiones

- La robótica se ha introducido en la medicina en los últimos diez años.
- El objetivo común consiste en mitigar las limitaciones humanas del cirujano.
- La consecuencia inmediata es la Mejora de calidad de los resultados quirúrgicos.
- Se puede pensar en automatizar ciertas intervenciones.

Los campos de investigación

- Modelado específico de la anatomía de un enfermo en particular.
- Tecnología de interfases para hacer los robots más precisos y sensitivos a la vez de fácil manejo.
- Integración de sistemas, desde el punto de vista de que el robot no actúa sólo, se debe integrar con todos los elementos del quirófano.
- Los equipos de investigación deben ser mixtos ingenieros-cirujanos.

La Automática y la Robótica Aplicada a la Medicina

