

Emanuel Slawiński · Vicente Mut

# **Humanos y máquinas inteligentes**

**Conocimiento educativo sobre el  
comportamiento interno de robots que  
actúan junto y para el hombre**

**Impresión**

Información bibliográfica publicada por Deutsche Nationalbibliothek: La Deutsche Nationalbibliothek enumera esa publicación en Deutsche Nationalbibliografie; datos bibliográficos detallados están disponibles en Internet en <http://dnb.d-nb.de>.

Los demás nombres de marcas y nombres de productos mencionados en este libro están sujetos a la marca registrada o la protección de patentes y son marcas comerciales o marcas comerciales registradas de sus respectivos propietarios. El uso de nombres de marcas, nombres de productos, nombres comunes, nombres comerciales, descripciones de productos, etc incluso sin una marca particular en estos publicaciones, de ninguna manera debe interpretarse en el sentido de que estos nombres pueden ser considerados ilimitados en materia de marcas y legislación de protección de marcas, y por lo tanto ser utilizados por cualquier persona.

Imagen de portada: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Editor: Editorial Académica Española es una marca de  
LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG  
Dudweiler Landstr. 99, 66123 Saarbrücken, Alemania  
Teléfono +49 681 3720-310, Fax +49 681 3720-3109  
Correo Electrónico: [info@eae-publishing.com](mailto:info@eae-publishing.com)

Publicado en Alemania

Schaltungsdienst Lange o.H.G., Berlin, Books on Demand GmbH, Norderstedt,  
Reha GmbH, Saarbrücken, Amazon Distribution GmbH, Leipzig  
ISBN: 978-3-8454-8371-9

**Imprint (only for USA, GB)**

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek: The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this works is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Publisher: Editorial Académica Española is an imprint of the publishing house  
LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG  
Dudweiler Landstr. 99, 66123 Saarbrücken, Germany  
Phone +49 681 3720-310, Fax +49 681 3720-3109  
Email: [info@eae-publishing.com](mailto:info@eae-publishing.com)

Printed in the U.S.A.

Printed in the U.K. by (see last page)

ISBN: 978-3-8454-8371-9

Copyright © 2011 by the author and LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG  
and licensors  
All rights reserved. Saarbrücken 2011

## Humanos y máquinas inteligentes

El presente trabajo está dirigido hacia lectores que se encuentren interesados en comprender conceptualmente y de una manera constructiva los sistemas hombre-máquina inteligente, con los cuales toda persona interactúa cada día más frecuentemente, utilizándolos tanto en el trabajo como en el hogar. Por lo tanto, la comprensión de la interrelación entre el hombre y las máquinas inteligentes surge como una útil herramienta de aprendizaje no solamente para los diseñadores o ingenieros sino también como parte de una formación base de conocimiento tecnológico. En este libro se tienen en cuenta los conceptos más relevantes del área sustentados en el conocimiento científico y práctico hasta la fecha. Es decir, este libro sintetiza un inmenso mar de conocimiento, a través de explicaciones sencillas basadas en ejemplos, analogías con situaciones comunes y preguntas o comentarios para debatir en grupo. Es deseo de los autores que la sociedad acepte armoniosamente nuevas y futuras tecnologías de máquinas inteligentes que tengan como objetivo mejorar no solamente índices económicos o de productividad sino mucho más importante aún, provocar un crecimiento en la calidad de vida de cada persona.



Emanuel Slawiński

Emanuel Slawiński nació en Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina el 5 de noviembre de 1975. Se graduó de Ingeniero Electrónico y Doctor en Ingeniería de Sistemas de Control en los años 2001 y 2006 en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ). Actualmente es profesor en grado y postgrado en la UNSJ e investigador científico de CONICET.



editorial académica española

978-3-8454-8371-9



*Este libro esta dedicado a mi esposa Analia, mis hijos Ivo y Abril, a mi papá y a mi mamá, y a mis hermanos Leopoldo y Alejo.*

*Emanuel Slawiński*



## **Agradecimientos de Emanuel Slawiński**

Dedico este libro a mi esposa Analia, a quien amo con todo mi corazón y me acompaña siempre en todo, este libro nace con su amor. A mis hijos Ivo y Abril quienes me alegran cada día con sus cariños y abrazos, a mi padre de quien aprendí que nunca hay que bajar los brazos y seguir para adelante, a mi mama que es la persona que me cuida y escucha siempre, a mi hermano Leopoldo con quien puedo compartir nuevas ideas y el deporte que tanto bien hace, a mi hermano Alejo que a pesar de la distancia nunca se olvida de la familia. También dedico este libro a mis suegros Carlos y Teresita, a mis sobrinos Tomas, Alexia, Constanza, Luisina y Octavio y a primos, tíos y abuelos de Comodoro por todos los momentos lindos que viví en familia.

A mis amigos de Neuquén y San Juan. A mis compañeros de trabajo, donde la relación entre investigadores, ingenieros, técnicos, secretarios, personal no docente es horizontal y la relación humana es la prioridad. En especial agradezco a mi compañero de trabajo y amigo Vicente, con quien llevo trabajando 10 años en equipo en la investigación de sistemas hombre-máquina. Finalmente quiero dedicar este escrito a “pepe”, quien falleció en el año 2006 y su ejemplo de vida perdurará por siempre en la Universidad por su vocación natural de colaborar y ayudar. Él me dirigió en grado y postgrado junto con Vicente, y gracias a él me dedico actualmente a investigar en el área de sistemas hombre-máquina que tanto me gusta de vocación.

Finalmente, nuevamente dedico y sobre todo agradezco a mi familia que con su amor hace de mi vida algo hermoso.



## Prefacio

El presente trabajo está dirigido hacia lectores que se encuentren interesados en comprender conceptualmente y de una manera constructiva los *sistemas hombre-máquina inteligente*, con los cuales toda persona interactúa cada día más frecuentemente, utilizándolos tanto en el trabajo como en el hogar. Por lo tanto, la comprensión de la interrelación entre el hombre y las máquinas inteligentes surge como una útil herramienta de aprendizaje no solamente para los diseñadores o ingenieros sino también como parte de una formación base de conocimiento tecnológico.

Los sistemas hombre-máquina cada día tienen un mayor grado de automatización, esto permite que las capacidades e inteligencia del hombre sean potenciadas y extendidas a través de una máquina inteligente, la cual no solamente tiene la capacidad mecánica alimentada por alguna fuente de energía para realizar un trabajo físico sino también una cierta capacidad cognitiva.

Hace algunos años, los *sistemas hombre-máquina inteligente* más avanzados se aplicaban solamente en tareas complejas tales como las actividades realizadas en las exploraciones espaciales. Sin embargo, estos sistemas avanzados, en el sentido que contemplan una gran riqueza en la interacción entre el hombre y la automatización, están siendo actualmente orientados también al hogar, oficina, entretenimiento, transporte, y comunicación, entre otros. Es decir que la utilización a diario de un *sistema hombre-máquina inteligente* en un futuro cercano será algo cotidiano. Por ello, este libro pretende ser útil en un nivel de aprendizaje de grado y postgrado en cursos afines con los sistemas de control hombre-máquina o también llamados sistemas hombre-robot.

La temática descripta en este libro es un tema que se inicia con la historia del hombre al utilizar sus primeras herramientas para cazar y cultivar la tierra y

continúa como un área activa de investigación, donde continuamente surgen innovaciones sobre todo a nivel tecnológico y por el propio avance en el conocimiento del comportamiento humano. Respecto a los conceptos utilizados en el área, los avances también son continuos pero varían más lentamente que los avances tecnológicos. En este libro se tienen en cuenta los conceptos más relevantes del área sustentados en el conocimiento científico y práctico hasta la fecha. Es decir, este libro sintetiza un inmenso mar de conocimiento, a través de explicaciones sencillas basadas en ejemplos, analogías con situaciones comunes y preguntas o comentarios para debatir de manera sinérgica. Dichas preguntas y comentarios que los autores recomiendan debatir en grupo son marcadas en el libro con ¿pregunta?... y con ...comentario..., respectivamente.

Los autores trabajan en investigación de sistemas de control hombre-máquina hace 10 años, dirigiendo tesis doctorales de investigación en el área, lo cual surge como factor de motivación para brindar dicho conocimiento hacia la sociedad, con el objeto de aportar un conocimiento constructivo y valioso del área en el proceso general de enseñanza-aprendizaje. Es deseo de los autores que la sociedad acepte armoniosamente nuevas y futuras tecnologías de máquinas inteligentes que tengan como objetivo mejorar no solamente índices económicos o de productividad sino mucho más importante aún, provocar un crecimiento en la calidad de vida de cada persona.

Los capítulos se organizan por grupos afines de la siguiente forma: Los capítulos 1, 2 y 3 son generales y describen los conceptos básicos de los sistemas hombre-máquina. Los capítulos 4, 5 y 6 incluyen explicaciones sobre los sistemas de control y en particular los robots, así como se introduce al lector en el uso de la tecnología actual, empleada para implementar la interfaz y control de un sistema hombre-máquina. Los capítulos 7 y 8 incorporan en forma detallada y conceptual los factores humanos que representan a las personas y cómo se utiliza esta información en el control de estos sistemas. Las aplicaciones desarrolladas en el capítulo 9 son de interés general, y ejemplifican cómo se diseñan y funcionan diferentes sistemas hombre-máquina

donde sus aplicaciones son muy interesantes. Finalmente, se brindan las conclusiones de este libro en el capítulo 10.

A continuación, se presenta la organización de este manuscrito describiendo brevemente el contenido de cada capítulo en particular.

En el capítulo 1 se realiza una breve introducción a los sistemas hombre-máquina remarcando las aplicaciones y usos de los mismos como así también los posibles beneficios del avance de estos sistemas.

El capítulo 2 brinda los conceptos fundamentales de los *sistemas de control hombre-máquina inteligente* ayudado por numerosos ejemplos de forma de clarificar los mismos. Se explican conceptos básicos como el significado de herramienta, máquina, comando, realimentación, y entorno como así también los esquemas de control manual, control automático, control compartido y teleoperación.

El capítulo 3 describe conceptualmente los sistemas de control automático brindando los conceptos mas utilizados en el control de sistemas completamente automatizados ayudado por ejemplos de fácil comprensión para que el lector pueda formar su conocimiento acerca de cómo funciona un controlador automático. También se explican conceptos relacionados tales como qué significa el modelo de un sistema.

El capítulo 4 tiene una fuerte tendencia tecnológica de forma de describir brevemente las diferentes alternativas tecnológicas actuales que permiten la implementación de sistemas de control abarcando el sistema sensorial, el sistema de actuación y el sistema de procesamiento, comunicación y control.

El capítulo 5 describe qué es un robot, cómo está formado el mismo y cuales son las estrategias de control básicas mas utilizadas en robots manipuladores tipo brazo y robots móviles. Además, los conceptos de control utilizados se relacionan con determinados comportamientos del hombre.

En el capítulo 6 se muestran las interfaces hombre-máquina desde un punto de vista tecnológico mostrando las interfaces que actualmente se utilizan para realimentar información al usuario estimulando sus sentidos y cómo las interfaces son empleadas para que el hombre genere comandos. Además, se brindan algunos conceptos generales acerca del diseño de una interfaz.

El capítulo 7 tiene como objetivo formar al lector sobre los factores humanos que afectan al uso, mal uso, abuso y desuso de la automatización basado en numerosos trabajos de investigación teóricos y experimentales que validan los mismos. Así, se explican conceptualmente la confianza del hombre en la automatización, el conocimiento de la situación y los modelos mentales, la fatiga y la distracción del hombre, así como la reacción ante diferentes estímulos y la carga mental de trabajo.

El capítulo 8 brinda conceptos que actualmente se utilizan en el control de sistemas *hombre-máquina inteligente* y se remarcan las diferencias que existen con los principios utilizados en el control de sistemas completamente automatizados. Es decir, se analiza cómo conceptualmente deberían diseñarse los sistemas de control hombre-máquina teniendo en cuenta los factores humanos y sociales.

El capítulo 9 apunta a un interés general en diversas aplicaciones orientadas a la salud, a la producción en la agricultura, la seguridad en un automóvil y un sistema de teleoperación de robots, el cual permite a una persona hacer un trabajo físico en cualquier lugar del mundo desde su casa a través de Internet. El capítulo 10 brinda las conclusiones generales del libro y las perspectivas de los sistemas hombre-máquina brindadas por los autores.

# Índice temático

<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Sistemas de control hombre-máquina</b>	13
2.1. Conceptos base	15
2.2. Control manual, Control automático y Sistemas de control hombre-máquina	28
2.3. Síntesis del capítulo	37
<b>3. Control de sistemas automáticos</b>	39
3.1. Razonamiento humano e implementación electrónica	41
3.2. Modelo de un sistema	45
3.3. Diseño basado en estructuras clásicas de control	47
3.4. Diseño basado en máquinas de estado	50
3.5. Diseño basado en estabilidad	53
3.6. Diseño basado en Optimización	55
3.7. Diseño basado en Inteligencia artificial	57
3.8. Síntesis del capítulo	60
<b>4. Componentes de un sistema de control</b>	63
4.1. Introducción	65
4.2. Sistema sensorial	66
4.3. Sistema de actuación	93
4.4. Sistema de cómputo	99
4.5. Ejemplos de aplicación	113
4.6. Síntesis del capítulo	124

<b>5. Robots</b>	127
5.1. Introducción	129
5.2. Robots manipuladores	138
5.3. Robots móviles	140
5.4. Control de robots	142
5.5 Síntesis del capítulo	169
<b>6. Interfaz de un sistema hombre-máquina</b>	171
6.1. Introducción	173
6.2 Conversión bilateral de señales entre el hombre y la máquina a través de un sistema de interfaz	174
6.3. Generación de comandos	176
6.4. Realimentación al usuario	186
6.5. Conceptos sobre interfaces	198
6.6. Síntesis del capítulo	202
<b>7. Factores humanos</b>	205
7.1. Introducción	207
7.2. Modelos de factores humanos	209
7.3 Comportamiento de reacción del operador humano	211
7.4 Fatiga	212
7.5. Distracción	215
7.6. Modelos mentales	220
7.7. Confianza del operador humano	223
7.8 Conocimiento de la situación	230
7.9 Carga física y mental de trabajo	233
7.10 Neuro-ergonomía	234
7.11 Otros factores humanos	235
7.12. Síntesis del capítulo	236

<b>8. Control de sistemas hombre-máquina</b>	239
8.1. Introducción	241
8.2. Niveles y tareas de la automatización	242
8.3. Control de sistemas hombre-máquina inteligente	250
8.4 Relación entre sistemas de control automático y control de sistemas hombre-máquina	262
8.5. Síntesis del capítulo	264
<b>9. Aplicaciones de sistemas hombre-máquina</b>	267
9.1 Introducción	269
9.2. Silla de ruedas inteligente	270
9.3. Robótica para cirugía y operaciones	274
9.4. Control de una máquina para agricultura	276
9.5. Interfaz de un automóvil	283
9.6. Teleoperación de Robots	291
9.7. Síntesis del capítulo	303
<b>10. Conclusiones y perspectivas</b>	305
<b>Bibliografía</b>	311



# *Capítulo 1*

## *Introducción*



# **Capítulo 1**

## **Introducción**

Los sistemas hombre-máquina y la automatización tienen una importancia relevante en el crecimiento y desarrollo de la sociedad, no solamente desde un punto de vista productivo, sino también en cuanto a la forma y calidad de vida de las personas. Por lo tanto, la introducción de la automatización debe considerar en forma equilibrada los factores humanos y tecnológicos y además, estar en concordancia con el medio ambiente ya que en definitiva, todo avance tecnológico debe ir de la mano con una mejora armoniosa y cálida en la vida de cada persona.

En general un sistema hombre-máquina está formado por al menos una persona y una máquina que interactúan entre sí para lograr un objetivo común en un entorno o ambiente dado, por ejemplo un conductor manejando un auto (máquina) por un camino (entorno). En la antigüedad, el hombre utilizaba herramientas para potenciar sus capacidades en la caza y en la agricultura utilizando su propia fuerza. Es conocido que con el transcurso del tiempo el hombre fue incorporando nuevas herramientas y fuentes de energía adicional para incrementar sus límites físicos, como por ejemplo la utilización de animales para arar la tierra. Así, se generaron permanentemente nuevas invenciones que van desde la máquina de vapor hasta la introducción de la computadora y que fueron cambiando paulatinamente el modo de trabajo y la forma de vida del hombre. Es decir que el crecimiento tecnológico ha permitido extender las cualidades humanas para realizar tareas en las áreas industriales, de servicios y en el hogar que hubieran resultado impensadas hace un par de siglos.

Normalmente, las máquinas son utilizadas cotidianamente por las personas y el desarrollo de las mismas afecta directamente nuestras vidas en cierto grado, sobre todo en cuanto a la inserción laboral de cada individuo en la sociedad. No solo el desarrollo de nuevas máquinas ayudan al hombre/mujer en actividades donde se deba realizar un trabajo físico sino también en tareas donde sea adecuado que el hombre reciba una ayuda cognitiva. Además, su uso no solamente se encuentra en las actividades laborales sino también en el hogar, lo cual incrementa la importancia aún más de conocer cómo las nuevas máquinas están diseñadas para trabajar sinérgicamente con las personas.

A su vez, el creciente avance de la tecnología nos sorprende día a día donde los sistemas automáticos, en los cuales el hombre participa entregando las consignas u objetivos (por ejemplo cuando establece la temperatura deseada de un aire acondicionado), mejoran continuamente su capacidad de procesamiento de la información y control de sistemas cada vez más complejos o el control de sistemas de uso masivo pero a un costo mucho menor. Por otro lado, si se observa a la automatización por dentro, la misma presenta rasgos similares al comportamiento humano dado que involucra percepción, comprensión y decisión, y la ejecución de acciones. La primera involucra el conocimiento del estado de la máquina y de su entorno, mientras que la comprensión-decisión se relaciona con el procesamiento de datos y cálculo de acciones, y finalmente las acciones pueden ser mecánicas sobre el entorno (por ejemplo aplicar una fuerza sobre una pared) y/o acciones de información (por ejemplo alertar al hombre del sobrecalentamiento de un motor).

A su vez, el hombre es consumidor o trabaja con estas tecnologías donde él puede ser benefactor totalmente pasivo de la automatización, como por ejemplo el consumo de energía eléctrica cuya generación tiene subsistemas automáticos donde el usuario es pasivo en el sentido que no está realmente interactuando con la automatización en sí misma; ó el hombre puede tener una interacción activa con la automatización como por ejemplo la relación entre un piloto y el sistema automático de vuelo de un avión, donde el piloto decide permanentemente si activa o no el piloto automático de vuelo (Figura 1.1).



Figura 1.1. Interacción activa entre un piloto y un avión con piloto automático.

Recientemente, y aunque las máquinas fueron ideadas por las personas de manera de contribuir al crecimiento de la sociedad haciendo mas fácil y rápido algún trabajo físico o incluso muchas veces posibilitando el mismo, las mismas pasaron de ser máquinas pasivas a máquinas activas o inteligentes que tienen la capacidad de realizar un trabajo físico en forma independiente adaptando su comportamiento de acuerdo a la situación. La figura 1.2 ilustra la diferencia entre una máquina convencional y una máquina inteligente donde la primera es manejada por el hombre para hacer un trabajo físico que básicamente transforma las acciones físicas realizadas por una persona en un trabajo físico de mayor magnitud energética (por ejemplo cuando se utiliza un gato hidráulico para levantar un automóvil), mientras que una máquina inteligente ayuda al hombre a realizar un trabajo físico y/o cognitivo donde se destaca la interrelación activa entre la máquina inteligente y el usuario en un nivel de comprensión de la situación y de toma de decisión yendo más allá de una conversión de energía.

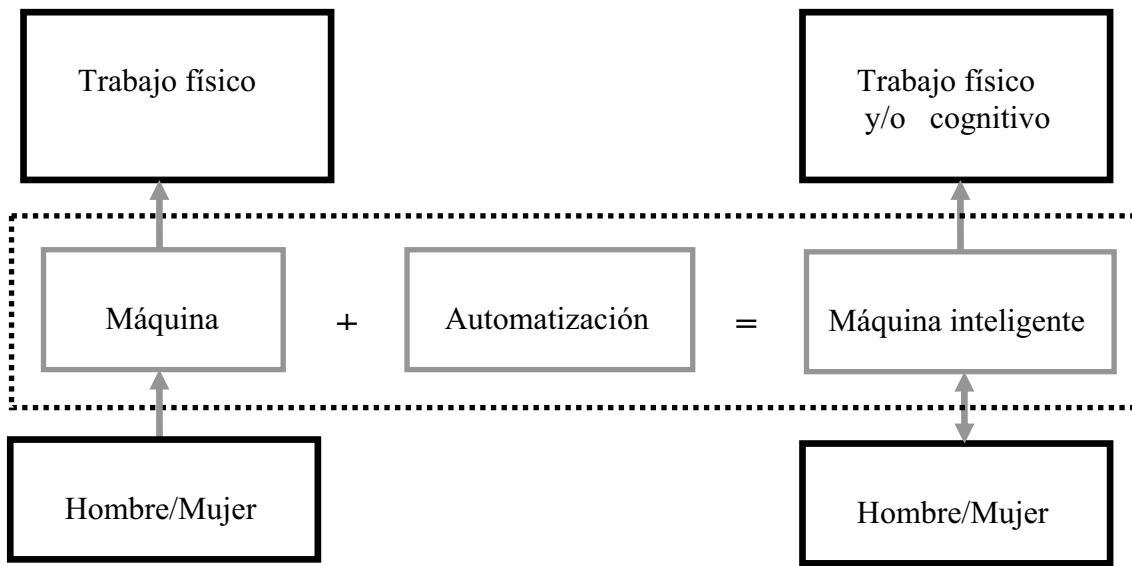


Figura 1.2. Diferencia entre máquina convencional y máquina inteligente.

Este libro describe los conceptos de los *sistemas de control hombre-máquina inteligente* o los sistemas con un cierto nivel de automatización donde el usuario mantiene una interacción activa con la máquina y su entorno, y donde la máquina posea un cierto nivel de automatización inteligente, en la cual el sistema tiene la capacidad de cambiar su comportamiento de acuerdo a la situación actual ya no solamente ejecutando órdenes sino también sugiriendo posibles acciones o incluso actuando rápidamente ante una situación de peligro.

Actualmente, las personas utilizan e interactúan más frecuentemente con sistemas que poseen un cierto nivel de automatización diseñados para asistir a ellas en sus actividades. Por lo tanto, el diseño y la comprensión de los sistemas que involucran una interrelación entre el hombre y una máquina inteligente se presenta como una necesidad actual y futura para el desarrollo de estos sistemas, su uso adecuado y su aceptación social.

Los sistemas inteligentes completamente automatizados tanto como los sistemas de control hombre-máquina, tienen un gran abanico de aplicaciones

de uso en la industria, la oficina y el hogar tanto como en el espacio, en la tierra, en el aire y en el agua, tales como exploración espacial, manufactura en la industria, tareas en agricultura, minería, y construcción, asistencia en medicina, transporte terrestre, aéreo y acuático, robótica, dispositivos para entretenimiento y para colaborar en labores domésticas, entre otros. Como ejemplos se pueden mencionar robots que ayudan en tareas de limpieza y cuidado de ancianos, transporte inteligente o asistido e incluso diversos sistemas de teleoperación donde una persona maneja una máquina a distancia siendo ayudado de alguna manera por un sistema de control, cabinas de mando de una cosechadora moderna (Figura 1.3) las cuales disponen de un sistema de monitoreo que comunica al operador humano diversa información recolectada en línea relativa a la cosecha a través de monitores de rendimiento, vehículos de alta gama que poseen un sensor láser de distancia (Figura 1.4) de forma tal de frenar automáticamente el vehículo en caso de que el automóvil circule a una baja velocidad y se detecte una alta probabilidad de colisión, robots para operaciones en medicina tal como el robot Da Vinci (Figura 1.5) el cual es capaz de reproducir con sus cuatro brazos los movimientos que desde la consola realiza un médico pero con mayor precisión ocasionando un menor daño a los tejidos del paciente, robots diseñados para hacer tareas de demolición (Figura 1.6), o dispositivos diseñados para entretenimiento tales como mini-cuadricopteros manejados por medio de un teléfono celular donde la imagen captada por la cámara del cuadricoptero puede ser vista por el usuario (Figura 1.7).



Figura 1.3. Cabina de mando de una máquina cosechadora moderna.



Figura 1.4. Automóvil dotado con un sensor láser para medir distancia.



Figura 1.5. Robot Da Vinci utilizado en medicina.

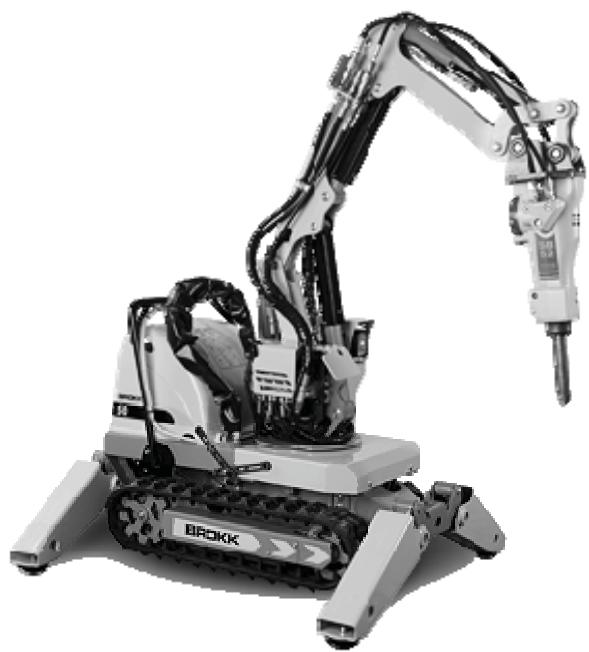


Figura 1.6. Robot 50 de Brokk teleoperado para demolición.



Figura 1.7. Cuadricóptero de cuatro hélices AR Drone controlado con un dispositivo tipo *iPhone* o un dispositivo tipo *iPod Touch*.

Actualmente se están realizando esfuerzos para obtener un mayor nivel de automatización inteligente en aviones, helicópteros y vehículos terrestres con el objeto de elevar el nivel de seguridad mediante la optimización de la interacción entre el hombre y un sistema automático, y también se realizan estudios sobre robots para que actúen de modo cooperativo con otros robots y personas. Un ejemplo de robótica cooperativa es cuando un manipulador móvil (robot tipo brazo montado sobre un vehículo autónomo tipo auto pequeño) intenta desactivar explosivos siendo teleoperado por un humano o cuando varios vehículos autónomos barren un terreno amplio en busca de minas explosivas donde todos los vehículos actúan en equipo en función de un objetivo común. Es decir, la potencialidad de la automatización ha motivado una gran cantidad de investigaciones y desarrollos en sus capacidades técnicas cada día mayores no solamente debido a la capacidad de realizar un trabajo físico sino también de incluir tareas cognitivas, siendo incuestionable a priori la aplicación de la automatización en la práctica si existe un rédito económico y social de su uso. Sin embargo, la automatización inteligente no siempre trabaja como se desea, es decir pueden existir incompatibilidades entre el diseño, la tecnología y el comportamiento del hombre en un planteo que va más allá del análisis económico y que incluyen factores sociales y humanos.

Pero, ¿Como impacta la automatización inteligente en distintos aspectos del desempeño del hombre? ... Es claro que la automatización (sea inteligente o no) no suplanta la actividad humana sino que de algún modo transforma la naturaleza del trabajo del hombre, tal como el cambio que produjo la aparición y el uso de las computadoras en el trabajo. Pero así como el diseño de los programas de una computadora fueron cambiando desde sus primeros pasos no solamente para aprovechar los avances tecnológicos sino también para que el hombre pueda trabajar más cómodo (con interfaces más agradables, entornos visuales, etc.), el diseño de sistemas automatizados inteligentes debe evolucionar para obtener sistemas que puedan interactuar sinérgicamente con las personas. Para lograr esto, se deben considerar y aprovechar las bondades tecnológicas en cuanto a precisión, velocidad, tamaños microscópicos, etc., y los factores humanos que van mas allá de un análisis económico de forma de alcanzar sistemas inteligentes que tengan una aplicación fructífera en la práctica en cuanto al crecimiento tecnológico y su aceptación social en pos de una mejor calidad de vida. Aunque todo cambio tecnológico puede producir miedos en la sociedad, si ellos son hechos de una manera gradual y considerando desde sus cimientos el comportamiento humano, seguramente dichos cambios irán a favor del crecimiento como sociedad. En definitiva, el éxito de nuevos avances sobre máquinas inteligentes depende si la sociedad en su conjunto acepta su uso en la práctica.



# *Capítulo 2*

*Sistemas de control  
hombre-máquina*



## **Capítulo 2**

### **Sistemas de control hombre-máquina**

El objetivo de este capítulo es brindar los conceptos básicos y fundamentales de los sistemas de control hombre–máquina y de los sistemas de control automático y manual. Es decir, esta parte del libro ayuda a comprender que son estos sistemas, para qué sirven y cómo están formados. Además, es objeto de este capítulo que el lector pueda asociar los conceptos brindados con ejemplos de la vida cotidiana.

#### **2.1 Conceptos base**

Empecemos con comprender qué es una máquina y una herramienta. Seguramente Usted utiliza diariamente alguna máquina y herramienta, como por ejemplo un automóvil (máquina) y un martillo (herramienta). Pero ¿para qué se utilizan las mismas? ... vemos que un automóvil nos permite trasladarnos rápidamente de un lugar a otro y el martillo permite aplicar la fuerza del hombre sin dañar su mano para golpear algún elemento y realizar una determinada tarea, como por ejemplo clavar una estaca en la tierra. Es decir, tanto las máquinas como las herramientas nos ayudan a realizar un trabajo físico (trasladarse y clavar una estaca en los ejemplos mencionados e ilustrados en la figura 2.1) de una manera más rápida, con menos esfuerzo físico, y potenciando las capacidades humanas en comparación al caso si la persona lo haría sin la máquina o sin la herramienta correspondiente.

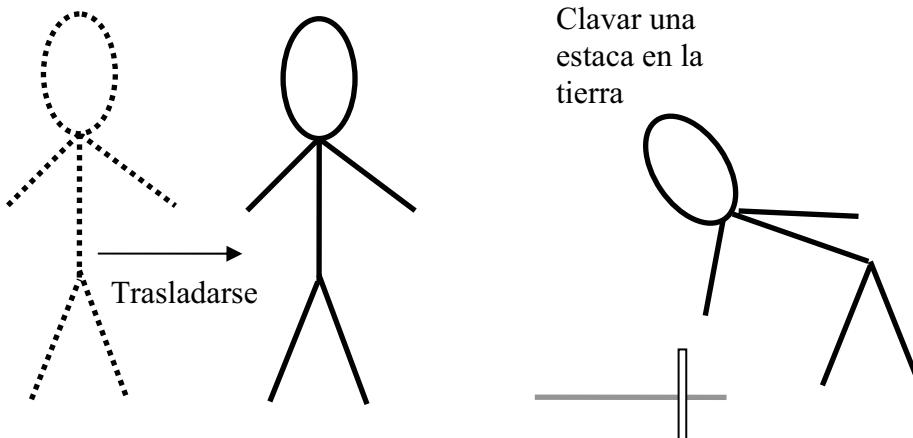


Figura 2.1. Las herramientas y las máquinas ayudan al hombre a hacer una tarea física.

Entonces nos podemos preguntar: ¿que diferencia existe entre una máquina y una herramienta? ... Generalmente las máquinas poseen una fuente energética extra a la provista por el ser humano (por ejemplo energía eléctrica) y una mayor complejidad interna (sistemas mecánicos, hidráulicos, y/o eléctricos tales como un motor) y sirven para realizar trabajos más complejos lo cual se ve reflejado también en que manejar las mismas requiere mayor entrenamiento comparado con las herramientas, por ejemplo manejar un automóvil es una tarea que requiere mayor capacitación y entrenamiento que utilizar alguna herramienta común tal como martillo, tijera, destornillador, pinza, etc.

¿Que herramientas y máquinas utilizó la última semana y cuales emplea más frecuentemente?...

Pero aunque las máquinas tienen una complejidad interna elevada, generalmente su utilización no es compleja. Por ejemplo, para manejar un automóvil solamente necesito comprender las funciones del pedal acelerador, pedal de embrague, pedal de freno, volante, caja de cambios, etc. y no el funcionamiento interno en si mismo, como sería conocer cómo funciona el motor, sistema de dirección, sistema de frenos, etc.

El término interfaz de un sistema hombre-máquina se refiere a los dispositivos y elementos utilizados que ayudan a cómo la persona produce comandos para ser enviados a la máquina y cómo recibe información de la misma acerca de su estado y del estado del entorno, de forma tal de potenciar sus sentidos para generar los mejores comandos. Es decir, el término interfaz incluye todos los métodos de intercambio de información entre el hombre y una máquina. En el ejemplo del automóvil, la interfaz desde el hombre hacia la máquina abarca los pedales, el volante, caja de cambios, etc. mientras que en este caso la interfaz desde la máquina hacia el conductor abarca el tablero indicador que marca algunas características internas del automóvil como la temperatura del motor, la velocidad de avance, el nivel de combustible, etc. La figura 2.2 ilustra gráficamente la complejidad interna de un automóvil que generalmente no es conocida en detalle por el conductor, y una interfaz típica entre un conductor y un automóvil.

En el caso del ejemplo del automóvil, a la evolución en el tiempo de la posición de los pedales, volante, etc. se les denomina comandos o señales de mando del hombre. Los comandos de una máquina poseen una funcionalidad definida, como por ejemplo la posición angular del volante de un automóvil produce el giro de las ruedas, lo cual es utilizado por un conductor para doblar el vehículo siguiendo la curvatura del camino. Continuando con las diferencias entre máquina y herramienta, se puede decir que en el caso de las herramientas en general el hombre aplica acciones que provocan un efecto directo sobre la herramienta, como por ejemplo en el caso del martillo la persona aplica una fuerza para golpear un objeto, mientras que en las máquinas, la fuerza aplicada a ellas se da en forma indirecta a través de un comando del operador humano, como sería en el ejemplo de un automóvil el uso del acelerador para comandar una fuente de energía auxiliar (motor del automóvil en este caso).



Figura 2.2. Funcionamiento interno de un automóvil (superior) y la interfaz entre un conductor y el automóvil (inferior).

Así como se mencionó la señal de mando, existen dentro del contexto de sistemas de control otros tipos de señales como son las señales de realimentación desde la máquina hacia el hombre, como por ejemplo la aguja indicadora de la temperatura del motor en un automóvil. Una señal involucra los valores de una variable en el tiempo. Por ejemplo, en el caso de un viaje en ruta, el conductor podría ir anotando la hora cada vez que pasa por determinados lugares tales como ciudades, pueblos, parajes, etc. o podría anotar la distancia recorrida cada un cierto período de tiempo (por ejemplo cada 30 minutos). La figura 2.3 (superior) muestra un recorrido realizado por un automóvil durante un viaje donde el conductor fue anotando la hora solamente en las ciudades, lo cual se representa en la figura 2.3 (medio) a través de la distancia recorrida en kilómetros (variable) en función del tiempo (hora y minutos). Por otro lado, la figura 2.3 (abajo) muestra la señal obtenida de distancia recorrida en función del tiempo cuando se anotó permanentemente la distancia recorrida y su tiempo asociado, la cual en general entrega mayor información, ya que en el caso planteado a través de la figura 2.3 (inferior) se observa que el automóvil estuvo detenido un tiempo determinado (debido a por ejemplo un descanso del conductor o una detención del vehículo para carga de combustible). Siguiendo con el ejemplo, cuando el conductor anota la hora, él realiza una medida objetiva y cuantitativa ya que existe un instrumento de medición (reloj) que entrega un número representativo de dicha medida. Si en cambio, el conductor anota en cada ciudad si la misma es muy linda, linda o fea, dicha medida es subjetiva ya que no existe un dispositivo que mida tal característica.

Por lo tanto, para obtener una medida válida se deberían considerar las respuestas de muchas personas. Desde un punto de vista científico, se podría realizar un análisis estadístico (por ejemplo se computa el valor medio o promedio) de las respuestas brindadas por la mayor cantidad posible de personas. La figura 2.4 ilustra la obtención de una medida objetiva y de una medida subjetiva a través de un instrumento de medición y mediante el uso de preguntas adecuadamente seleccionadas (cuestionario), respectivamente.

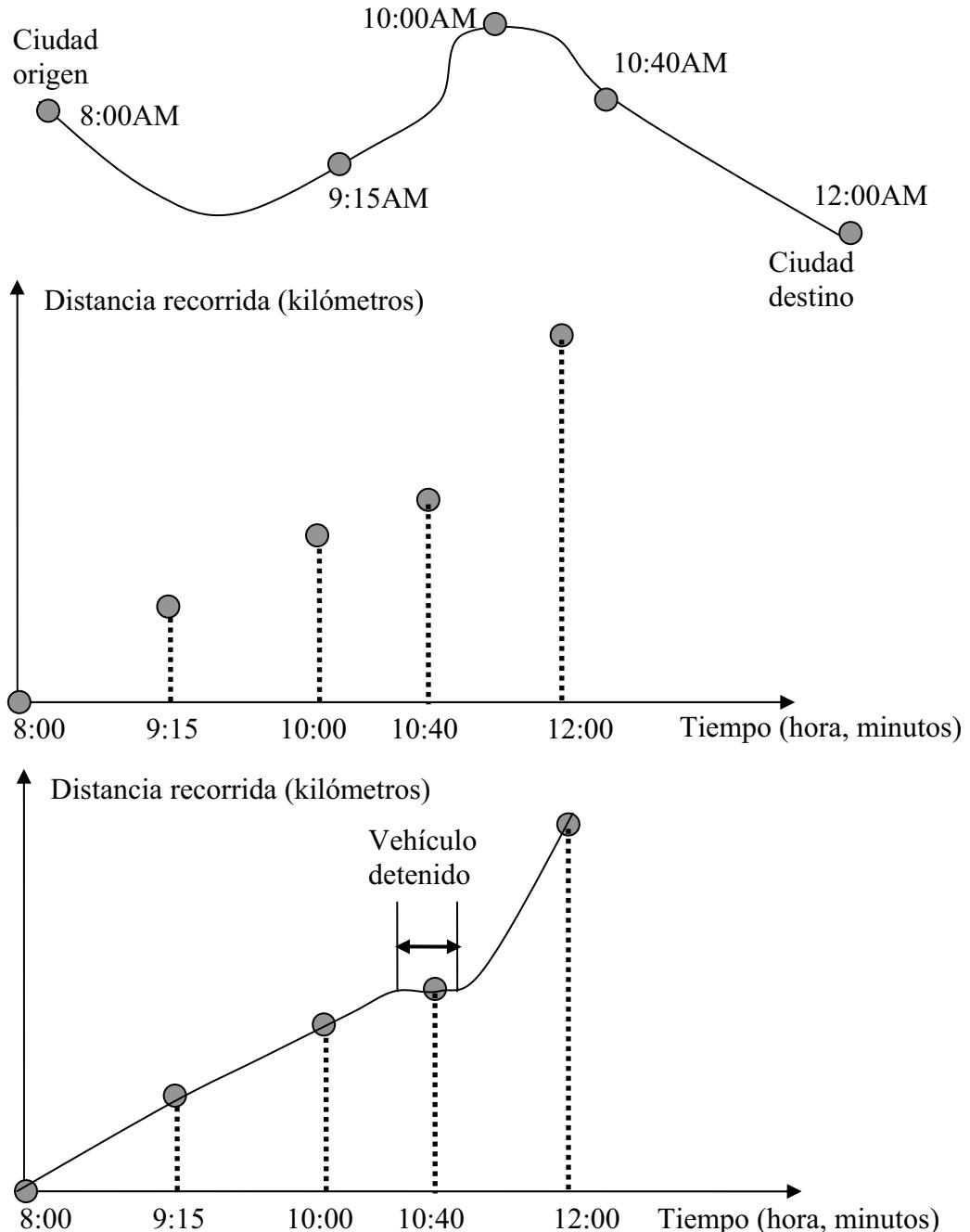


Figura 2.3. Recorrido realizado por un vehículo (superior), distancia recorrida en kilómetros marcada en determinados lugares (medio) y distancia recorrida marcada permanentemente durante el viaje (inferior).

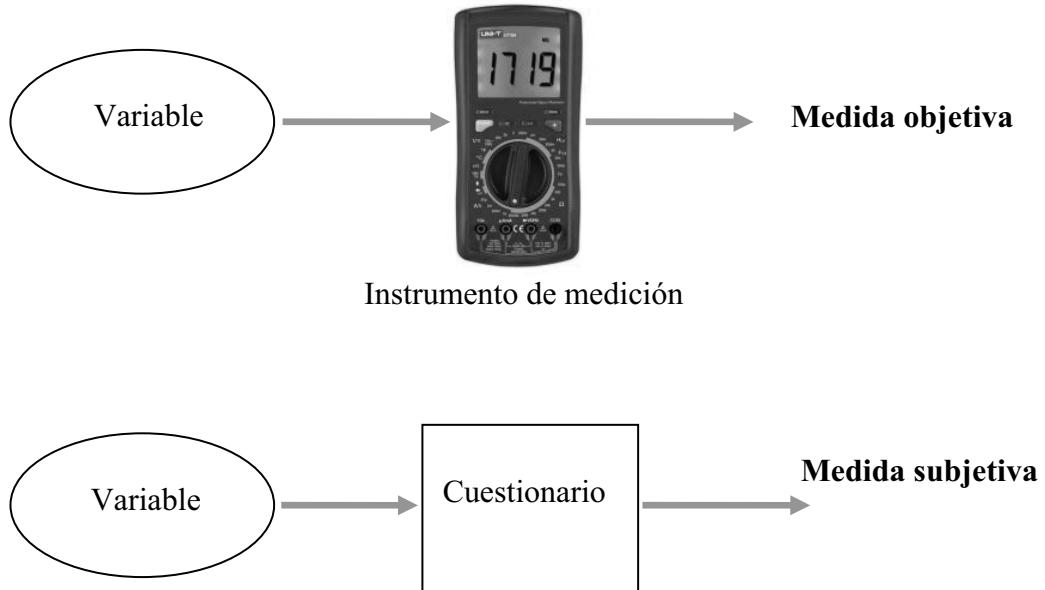


Figura 2.4. Medida objetiva y medida subjetiva.

Hasta aquí, un análisis unidireccional de señales desde el hombre hacia la máquina puede ser representado como se ilustra en la figura 2.5. Esto lo podemos simplificar como sigue: el hombre genera una acción tal como una fuerza que a su vez produce un comando que esta relacionado con alguna funcionalidad de la máquina, la cual finalmente realiza algún trabajo físico acorde al comando generado por la persona.

...Mencione una máquina y comente cuáles son sus comandos y cuál es el tiempo de entrenamiento que considera necesario para operar correctamente dicha máquina....

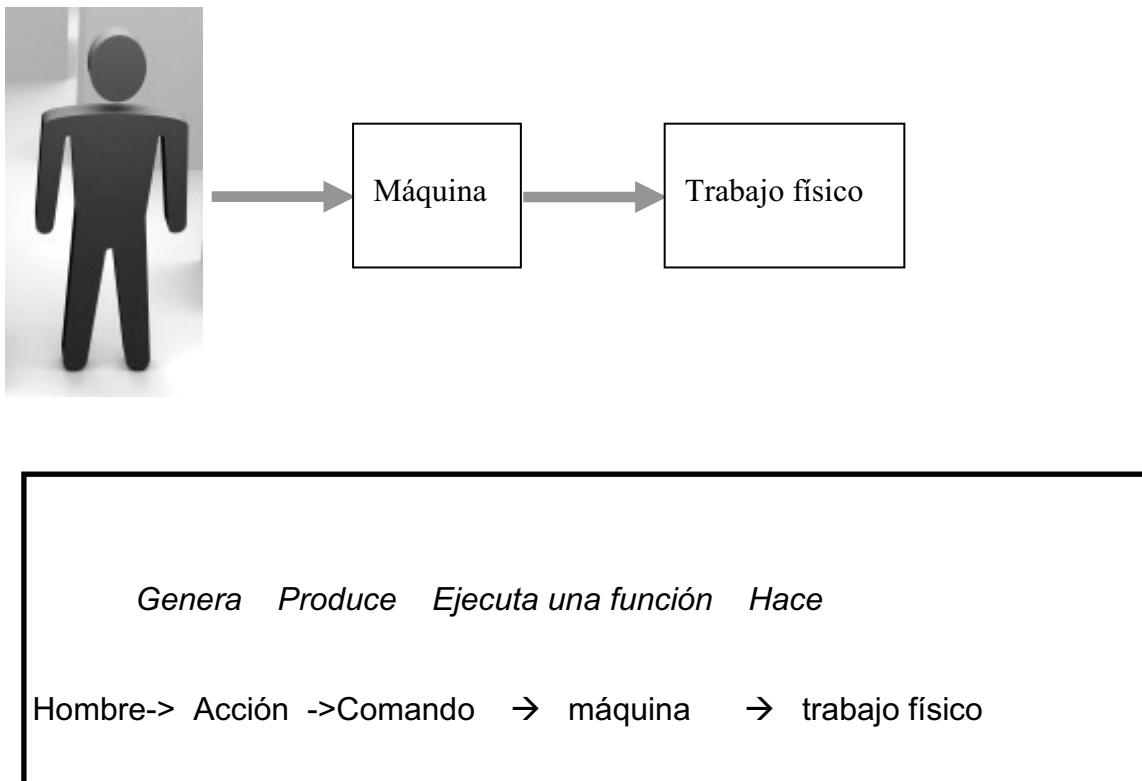


Figura 2.5. Flujo de información desde el hombre hacia la máquina.

Otro término y concepto utilizado en sistemas hombre-máquina es la denominada referencia. La referencia se asocia al objetivo que se desea cumplir y pueden ser de diferentes niveles, por ejemplo un objetivo de bajo nivel en el caso de manejar un vehículo podría ser establecer un valor deseado para la velocidad de avance actual del automóvil mientras que una referencia o comando de alto nivel en el mismo ejemplo podría ser llegar a un determinado lugar. Es decir, que las referencias de alto nivel involucran una mayor complejidad para convertir el objetivo en señales de control aplicables directamente a la máquina, como se apunta en la Figura 2.6.

Por ejemplo, en el caso de un automóvil el objetivo (referencia) podría ser mantener una cierta velocidad constante en rectas y disminuir la misma de acuerdo al radio de curvatura del camino manteniendo al vehículo centrado sobre su andarivel de avance. Para lograr el objetivo propuesto, el conductor genera permanentemente señales de control a través del manejo de los pedales de aceleración, freno y embrague mediante sus pies y del volante y palanca de cambios operados con sus manos.

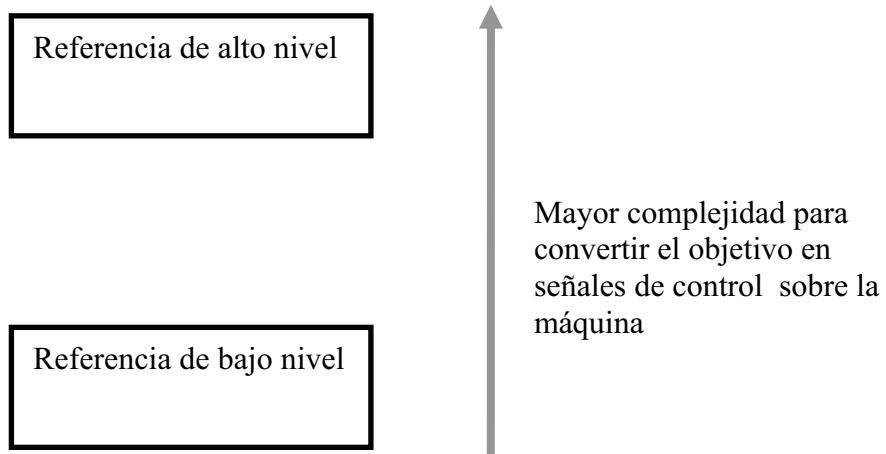


Figura 2.6. Referencias de bajo y alto nivel.

Por otro lado, el entorno de la máquina es aquello que rodea la misma y que indudablemente afecta el funcionamiento de ella. Los trabajos físicos pueden modificar el entorno o realizar alguna acción física sobre él sin modificar al mismo, por ejemplo pulir una pared o desplazarse por una ruta respectivamente.

¿Cual es el entorno de la máquina automóvil?...

El entorno de un automóvil está compuesto por peatones, otros vehículos quietos y en movimiento, animales, objetos estáticos tales como árboles, postes de distribución de energía eléctrica, cordones de calles, rotondas, etc. La figura 2.7 muestra un caso extremo del entorno de un vehículo en el caso de una elevada congestión de tráfico, lo cual podría ocurrir en determinados horarios en las grandes ciudades.



Figura 2.7. El entorno de un automóvil durante una congestión de tráfico.

¿De que dependen los comandos que generan las personas para operar una máquina?.... Los comandos que generan los operadores humanos para manejar una máquina dependen de sus objetivos tanto como del estado de la máquina y del entorno percibido por el hombre en base a sus sentidos y ayudado por la interfaz de la máquina en cuestión. Aquí, el concepto general de realimentación es fundamental ya que el mismo se relaciona a toda la información que es percibida por el hombre, por un sistema automático o por ambos del estado del sistema, para en función de ello actualizar sus comandos en el caso de un usuario o sus señales de control denominadas acciones de control en el caso de un control automático.

La figura 2.8 muestra un ejemplo de señales de realimentación hacia un conductor mientras conduce. El conductor utiliza su canal visual y auditivo para percibir el estado del entorno (camino, otros vehículos, peatones, límites de la vía de avance, etc.) a través de una realimentación visual y sonora. Además, el hombre percibe el estado (o una parte del mismo) del vehículo a través de una realimentación visual de la información del tablero del mismo que muestra la velocidad de avance, el nivel de combustible, la temperatura del motor, etc.

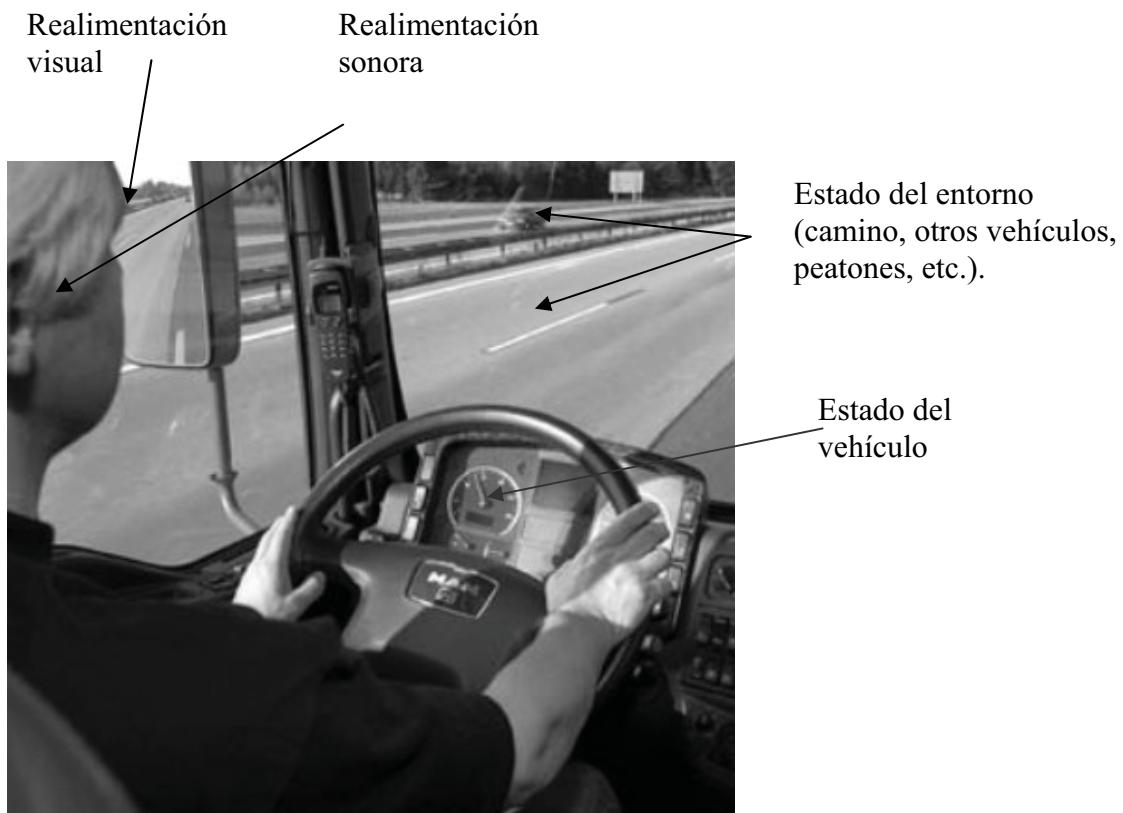


Figura 2.8. Persona manejando un vehículo.

Entonces un sistema de control hombre-máquina se puede ver como un sistema bidireccional donde la información fluye desde el hombre hacia la máquina y desde ésta hacia el usuario, como se ilustra en la figura 2.9. El hombre en base a su objetivo y a su percepción actual del estado de la máquina y del entorno genera una acción, la cual produce un comando que está asociado a una funcionalidad de la máquina que ejecuta una acción interactuando físicamente con su entorno con el objeto de hacer un trabajo físico determinado. Dicha acción ejecutada por la máquina modifica el estado de la misma y posiblemente el estado del entorno, lo cual nuevamente es percibido por el hombre para generar una nueva acción y continuar así repetidamente el ciclo de percepción-acción. Los ciclos de esta naturaleza se denominan lazos de control.

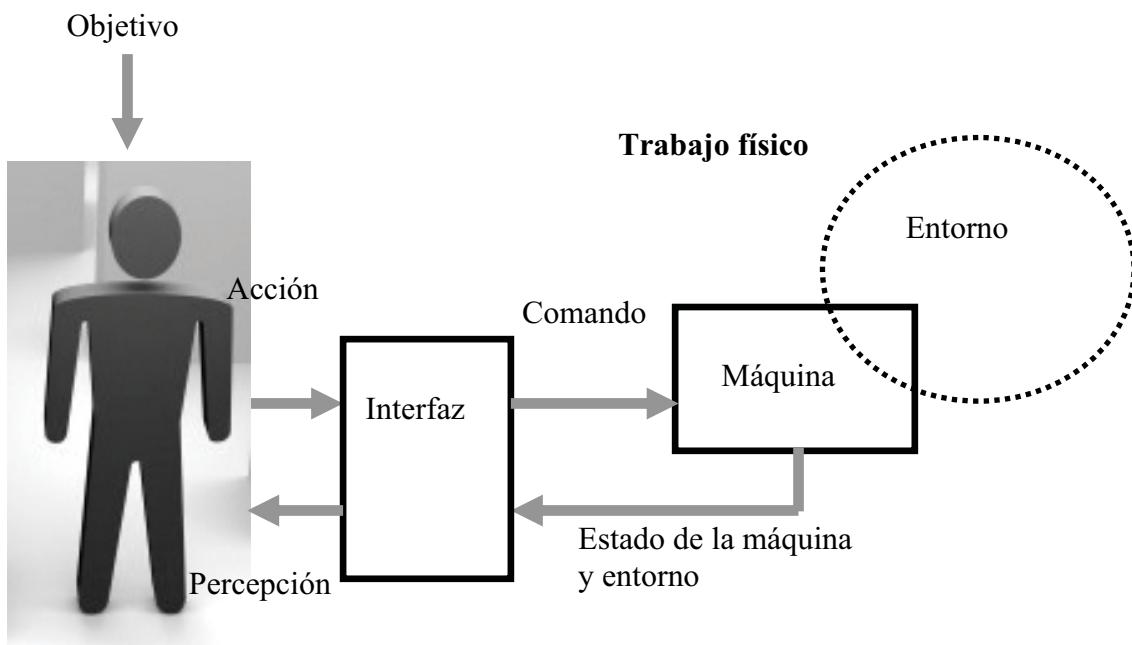


Figura 2.9. Flujo bidireccional de información entre el hombre y la máquina.

La frecuencia con la que envía información la máquina hacia el usuario no necesariamente tiene que ser igual que la frecuencia con la que el hombre envía comandos a la misma. Por ejemplo si un operador humano supervisa permanentemente una tarea pero genere directivas solamente cada vez que se requiera de acuerdo al objetivo global de la tarea.

En el caso de los comandos generados por el operador humano, la frecuencia con la que cambian los mismos depende de la tarea, por ejemplo comandos de poca frecuencia pueden ser dados para activar o desactivar una alarma, encender o apagar el aire acondicionado estableciendo su temperatura deseada, encender o apagar las luces del hogar, etc. Comandos de frecuencia intermedia podrían ser directivas de un supervisor humano en un proceso flexible, por ejemplo una máquina dosificadora que puede llenar envases de distintos tamaños y/o con distintos productos. Finalmente, los comandos de alta frecuencia son generados por el usuario generalmente cuando existe una elevada complejidad del entorno como por ejemplo manejar un automóvil, una máquina cosechadora, un helicóptero, etc.

Otro factor importante en sistemas hombre-máquina que eleva la complejidad del mismo es cuando el estado de la interacción entre la máquina y su entorno es difícil de interpretar por el procesamiento programado en una computadora y cuando existen situaciones muy críticas en tiempo en cuyo caso el hombre podría cometer errores en sus comandos o reaccionar demasiado tarde.

¿Cómo se controla un sistema hombre-máquina?... Existen diferentes alternativas para el control de un sistema hombre-máquina, entre ellas se pueden mencionar control manual donde actúa solamente el hombre, control automático donde solamente actúa la automatización, y control compartido donde el hombre y la automatización participan en el control de la máquina, como se ilustra en la figura 2.10. A continuación se describirán conceptualmente dichas estrategias de control.

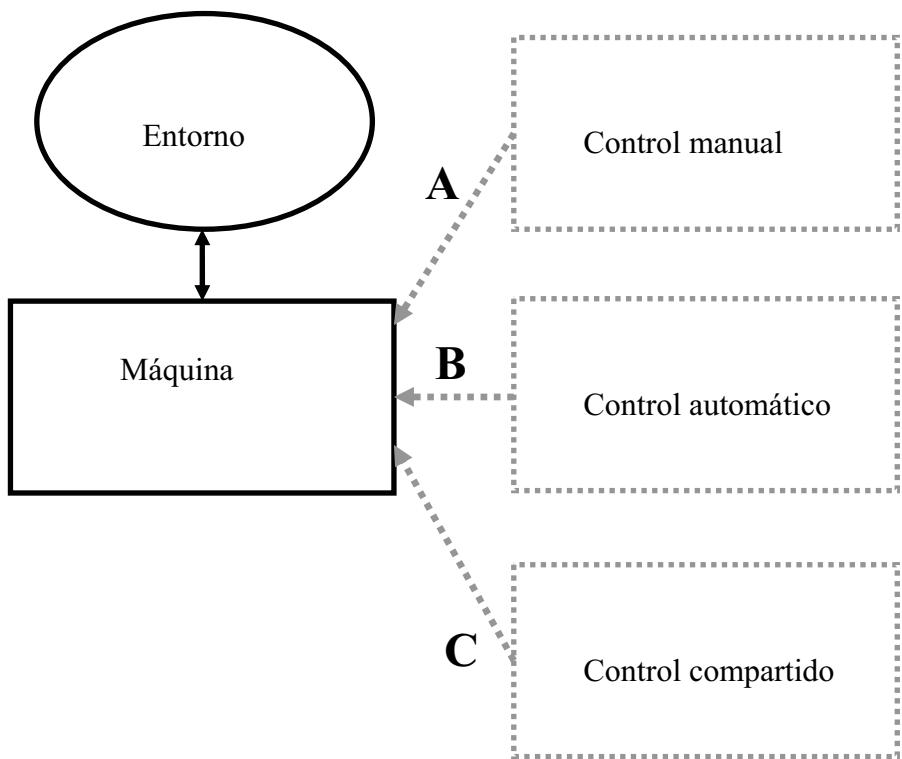


Figura 2.10. Opciones (A, B y C) de control de un sistema hombre-máquina.

## 2.2 Control manual, control automático y sistemas de control hombre-máquina

En el control manual, el hombre genera una acción la cual a través de una interfaz produce una acción de control aplicada sobre la máquina para modificar el entorno o desplazarse sobre el mismo. Asimismo, la información medida por la máquina respecto a su estado interno y al estado de su entorno es realimentada hacia el hombre a través de sus sentidos, principalmente táctil, visual y sonoro, como se ilustra en la figura 2.11.

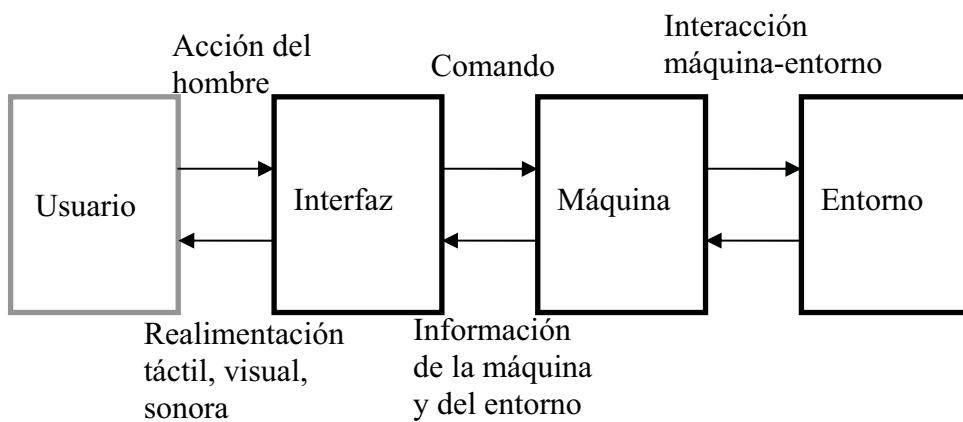


Figura 2.11. Control Manual

Por otro lado, en el control automático de una máquina el hombre envía un comando de alto nivel o referencia objetivo a través de una interfaz. El sistema de control automático es el encargado de hacer cumplir dicho objetivo por medio de la medición y la interpretación del estado de la máquina y del entorno, las cuales son utilizados por un algoritmo de control que implementa un razonamiento dado para finalmente gobernar los actuadores (por ejemplo un motor eléctrico) que modifican el estado de la máquina de manera de cambiar alguna característica del entorno o desplazarse por el mismo, como se muestra en el diagrama de la figura 2.12.

En el caso que la persona deba hacer un monitoreo de la tarea para cambiar a su criterio un comando de alto nivel, entonces se dice que es un esquema de

control supervisor, donde justamente la persona supervisa el trabajo permanentemente y da directivas (comandos) de alto nivel en caso que sea necesario, como se muestra en la figura 2.13.

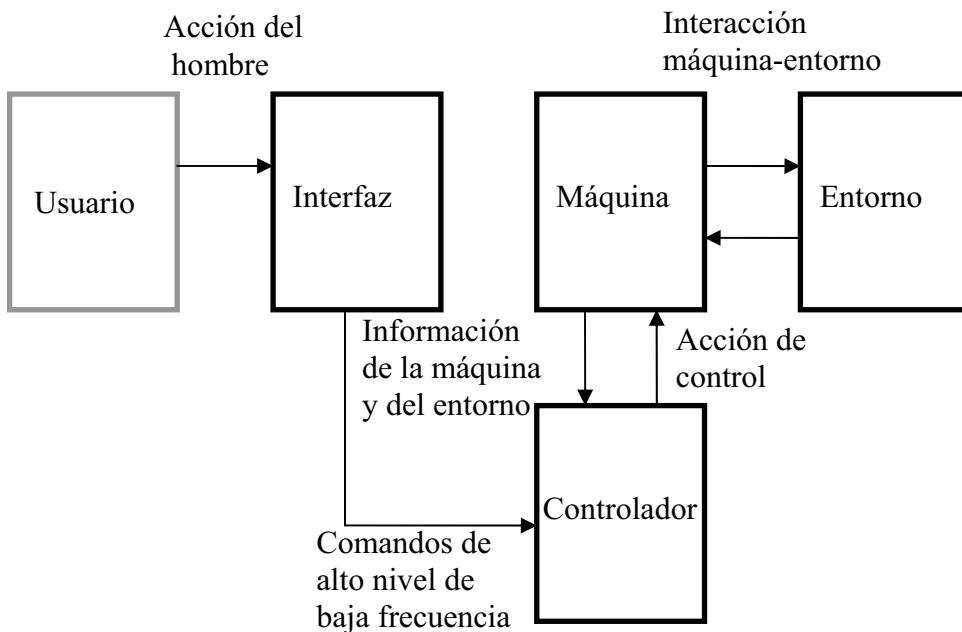


Figura 2.12 Control Automático sin supervisión.

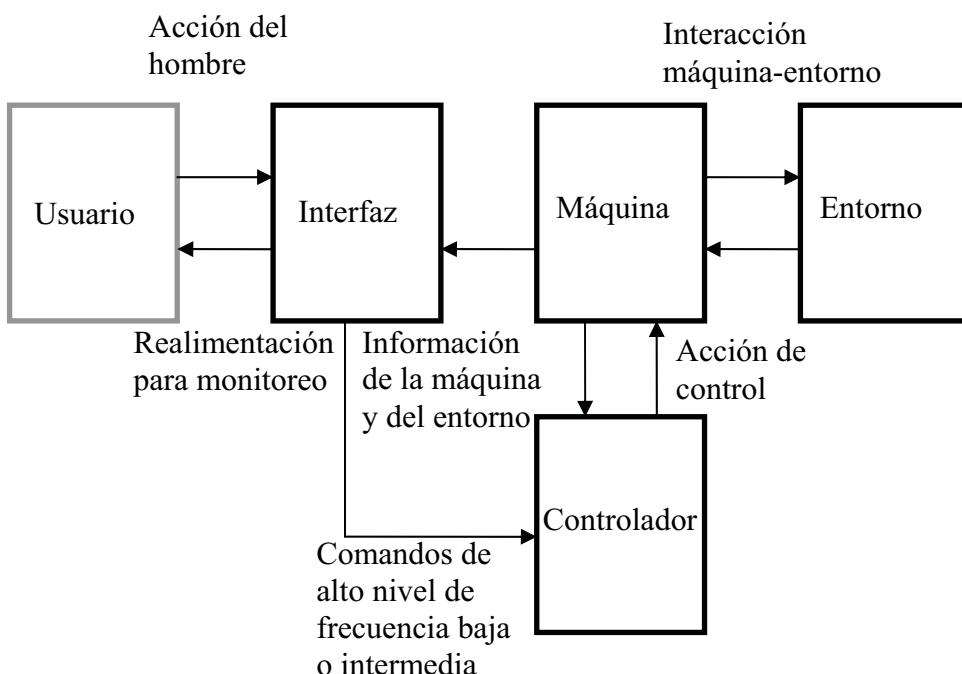


Figura 2.13. Control Automático con supervisión.

En un sistema hombre–máquina de control compartido, la acción de control sobre la máquina es establecida considerando tanto el comando del hombre como la señal de salida de un controlador automático, por ejemplo en un automóvil con control de velocidad crucero la velocidad es controlada en forma automática y la dirección es controlada por el conductor siendo el sistema automóvil controlado en forma compartida. En general, la realimentación hacia el usuario es permanente así como continuamente se tiene en cuenta el comando generado por el usuario, como se ilustra en el diagrama de la figura 2.14. Además, los comandos generados por el hombre podrían ser integrados con las acciones de control computadas por un sistema automatizado de forma de controlar una máquina dada entre ambos. Por ejemplo, el manejo de la tracción y dirección de una cosechadora de manera compartida entre el sistema automatizado y el hombre.

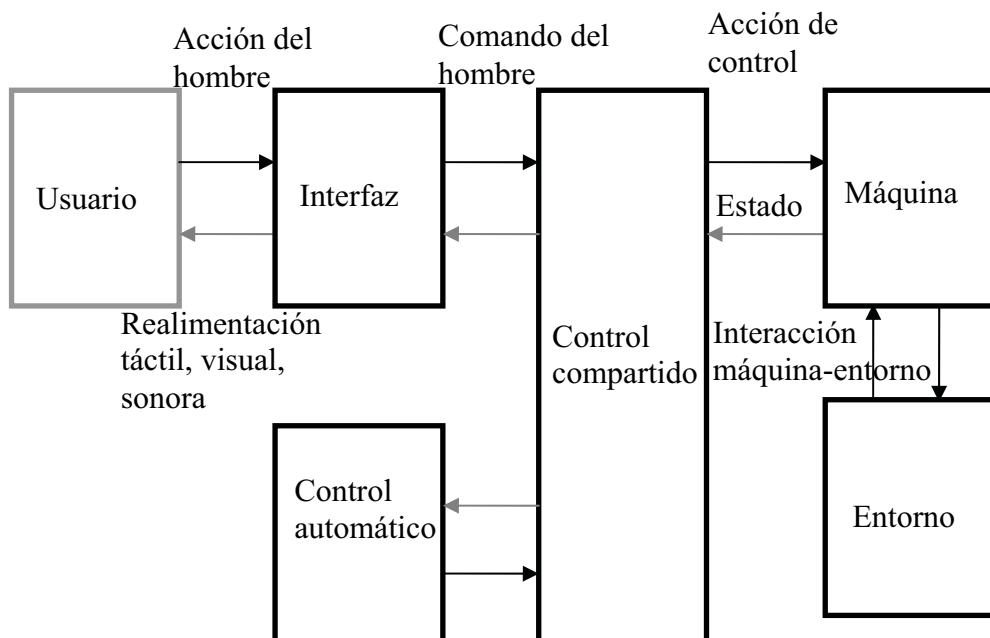


Figura 2.14 Control compartido.

El trabajo físico realizado por una máquina inteligente (robot) controlada en algún grado por el hombre podría ser hecho a distancia, como se ilustra en la figura 2.15. Así, surgen los sistemas de teleoperación donde la persona puede realizar un trabajo físico a distancia por ejemplo utilizando como canal de

comunicación internet. En este caso, el control podría estar formado por una parte situada en la interfaz (cerca del usuario) y otra parte implementada en la máquina (ver figura 2.15).

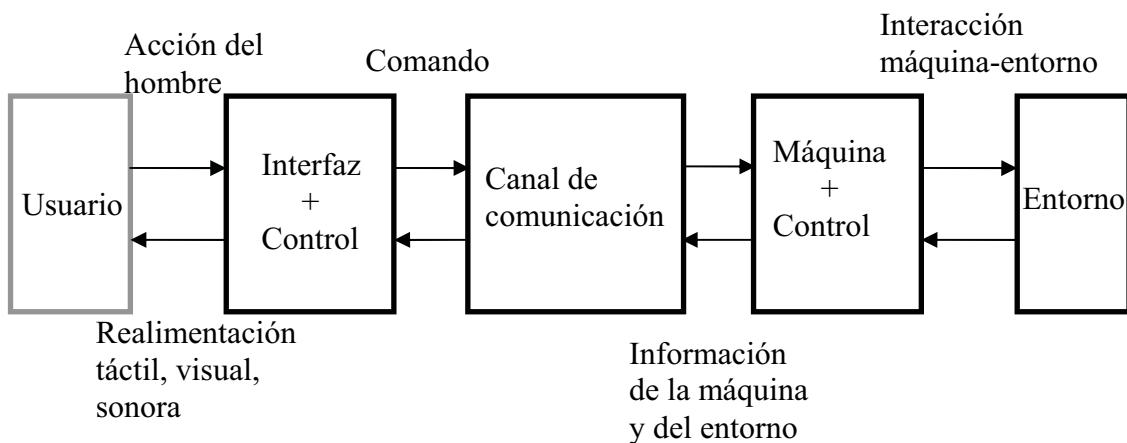


Figura 2.15 Sistemas de Teleoperación.

La figura 2.16 ilustra una máquina completamente inteligente, la cual podría interpretarse como aquella dotada de la capacidad para realizar tareas en forma independiente donde incluso la misma podría cambiar su comportamiento de acuerdo a la situación actual pero considerando la finalidad (objetivos) con la cual la máquina fue diseñada por el hombre. Por ejemplo, un sistema de riego inteligente que en forma automática modifique su forma de riego dependiendo de la humedad medida del suelo y del estado detectado e interpretado (a partir de una imagen captada por un sistema de visión) acerca de las hojas del cultivo

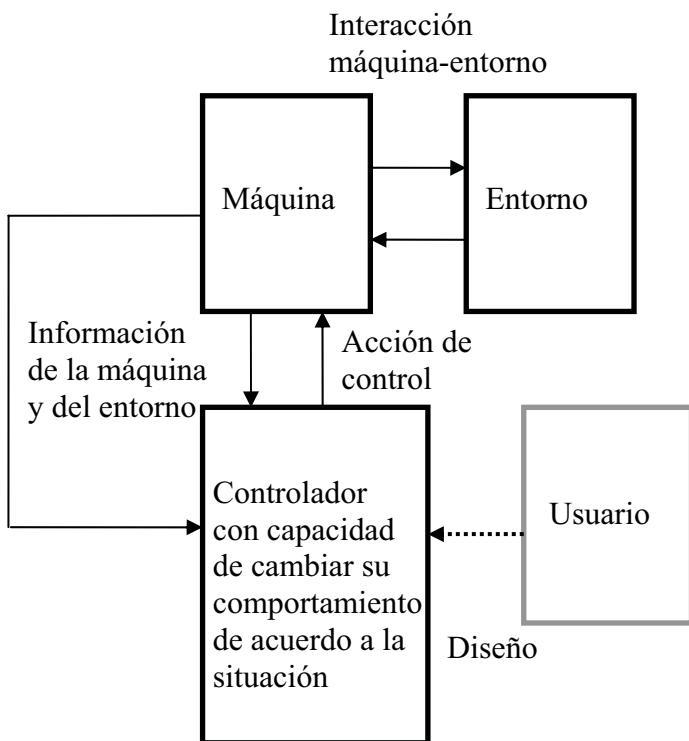


Figura 2.16. Máquina inteligente.

¿Como convierto una máquina manual en una máquina inteligente?...

Una máquina convencional se puede convertir en una máquina inteligente adicionando un sistema de percepción para medir el estado del sistema y un sistema de cómputo que implemente algún razonamiento adecuado para la aplicación que fue diseñada la máquina. Además, el sistema de actuación probablemente deba ser modificado para que el mismo pueda ser controlado electrónicamente desde la computadora dispuesta en la máquina.

A continuación se dan ejemplos adicionales de los sistemas de control descriptos.

*Ejemplo 1 control manual: Persona cocinando*

La persona para cocinar debe hacer muchas actividades tales como seleccionar la comida de la heladera y llevarlas a una mesada; cortar verduras y carne, prender hornallas, mezclar ingredientes en proporciones adecuadas, colocar ingredientes en ollas, etc. Esta es una tarea que involucra muchas actividades y donde la persona utiliza fuertemente su sentido visual, su tacto y su olfato en la preparación de la comida.

*Ejemplo 2 control automático sin supervisión: Persona usando un lavarropa automático*

El usuario carga la ropa a lavar en el lavarropa, y selecciona el programa apropiado de acuerdo al tipo de ropa y luego no supervisa la tarea. En cambio, él retira la ropa lavada solamente cuando el lavarropa termina su tarea, donde el control automático (dependiendo del programa seleccionado por la persona) controla y ejecuta los ciclos de lavado, enjuague y centrifugado correspondientes.

*Ejemplo 3 control automático con supervisión: Persona usando un equipo de aire acondicionado*

La persona prende el equipo de aire acondicionado y establece la temperatura deseada (referencia), entonces el controlador del equipo inyecta frío al recinto si la temperatura es menor que la temperatura deseada o no en caso que la diferencia entre la referencia y la temperatura del recinto sea pequeña. Si el usuario detecta un cambio en las condiciones del clima el mismo toma la decisión de apagar el equipo, por ejemplo si comienza una brisa fresca el usuario seguramente apagara el equipo y abrirá las ventanas del hogar.

*Ejemplo 4 control compartido: Persona manejando una cosechadora moderna con piloto crucero.*

Algunos modelos modernos de cosechadora de granos tienen la opción de piloto crucero donde la velocidad de avance es controlada automáticamente por el controlador de forma de mejorar el rendimiento en la cosecha en un determinado cultivo. En este caso, la velocidad es modificada en forma rápida y precisa de acuerdo al flujo de granos que circula por determinados puntos del interior de la cosechadora, lo cual no puede ser percibido directamente por el operador. La figura 2.17 muestra una cosechadora moderna que incluye la opción de piloto crucero.



Figura 2.17 Hombre manejando una cosechadora moderna (control compartido).

#### *Ejemplo 5 control compartido: Piloto manejando un avión*

Las cabinas de mando de los aviones tienen la opción para el piloto de maniobrar el avión manualmente o mediante un piloto automático que generalmente se utiliza para mantener una altura y velocidad constante avanzando en una dirección determinada. La figura 2.18 muestra una cabina de un avión comercial donde puede apreciarse la interfaz compleja de un avión, la cual es manejada adecuadamente por una persona capacitada y entrenada durante un cierto tiempo.



Figura 2.18 Cabina de avión.

*Ejemplo 6 sistema de teleoperación: Helicóptero no tripulado para fumigación*

Hay algunos sistemas basados en mini o medianos aviones o helicópteros no tripulados los cuales son teleoperados por un usuario para realizar alguna tarea específica. La figura 2.19 muestra un helicóptero no tripulado diseñado para hacer tareas de fumigación operado por un usuario. Además, el helicóptero posee la alternativa de ser gobernado por un controlador autónomo de vuelo.



Figura 2.19 Hombre teleoperando un helicóptero no tripulado para tarea de fumigación fabricado por Yamaha (sistema de teleoperación)

*Ejemplo 7 máquina inteligente: Robot limpiador*

Existen en el mercado robots de limpieza que barren, aspiran y lustran al mismo tiempo el piso de un recinto en forma automática (figura 2.20). Es decir, aparte de realizar la tarea de limpieza en la zona donde se encuentra el robot, el mismo tiene programado un controlador que permite al robot recorrer un recinto sin la intervención del hombre.



Figura 2.20 Robot de limpieza de pisos fabricado por Ubot (máquina inteligente).

*Ejemplo 8 máquina inteligente: Vehículo inteligente de transporte*

Los sistemas inteligentes de transporte de pasajeros están destinados principalmente a personas con dificultades físicas tales que imposibilitan el manejo normal de un vehículo. Estos sistemas tienen incorporadas varias opciones para trasladarse en forma automática de un lugar a otro o con un mínimo de esfuerzo físico. La figura 2.21 muestra un vehículo de transporte inteligente actualmente comercializado.



Figura 2.21 Vehículo inteligente de transporte fabricado por Robosoft (máquina inteligente).

### **2.3 Síntesis del capítulo**

El uso de máquinas y herramientas ayuda al hombre para hacer un trabajo físico.

En un sistema hombre-máquina, el hombre genera comandos a través de sus acciones sobre una interfaz. Dichos comandos son ejecutados por una máquina sobre o en un entorno. A su vez, el estado de la máquina, del entorno y de la tarea es percibido por el operador humano el cual en base al mismo y al objetivo que desee realizar, genera nuevos comandos hacia la máquina. Así, se forma un ciclo repetitivo de percepción-acción que se denomina lazo cerrado de control.

Por otro lado, el tipo de control de un sistema hombre-máquina puede ser manual, completamente automático o compartido entre el hombre y un sistema automatizado. A su vez, dentro del control automático se puede discernir entre un control automático con o sin supervisión de un operador humano.

A medida que se incorpora un mayor nivel de automatización, una máquina cambia de ser pasiva a inteligente, actuando con cierta autonomía y poder de decisión y teniendo una interacción activa con el hombre.

Los ejemplos y gráficos ilustrativos brindados ayudan a afirmar los conceptos básicos de control en sistemas hombre-máquina tales como señal, comando, realimentación, medida objetiva y subjetiva, interfaz, referencia y entorno. Además, los ejemplos en diversas aplicaciones ayudan al lector a imaginar cómo debería ser el tipo de sistema de control (manual, automático o compartido) asociado a una tarea dada.

*Capítulo 3*

*Control de sistemas  
automáticos*



## **Capítulo 3**

### **Control de sistemas automáticos**

Este capítulo tiene como objetivo introducir al lector sobre el control a nivel conceptual de sistemas de control automático. Esta parte del libro ayuda a comprender cuáles son los criterios utilizados para controlar un sistema automático. Además, es objeto de este capítulo que el lector pueda comprender el funcionamiento de sistemas autónomos y asociar diferentes tipos de control con ejemplos de la vida cotidiana.

#### **3.1 Razonamiento humano e implementación electrónica**

El diseño de controladores de sistemas o procesos utiliza diversas herramientas teóricas pertenecientes al área de sistemas de control pero en su aspecto conceptual básico, los controladores representan el cerebro del hombre. Por lo tanto, se intenta plasmar un razonamiento humano para un problema dado en ecuaciones lógicas con base matemática ya que las mismas pueden ser implementadas electrónicamente por una computadora o sistema electrónico de cómputo (como por ejemplo un microcontrolador o PC).

A medida que se incrementa la complejidad del sistema (influencia de más variables sobre la salida, acople entre variables de estado del sistema, variación en el tiempo de los parámetros del sistema, representación matemática compleja del modelo representando al sistema, etc.), se hace difícil y a veces imposible encontrar ecuaciones matemáticas que representen el

razonamiento humano tal que haga que el sistema funcione bien en la práctica contemplando todas las posibles situaciones. Por esta razón, existen muchos métodos de diseño o formas de controlar basados en conceptos matemáticos, físicos, estadísticos, o lógicos o una combinación de ellos, que intentan encontrar soluciones para desarrollar sistemas de control aplicables en la práctica a través de un sistema sensorial de percepción, un sistema de actuación para manejar la energía mecánica necesaria y un sistema de procesamiento de la información y control programado en una computadora.

### **Ejemplo 3.1: Razonamiento humano aplicado a la calefacción del hogar**

Suponga que desea automatizar la calefacción de su hogar donde dispone de un calefactor a gas que usted maneja manualmente, donde además se asume que dispone de un regulador de paso de gas que usted puede controlar para dejar pasar más o menos gas hacia el calefactor de forma de gobernar la cantidad de calor producida (tal como maneja la intensidad del fuego de una hornalla de la cocina) y que se transmite al recinto donde se encuentra instalado el calefactor. En la práctica, la frecuencia de comandos con la que usted opera un calefactor usando control manual es baja, es decir que usted podría actuar como supervisor verificando que el recinto tenga una temperatura deseada determinada independientemente de la temperatura ambiente. Un razonamiento que se puede hacer es que si la temperatura que usted desea es mayor que la temperatura real percibida en el recinto, entonces se podría girar la llave del calefactor para que éste irradie una mayor cantidad de calor. La figura 3.1 ilustra un comportamiento típico del hombre operando un calefactor. Pero ¿cómo fijo la cantidad de gas o la abertura de la llave de control?... Una opción es que la misma sea proporcional a la diferencia entre la referencia de temperatura establecida por el usuario y la temperatura actual del recinto, de forma de inyectar más o menos energía calórica al recinto de acuerdo a dicha diferencia.

Aunque el controlador simple que se acaba de describir parece una buena opción para el ejemplo planteado, nos podríamos preguntar: ¿con este controlador, obtengo el mínimo consumo de gas por hora para mantener la temperatura deseada?...

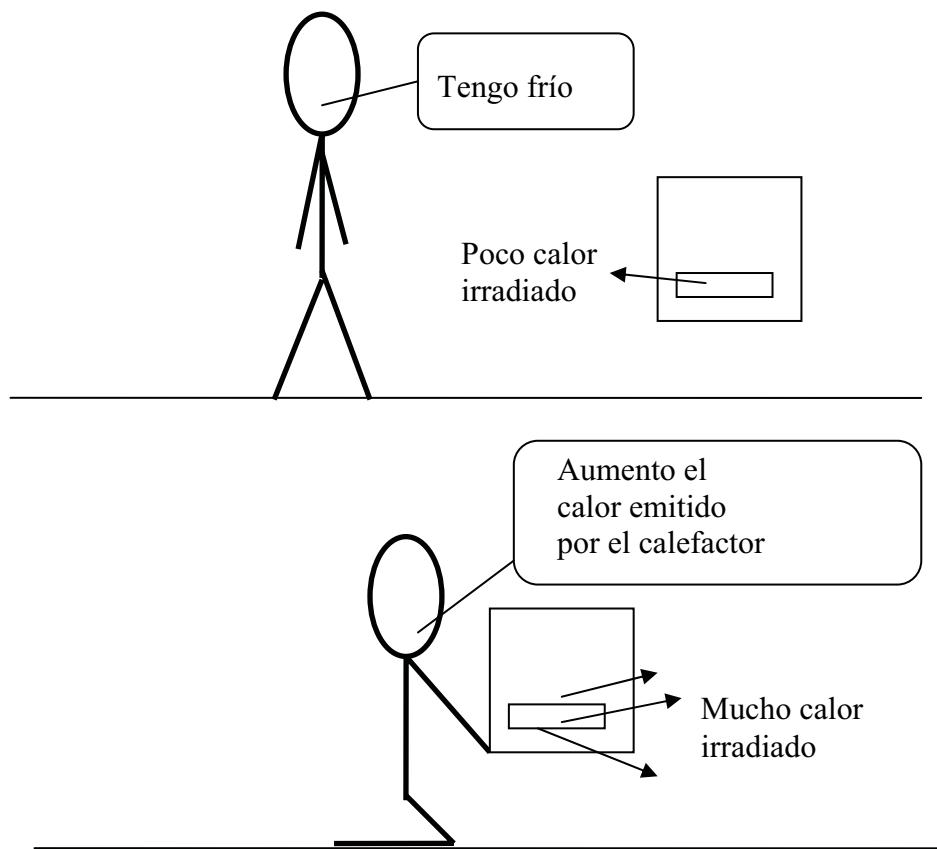


Figura 3.1. Comportamiento del hombre operando un calefactor.

### Ejemplo 3.2: Riego automatizado

Suponga que dispone de un terreno con un determinado cultivo el cual necesita para su desarrollo normal que el nivel de humedad del suelo donde se encuentra el cultivo esté en un determinado rango independientemente de la temperatura ambiente de forma que la planta crezca normalmente. Entonces el terreno se divide en zonas de forma tal que en cada una de ellas se coloca un sensor de humedad y un sistema de riego tipo si-no (prendido o apagado) con la capacidad de regar independientemente cada zona. Entonces se establece

el nivel de humedad deseado de acuerdo al conocimiento del cultivo y el control actúa inyectando agua de regadío a la zona donde la humedad actual sea menor que la humedad deseada y parando el suministro de agua en caso que la diferencia entre la humedad de referencia y la humedad actual sea pequeña.

La figura 3.2 ilustra el comportamiento típico del hombre para determinar si riega una planta más o menos seguido, lo cual puede ser emulado por un sistema automatizado.

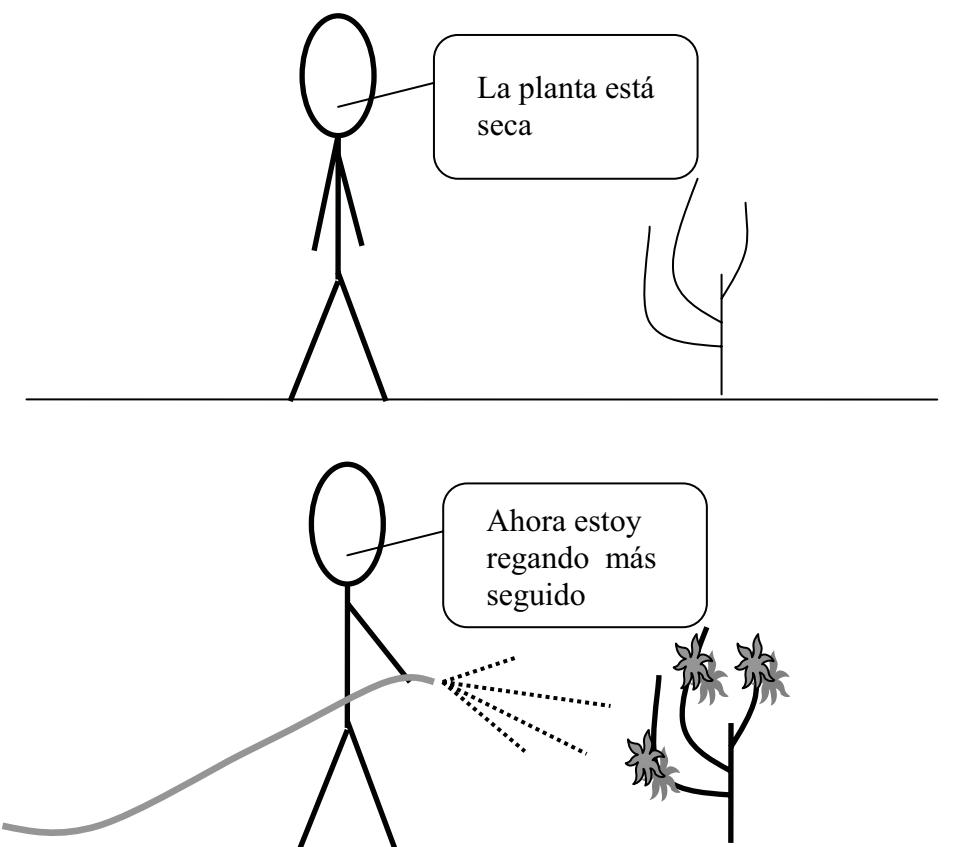


Figura 3.2. Comportamiento del hombre para regar un cultivo.

¿Estos razonamientos de control se podrían aplicar a otros sistemas?...¿Cómo se puede cuantificar la diferencia entre distintos sistemas?....

### **3.2 Modelo de un sistema**

En general, un sistema se puede controlar de forma más rápida y precisa si se conoce cómo funciona o trabaja el mismo. Los modelos representan a través de la matemática el comportamiento de un sistema, es decir permiten conocer cómo evoluciona o cambia el sistema con el transcurso del tiempo o en términos de control un modelo representa la dinámica del sistema [11] [22].

Por ejemplo, la temperatura de un recinto luego de encender un calefactor cambia lentamente respecto a la velocidad de respuesta que tiene un auto de juguete a control remoto cuando se acciona el mismo mediante su radio control. Es decir, un modelo de un sistema indica la velocidad de respuesta de un sistema pero también de qué manera cambia. Por ejemplo, los vibradores de los teléfonos celulares oscilan con un movimiento cíclico tal como girar en sentido horario y luego en sentido anti-horario y así continuamente ante una señal fija de entrada, mientras que una señal fija de entrada en el caso de un motor eléctrico hará que el mismo gire siempre en el mismo sentido. Es decir, además de la velocidad de respuesta un modelo describe la forma con la que un sistema actúa ante un estímulo (señal) de entrada.

Todo sistema se caracteriza por sus entradas, salidas y estado. ¿Qué es entrada, estado y salida de un sistema?... Las entradas son todas las señales que pueden gobernarse de alguna manera y que afectan el comportamiento del sistema, lo cual se ve reflejado en las salidas del sistema, tal como el voltaje (entrada) aplicado a un motor eléctrico que afecta la velocidad del mismo (salida). Es decir que generalmente, al menos por los usuarios, los sistemas son vistos como una caja negra donde ante cambios en las entradas, las salidas se modifican con una determinada forma y velocidad de respuesta. Estas modificaciones en el sistema pueden ser representadas por el modelo matemático del mismo. A su vez, el estado de un sistema representa el funcionamiento interno del mismo, y está compuesto por señales que generalmente pueden ser medibles o estimables a partir de mediciones y la evolución de las mismas describe completamente el funcionamiento interno del sistema. Por ejemplo, cuando se desea controlar el caudal de salida de un líquido en un tanque, el nivel del tanque es una variable que define el estado interno del sistema, como se ilustra en la figura 3.4.



Figura 3.3. Dinámica de un sistema.

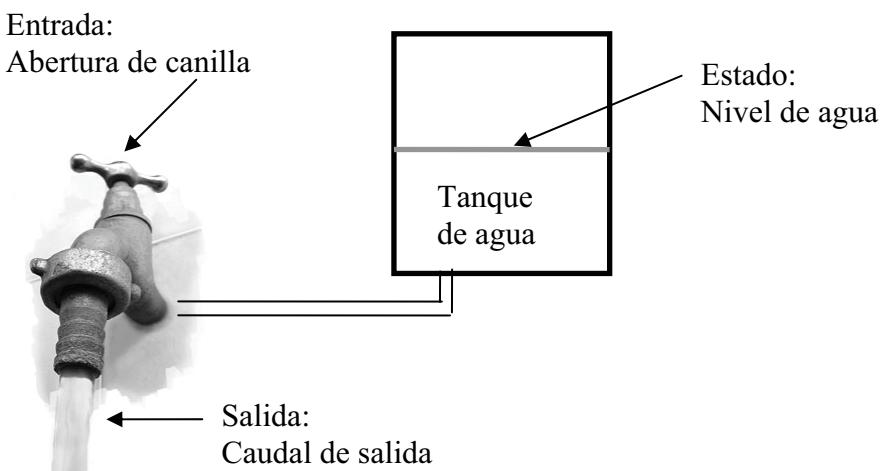


Figura 3.4. Entrada, estado y salida de un sistema de suministro de agua en el hogar.

Finalmente, se remarca que el modelo de un sistema representa al mismo de una manera matemática donde se relacionan las entradas, estado y salidas del sistema, donde la entrada es una señal aplicada al sistema, el estado refleja el estado interno del mismo y la salida representa la respuesta del sistema ante la señal aplicada estando el sistema en un estado dado [12]. Es decir, que las entradas y salidas se pueden asociar a una relación de causa-efecto, como se ilustra en la figura 3.5.

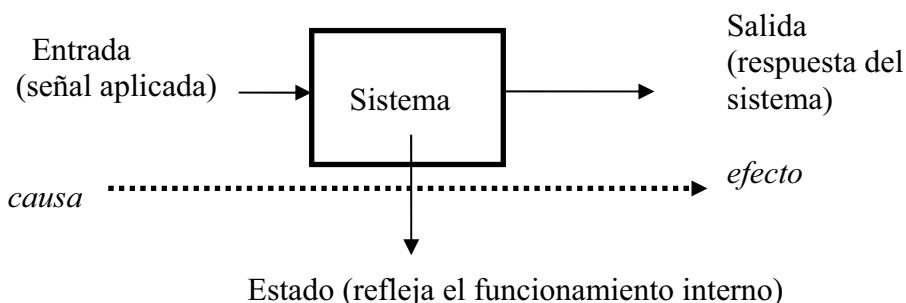


Figura 3.5. Modelo de un sistema.

A continuación se explicarán conceptualmente algunos métodos y estrategias de control que los diseñadores tienen en cuenta para desarrollar sistemas de control automático en el caso que el razonamiento utilizado en el control manual no pueda ser implementado en ecuaciones matemáticas y/o lógicas de forma inmediata aplicando un conocimiento básico de ingeniería.

### 3.3 Diseño basado en estructuras clásicas de control

El diseño de un sistema de control puede estar basado en estructuras clásicas pertenecientes a la teoría de control tal como los controladores PID (proporcional, integral y derivativo), el control de impedancia, entre otros.

El controlador PID [6] es de fácil y rápida implementación y el mismo se compone de tres parámetros que pesan tres efectos diferentes sobre la acción

de control aplicada a la máquina computando su acción a partir del error entre la referencia objetivo y la salida actual del sistema, como por ejemplo la diferencia entre la temperatura deseada en un recinto y la temperatura real en el mismo (ver Ejemplo 3.1). La acción proporcional P da prioridad al error actual, mientras que la acción integral I pondera los errores pasados computados matemáticamente a través de la integral del error y la parte derivativa D pesa la derivada del error la cual puede verse como una predicción del error, es decir que una derivada (pendiente) positiva elevada implica que el error en un futuro próximo será más grande.

La figura 3.6 muestra un sistema de control basado en un controlador PID, donde se puede ver que el controlador tiene como señales de entrada la referencia u objetivo y la salida real del sistema y genera la acción de control aplicada al sistema de forma de cambiar su salida hacia la referencia establecida.

El control PID se basa en la realimentación de la salida. A medida que el sistema es más complejo, es conveniente utilizar en el control la realimentación del estado del sistema debido a la mayor información que provee el estado respecto a la salida del sistema [13]. En este caso, los criterios de diseño más utilizados son estabilidad y optimización, los cuales se describirán brevemente en las secciones 3.5 y 3.6 de este capítulo.

Por otro lado, muchas veces el diseñador de un sistema de control desea que el sistema a controlar se comporte de una manera similar a algún comportamiento físico determinado, por ejemplo se puede hacer que un sistema dado se comporte como si el mismo tuviera una masa menor y una fricción mayor. Es decir, el diseñador puede adicionar o cambiar a través de un sistema de control características físicas tales como elasticidad, amortiguamiento, inercia, fricción, etc. que el sistema a controlar no tiene intrínsecamente. Como ejemplo ilustrativo, se puede utilizar un controlador denominado de impedancia [9] de forma tal que una persona pueda mover fácilmente un robot industrial de gran peso y volumen como si la persona manejara algún objeto muy liviano. La figura 3.7 muestra a un usuario

moviendo un robot industrial, el cual posee un marcador en su extremo, para escribir sobre una pizarra.

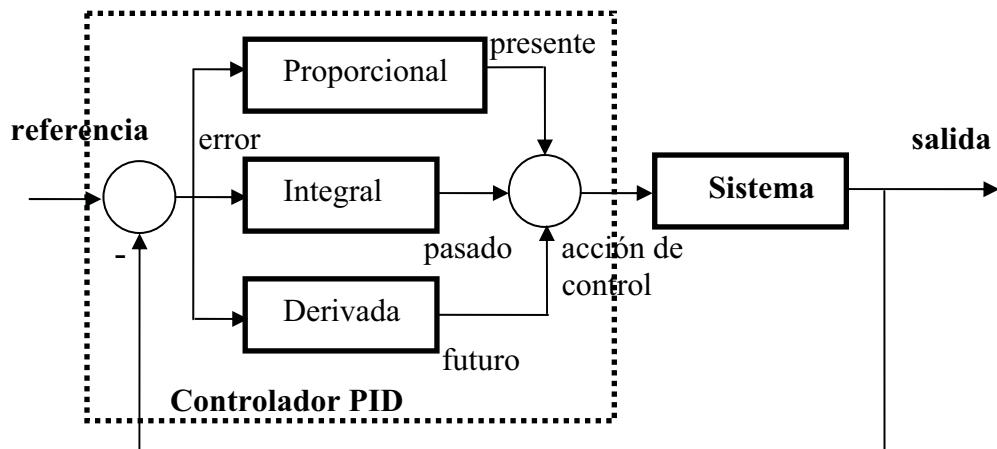


Figura 3.6. Controlador PID.

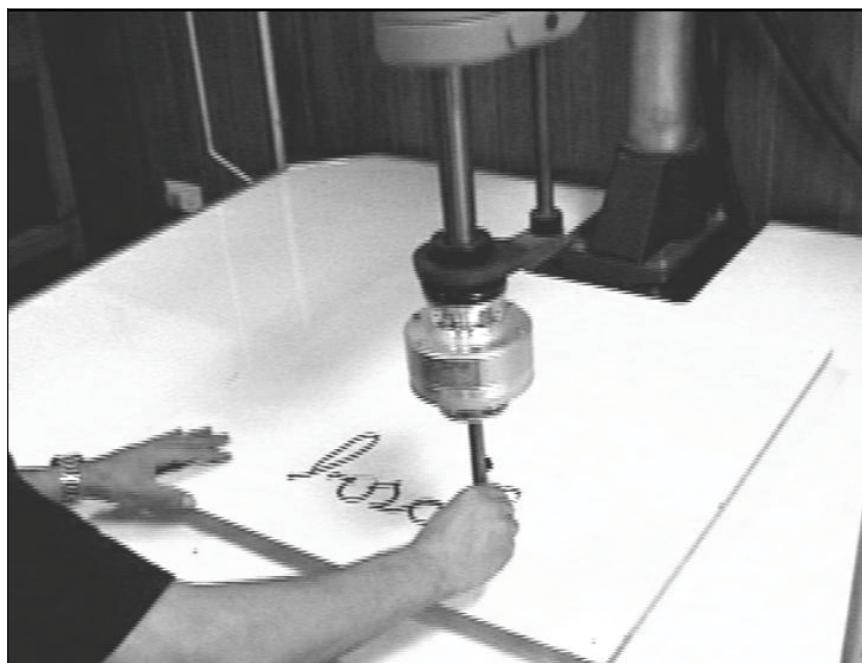


Figura 3.7. Controlador aplicado para modificar las propiedades intrínsecas de un robot industrial.

### 3.4 Diseño basado en máquinas de estado

Una máquina de estados es un sistema secuencial que consta de tres partes: entradas, estados y salidas [158]. Los estados indican en qué parte de un proceso se encuentra el sistema, siendo el número de posibles estados fijo, mientras que las transiciones entre estos dependen del valor de las entradas y del estado en que se encuentra actualmente. Por otro lado, las salidas dependen del estado actual y del valor de las entradas.

Por ejemplo, la figura 3.8 ilustra la entrada, estado y salida en el caso de una puerta de apertura y cierre automático de un supermercado. El estado indica si la puerta está cerrada o abierta mientras que la entrada del sistema se refiere a la distancia de la persona hasta la puerta. Si la persona se encuentra cerca de la puerta y se acerca a ella, entonces el próximo estado de la puerta será abierta. En este ejemplo la salida coincide con el estado.

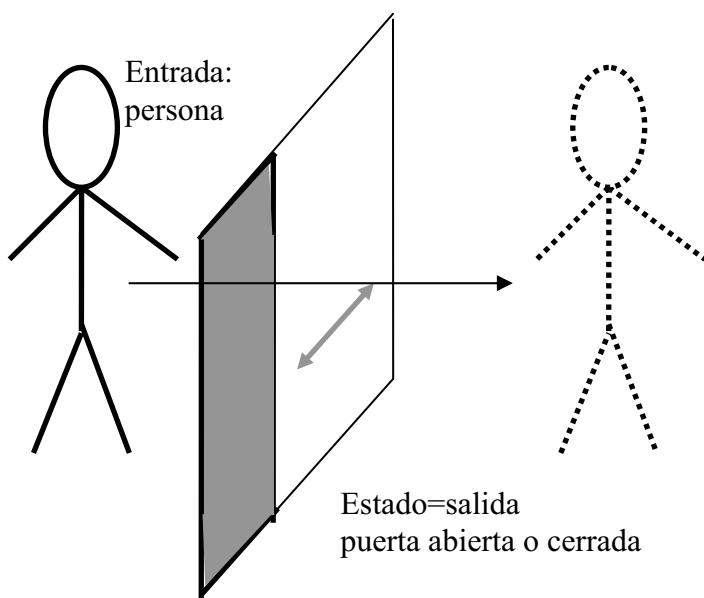


Figura 3.8. Puerta automatizada.

El diseño basado en máquinas de estado se sustenta en el uso de diagramas de flujo donde se considera también el tiempo. Esto decir, si la máquina está en un determinado estado, el próximo estado dependerá generalmente de alguna condición lógica como por ejemplo la condición *si-entonces-sino*, la cual implica que si se cumple esto se hace aquello sino se hace lo otro. También las

transiciones dependen de temporizadores, como por ejemplo si la máquina está en tal estado pasará al próximo luego de un periodo determinado de tiempo.

La figura 3.9 muestra una simple máquina de estado utilizada para controlar las luces de un semáforo, donde en este caso el estado del sistema es descripto semánticamente describiendo el comportamiento del mismo en cada situación tal como “siga”, “precaución”, “pare”, “y atención”. Las salidas del sistema son las luces verde, amarilla y roja, las cuales pueden estar prendidas o apagadas y son controladas individualmente. En este caso, no se tienen entradas pero a partir de un estado inicial comienza una secuencia cíclica de la máquina de estado. En este caso, el diseño se enfoca a establecer el periodo de tiempo que debe transcurrir antes de realizar una transición entre estados. Por ejemplo, el tiempo que el semáforo se encuentra en verde es mucho mayor que el tiempo que el semáforo se encuentra en amarillo. Además, en una intersección de calles típica, se requiere que los semáforos correspondientes a cada vía de paso estén sincronizados, es decir que solamente uno de ellos puede estar en verde y los tiempos de verde son fijados generalmente considerando la importancia relativa entre las calles que se interceptan y flujo vehicular promedio.

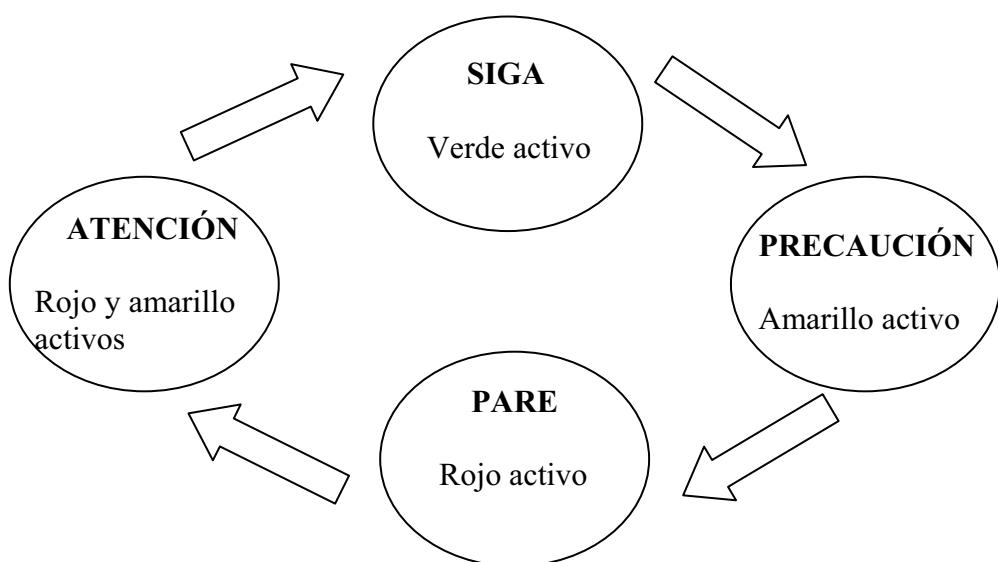


Figura 3.9. Diagrama de estados del sistema de control de luces en un semáforo.

¿Se puede aplicar un sistema de semaforización más inteligente que el sistema descripto?...

La figura 3.10 ilustra un sistema de semaforización inteligente en una intersección donde los tiempos de cada semáforo son manejados de acuerdo al tráfico actual por cada vía de circulación.

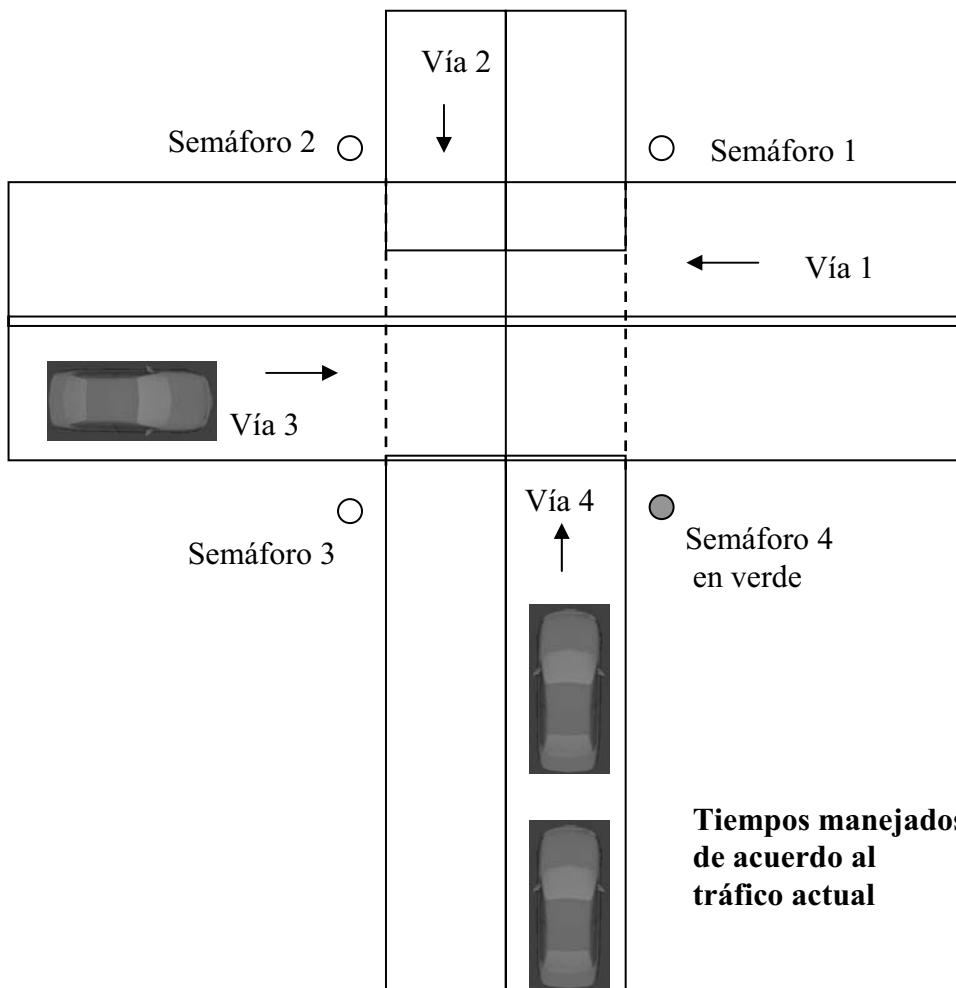


Figura 3.10. Control de un grupo de semáforos en una intersección de calles.

Es decir, se modifican los tiempos de la secuencia en cada estado (rojo, verde, amarillo) de acuerdo al tráfico. Esto permite que en una vía en la cual el tráfico aumenta a determinada hora del día, (por ejemplo por la salida del trabajo en una empresa dada), se agilice el tránsito de dicha vía para evitar una congestión de tráfico aumentando el tiempo de paso respectivo. Luego, cuando

el tráfico es menor se disminuye el tiempo de paso de dicha vía. Esto se puede hacer en forma dinámica durante todo el día midiendo permanentemente el número de vehículos que pasa por cada vía de la intersección.

### 3.5 Diseño basado en estabilidad

La estabilidad de un sistema se asocia a una característica deseable del comportamiento del mismo tal como cuando un objeto vertical de base firme (estable) sufre pequeños balanceos producidos por agentes externos (por ejemplo viento) pero el objeto no se caerá debido a su base firme. En cambio si la base no es buena, entonces una leve perturbación o acción externa hará que el objeto se caiga al suelo quedando en forma horizontal, como se ilustra en la figura 3.11.

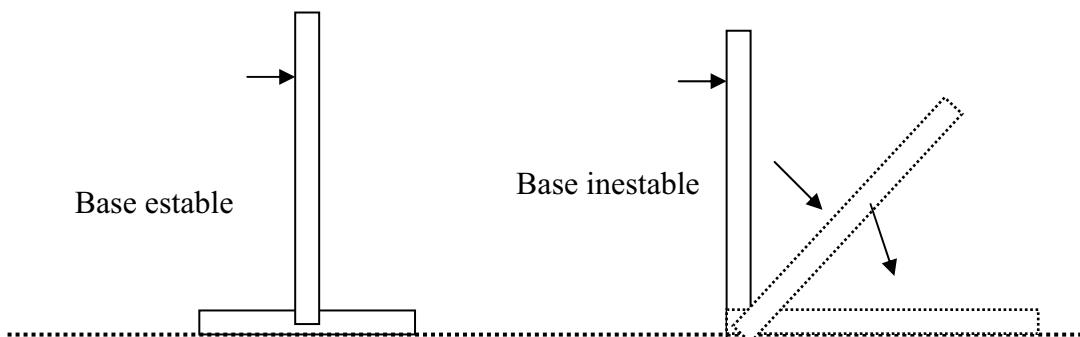


Figura 3.11. Ejemplo ilustrativo del concepto de estabilidad.

En teoría de control, la estabilidad también es una característica deseable del sistema y más aun generalmente se pretende que las diferencias entre el objetivo o referencia y el estado actual de la máquina sean cada vez más pequeñas a medida que el tiempo transcurre, lo cual implica que el estado del sistema tiende o converge o va hacia la referencia.

Los sistemas de control hombre-máquina son difíciles o imposibles de describir explícitamente mediante herramientas matemáticas que indiquen la evolución del sistema en el tiempo de forma de analizar la convergencia del sistema

hacia el objetivo deseado, ya que además de la complejidad de la máquina y del entorno se suma la infinita complejidad del comportamiento humano. A partir de esto, se han propuesto teorías de estabilidad tal como la teoría de Lyapunov y la estabilidad de entrada-salida [4][5], donde se intenta analizar la estabilidad del sistema sin tener ecuaciones matemáticas que representen explícitamente la evolución del sistema hombre-máquina.

La definición de estabilidad de Lyapunov [3] se sustenta en analizar si el sistema permanentemente disipa energía (o una función matemática abstracta que puede interpretarse como tal) de forma tal de garantizar que el sistema a medida que transcurre el tiempo tendrá menos energía en juego y tenderá a la estabilidad. Por ejemplo, un sistema tipo péndulo que se suelta desde una posición angular cualquiera, entonces luego de un tiempo se detendrá en su posición más baja como se ilustra en la figura 3.12, o en el caso del error en un sistema de control, si se cumple que su evolución en el tiempo disipa energía continuamente, entonces dicho error de control será cada vez más pequeño.

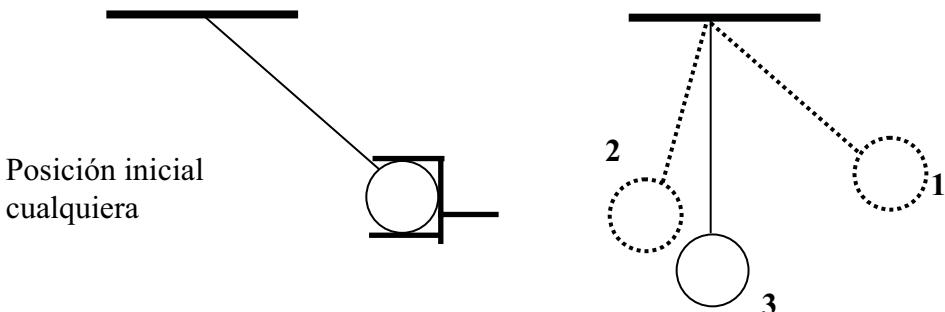


Figura 3.12. Sistema tipo péndulo mostrando una secuencia estable 1,2,3.

Otro ejemplo es cuando una persona anda en bicicleta por un terreno plano y deja de pedalear sin frenar. En este caso la bicicleta se detendrá ya que la fricción hará que la energía acumulada se disipe. Por otro lado, si la persona frena la bicicleta cuando circula por un terreno con pendiente en bajada, entonces se seguirá acumulando energía que se manifestará en un aumento

de la velocidad y que puede llevar a una caída de la persona. Este aumento de energía involuntario se relaciona con un sistema no estable (inestable).

### **3.6 Diseño basado en optimización**

Un criterio de diseño es optimizar el funcionamiento del sistema de forma de por ejemplo minimizar el costo de operación de la máquina, o maximizar el rendimiento de la misma o disminuir el tiempo empleado o cualquier combinación entre ellas con algún nivel de prioridad establecido. Generalmente, los sistemas de control automático buscan obtener una respuesta rápida, con mínimo error y con el menor consumo o costo posible. Por ejemplo en el caso típico de un controlador de temperatura de un hogar, el objetivo podría ser mantener el error de temperatura (diferencia entre la referencia objetivo o valor deseado y el valor real de temperatura) dentro de cierto límite minimizando el consumo de energía.

El diseño de un sistema de control basado en optimización [8] requiere especificar el modelo matemático (comportamiento) del sistema a controlar, definir el criterio de optimización (por ejemplo mínimo costo, mínima energía, máxima velocidad, máxima precisión, combinación de los mismos, etc.), y especificar posibles restricciones del sistema (por ejemplo valores máximos de las acciones de control) de forma de obtener para cada instante una acción de control óptima.

La mayoría de los problemas de control óptimos no se puede resolver analíticamente, es decir a través de una ecuación implementada en un sistema de cómputo que entregue permanentemente las acciones a ser aplicadas al sistema. Sin embargo, el crecimiento en capacidad y velocidad de cómputo de los ordenadores electrónicos ha fomentado el desarrollo de distintos métodos numéricos y recursivos de búsqueda permitiendo la aplicación del control óptimo a muchos problemas complejos.

Por ejemplo, suponga que un conductor desee manejar un vehículo en ruta a una velocidad óptima de acuerdo al consumo por kilómetro del automóvil. La figura 3.13 muestra puntos típicos obtenidos para un vehículo dado que

relacionan la velocidad del automóvil con el consumo por distancia recorrida. Entonces un criterio de optimización podría ser elegir la velocidad tal que en dicho punto de consumo la relación consumo-velocidad posea una tangente de pendiente 1 (línea a 45 grados) de forma tal que hablando en términos relativos, en dicho punto lo que se gana en proporción de velocidad (reduzco el tiempo del viaje) es igual a la proporción que se pierde en costo debido al mayor consumo. Debido a que la relación mencionada podría ser cumplida por varios puntos, entonces surge la necesidad de mejorar el criterio por ejemplo seleccionando de los puntos que cumplan la relación deseada entre velocidad y consumo aquel que posea la mayor velocidad. La figura 3.13 ilustra el proceso de obtención de la velocidad óptima de acuerdo al criterio establecido, donde se analizan todos los puntos disponibles (12 en este caso).

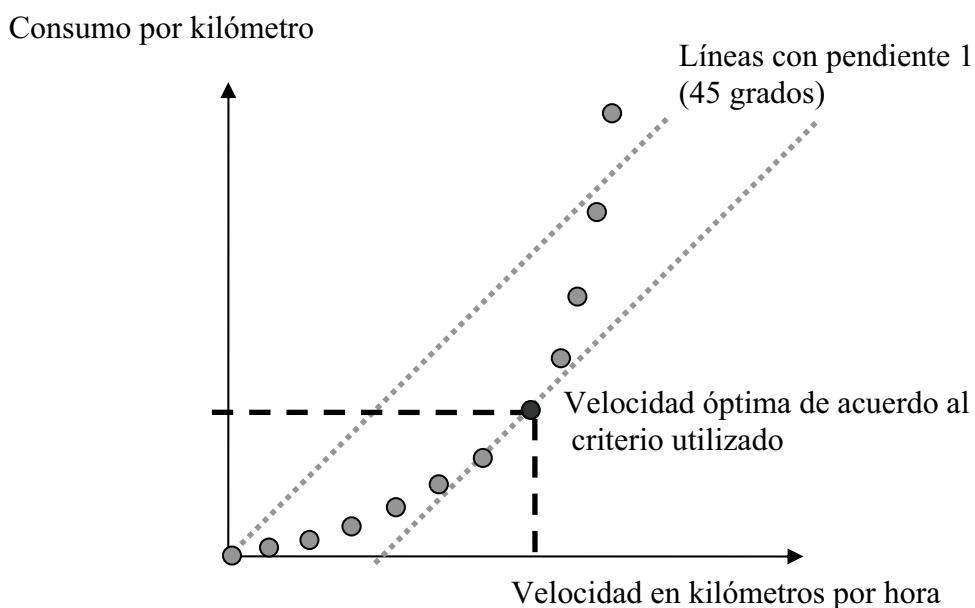


Figura 3.13. Buscando el punto de funcionamiento de acuerdo al consumo y velocidad de un automóvil.

Otro ejemplo de criterio de optimización se da cuando una máquina determinada puede fabricar 100 unidades de un producto en 6 horas pero con un gasto de energía específico, mientras que la misma máquina puede fabricar la misma cantidad de productos en 12 horas con un gasto menor de energía. Entonces se podría controlar la máquina en función de optimizar la velocidad

de producción y el costo de energía para obtener las acciones de control que posibiliten a la máquina fabricar un número de unidades dado en el tiempo que al productor decida en función de pedidos de clientes, costos de producción, etc. pero con el mínimo costo posible.

### **3.7 Diseño basado en inteligencia artificial**

La inteligencia artificial implica el estudio y diseño de agentes inteligentes realizables en un computador, los cuales abarcan los sistemas que perciben un entorno y realizan acciones que maximizan las posibilidades de éxito.

Por otro lado, el hombre utiliza generalmente para encontrar una solución a un problema complejo alguna heurística, la cual se define como la capacidad de un sistema para realizar de forma inmediata innovaciones positivas para sus fines.

Por ejemplo, en el caso planteado para seleccionar una velocidad óptima de acuerdo al criterio establecido en la sección anterior, se podría utilizar una heurística para realizar la búsqueda más rápida, tal como el conocimiento de que el consumo por kilómetro es mayor a medida que la velocidad del automóvil aumenta, por lo tanto la dirección de búsqueda podría comenzar desde los puntos de menor velocidad y ser detenida cuando el punto analizado tiene una pendiente mayor que 1, este proceso se ilustra en la figura 3.14, donde no se analizan todos los puntos debido al uso de conocimiento y heurística .

Esta heurística así planteada sirve solamente para este caso en particular. Por ello, se buscan estructuras basadas conceptualmente en alguna heurística general que permitan adaptarse a diferentes problemas. En este contexto, existen una gran cantidad de métodos dentro del área de inteligencia artificial, aunque se pueden mencionar que dos de los métodos más empleados son las denominadas redes neuronales [7] [14] y los algoritmos genéticos [10].

Las redes de neuronas artificiales (RNA) son un modelo de aprendizaje y procesamiento automático que consisten en una simulación de las propiedades observadas en los sistemas neuronales biológicos a través de modelos matemáticos recreados mediante mecanismos artificiales (como un

círculo integrado o una computadora). Se trata de un sistema de interconexión de funciones denominadas neuronas en una estructura llamada red que colabora para producir un estímulo o señal de salida, como por ejemplo una acción de control o una solución de un problema en particular. En inteligencia artificial es frecuente referirse a ellas como redes neuronales.

Consumo por kilómetro

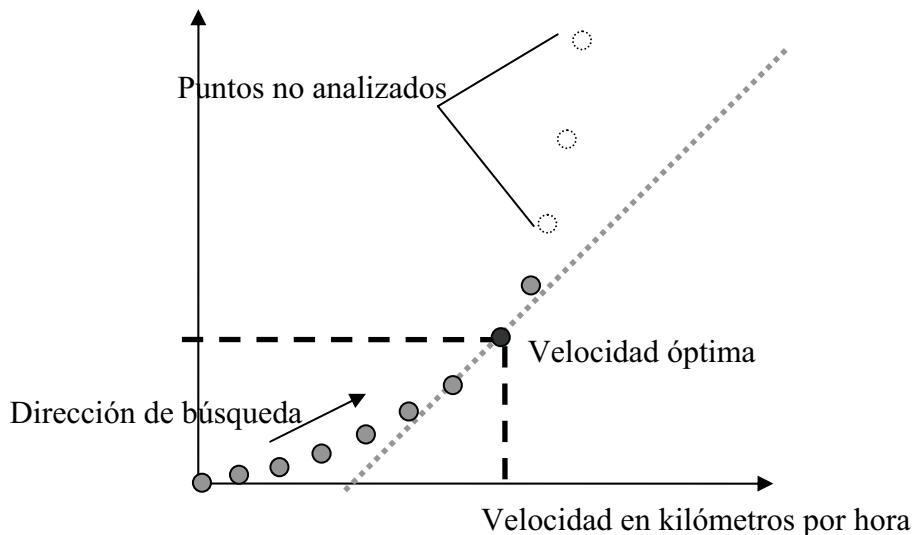


Figura 3.14. Búsqueda con uso de heurística.

Las redes neuronales artificiales poseen la capacidad de aprender a través de un proceso denominado etapa de aprendizaje. Esta consiste en proporcionar a la RNA datos como entrada e indicar cuál es la salida (respuesta) esperada. Por ejemplo en una red aplicada al diagnóstico de imágenes médicas; durante la fase de entrenamiento el sistema recibe imágenes de tejidos que se sabe son cancerígenos y tejidos que se conocen como sanos. Si el entrenamiento es exitoso, entonces el sistema podrá recibir nuevas imágenes de tejidos no clasificados y obtener su clasificación como *sanos* o *no sanos* con un buen grado de confiabilidad.

Biológicamente, un cerebro aprende mediante la reorganización de las conexiones entre las neuronas que lo componen. De la misma manera, las RNA tienen un gran número de procesadores virtuales interconectados entre sí

que de forma simplificada simulan la funcionalidad de las neuronas biológicas. En esta simulación, la reorganización de las conexiones entre neuronas artificiales se modela mediante un mecanismo de pesos, que son ajustados durante la fase de aprendizaje y durante el funcionamiento normal del sistema. En una RNA entrenada, el conjunto de los pesos determina el conocimiento de esa RNA que puede resolver el problema para el cual ha sido entrenada.

Por otra parte, en una RNA, además de los pesos y las conexiones, cada neurona tiene asociada una función matemática denominada función de transferencia. Dicha función genera la señal de salida de la neurona a partir de las señales de entrada. La entrada de la función es la suma de todas las señales de entrada multiplicada matemáticamente por el peso asociado a la conexión de entrada de la señal, como se muestra en la figura 3.15. En dicha figura se visualizan las diferentes capas de una red neuronal.

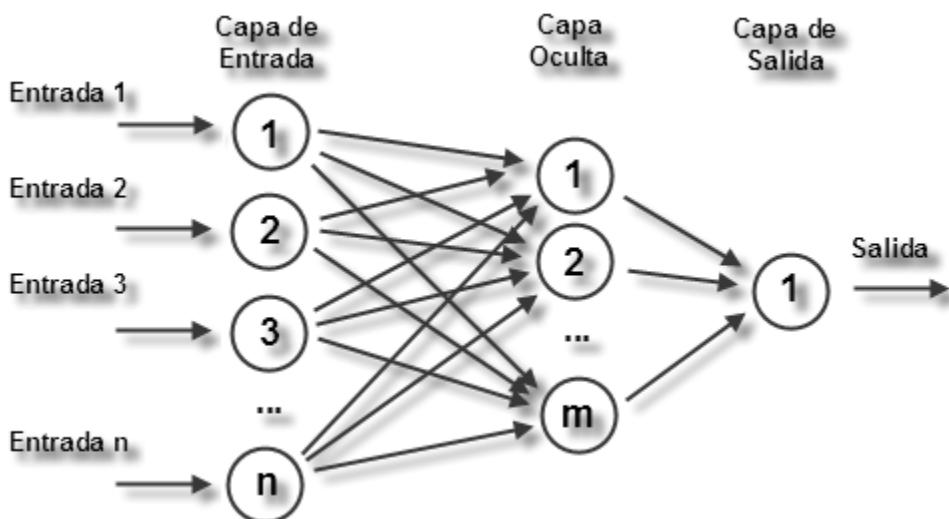


Figura 3.15. Representación de una red neuronal.

Las características de las RNA permiten utilizar las mismas aún en aplicaciones en las que no se dispone a priori de un modelo identificable que pueda ser programado, basándose en datos de entrada y salida obtenidos previamente y también utilizando los datos adquiridos permanentemente durante el funcionamiento normal del sistema.

Por otro lado, existen otros métodos tales como los algoritmos genéticos. Estos involucran una estructura que organiza o dirige un conjunto de transformaciones y operaciones para simular un proceso de evolución que ayuda a encontrar una solución dentro de un conjunto generalmente muy grande de posibles alternativas incluyendo problemas de gran complejidad.

Básicamente, los algoritmos genéticos se sustentan en el proceso biológico de reproducción y herencia de genes en una población determinada. La figura 3.16 muestra un diagrama ilustrativo del funcionamiento de un algoritmo genético donde en la práctica la población puede ser el espacio de números reales si por ejemplo se debe encontrar el valor de un parámetro de un modelo o la acción de control de un controlador dado.

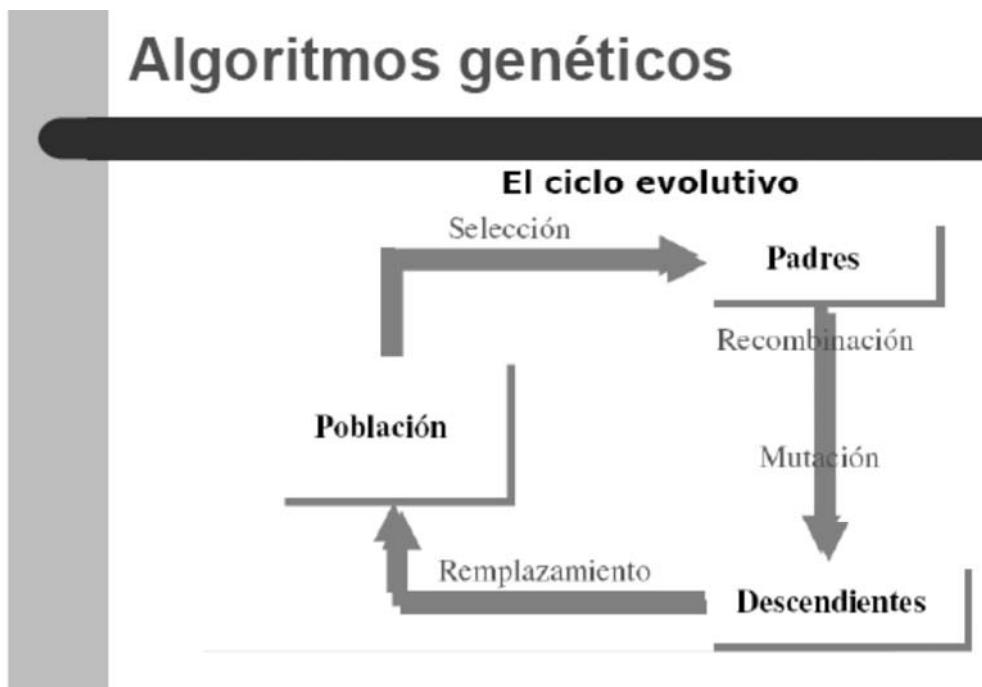


Figura 3.16. Diagrama representativo de los algoritmos genéticos.

### 3.8 Síntesis del capítulo

El diseño de sistemas de control automático se sustenta en diferentes conceptos de forma de establecer las acciones de control más adecuadas para

ser aplicadas a un sistema. En general, los criterios de diseño utilizados para el control de sistemas automáticos buscan obtener una respuesta precisa y rápida, y optimizar los recursos del sistema.

Cuando los sistemas son simples y se pueden controlar a partir de una lógica de control y temporizadores, se suelen utilizar máquinas de estado para controlar los mismos. A medida que el sistema es más complejo, la representación del mismo comienza a dificultar tanto la obtención de un modelo representativo como del razonamiento que debería ser utilizado para su control. Así, se utilizan desde esquemas clásicos de control tales como el controlador PID hasta controladores más complejos tales como aquellos basados en la Teoría de Lyapunov donde la evolución del sistema no se puede establecer matemáticamente (aunque el sistema pueda ser modelado) y la complejidad del funcionamiento del sistema es elevada, como por ejemplo señales de salida acopladas entre si (el cambio de una entrada modifica varias salidas de distintas formas y posiblemente no todas hacia valores deseables). También el concepto de optimización se puede aplicar desde sistemas sencillos donde los mismos se pueden modelar hasta sistemas complejos donde muchas veces el sistema no puede modelarse y se debe seleccionar una acción de control óptima entre una gran cantidad de posibles alternativas, la cual puede buscarse de manera secuencial barriendo todo el espectro, o de maneras metodológicas basadas en estructuras y conocimiento heurístico tal como las redes neuronales y los algoritmos genéticos.



# *Capítulo 4*

*Componentes de un sistema*

*de control*



## **Capítulo 4**

### **Componentes de un sistema de control**

Este capítulo tiene como finalidad formar al lector acerca de la implementación interna de un sistema de control a nivel conceptual. Este capítulo no pretende mostrar y explicar la amplia tecnología actual empleada en sistemas de control. Sin embargo, se describen brevemente algunos componentes tecnológicos y aplicaciones de un sistema de control como ejemplos de ayuda para que el lector comprenda resumidamente qué tienen en su interior las máquinas inteligentes como así también tomar conocimiento de la potencialidad de las mismas con respecto a que señales se puede medir, cuales son los actuadores comúnmente utilizados, cómo está formado el sistema interno de cómputo, etc.

#### **4.1 Introducción**

El crecimiento continuo de la tecnología y su disminución en costo incrementa paulatinamente la cantidad y calidad de aplicaciones de los sistemas automatizados.

En este capítulo, se describirá brevemente la tecnología actual comúnmente utilizada para implementar un sistema de control automático formado por un sistema sensorial, un sistema de actuación y un sistema de cómputo, donde este último procesa la información y computa las acciones de control. Estos tres subsistemas están diseñados para gobernar una máquina de manera de realizar un trabajo físico sobre o en un entorno dado. Así, la automatización podría funcionar de manera independiente como un sistema completamente

automático o como parte de un sistema compuesto por el hombre y una máquina formando así un *sistema hombre-máquina inteligente*. La figura 4.1 muestra un diagrama ilustrativo de la composición de un sistema de control automático desde un punto de vista de su implementación donde se remarcán con trazo grueso los bloques que se detallarán en este capítulo.

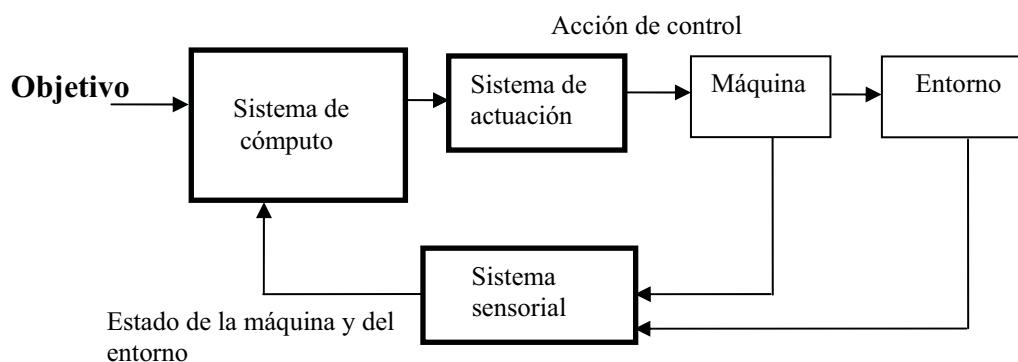


Figura 4.1. Componentes de un sistema de control automático.

El sistema sensorial permite medir el estado de la máquina y el estado del entorno. Por otro lado el sistema de cómputo contempla etapas de procesamiento, comunicación y control permitiendo procesar toda la información provista por el sistema sensorial y computar la acción de control a ser ejecutada por un sistema de actuación. Este último sistema modifica el estado de la máquina y el estado del entorno de forma de hacer un trabajo físico establecido a través del objetivo del sistema de control. Además, la parte de comunicación del sistema de cómputo permite intercambiar información desde los sensores hacia el sistema de cómputo y desde éste hacia los actuadores. La distancia entre el sistema de control y el operador humano puede ser desde centímetros hasta miles de kilómetros.

## 4.2 Sistema sensorial

Un sistema sensorial está formado por un conjunto de sensores, los cuales permiten medir señales físicas de interés y las convierten en señales eléctricas

adecuadas para poder ser ingresadas a una computadora o sistema electrónico de cómputo [135]. Un sistema sensorial es análogo a la percepción del hombre, que le permite estimar una medida de distancia, sentir una fuerza de contacto, percibir la temperatura de un objeto, discriminar objetos de distinto color y tamaño, etc.

A continuación y con el objeto de conocer los componentes internos de un sistema de control, se describen brevemente algunos tipos de sensores utilizados para medir posición y velocidad, localización de una máquina, temperatura, humedad, fuerza, distancia, e información extraída a partir de una imagen captada por un sistema de visión.

#### 4.2.1 Medición de posición y velocidad

Los sensores de la posición y/o velocidad angular de un eje son componentes fundamentales en la tecnología de control. Es difícil encontrar sistemas mecánicos industriales automatizados que no tengan varios ejes de movimiento angular y/o lineal. Los sensores se acoplan de alguna manera al eje de rotación de forma de medir el desplazamiento o velocidad angular del mismo, como se ilustra en la figura 4.2.

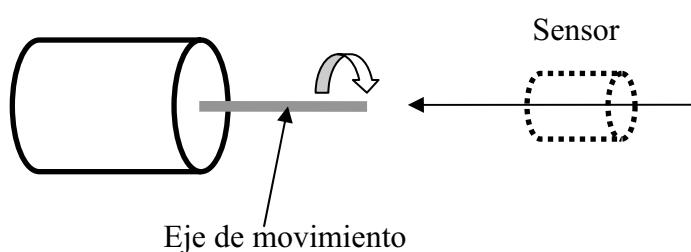


Figura 4.2. Acople de un sensor al eje de movimiento a medir.

Para medir el desplazamiento angular de un eje de rotación se utilizan generalmente potenciómetros y encoders [134] [135]. Un sensor tipo potenciómetro está construido de forma tal que el mismo varía su resistencia

eléctrica dependiendo del desplazamiento angular de su eje. Por lo tanto, acoplando el eje del potenciómetro con el eje de giro a medir se puede obtener una señal representativa del desplazamiento angular. Por ejemplo, los potenciómetros son utilizados en los automóviles con acelerador electrónico para capturar la posición angular del pedal acelerador.

Por otro lado, un codificador incremental de rotación es un sistema que entrega pulsos distanciados entre sí de acuerdo a la velocidad de rotación del eje a medir y una señal tipo si-no que indica el sentido de giro. Para obtener el desplazamiento angular se cuentan los pulsos recibidos por el detector. Estos sensores están formados por un sistema óptico basado en un emisor y un detector de luz enfrentados y un sistema que se acopla al eje de movimiento de forma de tapar o no el camino entre el emisor y el receptor cuando el eje gira. Un ejemplo típico de este tipo de codificadores se puede ver dentro de un mouse estándar de computadora. Los codificadores absolutos ópticos funcionan con un concepto similar al de los tipos incrementales en cuanto a la detección óptica, sólo que poseen un disco codificado que permite representar cada posición angular con un código determinado en el disco y que puede ser leído a través de varios detectores ópticos. Los encoders también pueden estar basados en efectos magnéticos, por ejemplo existen en el mercado encoders absolutos basados en el efecto Hall. La figura 4.3 muestra un sensor tipo potenciómetro y un sensor tipo encoder.



Figura 4.3. Potenciómetro utilizado para medir posición angular (izquierda) y sensor óptico tipo encoder para medir posición angular y velocidad de giro (derecha).

## 4.2.2 Sistemas de localización

Los sistemas de localización permiten medir o estimar la posición de una máquina o dispositivo respecto a un sistema de coordenadas global. Los métodos más conocidos son el empleo de odometría y el uso de receptores de señales de satélites como por ejemplo los dispositivos basados en GPS.

### 4.2.2.1 Odometría

La odometría es el estudio de la estimación (no es una medición directa) de la posición de vehículos con ruedas durante su movimiento. Para realizar esta estimación se usa información sobre la rotación de las ruedas para estimar cambios en la posición a lo largo del tiempo a partir de una posición inicial conocida.

La odometría proporciona una buena precisión a corto plazo, su implementación es económica y permite tasas de muestreo muy altas. Sin embargo, la idea fundamental de la odometría es la integración de información incremental del movimiento a lo largo del tiempo, lo cual lleva a una inevitable acumulación de errores.

### 4.2.2.2 GPS

El sistema de posicionamiento global GPS (por sus siglas en inglés *Global Positioning System*) entrega datos de posición (latitud, longitud, y altitud), velocidad, y hora y fecha respecto a un sistema de referencia global [141]. El funcionamiento del sistema GPS se basa en el principio matemático de la triangulación (figura 4.4) para determinar la posición de un punto en base a la medición de distancia entre el receptor y al menos tres satélites para determinar la posición global del receptor [142]. Por lo tanto, para calcular la posición de un punto será necesario que el receptor GPS determine con exactitud la distancia que lo separa de los satélites. Una vez obtenida la medición de posicionamiento global, estos datos se transmiten hacia un

sistema de cómputo. La figura 4.5 muestra dos sensores tipo GPS de pequeño tamaño.

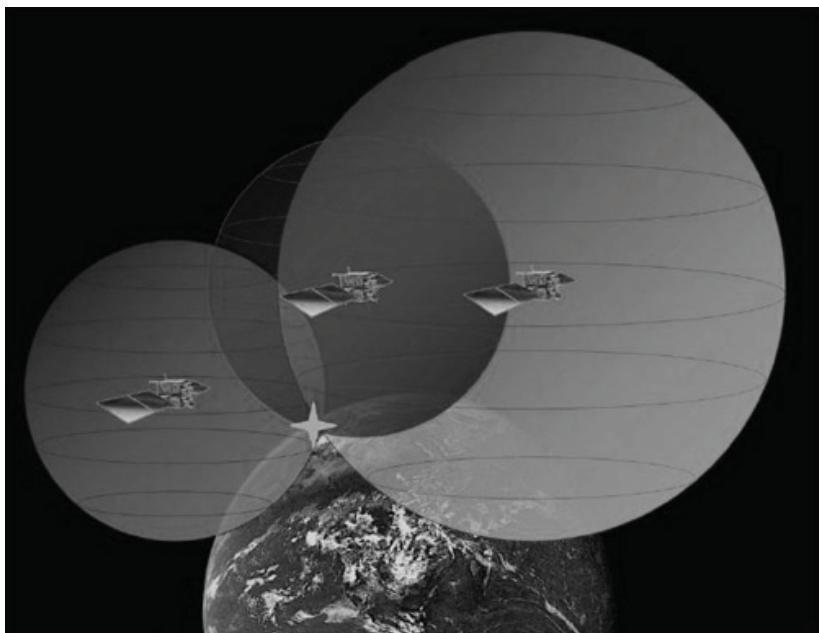


Figura 4.4. Principio de funcionamiento de un GPS.

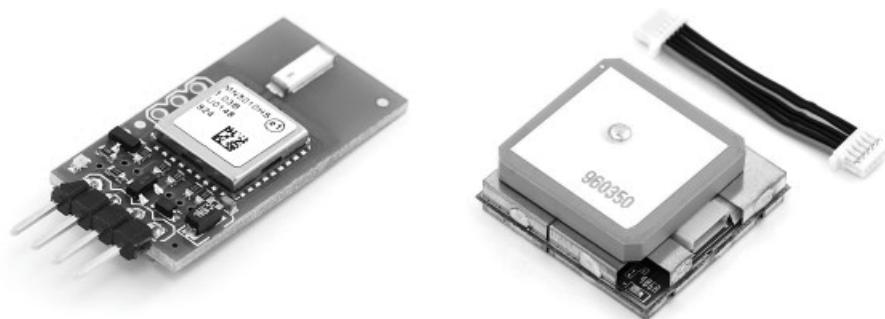


Figura 4.5. Micro GPS basado en el chip MN5010HS (izquierda) y mini módulo GPS basado en el chip EM-406A de USGlobalSat (derecha).

Cuando se quiere aumentar la precisión de un GPS, generalmente se utiliza un sistema GPS Diferencial. Este tipo de receptor, además de recibir y procesar la información de los satélites, recibe y procesa, simultáneamente, otra información adicional procedente de una estación terrestre situada en un lugar

cercano y conocido por el receptor (figura 4.6). Esta información complementaria permite corregir las inexactitudes que se puedan introducir en las señales que el receptor recibe de los satélites. En este caso, la estación terrestre transmite al receptor GPS los ajustes que son necesarios realizar en todo momento, los cuales el receptor contrasta con su propia información y realiza las correcciones correspondientes para obtener una medida de localización de una gran exactitud.

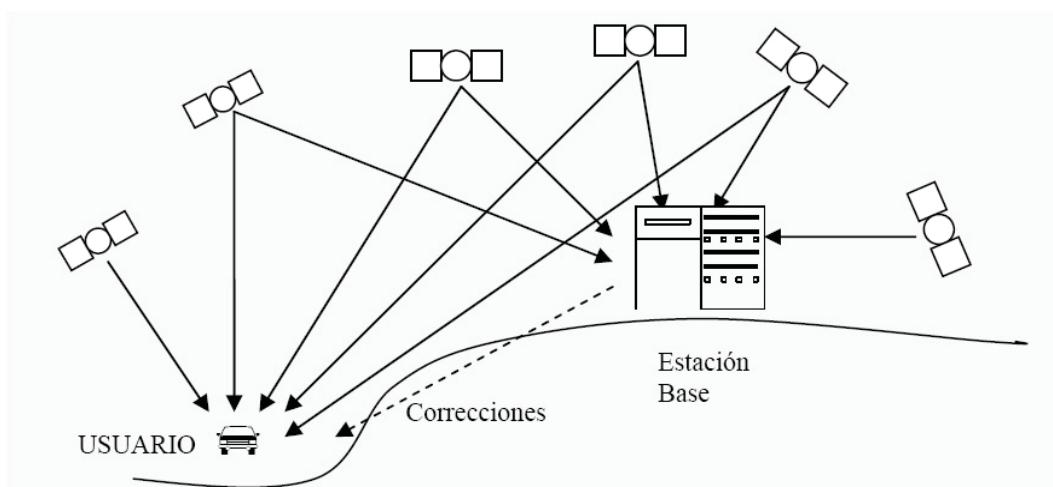


Figura 4.6. Funcionamiento de GPS diferencial.

#### 4.2.4 Sensores de temperatura y humedad

Existe una amplia variedad de sensores de temperatura [135], tales como los termistores PTC y NTC cuya resistencia varía en función de la temperatura, termocuplas donde el sensor estar formado por la unión de dos piezas de metales diferentes generando una tensión muy pequeña en la unión dependiendo de su temperatura, y sensores integrados (figura 4.7), los cuales poseen un rango menor de temperatura pero tienen un costo muy bajo. Los sensores de temperatura son elegidos de acuerdo al rango y exactitud requeridos en cada aplicación en particular.

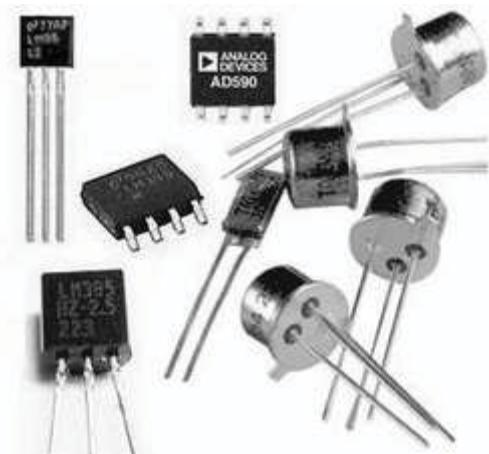


Figura 4.7. Sensores comerciales de temperatura.

Por otro lado, los sensores de humedad permiten medir la humedad de un objeto o ambiente. En general, pueden estar basados en diferentes tecnologías tales como de tipo resistivo o capacitivo, los cuales están construidos de forma tal que varían su resistencia eléctrica o su valor capacitivo dependiendo de la humedad [135].

Además, existen en el mercado sensores integrados con salida digital de humedad que miden humedad relativa con una respuesta rápida (pocos segundos), y se comunican en forma serie con un sistema de cómputo. Algunos sensores poseen además en su interior un sensor de temperatura para compensar la medición de humedad con respecto a la temperatura.

La figura 4.8 muestra sensores comerciales de humedad de tipo resistivo, capacitivo e integrado.

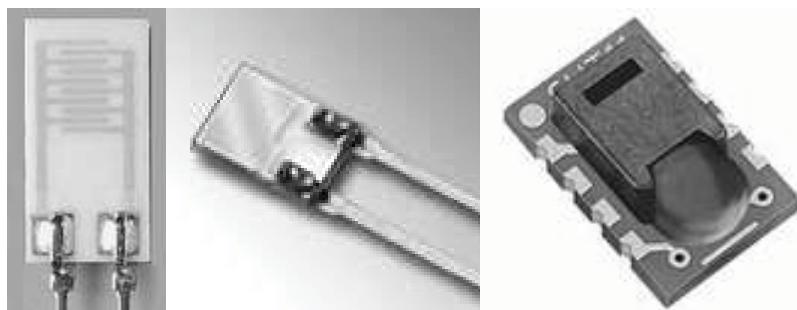


Figura 4.8. Sensor resistivo fabricado por General Eastern (izquierda), sensor capacitivo HC201 (medio), y sensor integrado SHT11 fabricado por Sensirion (derecha).

#### 4.2.5 Sensores inerciales

Los sensores inerciales permiten medir las aceleraciones, velocidades y desplazamientos de una masa en movimiento. Los mismos están compuestos por dos grandes grupos de sensores: los giróscopos y los acelerómetros. Utilizando estos últimos también se pueden obtener los denominados inclinómetros.

##### 4.2.5.1 Giróscopo

Un giróscopo es un sensor inercial que mide rotación angular con respecto a determinados ejes de referencia. En general los giróscopos comerciales entregan los ángulos denominados *pitch* (*cabeceo*), *roll* (*rotación*) y *yaw* (*guiñada*). Existen varios métodos utilizados actualmente por los sensores giroscópicos, uno de ellos es el método óptico el cual esta compuesto por un sistema de espejos o fibra óptica permitiendo medir velocidades angulares a partir de la detección de un desfasaje entre señales luminosas. Además, por medio de un cálculo matemático (integración) también se puede obtener el valor del ángulo que giró respecto del origen del sistema de referencia.

El principio de funcionamiento del método óptico se basa en la existencia de una fuente de luz que emite una señal en dos direcciones simultáneamente, y la presencia de un receptor de luz. Si el giróscopo esta quieto, entonces el receptor recibe ambas señales al mismo tiempo, mientras que si el giróscopo esta girando con una determinada velocidad angular los caminos de las dos señales luminosas desde el emisor hasta el receptor serán diferentes y las mismas tendrán un desfasaje proporcional al valor de velocidad angular. La figura 4.9 muestra un giróscopo integrado en un chip electrónico

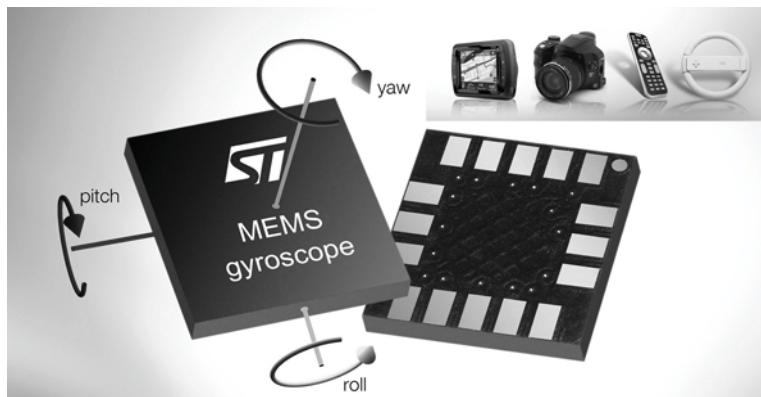


Figura 4.9. Los giróscopos integrados son utilizados en diversos dispositivos electrónicos.

#### 4.2.5.2 Acelerómetros

Un acelerómetro es un dispositivo que permite medir la aceleración de un objeto respecto a un sistema de referencia. Estos sensores pueden operar en un modo dinámico de medición para medir por ejemplo las vibraciones a las que está sometido un dispositivo u objeto, y en un modo estático (denominado inclinómetro) para medir la inclinación del objeto con respecto al vector de aceleración gravitatoria. Actualmente, los elementos sensibles son construidos integrados en un chip de pequeño tamaño, bajo consumo de energía y de costo accesible (figura 4.10). Además, los acelerómetros tienen salidas digitales que se pueden conectar directamente con un microcontrolador o sistema de cómputo.



Figura 4.10. Acelerómetro de 3 ejes LIS302 utilizado principalmente en teléfonos celulares.

Actualmente, en sistemas de localización se utilizan en conjunto los sistemas de navegación GPS y una unidad de medición inercial IMU (por sus siglas en inglés *inertial measurement unit*), los cuales están compuestos en general por un acelerómetro y un giróscopo. Este sistema combinado integra las señales provistas por el GPS e IMU (por ejemplo utilizando un filtro de Kalman [23]) de forma de obtener una medición más exacta y robusta de la localización global de un objeto respecto al uso individual de un sistema GPS o sistema IMU. La figura 2.11 muestra este sistema de medición de alta exactitud.

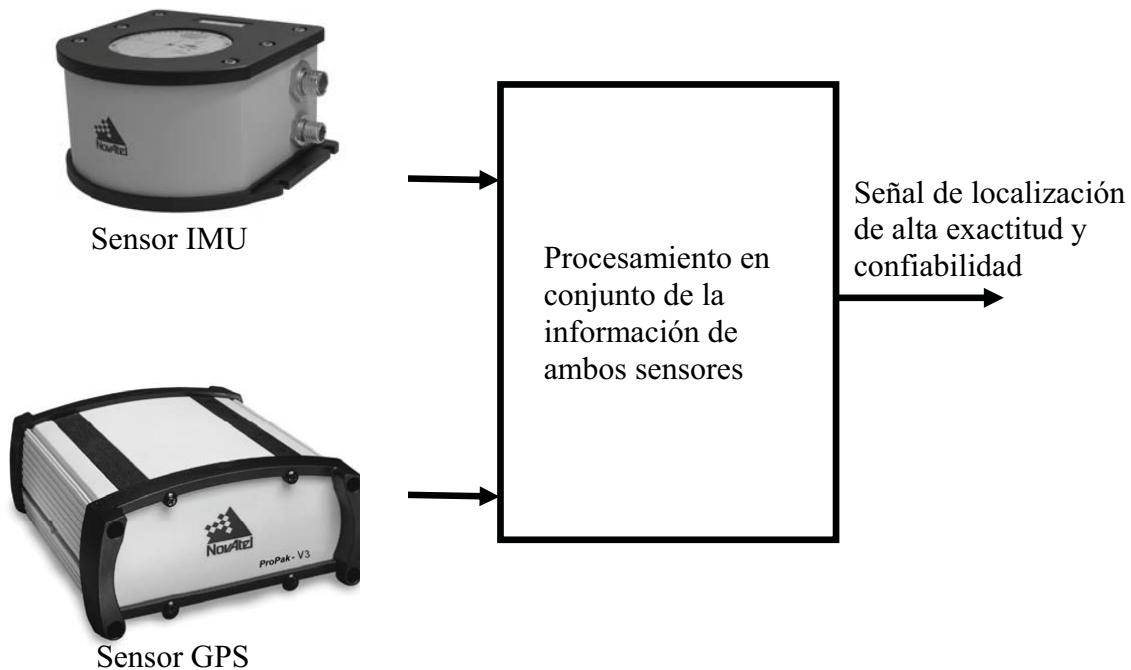


Figura 4.11. Uso combinado de un sensor GPS y sensor IMU.

#### 4.2.6 Sensores de fuerza

Los sensores de fuerza generalmente están basados en una celda de carga la cual está compuesta por un material deformable donde se colocan elementos denominados bandas extensiométricas dispuestas de forma tal que ante una fuerza aplicada, la deformación microscópica de dichas bandas modifica su valor de resistencia eléctrica [135]. Además, generalmente las celdas de carga

comerciales incluyen la electrónica de acondicionamiento de señal con salida digital integrada con el sensor. Una alternativa más económica a las típicas celdas de carga son los sensores flexibles de resistencia variable con la fuerza recibida. La aplicación de una fuerza sobre el área activa de detección se traduce en un cambio en la resistencia eléctrica del elemento sensor en función inversamente proporcional a la fuerza aplicada. Estos sensores pueden ser manipulados y montados fácilmente debido a su elasticidad y se pueden utilizar para medir tanto fuerzas estáticas como dinámicas. La figura 4.12 muestra sensores comerciales de fuerza tipo celda de carga y flexible.



Figura 4.12. Celda de carga con electrónica integrada (izquierda) y sensor flexible de fuerza modelo A201-25 fabricado por la empresa Tekscan (derecha).

#### 4.2.7 Visión artificial

La visión artificial intenta emular o reproducir el sentido visual de las personas, no solo respecto a la captación de la imagen sino también relativo al procesamiento de dicha información para interpretar la misma y obtener datos útiles para ser empleados por un sistema de control. Es decir, el hombre a través de su sentido visual es capaz de percibir e interpretar una gran cantidad de información, por lo que su emulación artificial para percibir y comprender una imagen por medios electrónicos es fundamental para aumentar la potencialidad de un sistema automatizado para ejecutar diversas y complejas tareas.

Además, la captura de imágenes visuales del entorno de trabajo provee información de gran interés para reconocer el entorno de una máquina y cumplir una tarea sin disponer previamente de un modelo preciso del mismo. Esta información se obtiene a partir del procesamiento de imágenes obtenidas con una o más cámaras y probablemente complementada con información de profundidad (por ejemplo utilizando un sensor láser).

Pero, ¿Cómo se representa una imagen visual?...

Una imagen visual es un arreglo bidimensional de pixeles (colores representados por números) obtenidos a partir de una escena tridimensional (mundo real tal como lo vemos). La imagen es captada mediante una cámara de video, la cual entrega información cruda que debe ser procesada para extraer la información requerida para una aplicación determinada. Estos procesamientos incluyen las siguientes etapas: adquisición de la imagen, pre-procesamiento, segmentación, descripción o extracción de características de la imagen, y una etapa de reconocimiento e interpretación [138] [139] [140], como se ilustra en la figura 4.13. Dichas etapas se describen a continuación.

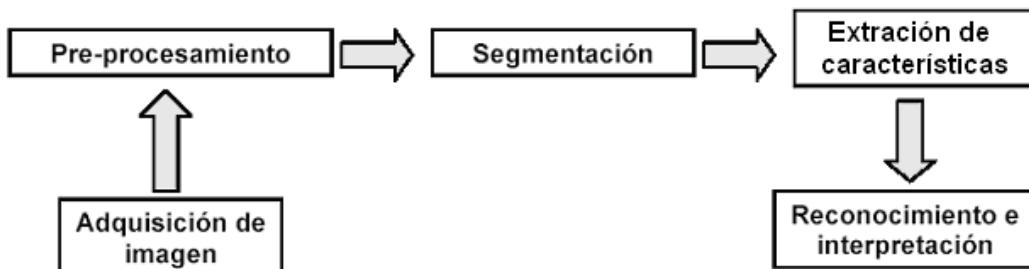


Figura 4.13. Etapas del procesamiento digital de imágenes.

**Adquisición de imagen:** El primer paso es la adquisición de la imagen, para lo cual se requiere de una cámara y la capacidad de digitalizar la señal producida por ella, solamente en el caso que la cámara entregue una salida analógica. Por ejemplo, una cámara tipo Webcam (figura 4.14) entrega directamente una señal de video digital.



Figura 4.14. WebCam fabricada por Logitech.

Una imagen capturada es un conjunto de valores numéricos. La resolución es la medida básica de cuanta información es visible en una imagen. Generalmente es descripta a través de su resolución horizontal y su resolución vertical. Entre más grandes sean éstos números, la calidad es mejor debido a que la imagen tendrá un mayor detalle.

Cada imagen esta compuesta de elementos individuales conocidos como píxeles. Si se tiene una resolución pequeña por ejemplo de 800 x 600, entonces la imagen tendrá un total de 480.000 píxeles, lo cual enfatiza la potencia elevada de cómputo para procesar una imagen en tiempo real. Cada píxel de la imagen esta descripto por sus coordenadas 2D que determinan su posición dentro de la imagen y por un valor numérico que define su color en el espacio de color utilizado, tal como los formatos RGB, YUV y HSI. Por ejemplo el espacio de color RGB (por sus siglas en inglés *red, green and blue*) tiene tres componentes: rojo, verde y azul, los cuales son mezclados en diferentes proporciones para obtener cualquier color.

Debido que al tomar una imagen (dos dimensiones) perdemos la información de profundidad, se pueden utilizar dos cámaras para recuperar la misma utilizando un procesamiento análogo a cómo el cerebro integra la información visual proveniente de sus ojos (visión estéreo). La imagen provista por una

cámara/s generalmente es captada por una placa tipo *frame grabber*, como se ilustra en la figura 4.15.

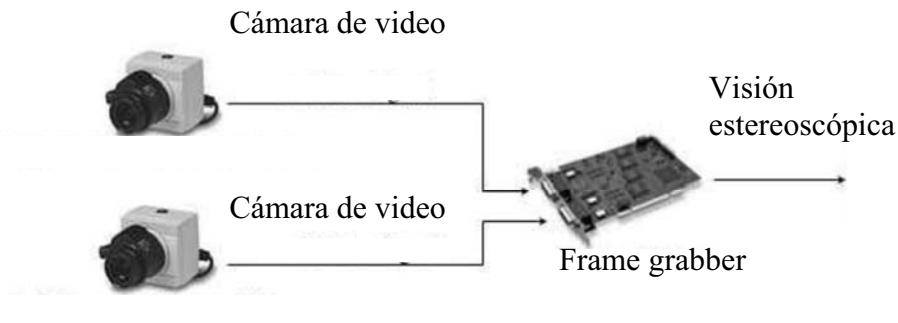


Figura 4.15. Diagrama esquemático típico del hardware utilizado para capturar video estéreo basado en una placa frame-grabber.

**Pre-procesamiento:** Despues de que una imagen digital ha sido obtenida, el siguiente paso es el pre-procesamiento de la imagen. El objetivo de este paso es mejorar la imagen para aumentar la probabilidad de éxito en los siguientes pasos. Algunos ejemplos de métodos utilizados en esta etapa implican modificar el contraste, brillo, saturación y matiz, disminuir el ruido de la imagen, y el realce de detalles, entre otros, tal como se realiza con los editores básicos de fotos digitales.

A medida que la tecnología utilizada en las cámaras es de mejor calidad, el pre-procesamiento de la imagen es menor. Por ejemplo las cámaras de video tipo webcam suelen captar una imagen pobre (con ruido) si la iluminación del ambiente es baja. El pre-procesamiento de imágenes no incrementa la cantidad de información de una imagen sino que suprime ruido producido por imperfecciones de la tecnología utilizada y adecua la imagen para su posterior procesamiento.

**Segmentación:** consiste en el proceso de división de una imagen en objetos o regiones de interés. Es decir, se realiza una separación de la imagen en diferentes partes que son homogéneas en relación a uno o varios atributos.

La división de la imagen mediante segmentación se realiza hasta que los objetos de interés (dependiendo de la aplicación) han sido aislados. En general, los algoritmos de segmentación de imágenes pueden ser métodos basados en bordes, técnicas basadas en regiones o técnicas de umbral [139]. Por ejemplo los métodos basados en bordes se centran en la detección de contornos, delimitando el borde de un objeto y segmentando los píxeles dentro del contorno como pertenecientes a ese objeto.

La elección de una técnica de segmentación está determinada por las características particulares del problema a resolver. La salida de esta etapa son conjuntos de puntos de la imagen (posición y color) que se asocian a diferentes regiones.

**Descripción:** Los datos obtenidos en la etapa de segmentación deben ser convertidos a una estructura apropiada para su posterior procesamiento. La descripción, también llamada extracción de características, obtiene información cuantitativa o características relevantes para diferenciar un objeto de los demás (por ejemplo área, posición, perímetro, color, etc.). Por ejemplo, la figura 4.16 muestra una imagen sin procesar y el resultado obtenido donde se detectó un objeto por su color (segmentación) y se extrajo las coordenadas de su centro (característica de la imagen).

El proceso de segmentación y descripción de una imagen es conveniente porque en lugar de manejar una gran cantidad de datos se trabaja con una estructura sencilla que contiene la misma información, es decir se representa la información característica de cada objeto detectado en la imagen de una forma compacta a través de uno o varios descriptores, que pueden ser utilizados por un sistema de control.



Figura 4.16. Imagen resultante de un procesamiento de imagen por color usando umbrales.

**Reconocimiento e Interpretación:** esta etapa asocia un significado al conjunto de objetos reconocidos en la escena. Comprende todos aquellos métodos relacionados con la comprensión de una escena visual.

El reconocimiento es el proceso que asigna un identificador a un objeto basado en la información provista por sus descriptores. En cambio, la interpretación implica asignar un significado al objeto reconocido basado en un patrón de referencia. Por ejemplo en un sistema automático de inspección de calidad de botellas, donde se desea detectar si una botella es defectuosa o no, el patrón de referencia puede incluir condiciones a cumplir en el alto y diámetro de la botella y restricciones tales como no poseer deformaciones (como por ejemplo abolladuras).

Además, se pueden aplicar cálculos matemáticos a los objetos reconocidos, por ejemplo con una cámara de video montada sobre un automóvil se podría reconocer y discernir entre peatones, otros autos y animales y a su vez se podrían calcular sus posiciones y velocidades relativas respecto al vehículo.

Aunque la tecnología utilizada en visión artificial tiene algunas ventajas con respecto al sentido visual del hombre, tales como que la óptica de una cámara puede ser fácilmente modificada (zoom, campo de visión, etc.), y permiten una

captura más rápida de imágenes y tienen un mayor espectro (infrarrojos, ultravioleta) que el ojo humano; la misma difícilmente pueda interpretar tal como lo hace una persona la gran cantidad de información que tiene una secuencia de imágenes (video) en el tiempo. De todos modos, el avance continuo de la tecnología permite procesar cada vez más rápido mayor cantidad de información (como la provista por un sistema de visión) fomentando la prueba de nuevos algoritmos de procesamiento para obtener más información de una imagen y de un video.

#### **4.2.8 Sistemas para medir distancia 1D**

Existen diferentes tecnologías que pueden ser usadas para medir la distancia, por ejemplo entre una máquina o sistema autónomo y los objetos de su entorno. La elección de la misma dependerá de los requerimientos de la aplicación en cuanto a precisión, resolución, rango y frecuencia de medición, directividad, tamaño físico, y costo.

Las tecnologías principales de este tipo de dispositivo son tres: el tratamiento de señal infrarroja (de poco alcance, reducido costo y poco consumo de potencia), el tratamiento de señal ultrasónica (de medio alcance, costo moderado y potencia media) y el tratamiento de señales láser (de elevado alcance, costo superior y mayor consumo de potencia) [110] [144].

##### **4.2.8.1 Ultrasonido**

Los sensores de ultrasonido pueden ser utilizados para medir la distancia entre el sensor y objetos de su entorno. El principio de funcionamiento se basa en la emisión de una onda ultrasónica y la posterior recepción del eco generado por el rebote producido en objetos del medio, como se ilustra en la figura 4.17. Aquí, se mide el tiempo de vuelo desde que se disparó el sonar hasta que se detecta el eco, determinándose de forma indirecta la distancia, al conocerse la velocidad de la onda en el medio.

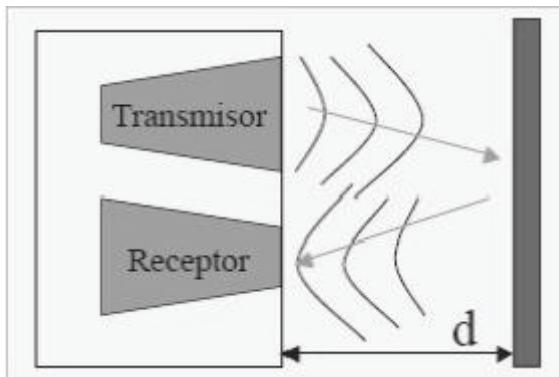


Figura 4.17. Medición de una distancia **d** a través del tiempo de vuelo.

La distancia máxima de medición se encuentra alrededor de los 10 metros. Debido a que las frecuencias de emisión son del orden de los Kilohertz, entonces la longitud de onda de estos sensores es del orden de los centímetros. Generalmente, la directividad del cono de emisión esta en el orden de los 10 a 30 grados. Por otra parte, la velocidad de una onda de ultrasonido en el aire es afectada por la temperatura, por lo cual algunos sensores comerciales traen dicha compensación basada en el uso de un sensor de temperatura.

Los sensores de ultrasonido son independientes de la energía e iluminación del ambiente y del posible ruido en él. El problema más significativo de trabajar con sensores de ultrasonido, es que la medición de distancia es altamente susceptible a errores causados por objetos no perpendiculares. Adicionalmente, los errores de distancia pueden ocurrir debido a reflexiones múltiples o especulares. Finalmente, los transductores casi siempre tienen un inherente amplio cono de radiación, lo cual resulta en una pobre resolución angular. La frecuencia de actualización depende de la distancia máxima de medición y suele estar en el orden de los 25 Hz. La figura 4.18 muestra un típico sensor de ultrasonido para medir distancia.



Figura 4.18. Sensor de ultrasonido.

#### **4.2.8.2 Infrarrojo**

El método de detección de estos sensores es por medición de tiempo de vuelo o por triangulación. El primer caso funciona igual que los sensores de ultrasonido. En cambio, en el segundo caso, el haz infrarrojo es reflejado por el objeto e incide en un pequeño arreglo CCD, con lo cual se puede determinar la distancia y/o presencia de objetos en el campo de visión. La idea básica es que se emite un pulso de luz IR (infrarroja). Esta luz viaja y en caso de encontrar un objeto en su camino, se produce un rebote y la onda reflejada vuelve al detector donde se crea un triángulo entre el punto de reflexión, el emisor y el detector. Los ángulos en este triángulo varían dependiendo de la distancia al objeto, como se ilustra en la figura 4.19. La luz recibida en el receptor se transmite por un sistema óptico hacia un arreglo lineal CCD, el cual convierte la intensidad de luz recibida en una señal eléctrica y permite medir el ángulo de la luz reflejada y por lo tanto, se puede calcular la distancia al objeto. Este método de medición de distancia es casi inmune a la interferencia de la luz del ambiente y es robusto ante diferentes colores del objeto detectado.

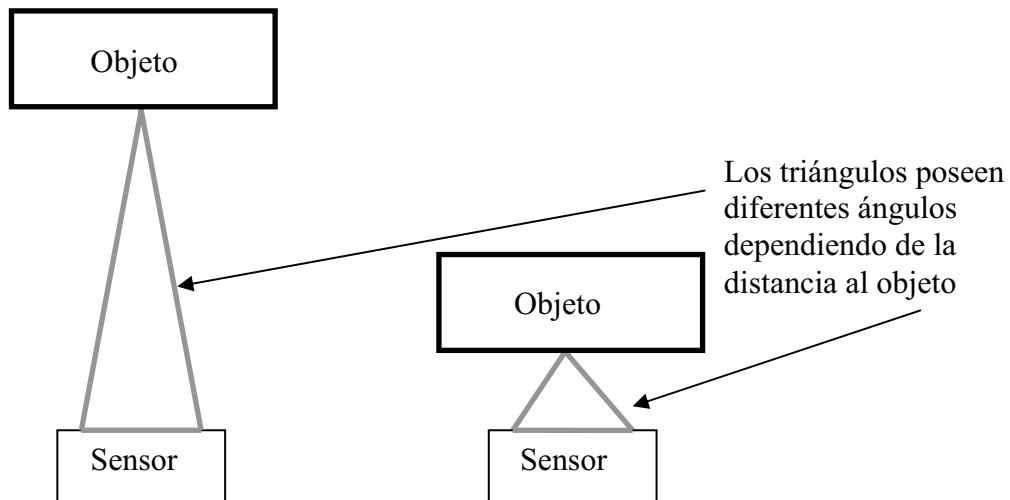


Figura 4.19. Principio de funcionamiento del infrarrojo por triangulación.

La figura 4.20 muestra algunos sensores comerciales cuyas distancias máximas de medición van desde pocos centímetros hasta 5 metros.



Figura 4.20. Sensores infrarrojos comerciales fabricados por Sharp.

#### 4.2.8.3 Láser

Esta tecnología puede ser utilizada con el método de tiempo de vuelo, donde el principio de funcionamiento se basa en medir el tiempo de propagación de la onda que demora el haz láser en ir, rebotar en el objeto y volver al sensor, o con el método de triangulación similar al método de triangulación descripto con

un sensor infrarrojo, donde se combina un emisor láser con un sensor de video CMOS o CCD. Las aplicaciones de esta tecnología son de lo más variadas, desde la medición de distancias en un rango que abarca desde unos pocos centímetros, hasta decenas de kilómetros, o incluso la medición de los relieves de una superficie con precisiones milimétricas. En cualquier caso, el rango de aplicación sólo está limitado por la potencia del emisor, la velocidad de la electrónica utilizada y en el caso del método de triangulación influye la calidad de la óptica asociada al sensor de video y su resolución (ancho y alto). La figura 4.21 muestra un sensor láser de distancia.



Figura 4.21. Sensor láser 1D fabricado por Balluff.

Aunque los métodos mencionados son los más utilizados para medir una distancia 1D, también existen otros métodos como por ejemplo el uso de un puntero láser y una WebCam para determinar la distancia desde el emisor láser hasta el punto del entorno marcado en la imagen por el láser. La imagen es procesada para extraer dicha posición en ancho y alto dentro de la imagen, como es visualizada en la figura 4.22. Luego, conociendo la disposición geométrica del dispositivo (posición y orientación de sensor y de emisor), se aplica una fórmula que permite determinar la distancia al objeto apuntado por el puntero láser, en función de la posición de la imagen del haz láser recogida por el sensor.

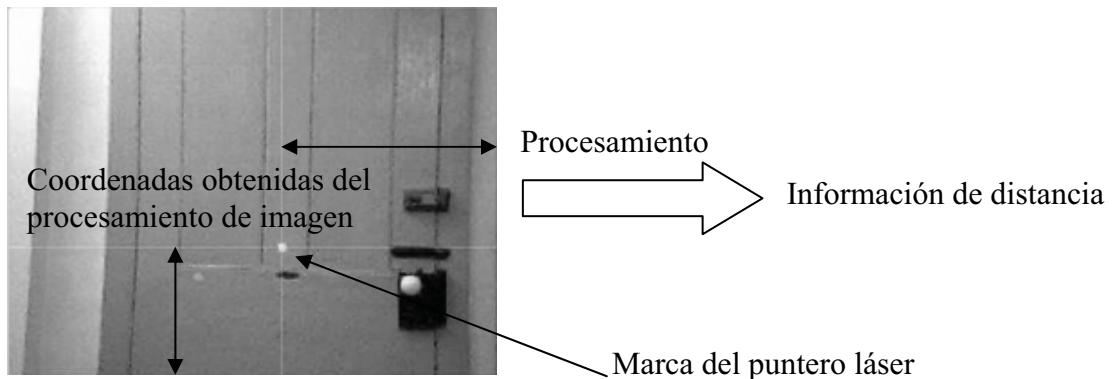


Figura 4.22. Medición de distancia utilizando un puntero láser y una webCam.

#### 4.2.8.4 Sensores de distancia 2D

Los sensores de distancia 1D pueden ser dispuestos en paralelo o girados con un servomotor de forma de medir la distancia en diferentes direcciones y así formar un mapa 2D de mediciones de distancia, como se ilustra en la figura 4.23.

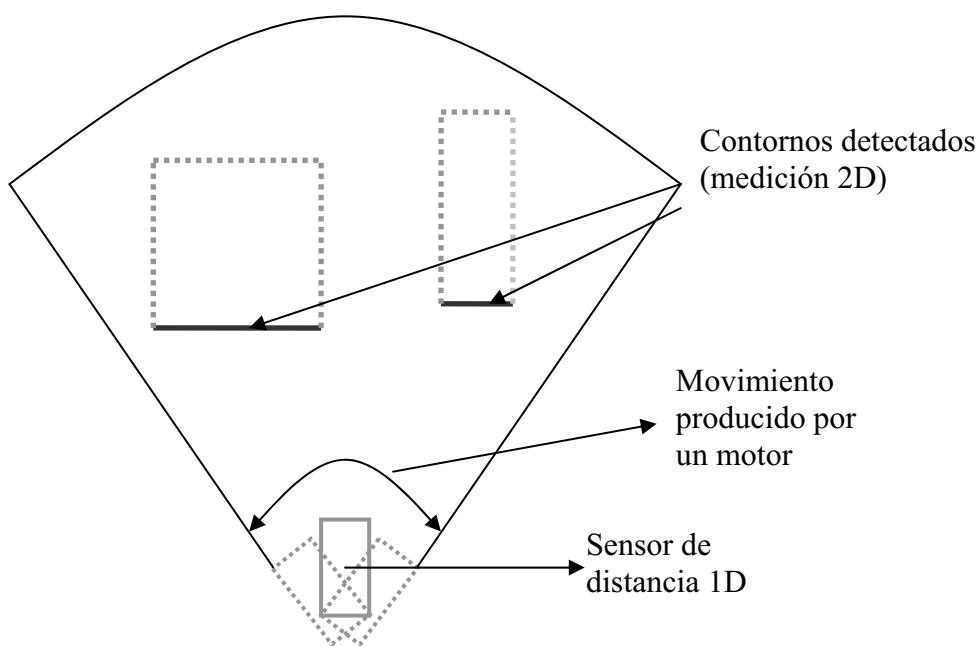


Figura 4.23. Mapa bidimensional generado a partir de un sensor de distancia 2D.

La figura 4.24 muestra un sensor de distancia 2D basado en láser, donde el rango de medición suele ser de 180 grados con una resolución de 2, 1 o 0.5 grados.



Figura 4.24. Sensor láser LMS111 fabricado por SICK.

#### **4.2.8.5 Sensores de distancia 3D**

Los sistemas de visión y sensores láser se utilizan en forma individual o combinados entre sí para obtener un sensor de distancia 3D [27].

Si se utilizan dos sensores de imagen (cámaras de video), la distancia 3D a un objeto puede ser determinada de forma análoga a cómo el cerebro humano interpreta la realidad a partir de las imágenes que le proporcionan los dos ojos, donde dichas imágenes presentan pequeñas diferencias entre sí (debidas a la separación entre los ojos) que pueden ser procesadas para medir (percibir en el caso del hombre) profundidad. En el procesamiento de visión estéreo, se debe reconocer un objeto dado en cada imagen y procesar la información extraída de dichas imágenes acerca de tal objeto. Por ejemplo, las coordenadas en el plano de la imagen de un objeto detectado van a ser distintas para cada imagen debido a la diferente posición física de las cámaras.

La figura 4.25 muestra un sistema comercial de visión compuesto por dos cámaras de video.

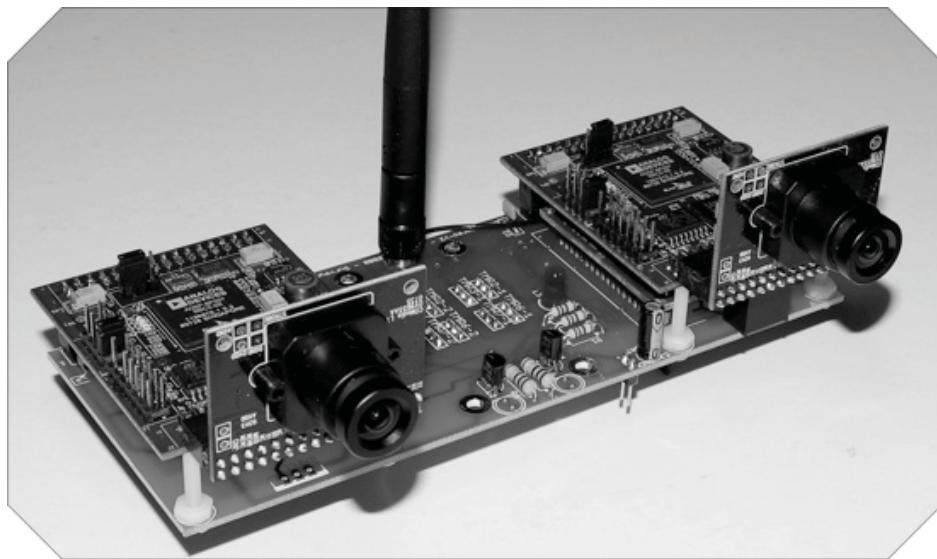


Figura 4.25. Sistema de visión estéreo fabricado por Surveyor corporation.

Otra alternativa es utilizar un sensor láser 2D con un servomotor, como se muestra en la figura 4.26.



Figura 4.26. Sensor 3D basado en un sensor láser 2D y un servo-motor desarrollado por la Universidad de Hannover, Alemania.

En este método, el servomotor es controlado de forma tal de barrer el espacio 3D, como se ilustra en la figura 4.27.

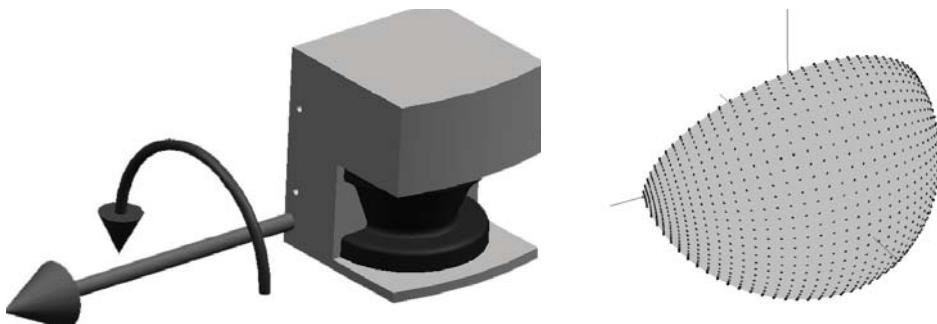


Figura 4.27. Puntos medidos en un barrido láser 2D controlado por un servomotor

Los puntos medidos por el sensor láser 2D y la posición angular del servomotor en cada medición pueden ser procesados para obtener un mapa 3D del entorno, como se muestra en la figura 2.28.



Figura 4.28. Mapa 3D reproducido a partir de un sensor láser 3D.

Otro ejemplo de medición de distancia 3D es el sistema LIDAR aplicado en vehículos aéreos, donde se utilizan un sensor láser 2D de gran alcance y sensores GPS e IMU de forma de procesar los datos entregados por los

sensores para reconstruir un mapa 3D del terreno recorrido por aire, como se ilustra en la figura 4.29.

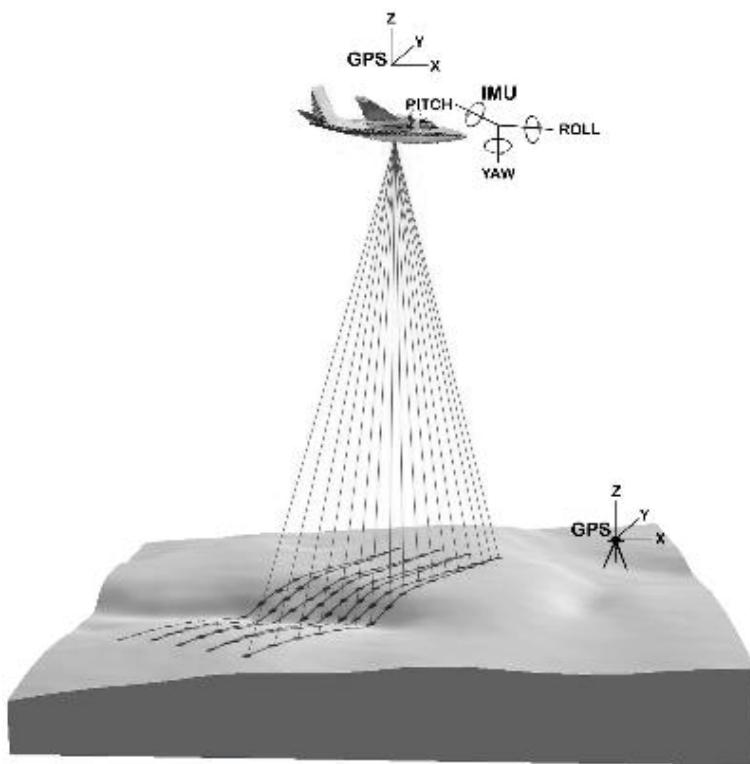


Figura 4.29. Grafico ilustrativo mostrando el uso simultaneo de un sistema láser 2D, y sensores IMU y GPS.

Una alternativa más reciente para medir distancia 3D, es el uso de las cámaras de video denominadas cámaras TOF (por las siglas en inglés *time-of-flight camera*), las cuales entrelazan la información visual con la información de distancia medida con un sensor láser basado en la medición de tiempo de vuelo. La figura 2.30 muestra cámaras TOF comerciales.



Figura 4.30. Cámaras TOF.

Estos sistemas determinan la distancia para cada pixel de la imagen a través de la medición del tiempo requerido por el láser para lograr el objetivo y retornar a la cámara. Por lo tanto, las cámaras TOF permiten la generación de imágenes tridimensionales en tiempo real (figura 4.31), donde los objetos son fácilmente y confiablemente localizados. A diferencia de las cámaras de video convencionales, las cámaras TOF no solamente ofrecen la imagen captada por la cámara de video sino también una imagen aumentada con información de distancia parametrizada con colores, como muestra la figura 4.32, donde a la derecha de la imagen se visualiza la escala que asocia un color a una distancia en centímetros.



Figura 4.31. Reproducción de imágenes 3D a partir de la información suministrada por una cámara TOF.

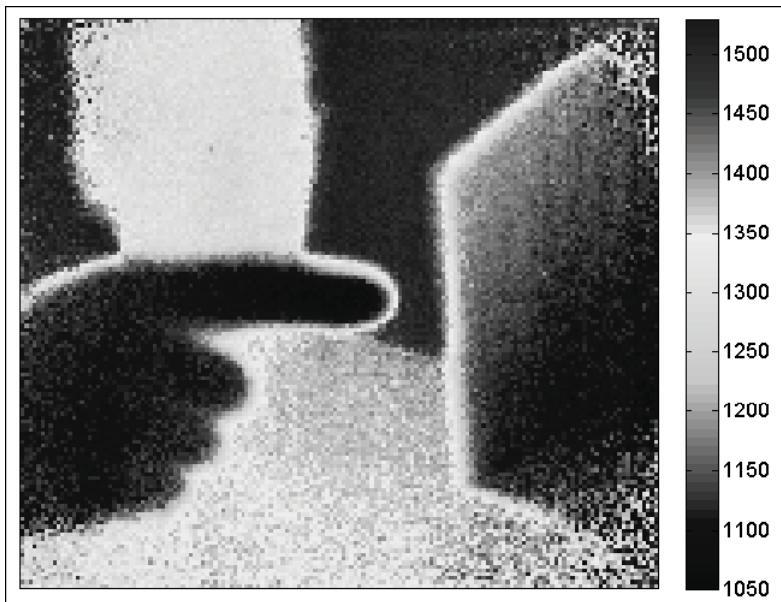


Figura 4.32. Imagen 3D aumentada con información de distancia.

### 4.3 Sistema de Actuación

El sistema de actuación está compuesto por dispositivos denominados actuadores, los cuales tienen como función proporcionar una energía controlada al proceso para llevar la variable controlada al valor deseado, por ejemplo entregar una fuerza (o par) controlada de forma tal de actuar sobre un dispositivo mecánico para realizar un trabajo físico. Por ejemplo, en una pala neumática excavadora, el sistema de actuación es controlado para que la máquina realice el trabajo de cavar en una superficie dura.

En general, la energía que entrega el actuador proviene de tres fuentes posibles: presión neumática, presión hidráulica o fuerza electromotriz. Dependiendo del origen de la energía, el actuador se denomina neumático, hidráulico o eléctrico [143]. En algunos casos, también se pueden utilizar los motores a explosión tales como los utilizados en automóviles, tractores, y aviones, entre otros.

Además, de acuerdo al tipo de movimiento del actuador, se pueden clasificar los mismos en lineales o giratorios. Los primeros generan una fuerza en línea

recta, tal como lo hace un pistón, mientras que los actuadores giratorios o rotacionales generan un par tal como el generado por un motor eléctrico.

#### **4.3.1 Actuadores eléctricos**

Los motores eléctricos son máquinas que convierten una energía eléctrica en un movimiento de giro o desplazamiento de traslación, es decir que transforma energía eléctrica en energía mecánica (figura 4.33). Los motores utilizan para su funcionamiento una corriente continua (como por ejemplo la suministrada por la batería de un automóvil) o corriente alterna tal como la energía provista en cada hogar a través del sistema de distribución de energía eléctrica.

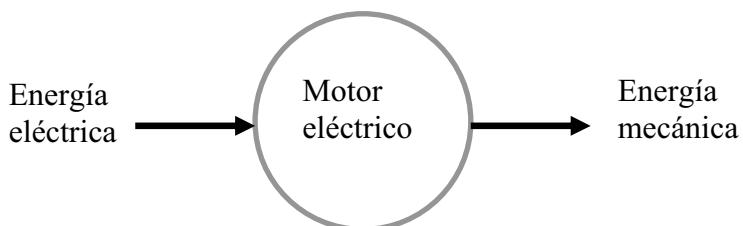


Figura 4.33. Transformación de energía de un motor eléctrico.

Dentro de los motores de corriente continua, existen distintos tipos de motores como por ejemplo los motores denominados paso a paso y los llamados solenoides. La figura 4.34 muestra distintas clases de motores eléctricos.



Figura 4.34. Motores eléctricos fabricados por Faulhaber.

Los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos que convierten una serie de pulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos avanzando una serie de grados dependiendo de sus entradas. Los motores paso a paso poseen su mayor capacidad de par motor a baja velocidad y tienen un torque de detención, lo cual hace que estos motores se mantengan firmemente en su posición cuando no están girando, eliminando así la necesidad de un mecanismo de freno. Este tipo de motores tienen varios bobinados que deben ser alimentados en una adecuada secuencia para producir el avance en pasos. Si se invierte el orden de esta secuencia, se logra que el motor gire en sentido opuesto. Por otro lado, un solenoide actúa como un electroimán cuando se envía una corriente eléctrica sobre sus devanados, donde se crea un campo magnético que produce una fuerza motriz que empuja un embolo móvil al ser energizada la bobina y vuelve por la acción de un resorte al quitar la energía a la bobina. Generalmente se utilizan como válvulas si-no, esto es abierta o cerrada controlando por ejemplo el flujo de líquidos o gases de un sistema de actuación hidráulico o neumático, respectivamente.

Los diferentes tipos de motores de corriente continua son energizados mediante el uso de sistemas basados en relés o por amplificadores de potencia como por ejemplo los amplificadores tipo puente H alimentados por una fuente de alimentación. Las etapas de potencia son manejadas por un sistema de cómputo que controla la energía entregada por la etapa de potencia hacia el sistema de actuación (por ejemplo compuesto por motores eléctricos) [143].

#### **4.3.2 Actuadores neumáticos e hidráulicos**

La palabra neumática se refiere al estudio del movimiento del aire. Los sistemas de aire comprimido proporcionan un movimiento controlado con el empleo de cilindros y motores neumáticos [136] y se aplican en diversos tipos de aplicaciones tales como herramientas y maquinaria industrial, martillos neumáticos, pistolas para pintado, sistemas de empaquetado, elevadores, herramientas de impacto, prensas neumáticas, robots industriales, vibradores para la construcción, entre otras. Los actuadores neumáticos poseen una buena relación entre velocidad y fuerza.

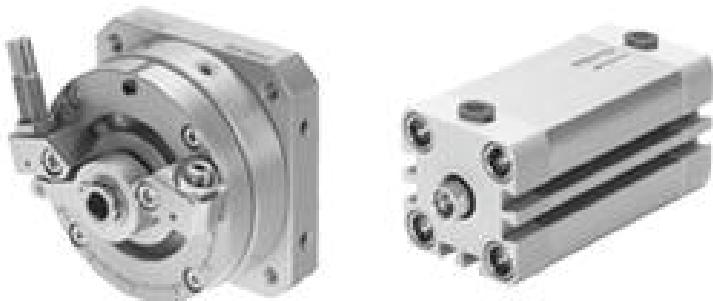


Figura 4.35. Actuador neumático giratorio (izquierda) y cilindro neumático (derecha) fabricados por Festo.

Por otro lado, la hidráulica utiliza básicamente los fluidos hidráulicos como medios de presión para mover el pistón de un cilindro [136]. Los actuadores hidráulicos tienen la capacidad de entregar fuerzas muy grandes y se aplican típicamente en dispositivos móviles tales como maquinaria de construcción, excavadoras, plataformas elevadoras, aparatos de elevación y transporte, maquinaria para agricultura y en dispositivos fijos abarcando la fabricación y montaje de máquinas de todo tipo, aparatos de elevación y transporte de cargas, prensas, máquinas de inyección y moldeado, máquinas de laminación, y ascensores, entre otras. La figura 4.36 muestra un cilindro hidráulico comercial.



Figura 4.36. Cilindro hidráulico de la serie MH fabricado por Parker.

### 4.3.3 Control de actuadores

En el contexto de los sistemas de control estudiados en este libro, el control de un sistema de actuación permite realizar un trabajo físico. El sistema de actuación generalmente está compuesto por varios actuadores y dentro de un sistema dado puede haber tanto actuadores eléctricos como actuadores neumáticos y/o hidráulicos. Dicho sistema es controlado electrónicamente por un sistema de cómputo que calcula las acciones a ser aplicadas.

La elección del tipo de actuador depende de las especificaciones a cumplir por la máquina y las características que debe poseer, como por ejemplo velocidad, precisión, fuerza, tamaño, peso, entre otras. Por ejemplo los actuadores hidráulicos son utilizados generalmente cuando se necesita una gran magnitud de fuerza mientras los actuadores eléctricos se utilizan generalmente cuando se necesita pequeñas fuerzas pero manejadas con una gran velocidad.

La figura 4.37 ilustra el control de un actuador eléctrico, donde una señal de control enviada desde un sistema de cómputo (por ejemplo una computadora) maneja la energía entregada al motor eléctrico a través de una etapa de potencia.

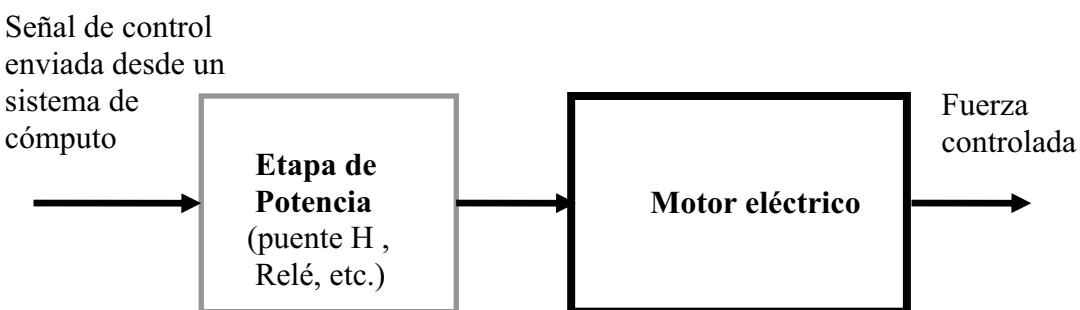


Figura 4.37. Control de un actuador eléctrico.

Por otro lado, las figuras 4.37 y 4.37 ilustran el control de actuadores hidráulicos y neumáticos, respectivamente. Donde en el primer caso el sistema de cómputo maneja las electroválvulas necesarias para controlar las presiones y caudales de un circuito hidráulico de forma de obtener una determinada fuerza de salida. En el caso del control de actuadores neumáticos, el sistema de cómputo maneja las electro-válvulas (si-no, lineales, etc.) de un circuito neumático de forma de controlar la magnitud, dirección y sentido de la fuerza producida por el sistema neumático.

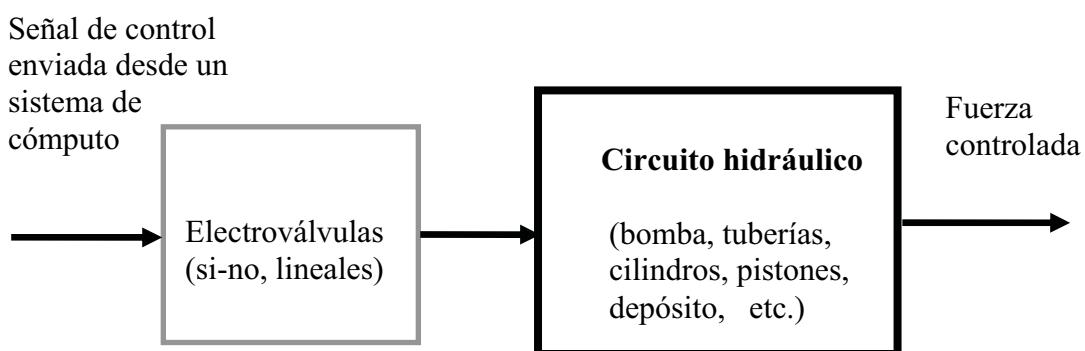


Figura 4.38. Control de un actuador hidráulico.

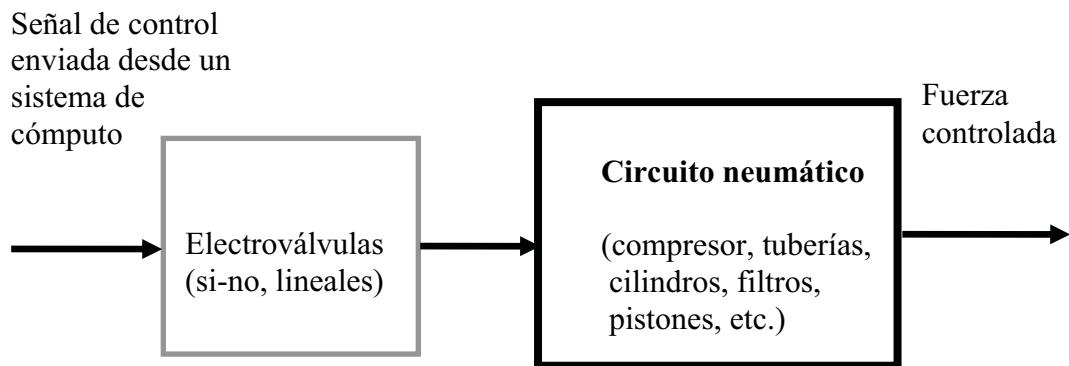


Figura 4.39. Control de un actuador neumático.

## **4.4 Sistema de cómputo**

Los sistemas de cómputo están formados en cuanto a su funcionalidad por un sistema de procesamiento, un sistema de comunicación y un sistema de control.

### **4.4.1 Hardware**

Un sistema de cómputo conceptualmente se asocia a una computadora que dispone a diferencia de una computadora estándar la posibilidad de comunicarse con los sensores y los actuadores del sistema. Por ejemplo en el control basado en PC se suelen adicionar a la misma alguna placa de adquisición de datos (con entradas y salidas digitales tanto como con conversores analógicos a digital) y placas tipo frame grabber para capturar imágenes de cámaras de video, las cuales generalmente son conectadas al bus PCI.

Otra alternativa es utilizar las computadoras portátiles denominadas notebooks o los sistemas empotrados [154]. Estos últimos generalmente se basa en la arquitectura PC104, la cual aprovecha la estructura estandarizada de una PC ofreciendo una completa compatibilidad de arquitectura en hardware y software con el bus de una PC, pero en módulos apilables ultra-compactos.

Los sistemas empotrados basados en PC104 generalmente disponen de un microprocesador, múltiples entradas y salidas digitales, memoria RAM, comunicación serie, puertos USB, y comunicación inalámbrica, entre otros. La figura 4.40 muestra una placa comercial PC104.

Por otro lado, en la mayoría de las aplicaciones industriales se utilizan los dispositivos lógicos programables denominados PLC [160] debido a su robustez en entornos industriales y su fácil programación. La figura 4.41 muestra un PLC comercial.

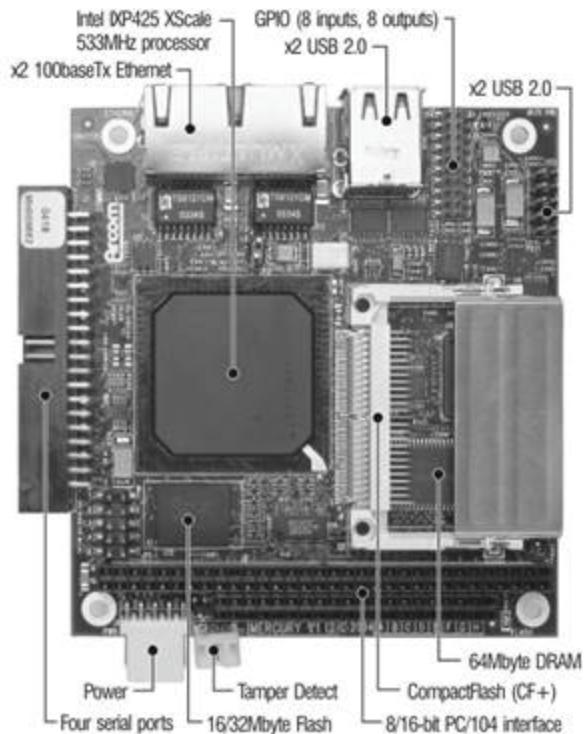


Figura 4.40. Sistema empotrado basado en PC104.

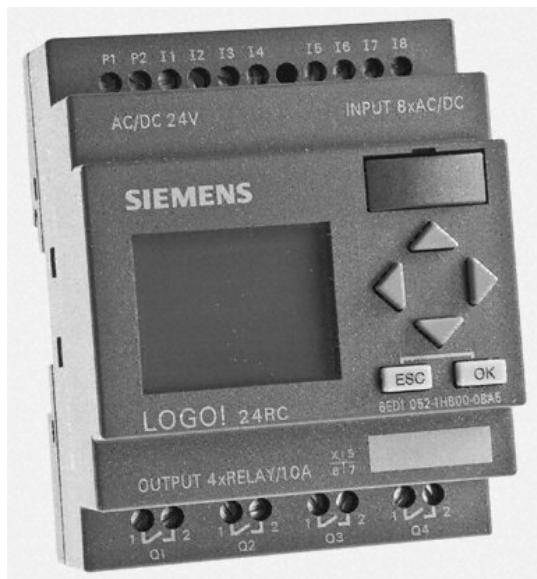


Figura 4.41. Dispositivo lógico programable PLC fabricado por Siemens.

Finalmente, se remarca el uso de microcontroladores [137], los cuales son de muy bajo costo y representan una mini computadora para control que posee una CPU (Unidad Central de Proceso), memoria RAM para almacenar datos,

memoria EEPROM para almacenar el programa, entradas y salidas digitales, diversas interfaces para comunicarse con sensores y actuadores como conversores A/D, comunicación RS232, salidas PWM, y módulo de comunicación CAN, entre otros. Además, estos dispositivos poseen un consumo muy bajo de energía y su programación en la actualidad es bastante rápida y fácilmente portable gracias al crecimiento de los compiladores basados en lenguajes de alto nivel (por ejemplo lenguaje C) y la disponibilidad de muchas librerías tanto para utilizar los módulos internos del microcontrolador como para implementar diversas operaciones matemáticas.

La figura 4.42 muestra un mini sistema empotrado basado en un microcontrolador Arduino, mientras que la figura 4.43 muestra un microcontrolador de muy bajo costo, capaz de implementar diversas operaciones matemáticas

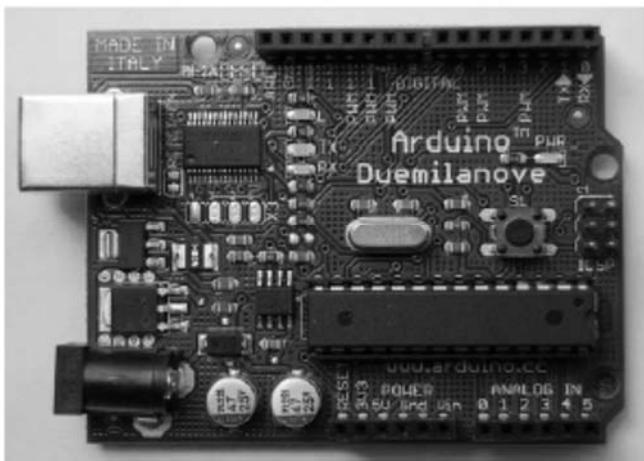




Figura 4.43. Microcontrolador PIC de Microchip.

#### **4.4.2 Comunicación de la información**

Para intercambiar información entre dos o más dispositivos se utiliza algún protocolo de comunicación que involucra un conjunto de reglas y normas determinadas que cumplen los dispositivos para asegurar una comunicación exitosa. Por ejemplo un grupo de personas que hablan el mismo idioma se pueden comunicar sin problemas mientras que personas que hablan distinto idioma no podrán conversar entre sí. Así como cada idioma asocia un significado a una palabra y todas las personas que desean hablar tal idioma deben conocer el mismo, también las personas siguen determinadas reglas de comunicación como por ejemplo hablar una persona a la vez. De forma análoga, los protocolos de comunicación permiten comunicar dispositivos para intercambiar información entre los mismos.

En un sistema de control, el sistema de cómputo se comunica con los sensores del sistema tanto como con los actuadores, como se ilustra en la figura 4.44.

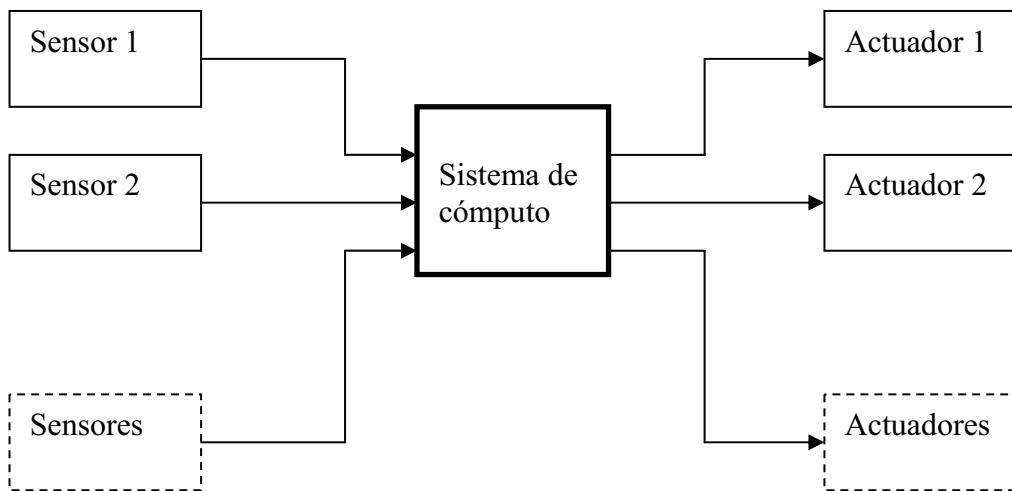


Figura 4.44. Comunicación de sensores y actuadores con un sistema de cómputo.

En cuanto a la comunicación en un nivel físico, la misma puede ser por cable o en forma inalámbrica.

A continuación se describen brevemente algunos de los protocolos de comunicación más utilizados.

**Comunicación USB [151]:** El protocolo USB es una solución para usar una computadora y comunicarse con dispositivos externos cercanos (hasta algunos metros) tales como cámaras de video tipo Webcams, dispositivos de almacenamiento tipo pendrive, mouses, teclados, impresoras, etc. (figura 4.45). Una de las principales características es que los dispositivos son reconocidos por la computadora una vez conectados (*plug-and-play*) y permite la alimentación de dispositivos de bajo consumo.

USB trabaja con topología estrella, por lo que la computadora va seleccionando de dispositivo en dispositivo. De esta manera mientras mas dispositivos estén conectados a un mismo concentrador USB la velocidad para cada dispositivo disminuye. Puesto que todos los periféricos comparten el bus y pueden funcionar de forma simultánea, la información es enviada en paquetes, los cuales contienen una cabecera que indica el periférico al que va dirigido.

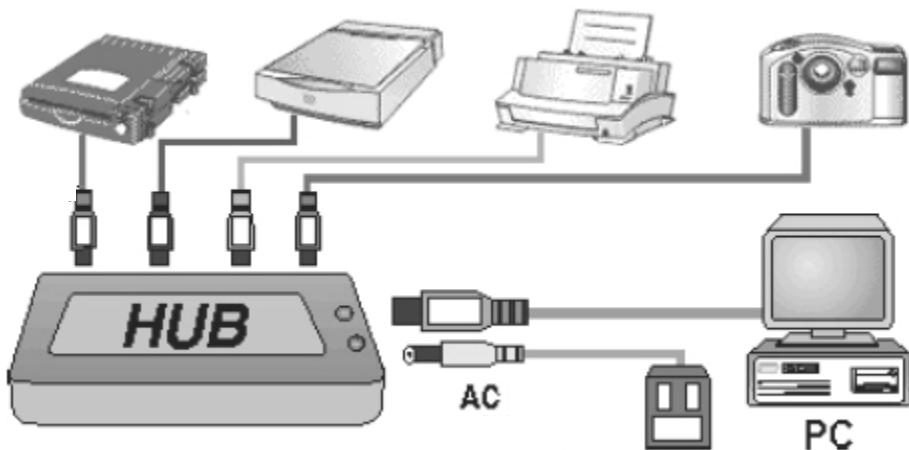


Figura 4.45. Periféricos conectados a una PC por medio del protocolo USB.

**Comunicación serie RS232 [152]:** La comunicación serial es un protocolo muy común para comunicar dos dispositivos entre sí, y se incluye de manera estándar en prácticamente cualquier computadora y microcontrolador y puede ser emulado también a través de un puerto USB. El concepto de comunicación serial es sencillo. El puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez.

Típicamente, la comunicación serial se utiliza para transmitir datos en formato ASCII. Para realizar la comunicación se utilizan 3 líneas (cables): Tierra, Transmisión (TX) y Recepción (RX). Debido a que la transmisión es asincrónica, es posible enviar datos por una línea mientras se reciben datos por otra. Existen otras líneas disponibles para realizar un *handshaking*, o intercambio de pulsos de sincronización, pero no son requeridas necesariamente. Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las características de transmisión (velocidad de transmisión, bits de datos, bits de parada, y la paridad) de ambos dispositivos sean iguales.

**Comunicación RS485 [152]:** RS-485 (Estándar EIA-485) usa señales eléctricas diferenciales, en comparación con señales referenciadas a tierra como en RS-232. La transmisión diferencial utiliza dos líneas para transmitir y recibir y tiene la ventaja que es más inmune al ruido y puede lograr mayores

distancias que RS-232. La inmunidad al ruido y la distancia son dos puntos clave para ambientes y aplicaciones industriales. Además, este protocolo incrementa el número de dispositivos que se pueden conectar (32 dispositivos). Gracias a esta capacidad, es posible crear redes de dispositivos conectados a un solo puerto RS-485. Esta capacidad, y la gran inmunidad al ruido, hacen que este tipo de transmisión serial sea la elección de muchas aplicaciones industriales que necesitan dispositivos distribuidos en red conectados a una PC u otro sistema electrónico para la colección de datos. El hardware de RS-485 se puede utilizar en comunicaciones seriales hasta distancias de 1200 metros de cable. La figura 4.46 ilustra la diferencia de alcance entre el protocolo RS485 y el protocolo RS232.

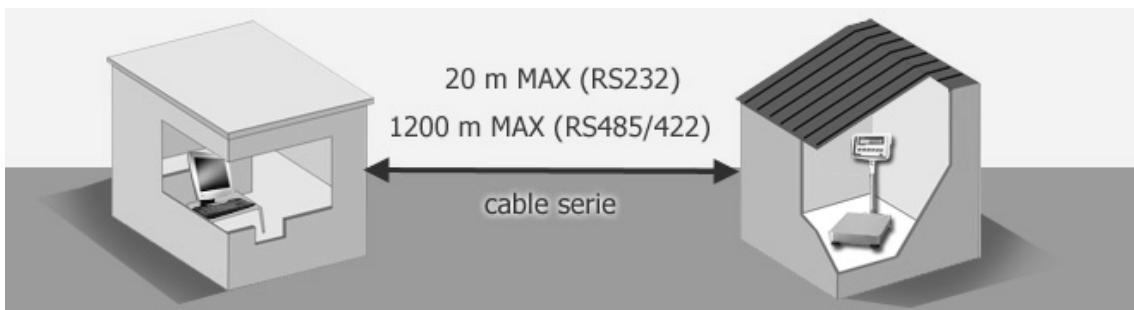


Figura 4.46. Comunicación RS232 y RS485.

**Comunicación CAN [153]:** El Bus Can se basa en su arquitectura multi-maestro, el cual permite compartir una gran cantidad de información entre los distintos módulos de control conectados a esta red, lo que provoca una reducción importante tanto del número de sensores utilizados como de la cantidad de cables que componen la instalación eléctrica. Todos los dispositivos se pueden comunicar entre sí. Las características principales de este protocolo son las siguientes: flexibilidad (se pueden añadir unidades de control adicionales al bus sin necesidad de reprogramar todo el sistema para que se reconozcan los nuevos nodos), fiabilidad (mecanismos que aseguran que el mensaje es transmitido y recibido correctamente), robusto al ruido, y comunicación basada en mensaje con prioridades (el mensaje es enviado físicamente a todos pero con un identificador que marca para qué dispositivo va

dirigido de forma que solo lo utilice dicho dispositivo). La figura 4.47 muestra un típico bus CAN donde se conectan varios dispositivos.

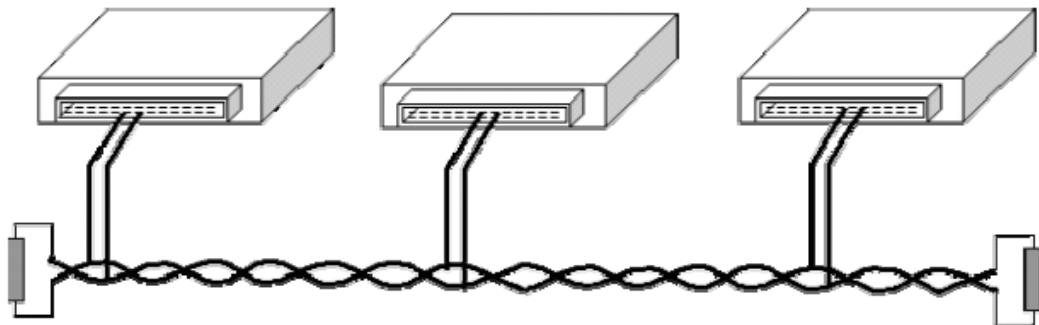


Figura 4.47. Dispositivos conectados mediante un bus CAN.

**Comunicación TCP/IP:** TCP/IP es la arquitectura de protocolos más adoptada para la interconexión de sistemas de cómputo tanto en una red local de computadoras tal como una intranet o en una red global de computadoras como Internet [148] [149] [150].

Este servicio encuentra su modelo en el sistema telefónico. Para conversar con alguien, descolgamos el teléfono, marcamos el número, hablamos y después colgamos. De manera similar, para usar un servicio de red orientado a la conexión, el usuario del servicio establece primero una conexión, la usa y después la libera. Algunas veces en sistemas de tiempo real, se prefiere utilizar el protocolo UDP/IP ya que el mismo consume menor ancho de banda y no tiene el *handshaking* del TPC/IP haciendo más ágil la comunicación. Sin embargo, este protocolo toma su modelo en el sistema postal. Es decir, cada mensaje (carta) es enviado al destinatario pero no tengo certeza si este último recibió el mensaje.

La figura 4.38 muestra una red de dispositivos conectados a través de una red tipo ethernet utilizando el protocolo TCP/IP.

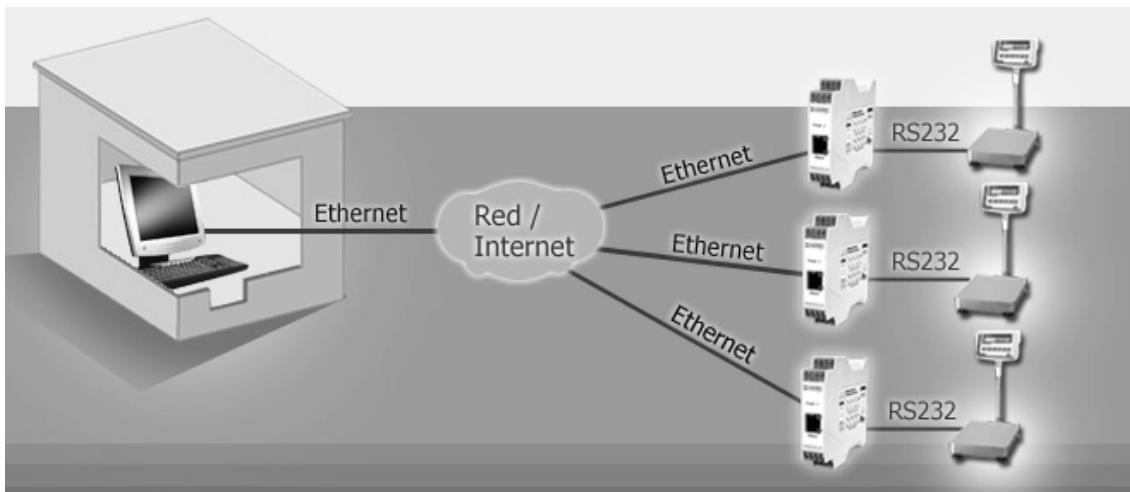


Figura 4.38. Dispositivos conectados a una computadora por TCP/IP.

**Comunicación inalámbrica y móvil:** El término red inalámbrica es un término que se utiliza para designar la conexión de nodos (equipos) sin necesidad de una conexión física (cables), utilizando para ello ondas electromagnéticas. Este tipo de comunicación se utiliza para comunicar computadoras entre sí, para comunicar una computadora con sus periféricos tales como Mouse, impresoras, webcams, teclado, teléfonos móviles, etc. y también se utiliza para comunicar sensores y actuadores con un sistema de cómputo [145].

Por ejemplo, la figura 4.39 muestra un enlace inalámbrico punto a punto entre dos dispositivos utilizando una frecuencia de transmisión en la banda de RF (radio frecuencia). Para comunicar dispositivos entre sí, se puede armar una red inalámbrica utilizando módulos de comunicación de bajo costo, como por ejemplo el equipo de comunicación mostrado en la figura 4.50.

En el caso que la distancia entre dispositivos sea extensa, se puede utilizar la tecnología móvil [146] [147]. Por ejemplo la tecnología EDGE (por sus siglas en inglés *Enhanced Data Rates For Global Evolution*)/GPRS (*General Packet Radio Service*) se utiliza para sistemas de monitoreo y control a distancia, en el caso que dichos sistemas se encuentren geográficamente dentro del área de cobertura de esta red pública. Esto se hace a través de la instalación de un servidor conectado a Internet, que no sólo gobierna las funciones específicas de este tipo de comunicación (verificando la presencia activa de los móviles, su

buen funcionamiento, recopilando sus variables típicas, etc.) sino que también permite el acceso a esta información mediante navegadores Web en computadores personales, o el despliegue de información en teléfonos celulares utilizando el navegador WAP o aplicaciones diseñadas para móviles.



Figura 4.39. Comunicación inalámbrica punto a punto.



Figura 4.50. Modulo Xbee-Pro con antena tipo látigo.

Por ejemplo si se utiliza el servicio SMS (*Short Message Service*), se pueden intercambiar cadenas de texto cortas entre un dispositivo remoto y un teléfono móvil.

El beneficio fundamental de utilizar esta tecnología radica en la posibilidad de un canal móvil que se encuentra disponible en una considerable fracción del país, abarcando extensas áreas rurales y permitiendo alcances aún mayores si

se potencian equipos estándar con antenas especiales o si se utilizan las más modernas tecnologías en móviles tales como 3G y UMTS-HSDPA, las cuales brindan mayor capacidad de transferencia de datos mejorándose la velocidad de acceso a costa de un mayor costo fijo y del uso de módems para banda ancha móvil, tales como los mostrados en la figura 4.51.

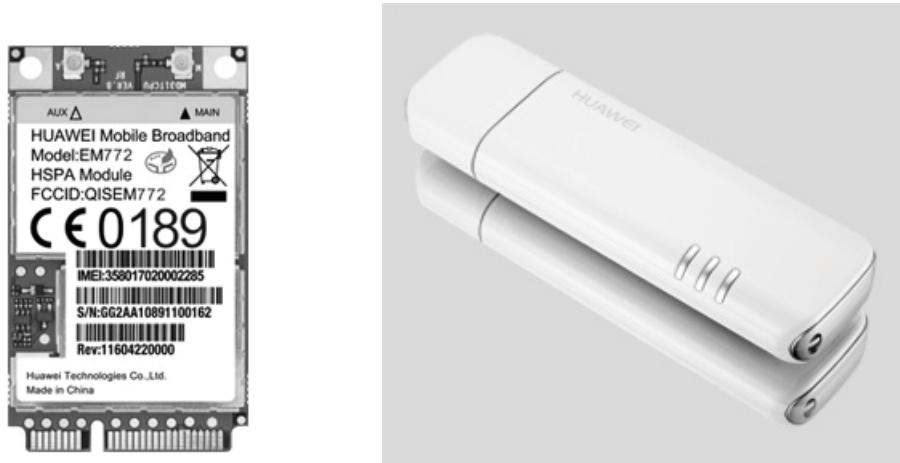


Figura 4.51. Modulo embebido EM772 y modem E160 fabricados por Huawei.

A medida que aumenta la complejidad del sistema, generalmente se emplean más sensores, más actuadores e incluso más de un sistema de cómputo, los cuales son conectados en red para compartir información. La figura 4.52 muestra la arquitectura de comunicación de un sistema complejo que requiere el envío, recepción y/o intercambio de mucha información.

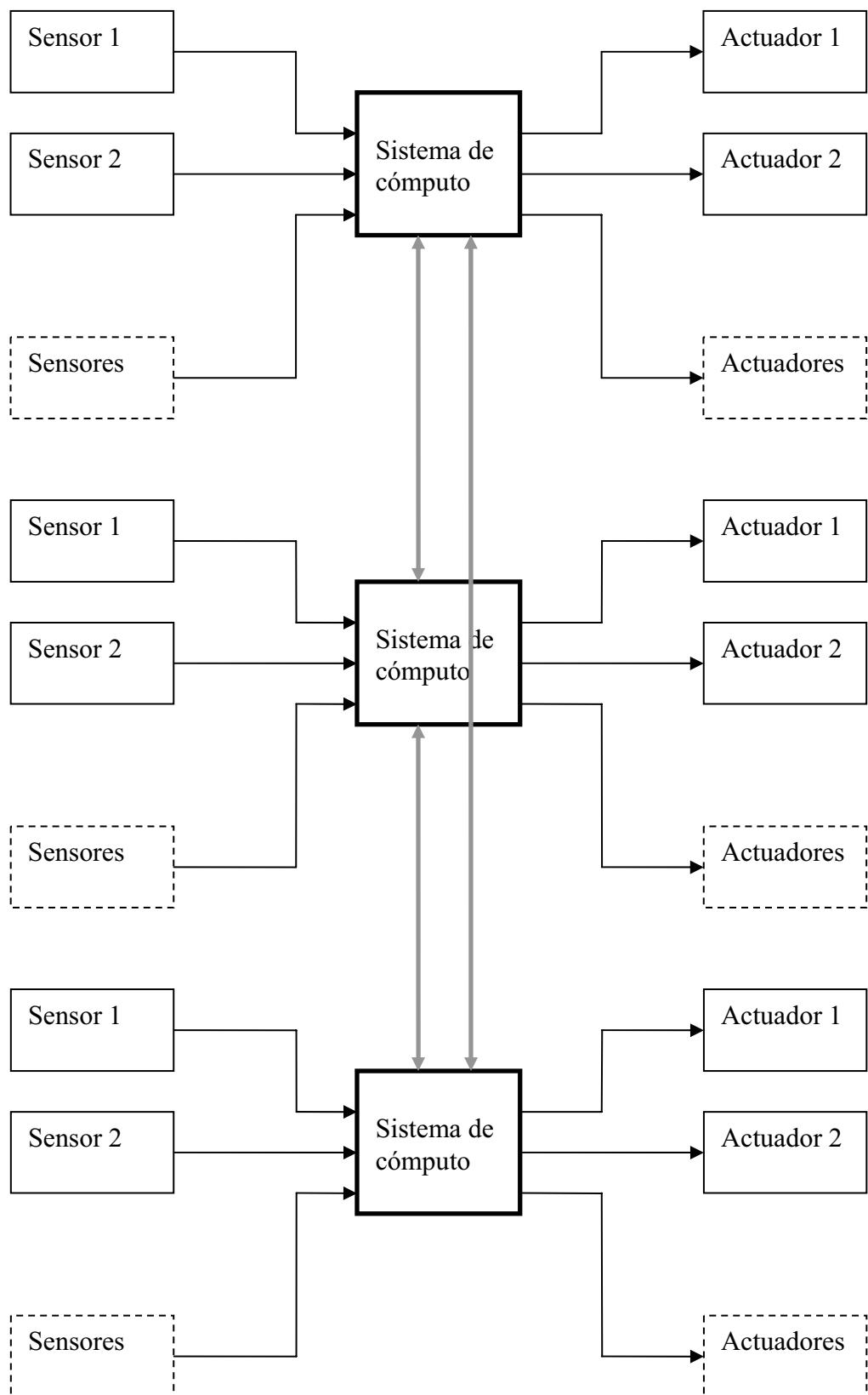


Figura 4.52. Comunicación de un sistema complejo.

#### 4.4.3 Plataforma de sistemas de cómputo basado en PC

Una plataforma de cómputo empotrado o basada en PC relaciona los componentes de hardware y software de estos sistemas [156]. Dicha plataforma puede ser vista desde una perspectiva en capas clasificadas como: capa de aplicación, capa de sistema operativo, capa de procesador y capa de dispositivo, como se muestra en la figura 4.53, donde las dos primeras involucran software mientras que las dos últimas se relacionan con el hardware del sistema de cómputo basado en PC. Respecto a una vista relativa al sistema, la misma incluye una capa de aplicación, una capa de administración y manejo de recursos, una capa de cómputo y una capa física (figura 4.53).

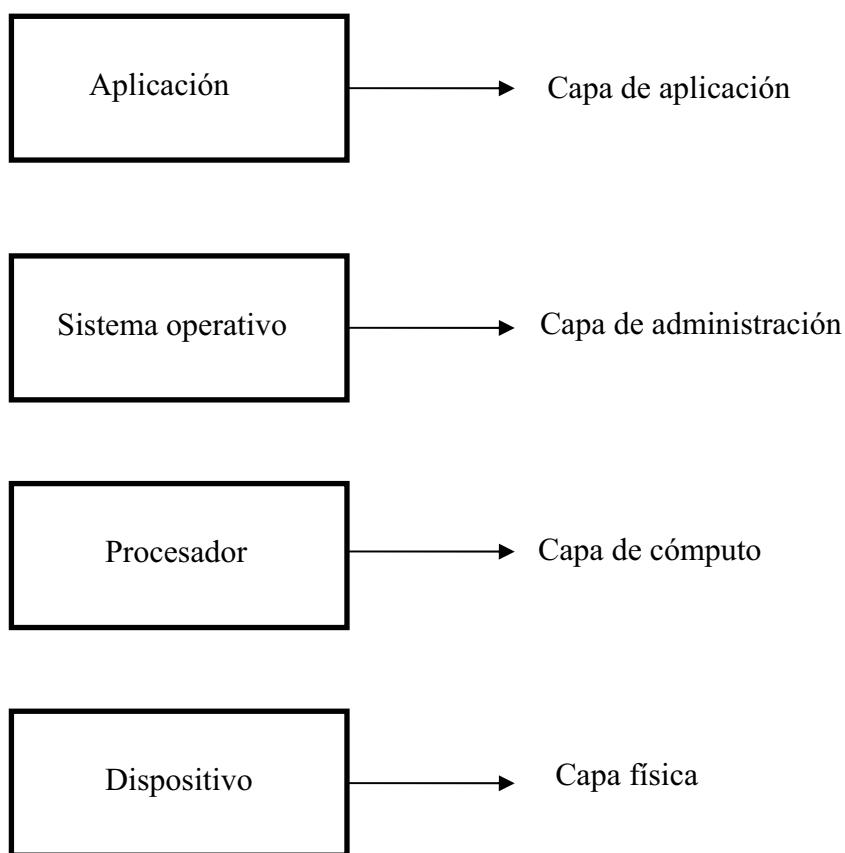


Figura 4.53. Arquitectura en capas de una plataforma de cómputo basada en PC.

La principal ventaja de los sistemas de cómputo basados en PC o PC104 u otra arquitectura compatible es el uso de un sistema operativo [159] estándar tal como Linux o Windows, lo cual permite abstraerse del funcionamiento del

hardware. Además, los sistemas operativos proporcionan una interfaz de programación para aplicaciones (API) para desarrollar tanto aplicaciones como *drivers* de nuevos dispositivos ayudando a los programadores para crear aplicaciones fácilmente y rápidamente abstrayéndose de la construcción del hardware en bajo nivel y su funcionamiento. En cuanto a las API para aplicaciones se pueden mencionar por ejemplo la API Win32 de Windows, las librerías DirectX, y la librería Open GL.

Además, sobre la plataforma de computo los desarrolladores utilizan generalmente lenguajes estándar de alto nivel [155] tal como C/C++ para implementar aplicaciones de control involucrando tareas de procesamiento de información y calculo de acciones de control para ser transmitidas a un sistema de actuación en base a la información procesada a partir de los datos recibidos desde el sistema sensorial.

En la utilización de sistemas de cómputo para control de sistemas, es usual trabajar con una gran cantidad de entradas y salidas digitales (I/O) para comunicarse con componentes externos tales como sensores y etapas de potencia de actuadores. Así, el principal objetivo de las API y *drivers* es encapsular el flujo de entrada/salida del sistema de forma que los desarrolladores puedan orientarse en el diseño del algoritmo de alto nivel de la aplicación sin preocuparse en los detalles del flujo de señales en hardware.

Es decir, para utilizar en un sistema de control un determinado sistema operativo, éste necesita un mecanismo adecuado de administración y manejo de recursos de forma de tratar con múltiples tareas y dispositivos trabajando en una forma coordinada y teniendo en cuenta un nivel de prioridades establecido.

La figura 4.54 muestra la estructura de software de un sistema de cómputo basado en PC. Las interfaces de programación API brindan la interfaz entre el sistema operativo y las aplicaciones de alto nivel, mientras que los *drivers* proporcionan la interfaz entre el sistema operativo y los dispositivos de bajo nivel (por ejemplo actuadores, sensores, etc.).

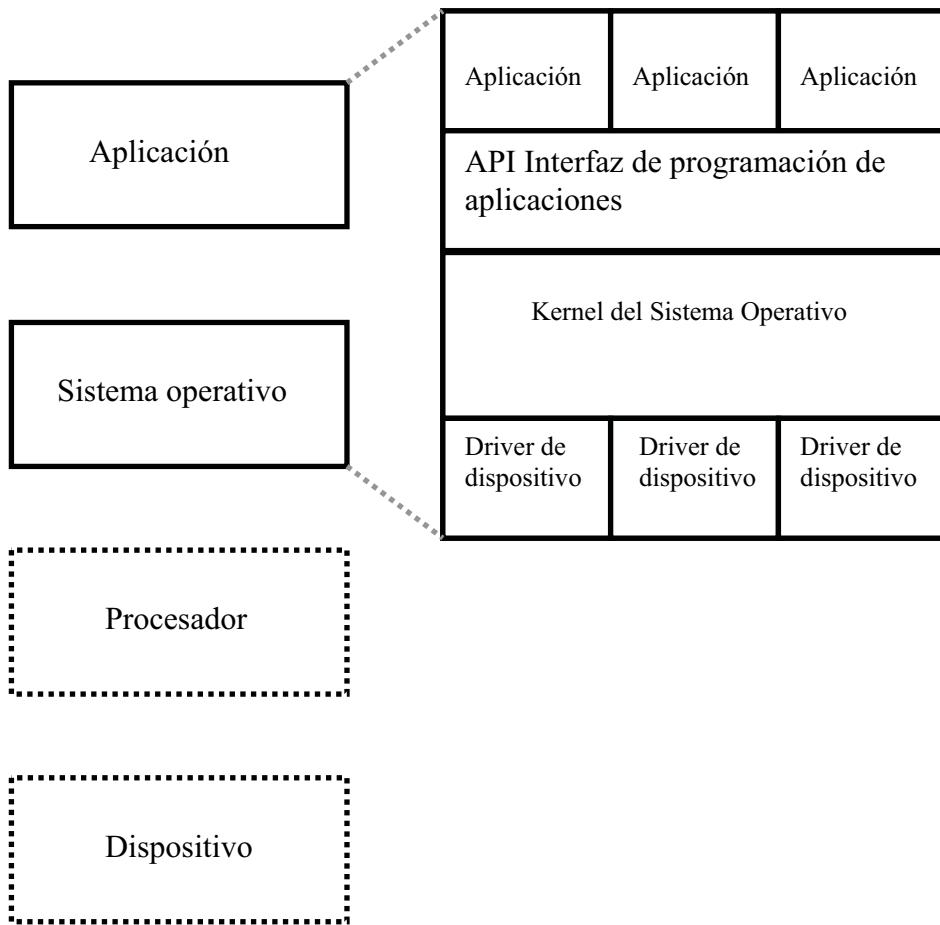


Figura 4.54. Arquitectura de software de una plataforma de cómputo basada en PC.

La principal característica de una estructura de software es la definición de una interfaz estándar que posea una estructura interna tal que permita a los desarrolladores y diseñadores independizarse lo más posible del funcionamiento del hardware de forma de orientar su atención en la problemática de la aplicación.

#### 4.5 Ejemplos de aplicación

En esta sección se describen ejemplos de implementación de un sistema de control en cuatro aplicaciones diferentes: clasificación de frutos, monitoreo a distancia, autopiloto de un tractor utilizado para tareas agrícolas y un sistema

de teleoperación de un mini-helicóptero. Mediante estos ejemplos se intenta afirmar los conceptos brindados en este capítulo acerca del funcionamiento interno de un sistema de control.

#### **4.5.1 Clasificación de frutos**

En muchos tipos de frutos, se deben clasificar los mismos no solamente para descartar aquellos que están en malas condiciones (como por ejemplo frutos picados, excesivamente maduros, etc.) sino para discernir entre frutos de elevada calidad (generalmente se destinan para exportación) y frutos de calidad aceptable de acuerdo a algún criterio normalizado tal como por ejemplo el color del fruto, la forma, el tamaño y el peso.

La figura 4.55 ilustra un proceso típico de clasificación de un determinado fruto realizado en forma manual, donde el operario recoge el fruto que es desplazado por una cinta transportadora y realiza una clasificación del fruto utilizando su sentido visual y instrumentos de medición como por ejemplo calibres y balanzas para medir tamaño y peso, respectivamente. Suponga una aplicación donde se desea hacer una clasificación de acuerdo al color y tamaño del fruto.

...¿Cómo implementaría un sistema de control para automatizar este trabajo?...  
¿Qué tipo de sensores utilizará?....¿Qué tipo de actuador emplearía?...

Una posible opción de implementación de un sistema de control para realizar el trabajo físico planteado de clasificación de frutos es ilustrada en la figura 4.56. El sistema de control está basado en el uso de una computadora.

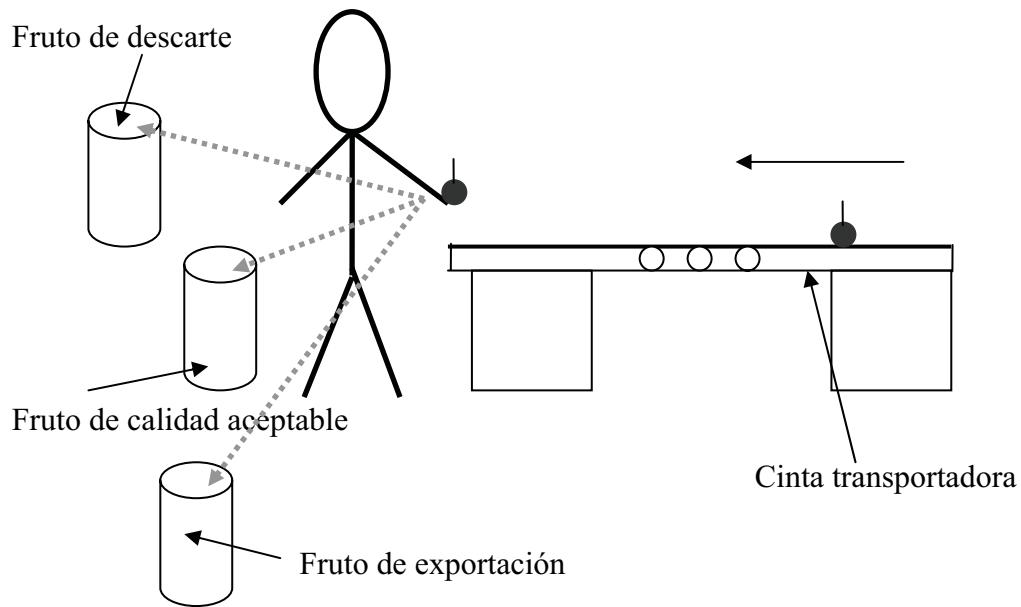


Figura 4.55. Clasificación manual.

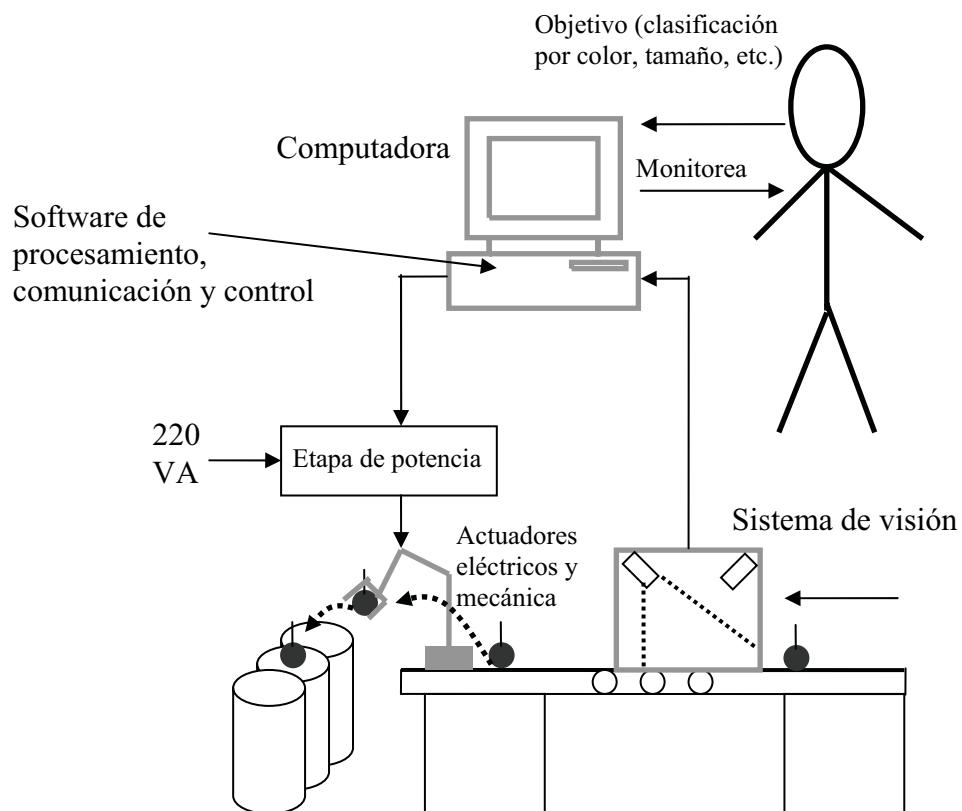


Figura 4.56. Sistema de control basado en computadora para clasificación de frutos.

Para clasificar los frutos de acuerdo a su color y tamaño se puede utilizar un sistema de visión compuesto por una o más cámaras de video dependiendo del tipo de fruto. Las imágenes captadas por el sistema de visión son transmitidas por cable hacia la computadora de control, la cual dispone de una placa tipo frame grabber para adquirir la información provista por la cámara y llevarla hacia la memoria de la PC. Allí se deben procesar las imágenes para extraer la información deseada de color y tamaño de cada fruto y entonces, de acuerdo a un patrón de calidad establecer si el fruto es de descarte, de calidad aceptable o de exportación.

La computadora debe tener un sistema operativo como por ejemplo Windows o Linux (sistema operativo de tiempo real) y una aplicación de software que realice el procesamiento de las imágenes de video y de acuerdo al tipo de fruto clasificado se envían señales de control hacia una etapa de potencia que maneja directamente un sistema de actuación eléctrico que esta acoplado a un sistema mecánico diseñado para desplazar el fruto hacia la izquierda, centro o derecha de la cinta transportadora para que el fruto caiga en el deposito adecuado de frutos clasificados, como se ilustra en la secuencia (1,2,3,4) mostrada en la figura 4.57. En el paso 1, se clasifica el fruto mediante el sistema de visión, en los pasos 2 y 3 el sistema mecánico es controlado para atrapar el fruto y desplazar el mismo hacia el depósito adecuado basado en la información procesada del sistema de visión que permite medir la ubicación del fruto y su clasificación. Finalmente en el paso 4, el movimiento continuo de la cinta transportadora hace que el fruto caiga en el depósito adecuado de acuerdo al criterio de clasificación seleccionado por el usuario quien además debe monitorear el funcionamiento del sistema.

En este ejemplo resulta adecuado utilizar un sistema de actuación eléctrico debido a que los frutos son livianos y por lo tanto no se requiere una fuerza grande pero si una rápida velocidad de respuesta para trabajar en línea sin detener la cinta transportadora.

Sistema de visión

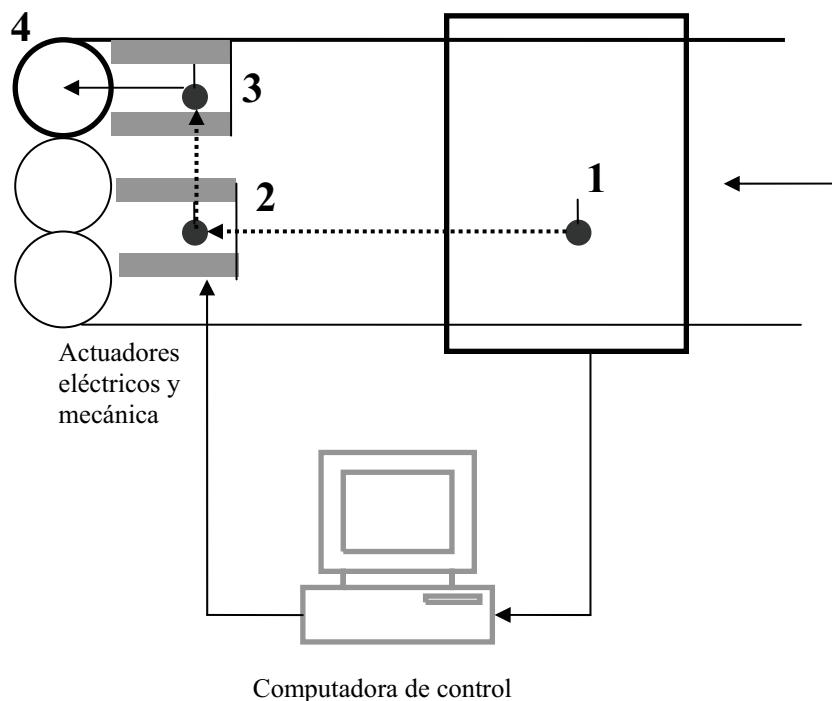


Figura 4.57. Funcionamiento del sistema de actuación (vista superior).

#### 4.5.2 Monitoreo a distancia

En este ejemplo, se desea monitorear en forma remota el proceso de fermentación del vino que ocurre en los tanques de una bodega. Para ello, se debe medir la densidad en el proceso de fermentación del vino, con el objeto de controlar la transformación del azúcar del jugo de uva en alcohol (vino).

Debido a que el proceso de fermentación es un proceso lento y las bodegas generalmente se encuentran alejadas de los centros urbanos, entonces resulta de utilidad monitorear este proceso en forma remota.

Una posible implementación de un sistema de control es ilustrado en la figura 4.58, donde se colocan sensores de densidad de líquidos en los tanques de la bodega (allí se produce el proceso de fermentación) conectados a un bus de datos como por ejemplo RS485 o CAN. A su vez, un microcontrolador es conectado también al bus de forma de solicitar las mediciones de densidad de los tanques de la bodega y enviar un mensaje SMS a través de la red de

telefonía móvil usando por ejemplo la tecnología EDGE hacia el teléfono celular del supervisor del proceso (generalmente un enólogo).

La implementación de este sistema de control permite entonces el monitoreo remoto de un sistema a bajo costo.

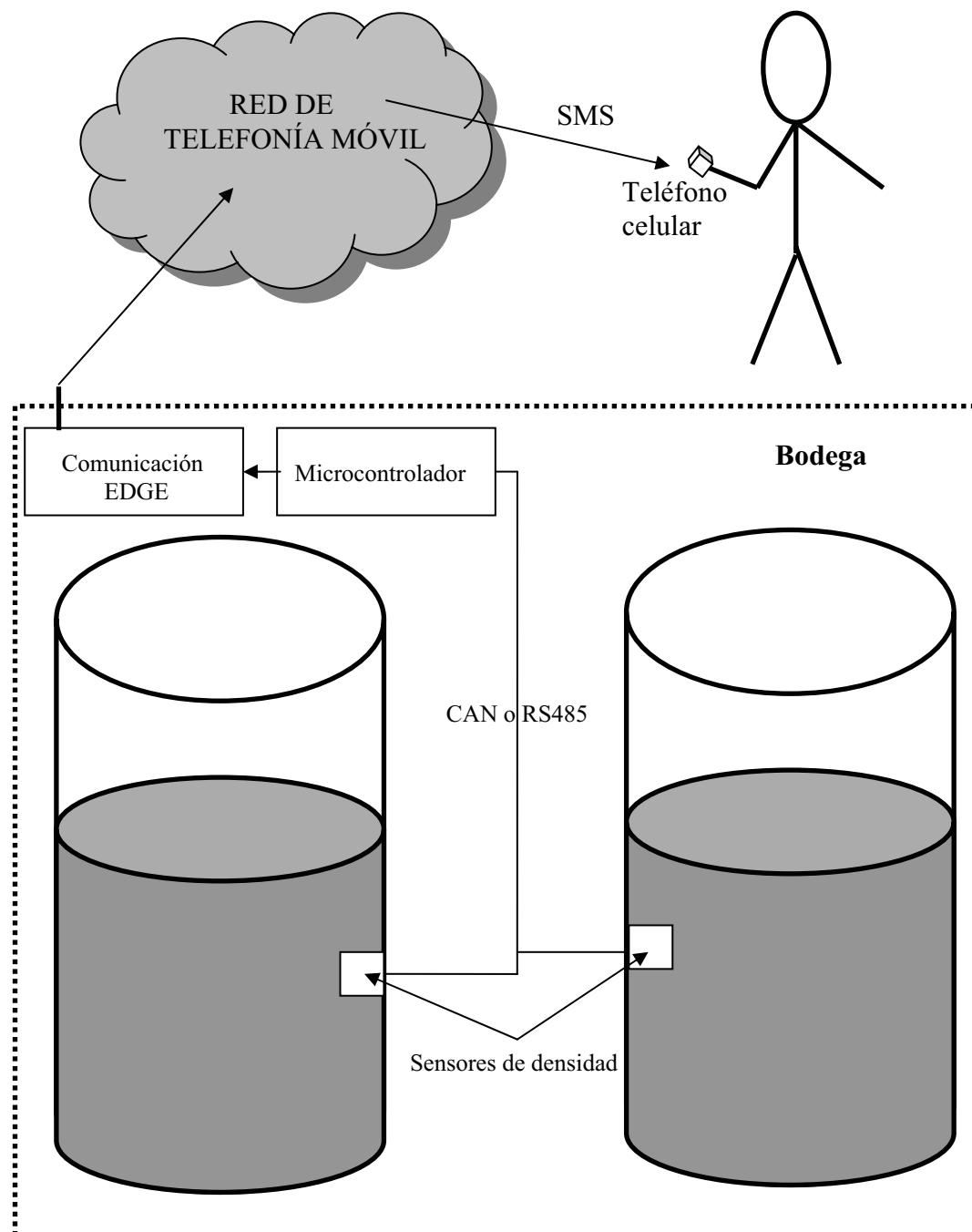


Figura 4.58. Monitoreo remoto del proceso de fermentación del vino.

#### 4.5.3 Auto-piloto para maquinaria agrícola

Otro ejemplo de sistema de control es el denominado auto-piloto aplicado a una máquina para tareas agrícolas de forma de lograr tareas en el campo con una gran precisión aprovechando la exactitud de los sistemas actuales de localización. El auto-piloto controla en forma automática la dirección de una máquina agrícola como por ejemplo un tractor de forma de seguir una línea de referencia.

La línea de referencia depende de la tarea a realizar y es establecida por el productor agrícola. Por ejemplo, la figura 4.59 muestra líneas de referencias típicas utilizadas en siembra que establecen por donde debería pasar el tractor.

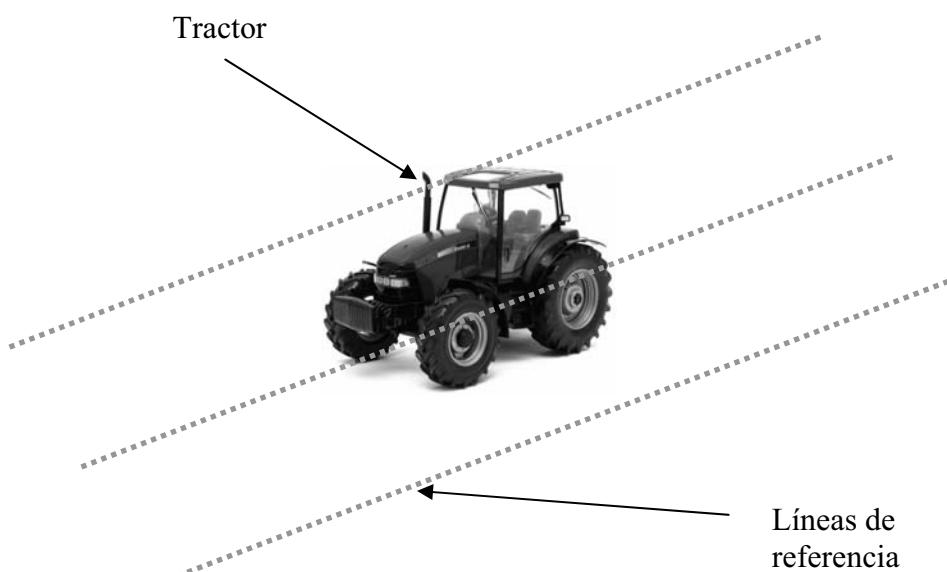


Figura 4.59. Ejemplo de líneas de referencia.

Para seguir líneas georreferenciadas en forma precisa, se puede utilizar un sistema auto-piloto, el cual esta compuesto por un sistema de localización basado en GPS, un sistema de cómputo empotrado, una etapa de potencia, un actuador eléctrico para manejar la dirección hidráulica del vehículo y una

interfaz que permite al operador humano establecer las líneas de referencia y posee una pantalla gráfica para realimentar al usuario la posición del tractor respecto a la línea de referencia. Este sistema se ilustra en la figura 4.60.



Figura 4.60. Componentes de un autopiloto de un tractor.

El funcionamiento del sistema auto-piloto desde un punto de vista de control se ilustra en la figura 4.61, donde el productor y/o operario establecen las líneas de referencia que son comparadas en línea con la localización actual del tractor en el controlador del sistema, que determina la acción de control aplicada al actuador eléctrico que modifica la dirección hidráulica del tractor de forma de disminuir el error y seguir de manera muy precisa la línea de referencia. En la práctica, el operador humano activa el autopiloto cuando ve en la pantalla

grafica que está cerca del inicio de la línea de referencia y desactiva el mismo cuando termina cada línea.

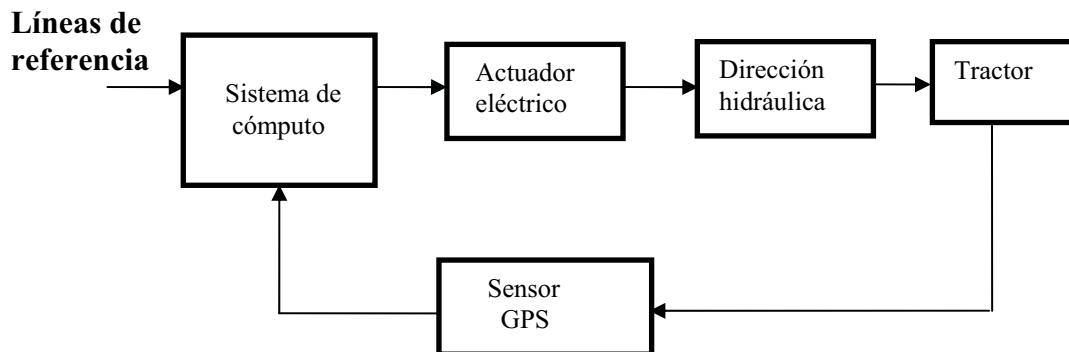


Figura 4.61. Sistema auto-piloto para controlar la dirección de un tractor.

#### 4.5.4 Teleoperación de un mini-helicóptero

Una aplicación de los sistemas de control cuyo costo cada vez es menor es el control de mini-helicópteros no tripulados. Aunque existen mucha diversidad de tareas de estos sistemas tales como por ejemplo inspección, fumigación, y vigilancia, entre otros; en general se desea realizar una trayectoria deseada en el espacio, lo cual sería muy difícil de lograr por un operario que no sea un experto en el manejo por radio-control u otro dispositivo de mando de este tipo de vehículos aéreos.

Para ello, se puede adicionar un sistema de control de un muy pequeño tamaño y peso dentro del mini-helicóptero de forma de ayudar a un operario con un mínimo de capacitación (no necesariamente un experto) a manejar adecuadamente el helicóptero.

La figura 4.62 muestra un típico sistema de control manual de un mini-helicóptero eléctrico manejado por medio de un dispositivo de mando, cuya señal de control de bajo nivel (referencias de los motores eléctricos que mueven distintas partes del helicóptero como por ejemplo la velocidad de giro

de la hélice principal) es enviada al helicóptero a través de un sistema de comunicación inalámbrico.

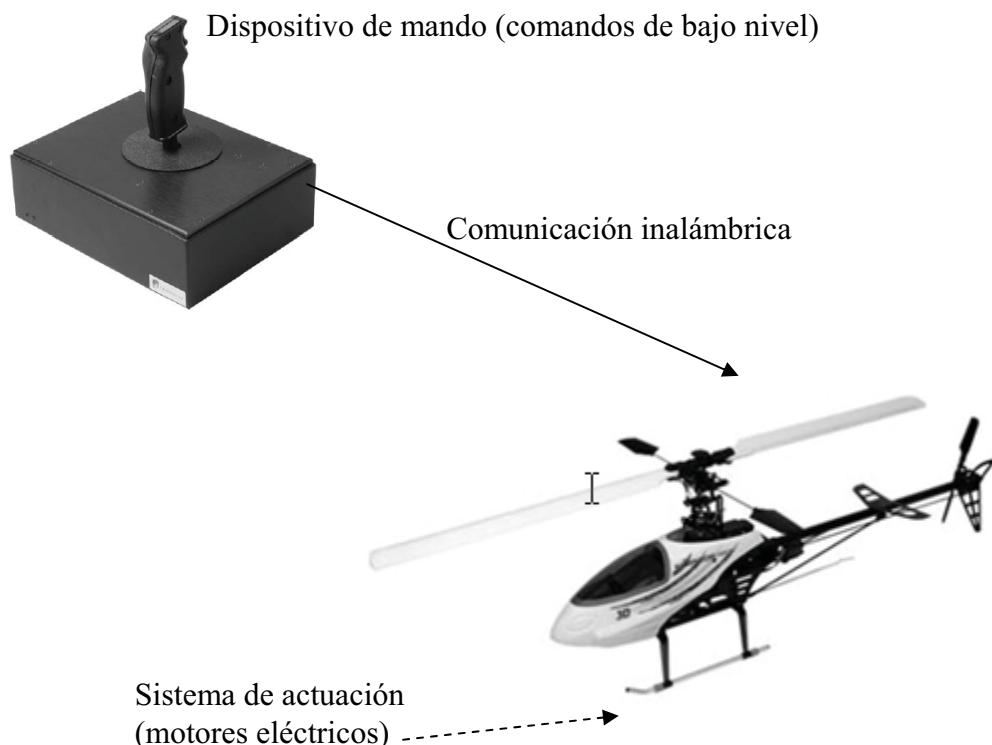


Figura 4.62. Mini-helicóptero controlado en forma manual.

La figura 4.63 muestra los sensores y micro sistema de cómputo que son incorporados en el mini-helicóptero de forma tener una cierta capacidad autónoma que permita generar un camino que pase por puntos 3D establecidos por el usuario controlando el vuelo del mini-helicóptero para que realice dicho recorrido en forma suave.

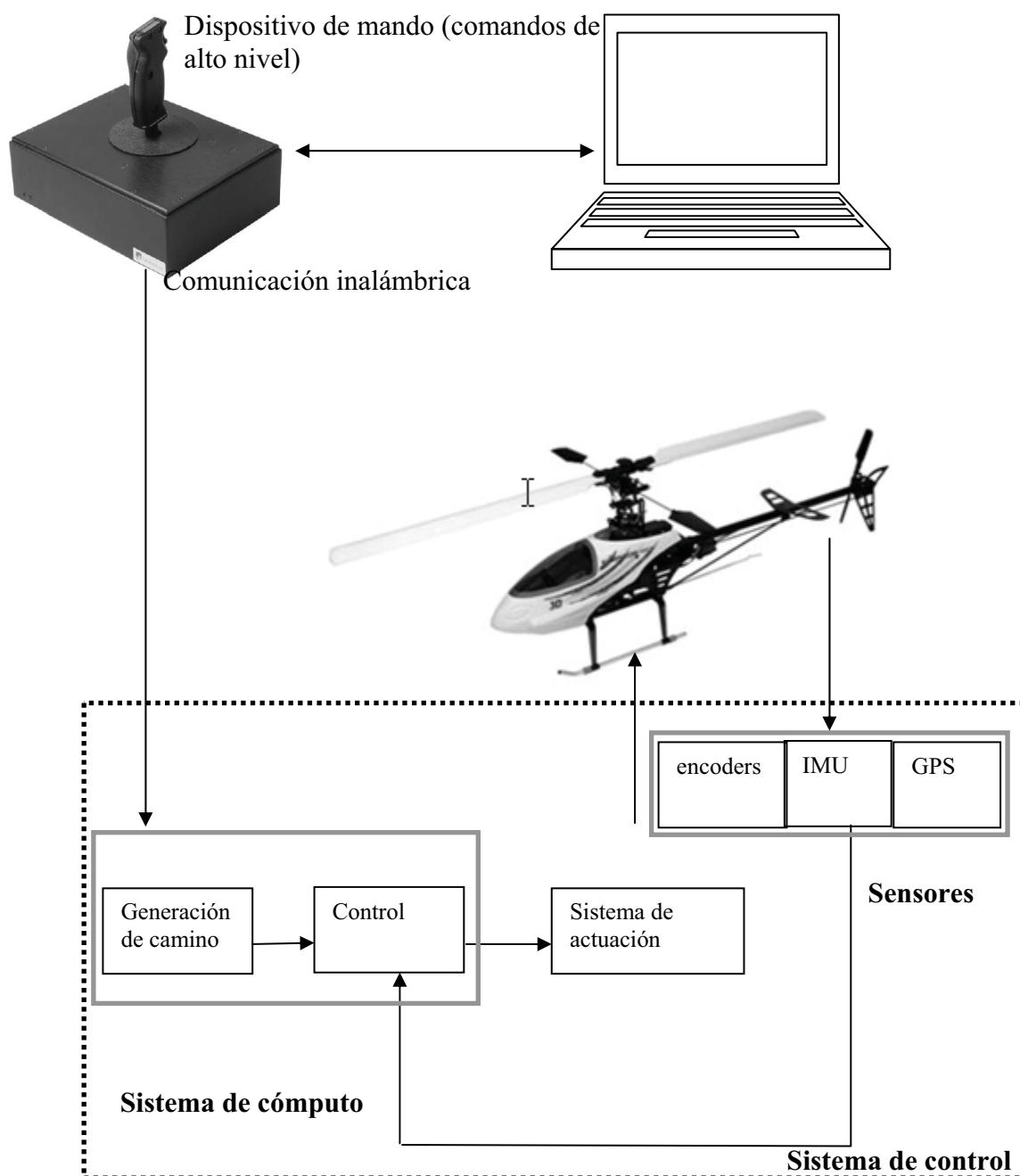


Figura 4.63. Sistema de control de un mini-helicóptero.

El usuario marca puntos 3D ayudado por una pantalla gráfica donde visualiza un ambiente virtual 3D, como se ilustra en la figura 4.64. Estos puntos (comandos de alto nivel) son enviados de forma inalámbrica al sistema de cómputo a bordo del mini-helicóptero, el cual interpreta estos datos generando

un camino suave que pasa por los puntos de referencia asignados por el operador humano.

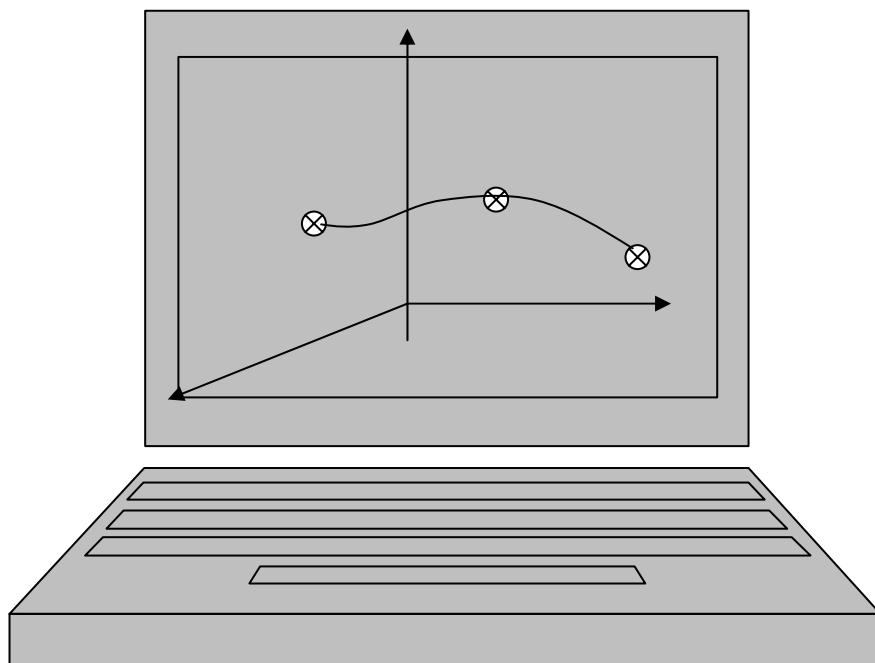


Figura 4.64. Generación de comandos de alto nivel.

Luego, el sistema de cómputo ejecuta un lazo de control donde compara el camino de referencia previamente generado con el estado actual del mini-helicóptero en base a la información provista por el sistema sensorial compuesto por sensores de la posición angular de los actuadores (por ejemplo utilizando encoders) y sensores de localización basada en la información provista por un GPS y un sistema sensorial integrado tipo IMU. La acción de control computada continuamente por el sistema de cómputo es aplicada al sistema de actuación, el cual modifica el movimiento del mini-helicóptero.

#### 4.6. Síntesis del capítulo

La tecnología actual permite medir y estimar una gran cantidad de variables con una exactitud cada vez mayor. A su vez, el avance tecnológico brinda cada día una mayor capacidad de procesamiento de la información, lo cual permite

controlar diferentes tipos de sistemas con una velocidad y precisión que sorprenden. Además, el crecimiento de las tecnologías de la comunicación permite realizar redes de dispositivos a bajo costo e inclusive monitorear y controlar sistemas a distancia utilizando por ejemplo Internet.

Los sistemas de control están compuestos por un sistema sensorial, un sistema de cómputo y un sistema de actuación. El sistema de cómputo incluye el hardware necesario para procesar la información suministrada por el sistema sensorial, realizar las comunicaciones con otros dispositivos (como por ejemplo intercambiar datos con sensores, actuadores y otros sistemas de cómputo conectados en red) y calcular las acciones de control que serán aplicadas por el sistema de actuación. Los sistemas de cómputo más comunes son las computadoras, sistemas de hardware empotrados, dispositivos lógicos programables y los microcontroladores. Además, la tecnología en comunicaciones permite intercambiar información entre un sistema de cómputo y una computadora remota manejada por un usuario para enviar comandos de alto nivel y monitorear un sistema de control, por ejemplo utilizando Internet desde cualquier lugar del mundo.

El sistema sensorial está formado por uno o varios sensores que permiten medir el estado del sistema. Los sensores son dispositivos que convierten una variable física de interés en una señal eléctrica entendible por medios electrónicos. Una determinada tecnología, por ejemplo emisión y detección infrarroja se puede utilizar para medir diferentes variables físicas de acuerdo al principio de medición que se utilice. En este ejemplo, dicha tecnología se puede emplear para medir la distancia hasta un objeto tanto como para detectar el nivel de alcohol en la sangre.

Muchos tipos de sensores entregan una medición que puede ser comprendida directamente por un sistema de cómputo (por ejemplo un microcontrolador), como por ejemplo un sensor de distancia 1D láser, infrarrojo u de ultrasonido, o sensores de temperatura, humedad, velocidad, desplazamiento, fuerza, entre otros. Sin embargo, los sensores que pueden captar una mayor cantidad potencial de información, tales como los sensores de distancia 2D y 3D y los

sistemas de visión monocular y estereoscópica, necesitan de un alto procesamiento sobre los datos adquiridos (por ejemplo el procesamiento aplicado a una imagen) para poder relacionar dicha información a alguna medida física o incluso interpretar dicha información de forma de obtener datos útiles para un sistema de control dado.

Por otro lado, el sistema de actuación está compuesto por uno o varios actuadores ya sean eléctricos, neumáticos o hidráulicos o en general una combinación de los mismos. El sistema de actuación entrega una energía controlada que permite al proceso alcanzar una referencia deseada y por ejemplo en un sistema mecánico, permite a una máquina realizar un trabajo físico deseado.

Las aplicaciones ejemplo descriptas brevemente en este capítulo permiten percibir la potencialidad de la tecnología actual aplicada en diferentes áreas a través de diversos sistemas de control.

# *Capítulo 5*

## *Robots*



## **Capítulo 5**

# **Robots**

### **5.1 Introducción**

La palabra robot proviene de la palabra checa *robot*a que significa trabajo. Existen varias definiciones en la literatura actual acerca del significado del término robot, tales como:

“Un robot es una máquina capaz de extraer información de su entorno y usar el conocimiento acerca de su mundo para actuar sin problemas de una manera segura y decidida”.

“Un robot es un sistema autónomo el cual existe en un mundo físico, puede sensar su entorno y puede actuar sobre éste para alcanzar determinados objetivos”

“Un robot es un manipulador reprogramable, multifuncional, controlado automáticamente, que puede estar fijo en un sitio o moverse y está diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, por medio de movimientos variables programados para la realización de diversas tareas o trabajos”.

En base a estas definiciones, se puede decir que un robot es una máquina posiblemente dotada de herramientas capaz de realizar un trabajo físico en forma independiente y que puede ser reprogramada para realizar diferentes tareas [16] [19].

Las figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 y 5.6 muestran algunos robots aplicados tanto en la industria como en el hogar. La figura 5.1 muestra un tractor dotado con un control automático de dirección aprovechando la exactitud de un sistema muy preciso de localización y que puede ser útil para diversas tareas tales como siembra [109], mientras que la figura 5.2 muestra un robot manipulador (tipo

brazo) utilizado en la industria para carga rápida de pallets manipulando objetos de gran peso. La figura 5.3 muestra un camión automatizado para transporte de carga en minería evitando el riesgo para el hombre de conducir en un terreno peligroso. Por otro lado, la figura 5.4 muestra un robot utilizado en la industria farmacéutica para búsqueda rápida de remedios en un laboratorio de grandes dimensiones. La figura 5.5 muestra un robot submarino que puede quedar suspendido en un punto debajo del agua tal como lo hace un helicóptero en el aire, y que está destinado hacia empresas de exploración petrolífera o para las exploraciones submarinas de arqueólogos. La figura 5.6 muestra un robot dotado de un sistema mecánico controlado para caminar con dos piernas tal como lo hace el hombre. Los robots de este tipo quizás sean aplicados extensivamente en un futuro en tareas en el hogar. Finalmente, la 5.7 muestra un robot orientado a entretenimiento, el cual es un mini-robot tipo perro diseñado como juguete que posee muchas funcionalidades muy atractivas para niños.

Es decir, los robots tienen una gran cantidad de aplicaciones en diversas áreas y a la vez, el avance tecnológico promueve permanentemente nuevos usos en la industria, en la producción, en el transporte terrestre, aéreo y submarino, en áreas de interés general como salud y educación, y en el hogar [31] [32] [33].



Figura 5.1. Control automático en la dirección (autopiloto) de maquinaria agrícola.



Figura 5.2. Robots industriales utilizados para carga de pallets.



Figura 5.3. Robot de transporte autónomo para minería.



Figura 5.4. Robot utilizado en la industria farmacéutica.

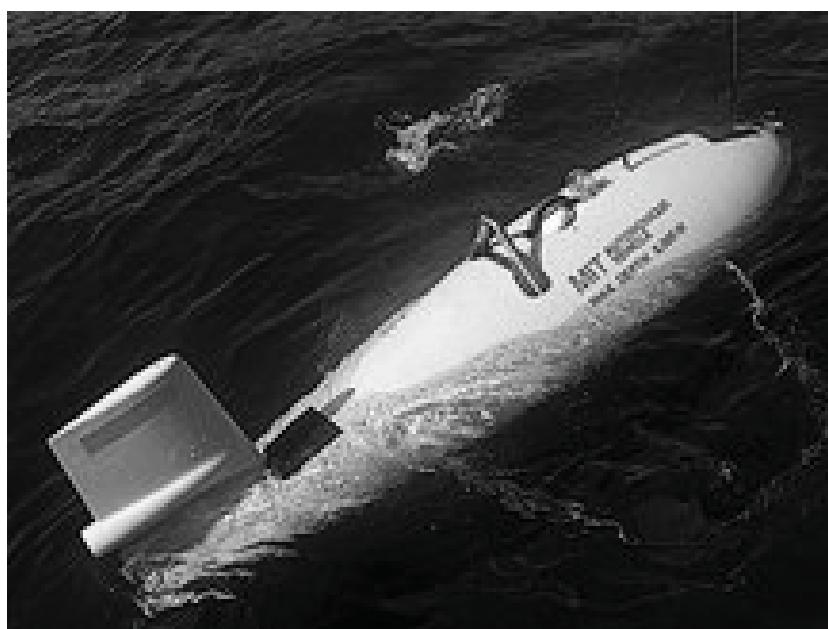


Figura 5.5. Robot submarino desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT).

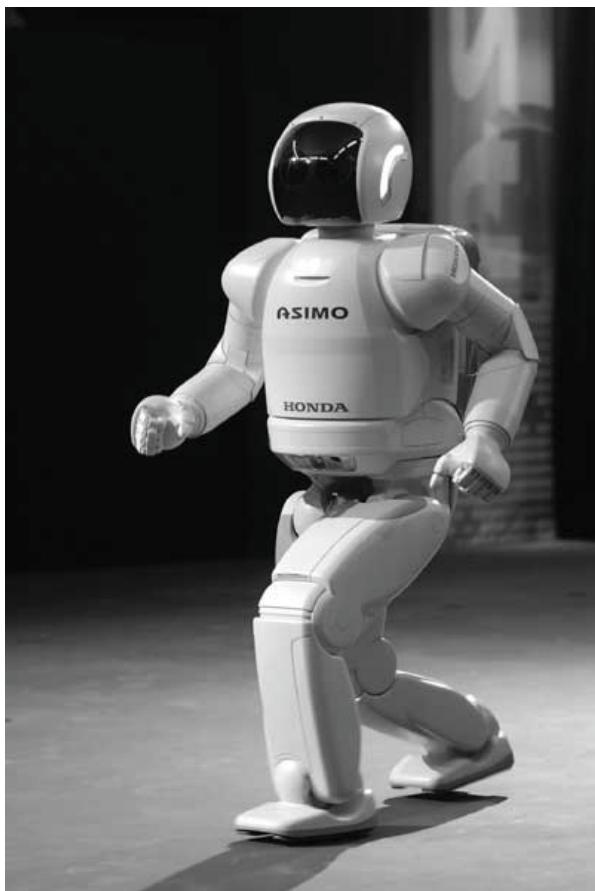


Figura 5.6. Robot de dos piernas que camina desarrollado por Honda.



Figura 5.7. Robot Aibo de Sony.

¿Cómo se transforma una máquina convencional en una máquina inteligente denominada robot?...

Vamos a utilizar un ejemplo para ilustrar cómo una máquina puede ser convertida en una máquina inteligente. Suponga que tiene una máquina de cortar césped como se muestra en la parte superior de la figura 5.8. La cual es manejada manualmente por una persona recorriendo todo el lugar donde se quiere cortar el césped. Además, el hombre evita toda acción indeseable tal como chocar con un cerco, dañar plantas y flores, atascamientos o roturas de la máquina, entre otras.

Para convertir esta máquina manejada por el hombre en una máquina inteligente, se debe dotar a la máquina de un sistema de percepción tanto de su ubicación como del reconocimiento del entorno, como por ejemplo detectar si hay una planta en una determinada posición. Una alternativa para implementar dicho sistema sensorial es utilizar un sistema de odometría basado en encoders y una cámara de video (estos sensores son descriptos en el capítulo 4). La información brindada por el sistema de percepción en cuanto a la ubicación de la máquina y de los objetos que no sean césped del entorno son utilizados por un sistema de control cuyo razonamiento implementado describe de alguna forma el razonamiento del hombre cuando realiza esta tarea. Esto implica ejercer las acciones necesarias para recorrer un espacio pre-establecido cortando el césped pero sin tener contacto con las plantas u objetos que existan en el terreno para evitar el daño de las mismas o el daño de la máquina. Así, el razonamiento implementado en un sistema de cómputo se traduce en acciones físicas a través de un sistema de actuación. Por ejemplo el uso de motores eléctricos, dispuestos mecánicamente de forma tal de poder controlar automáticamente la dirección y tracción de la máquina de cortar césped. Es decir que controlando el movimiento de los motores puedo hacer que la máquina rote y avance. De esta forma se incorpora conocimiento y tecnología en una máquina para transformarla en un robot, como se ilustra en la figura 5.8 (parte inferior).

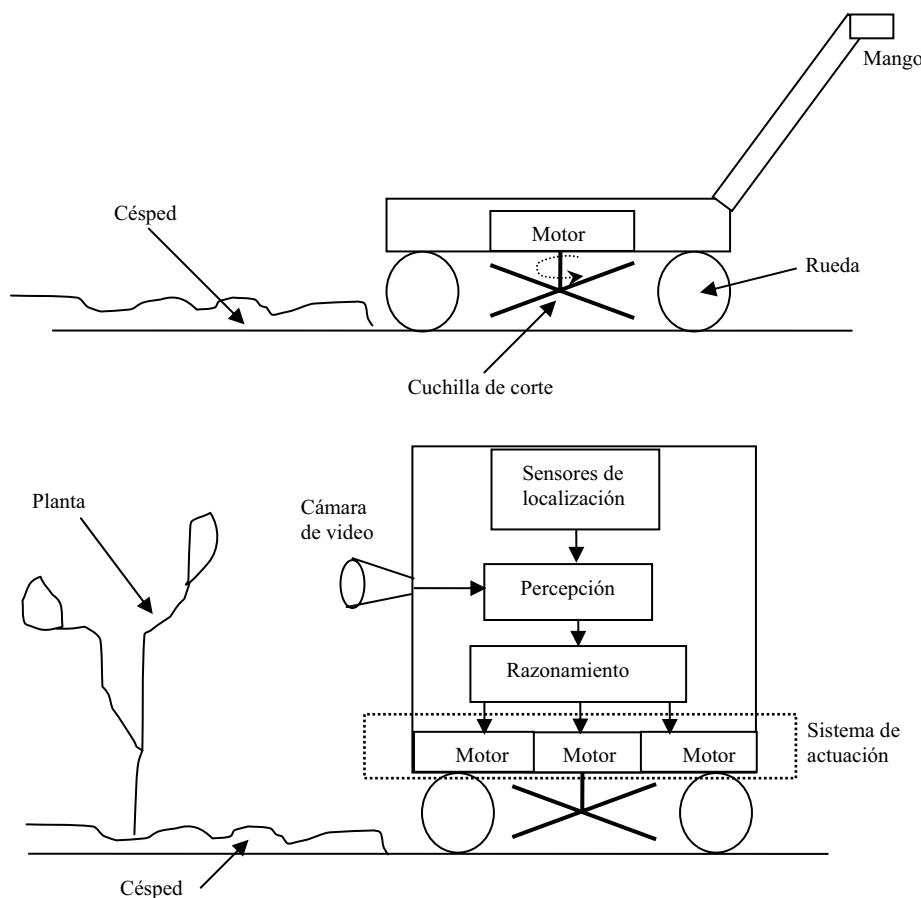


Figura 5.8. Máquina de cortar césped (superior) y máquina inteligente de cortar césped (inferior).

La evolución permanente del diseño y desarrollo de robots hace que exista una gran diversidad de clases desde robots que tienen como objetivo exclusivo la amplificación de la potencia muscular del hombre imitando su capacidad de movimiento y sustituyéndolo en su trabajo físico, hasta robots que también son capaces de procesar información de forma de ayudar, complementar e incluso sustituir al hombre en algunas funciones cognitivas. Es decir, el diseño de robots tiende hacia máquinas inteligentes que puedan realizar tareas más complejas en cuanto al nivel requerido de capacidad cognitiva, lo cual hace que el rol del hombre dentro de un sistema altamente automatizado (tal como un sistema robótico) cambie y dependa de cada aplicación. La tabla 5.1 muestra en forma resumida algunas áreas de aplicación actual de los robots donde se remarca cual es el rol del hombre en dichas tareas, y la cercanía o lejanía física entre el robot y el operador humano.

Área de aplicación	Remote/próximo	Rol	Ejemplo
Búsqueda y rescate	Remoto	hombre es supervisor u operador	Robots de búsqueda remotamente operados
	Próximo	hombre y robot son pares	robot soporta estructuras inestables
Robótica de Asistencia	Próximo	Hombre y robot son pares el robot es una herramienta	Asistencia para ciegos y terapia para ancianos
	Próximo	robot es mentor	Interacción social para niños autistas
Militar y policial	Remoto	Hombre es supervisor	Exploración y remoción de minas
	Remoto o próximo	Hombre y robot son pares	Patrulla de apoyo
	Remoto	Hombre es consumidor de información	Comandante utilizando información de reconocimiento
Educacional	Próximo	Robot es mentor	Robot asistente para clase
	Próximo	Robot es mentor	Robot guía para visitas a museos
Espacio	Remoto	Hombre es supervisor u operador	Ciencia remota y exploración
	Próximo	Hombre y robot son pares	Asistencia robótica para astronautas
Hogar e industria	Próximo	Hombre y robot son pares	Robot compañero
	Próximo	Hombre es supervisor	Robot aspiradora
	Remoto	Hombre es supervisor	Robot constructor

Tabla 5.1. Rol del hombre en distintas aplicaciones.

Como se mencionó en este capítulo, un robot está diseñado de forma tal de poder realizar un trabajo físico de manera independiente y ser reprogramado para distintos trabajos. Por lo tanto, mediante un sistema de control automático se pretende calcular y ejecutar acciones que permitan gobernar un robot para llevar adelante una tarea específica.

En la figura 5.9 se muestra un esquema de robot, el cual consta de un brazo montado sobre un vehículo y está formado por un sistema mecánico, actuadores, sensores internos (brindan el estado del robot), un sistema de percepción del entorno basado en los sensores externos (informan sobre el entorno del robot) y un sistema de control. Los sensores internos y externos permiten cerrar lazos de control con realimentación del estado del robot y realimentación de la información que representa la interacción entre el robot y el entorno [17]. El sistema de percepción y el sistema de control que implementa en cierta forma un razonamiento basado en el conocimiento del problema en cuestión son dos bloques fundamentales en un robot, debido a su alta relación con el cerebro humano en una analogía entre robot y hombre. Es decir que los sistemas de percepción y control de un robot dotan al mismo de un cierto grado de inteligencia.

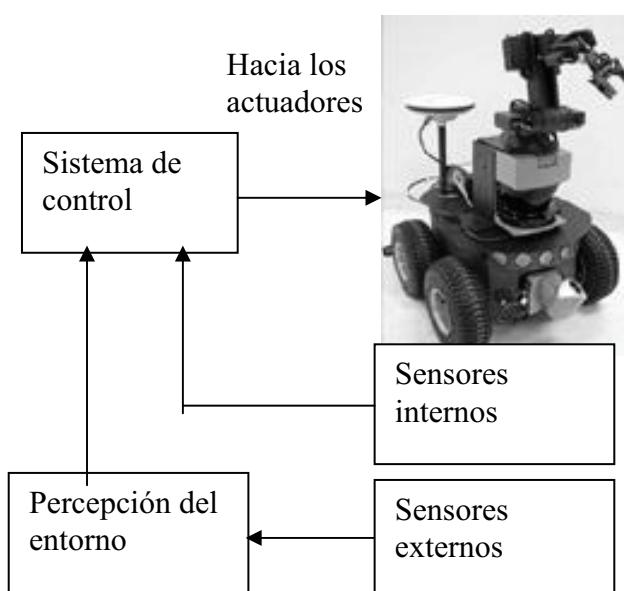


Figura 5.9. Sistema de control de un robot.

Los tipos de robots más utilizados son los robots manipuladores [18] y los robots móviles [21] o la combinación de ambos (ver figura 5.9), donde los primeros permiten manipular objetos utilizando en su extremo alguna herramienta tal como lo haría el hombre, mientras que los robots móviles permiten desplazarse de un lugar a otro tanto por tierra, por aire o por agua.

## 5.2 Robots manipuladores

Los robots manipuladores representan una cadena de eslabones articulados accionados en una o más articulaciones, que suelen tener una herramienta en su extremo de forma de hacer una tarea dada, como por ejemplo pulir o limpiar una superficie.

La figura 5.10 muestra un robot manipulador compuesto por eslabones, articulaciones y una herramienta montada sobre el extremo operativo del robot. Además un robot consta de un sistema sensorial, un sistema de actuación y un sistema de cómputo (procesamiento, comunicación y control).

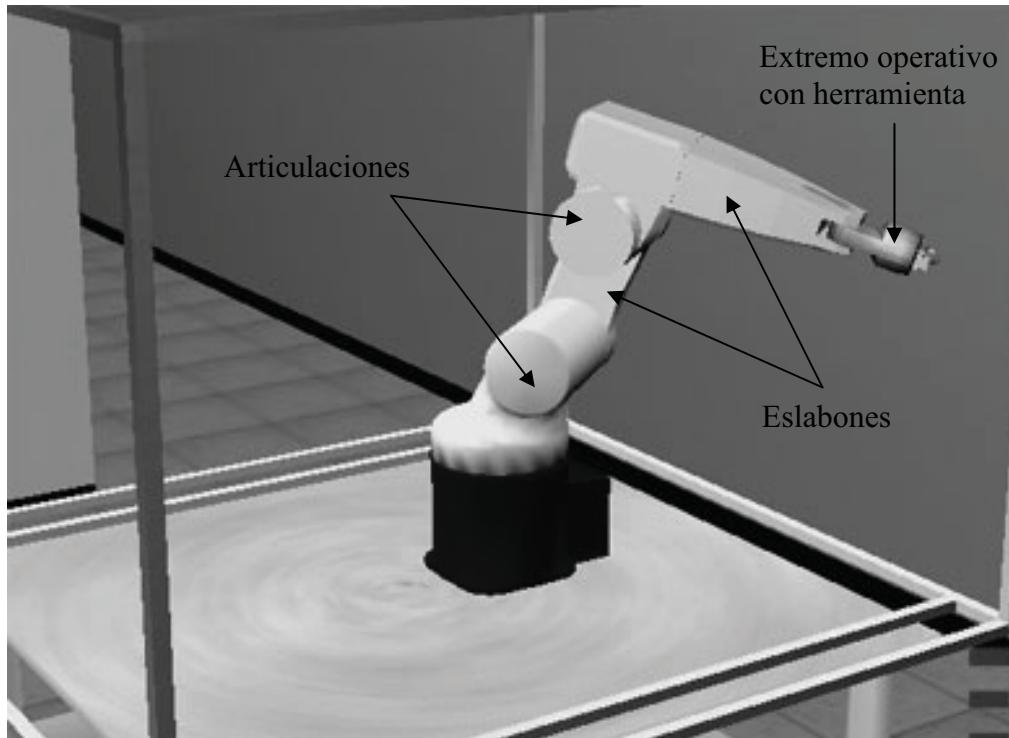


Figura 5.10. Componentes de un robot manipulador.

La figura 5.11 muestra la similitud de los componentes de un robot manipulador con el brazo humano.

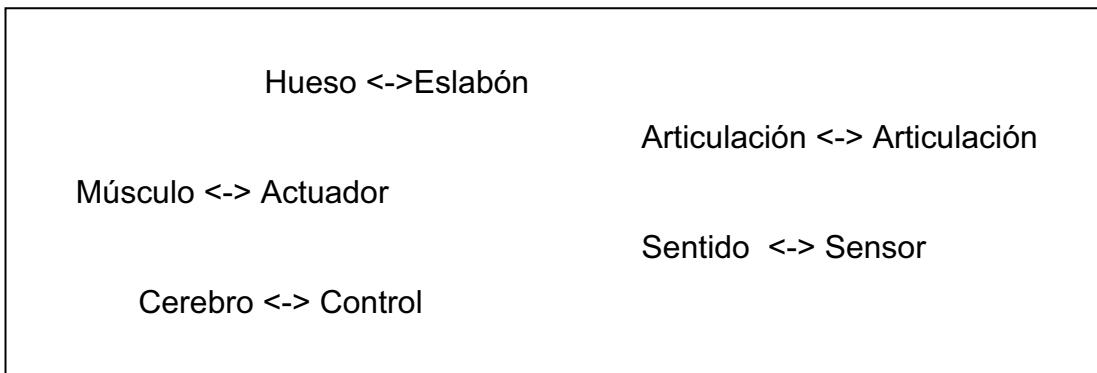


Figura 5.11. Analogía entre brazo humano y robot manipulador.

Los sensores internos más comúnmente utilizados en robots manipuladores son potenciómetros, y encoders, mientras que las celdas de carga, y cámaras de video mono y estéreo son los sensores externos más empleados en estos robots (estos sensores fueron descriptos en el capítulo 4).

El modelo matemático de un robot manipulador en interacción con un medio tiene una estructura y propiedades determinadas, es decir el modelo representa el conocimiento del comportamiento de dicho robot expresado en forma matemática. Además, la estructura mecánica del robot define el espacio de trabajo o zonas que pueda alcanzar el mismo. Aunque este libro no detalla modelos matemáticos, conceptualmente si se puede mencionar que en el movimiento del robot influye el par aplicado a los motores del robot (actuadores), la fuerza de la gravedad, la inercia del robot, las fuerzas centrifugas y de coriolis entre las distintas partes del manipulador lo cual ocasiona fuerzas que una articulación y su eslabón correspondiente ejerce sobre otra, y las fuerzas que el entorno ejerce sobre el manipulador [15].

La figura 5.12 muestra un robot industrial típico, el cual se caracteriza por un gran par motor, alta velocidad, sensores (tales como encoders y celda de carga) y varios actuadores de forma de hacer un trabajo físico en el espacio 3D.

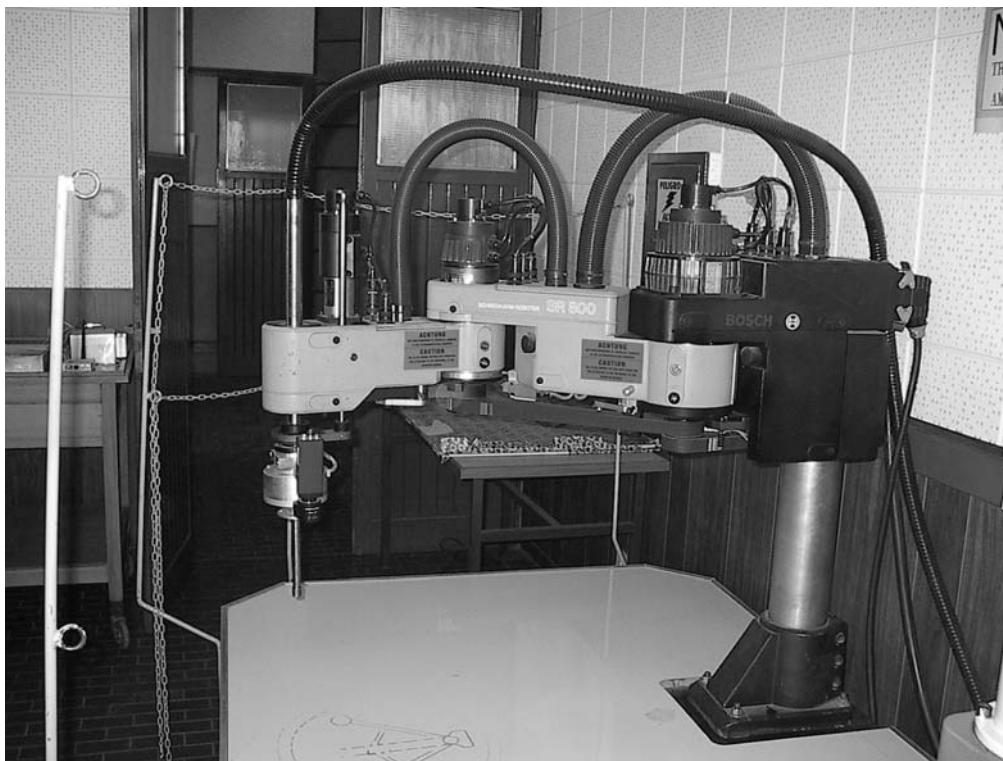


Figura 5.12. Robot industrial Bosch utilizado para pruebas de laboratorio en el Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

### 5.3 Robots móviles

Un robot móvil está constituido básicamente por una estructura móvil autónoma que puede desplazarse por tierra, agua o aire evitando los obstáculos que encuentra en su camino para llegar a una ubicación preestablecida inclusive siguiendo un camino determinado que puede estar parametrizado en tiempo (el robot debe pasar por cada punto del camino en tiempos predefinidos) en cuyo caso se denomina trayectoria. Los sensores más utilizados en robots móviles son los encoders, acelerómetros, inclinómetros, giróscopos, GPS, medición de distancia por láser, infrarrojo o ultrasonido, y cámara de video mono y estéreo.

Las figuras 5.13 y 5.14 muestran un robot móvil con ruedas y un robot móvil aéreo respectivamente, los cuales cuentan con diversos sensores, una computadora a bordo y varios actuadores para poder controlar el movimiento de dichos robots. Por otro lado, la figura 5.15 muestra un avión autónomo utilizado en aplicaciones militares.



Figura 5.13. Robot móvil Pioneer 2DX dotado con encoders, cámara de video, sensores de ultrasonido y un sensor láser 2D.



Figura 5.14. Robot tipo helicóptero fabricado por Rotomotion modelo SR20.



Figura 5.15. Avión *Predator* utilizado por el ejército estadounidense.

Existe una gran diversidad en la complejidad de los robots móviles, no solamente entre los vehículos que se desempeñan en distintos medios (robots terrestres, aéreos y acuáticos) sino que para cada medio existen distintos tipos de robots móviles con diferentes estructuras mecánicas. Por ejemplo, el comportamiento de un vehículo tipo automóvil es más complejo que el comportamiento de un robot móvil con dos ruedas actuadas y una rueda loca (figura 5.13) y por lo tanto, su representación matemática a través de un modelo es más compleja. Además las restricciones del movimiento dependen de la estructura mecánica, por ejemplo un robot de la figura 5.13 puede girar sobre sí mismo mientras que un vehículo de cuatro ruedas tipo automóvil tiene un radio de giro mínimo dado.

#### 5.4 Control de robots

El control de robots utilizado depende del tipo de robot, del entorno y del nivel de complejidad de la tarea que se desea realizar en forma autónoma. Dentro del contexto del control de robots surgen diversos conceptos que a continuación serán brindados paulatinamente al lector basados en ejemplos de tareas para un robot manipulador tipo brazo humano y un robot móvil tipo

automóvil, donde la tarea y entorno serán cada vez más complejos, lo cual requerirá de un mayor nivel de percepción y razonamiento de control.

Se comienza con el control de un actuador (por ejemplo un motor eléctrico). Generalmente, se presentan problemas de seguimiento de señales de referencia, donde se generan automáticamente señales de control que intentan anular la diferencia entre la señal de referencia y la señal medida en el sistema que se pretende controlar. Un problema similar es el de la regulación automática mediante el cual se intenta mantener una referencia fija, aunque existan perturbaciones (por ejemplo fuerzas externas) que tiendan a separar al sistema de las condiciones deseadas.

Tanto el control de seguimiento como el de regulación se basan en el principio de la realimentación. Esto es, las señales de referencia se comparan con señales medidas del proceso o sistema que se pretende controlar y su diferencia se utiliza para calcular una acción de control en función del error y es aplicada sobre el mismo proceso o sistema. La figura 5.16 muestra cómo se computa el error del sistema. En los sistemas automáticos la cadena cerrada de medición-acción se realiza sin la intervención del hombre.

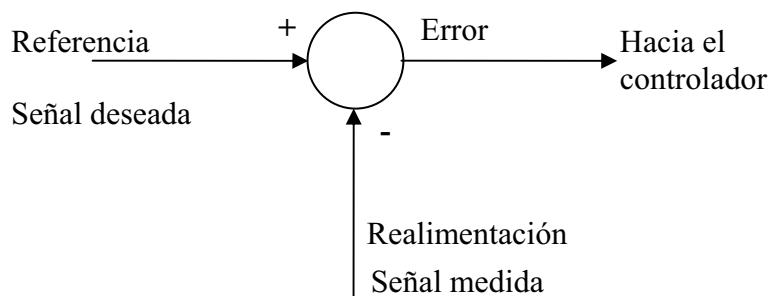


Figura 5.16. Error del sistema.

La figura 5.17 muestra cómo se controla conceptualmente el ángulo de giro de un motor basado en la referencia y la posición actual del mismo, donde se aplican acciones de control (en este caso una tensión eléctrica aplicada al motor) de forma de hacer nula o muy pequeña la diferencia entre la referencia y la posición angular del motor (parte derecha en la figura 5.17).

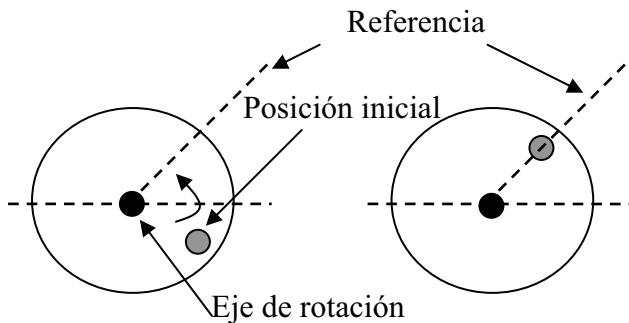


Figura 5.17. Control de una articulación basado en realimentación.

Ahora bien, la referencia puede ir variando en el tiempo de forma que el actuador (por ejemplo motor) realice un determinado movimiento en forma permanente para seguir la referencia. La figura 5.18 muestra un típico sistema de control donde se realimenta el estado del actuador que es comparado con una señal de referencia y dicha diferencia es utilizada por un controlador para computar una acción de control y aplicar la misma sobre el actuador modificando así su estado.

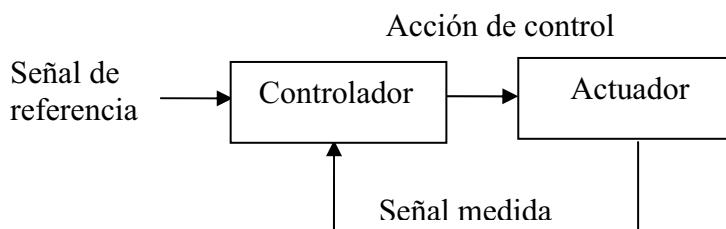


Figura 5.18. Control de un actuador para seguir una señal de referencia.

Es importante remarcar que dada una tarea o posición objetivo a alcanzar por el extremo operativo de un robot manipulador, se debe generar una trayectoria suave de movimiento desde la posición actual del robot hasta la posición objetivo. Dicha trayectoria está compuesta por puntos en el espacio 3D que deben ser convertidos utilizando el modelo del robot a referencias compatibles (entendibles) para cada actuador [16] (por ejemplo ángulo de desplazamiento deseado para un actuador tipo motor eléctrico) las cuales son comparadas con

las señales actuales de cada articulación (por ejemplo ángulo actual de desplazamiento del motor eléctrico de una articulación dada).

Por otra parte, un robot cuenta generalmente con varios actuadores lo cual hace que controlando cada uno se puedan lograr movimientos más complejos del robot como por ejemplo un movimiento similar al movimiento de un brazo humano (robot manipulador) o un movimiento similar al de un automóvil (robot móvil con ruedas). La figura 5.19 ilustra el concepto de que el movimiento en conjunto de las articulaciones 1, 2, y 3 posibilita realizar movimientos complejos, como por ejemplo un robot manipulador el cual pasa de una posición inicial de abajo hacia arriba y de izquierda a derecha, lo cual se asemeja a un movimiento típico de un brazo humano.

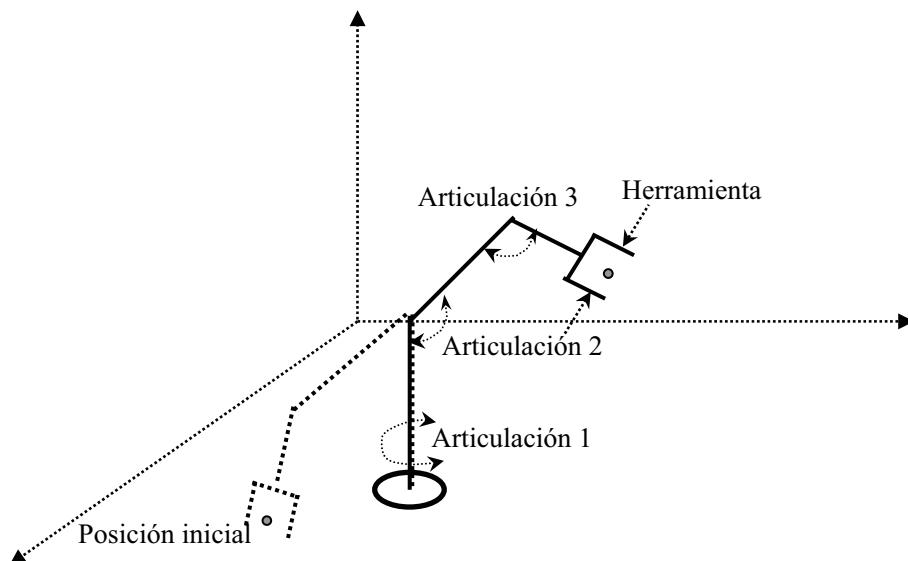


Figura 5.19. El movimiento en conjunto de las articulaciones posibilita realizar movimientos complejos del robot.

¿Los diferentes actuadores de un robot manipulador se controlan independientemente de los otros actuadores del robot?...

Un robot manipulador (tipo brazo humano) constituye una estructura mecánica compleja representado por un modelo que presenta acoplamientos entre las diferentes articulaciones y sus eslabones correspondientes, donde el

movimiento de un eslabón ejerce una fuerza sobre otra articulación. Para controlar el movimiento de un robot manipulador se utilizan dos esquemas de control denominados control desacoplado y control acoplado. El primero se refiere al control de cada actuador independientemente, sin considerar los acoplamientos entre las distintas articulaciones del robot. Esta situación resulta justificada en robots con altas relaciones de reducción en la transmisión de movimientos y con velocidades de operación relativamente bajas. Este esquema tiene por ventaja la simplicidad y se usa extensamente en robots industriales. El control denominado acoplado se orienta al control del comportamiento o dinámica intrínseca compleja del manipulador y generalmente utiliza en mayor o menor grado el conocimiento del modelo del robot y/o modelo del entorno. Esto es particularmente válido y necesario para robots de alto desempeño, con grandes velocidades de movimiento y bajas relaciones de transmisión, donde las fuerzas que una articulación ejerce sobre otra son significativas.

#### **5.4.1 Planificación de caminos y trayectorias**

Dentro del contexto del control de movimiento de un robot manipulador o robot móvil, surgen los conceptos de planificación de movimiento, planificación de caminos, planificación de trayectorias y generación de movimiento [18], los cuales se describen a continuación:

La **planificación de movimiento** es una rama de la robótica que se encarga de estudiar la división de una tarea en movimientos discretos. Se trata de encontrar las estrategia de movimiento o las acciones de control para llevar a un sistema robótico de una posición a otra, o más generalmente, para evolucionar un sistema de un estado inicial a uno final u objetivo. Algunos autores describen brevemente una navegación en términos de las preguntas ¿Dónde estoy? ¿Hacia dónde debo ir? Y ¿Cómo llego hasta allí?, para referirse a la localización del robot, objetivo y planificación de movimientos.

**Planificación de caminos** (en inglés *path-planning*) es el arte de decidir que camino tomar para llevar a un robot desde una posición dada hacia una posición objetivo, manteniéndose libre de colisión. Un algoritmo de path planning puede generar varios caminos y decidir cuál es el más adecuado de acuerdo a un criterio dado, por ejemplo, el camino de menor longitud.

**Planificación de trayectorias** comprende la parametrización en tiempo del camino a seguir, o sea el cálculo o generación de trayectorias para hacer evolucionar un sistema robótico de un estado inicial a un estado objetivo teniendo en cuenta el tiempo y evitando estados no deseados. En resumen un sistema o algoritmo de planificación de trayectorias se puede basar en un camino generado por un planificador de caminos para producir una trayectoria, donde cada punto es asociado con un tiempo determinado, lo cual permite seguir perfiles deseados de velocidad. Por ejemplo, ir desde un punto a otro comenzando despacio, yendo luego a una velocidad elevada y finalmente disminuyendo la velocidad paulatinamente para llegar suavemente a la posición objetivo.

**Generación de movimiento** se refiere al cálculo de las acciones de control adecuadas para que el robot se mueva a lo largo de una trayectoria de referencia. En la literatura, esta función se denomina *seguimiento de trayectorias* o *tracking*.

La figura 5.20 muestra un ejemplo ilustrativo de un camino y una trayectoria (parametrizada con tiempos  $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4$  y  $t_5$  en este caso) generados entre una posición inicial dada y una posición objetivo y como la generación de movimiento implican señales de control (por ejemplo un voltaje eléctrico) que son aplicados a los actuadores del robot.

#### 5.4.2 Control de robots manipuladores

Esta sección describe conceptualmente cómo funcionan en general los controladores básicos de robots manipuladores.

Aunque existen una gran cantidad y diversidad de tipos de controladores aplicados a robot manipuladores, esta sección apunta a una comprensión de algunos conceptos fundamentales utilizados en los sistemas de control y su

relación con comportamientos y percepciones del hombre cuando ejecuta un trabajo físico.

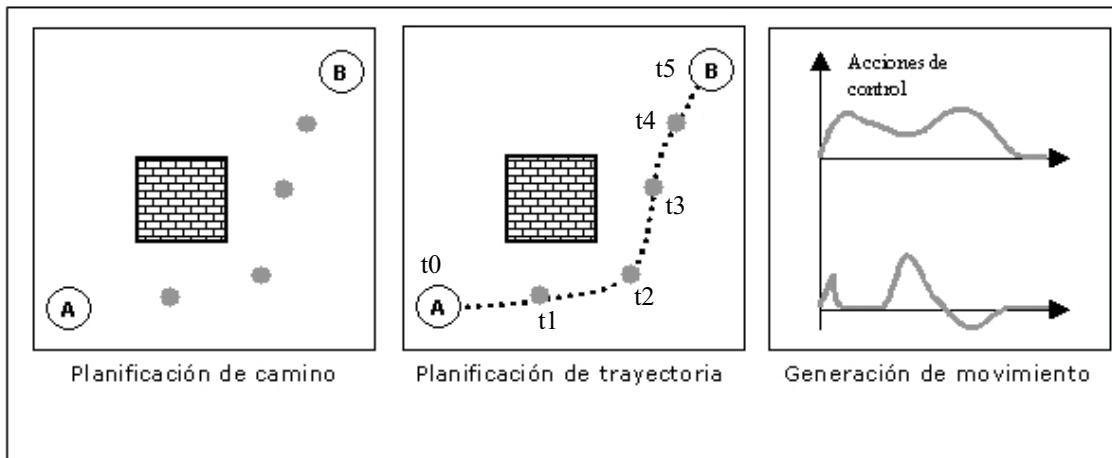


Figura 5.20. Ejemplo de planificación de movimiento: puntos generados por la planificación de caminos (izquierda), trayectoria con suavizado y parametrización en el tiempo del camino (centro) y acciones de control en función del tiempo para el movimiento (derecha).

Las figuras 5.21, 5.22, y 5.23 muestran tres trabajos físicos que puede hacer un robot manipulador que van desde una menor hacia una mayor complejidad del entorno y la tarea.

La figura 5.21 muestra la ejecución de una tarea de seguimiento de trayectoria en espacio libre establecido por un operador humano. Es decir que el robot tiene que tener la capacidad de ejecutar un movimiento acorde a la referencia dada. El movimiento se realiza en espacio libre, es decir sin interactuar con objetos del entorno. Por otro lado, los sensores internos miden el estado de la estructura mecánica y en particular giros o desplazamientos y velocidades de cada articulación, lo cual es usado por un controlador de movimiento que calcula qué acciones de control se podrían aplicar para que el robot siga la trayectoria de referencia en el espacio 3D. Es importante remarcar que el movimiento de un robot manipulador es similar al movimiento del brazo humano.

Por otro lado, la figura 5.22 ilustra una tarea de inserción de un objeto donde se deben utilizar los sensores internos tanto como sensores externos de fuerza

para medir la fuerza de interacción entre el brazo robótico y los objetos de su entorno de forma tal de poder agarrar la pieza a insertar y trasladarla a un determinado lugar lo cual requiere que el brazo robótico debe posicionar su extremo operativo sobre el objeto a manipular, luego se debe agarrar el objeto sin dañar el mismo ni al robot y llevarlo hacia la posición deseada de forma de situar el objeto en una posición pre-establecida acomodando el objeto suavemente hasta lograr una inserción correcta tal como una persona lo hace con su brazo y mano utilizando su capacidad de movimiento, su sentido táctil de fuerza y un razonamiento al menos de reacción ante estímulos táctiles de fuerza.

Finalmente, la figura 5.23 muestra una tarea inteligente de inserción donde el robot manipulador es dotado por un sistema de percepción que no solamente involucra la captación de la información del entorno (por ejemplo por medio de una cámara de video y sensores de fuerza) sino también el procesamiento e interpretación de dichos datos. En el ejemplo, el robot podría seleccionar algún objeto que pueda ser insertado en la posición establecida en caso de encontrar una similitud entre las características físicas del objeto (tamaño, tipo de rosca, largo, ancho, etc.) y el lugar establecido para insertar el mismo. Además, el robot podría tener en cuenta otras características tales como el color del objeto a insertar. Esta tarea puede ser realizada por una persona utilizando su capacidad de movimiento, su sentido táctil de fuerza y su sentido visual y un razonamiento cognitivo acerca del problema en cuestión.

¿Cómo se logra controlar las acciones de control de un robot manipulador para que se comporte correctamente cuando el mismo interactúa con objetos de su entorno? ... ¿Qué sucede cuando el brazo robótico toca un objeto? ... Cómo debe comportarse el robot cuando siente dicho objeto?...

El diseño del control del robot implica calcular las acciones de control para ser aplicadas a los actuadores tal que el robot ejecute una tarea dada con un movimiento restringido por la interacción mecánica o virtual con el medio, como por ejemplo girar una manivela, atornillar, desbastar o pulir una superficie, tareas de montaje y ensamble, etc., como se ilustra en la figura 5.24. En estos casos y tal como lo hace el hombre cuando toca un objeto, se debe controlar la fuerza que ejerce el manipulador sobre el medio a través de la medición de la fuerza que el entorno efectúa sobre el robot.

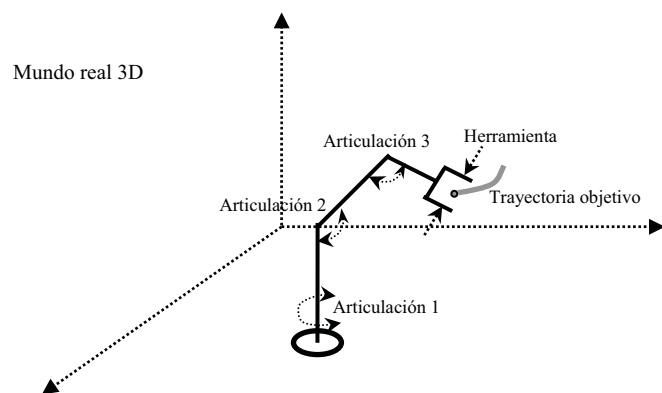


Figura 5.21. Seguimiento de camino y trayectoria en espacio libre.

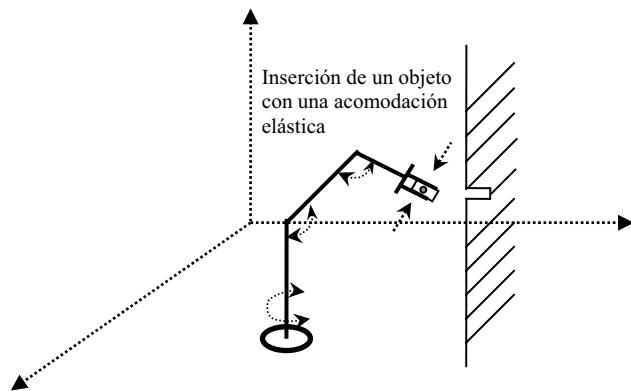


Figura 5.22. Tarea de inserción.

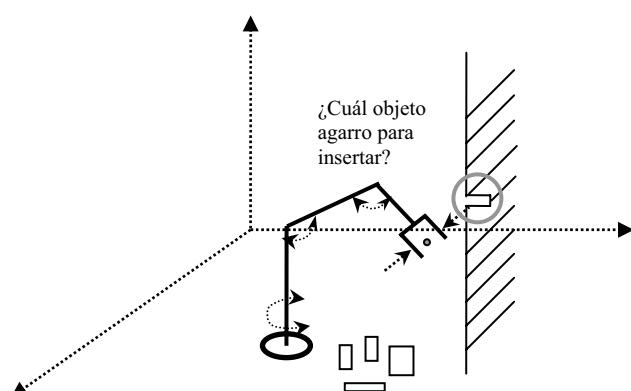


Figura 5.23. Tarea inteligente de inserción.

Mayor complejidad  
de la tarea y entorno

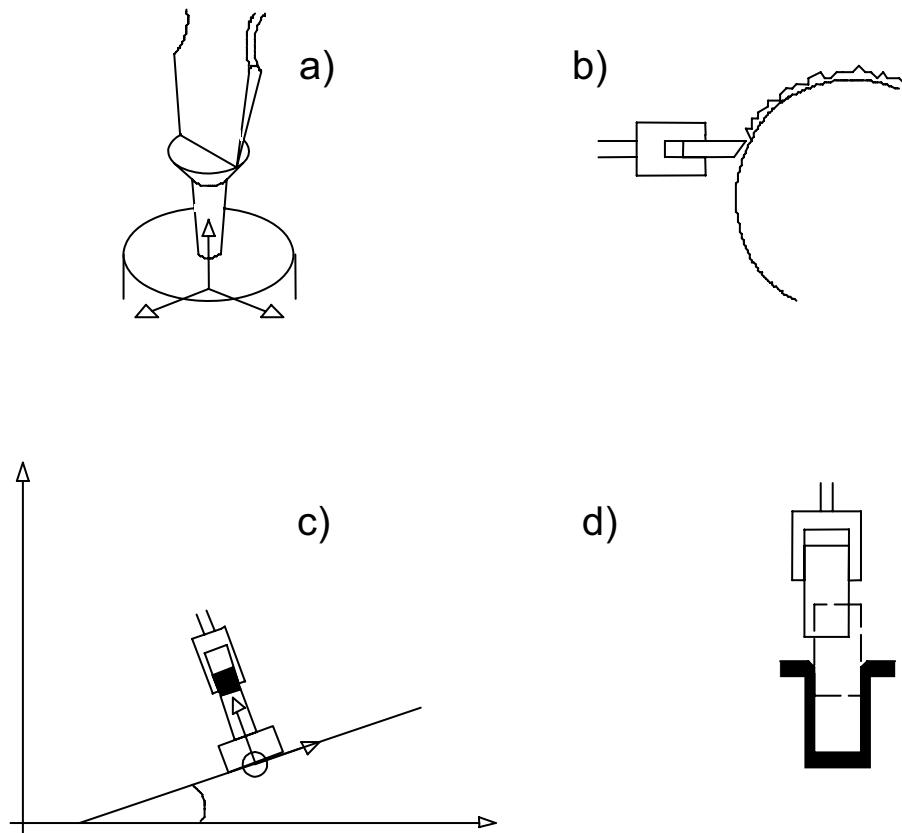


Figura 5.24 Tareas robóticas con interacción: a) atornillar b) devastar c) ensamble d) inserción.

Generalmente, se requiere que el robot tenga un comportamiento de acomodación tal como lo hace una persona a través de su tacto. Sin embargo, la estructura mecánica del robot se construye normalmente lo más rígida posible para asegurar precisión de posicionamiento, por lo que no puede esperarse una acomodación de las fuerzas a partir de la estructura mecánica en sí misma. Un modo de lograr esa acomodación es mediante elementos pasivos o sea incluyendo dispositivos mecánicos flexibles que ceden cuando el extremo está sometido a un esfuerzo. Con estos dispositivos, ciertas tareas con interacción pueden realizarse utilizando solamente control de movimiento. Sin embargo, resulta más versátil lograr la acomodación y también el control de las fuerzas de interacción ejerciendo acciones sobre los servomotores del robot en base a la medición de esas fuerzas de interacción, lo que implica la

disponibilidad de sensores de fuerza (y par). Una solución se orienta a controlar posición y fuerza simultáneamente y de un modo no conflictivo [25]. O sea, la fuerza se controla en las direcciones de movimiento restringido por el medio mientras la posición se controla en las direcciones de movimiento libre. Este tipo de control se denomina control híbrido y puede representarse como la figura 5.25 donde los lazos de control de movimiento y control de fuerza son independientes.

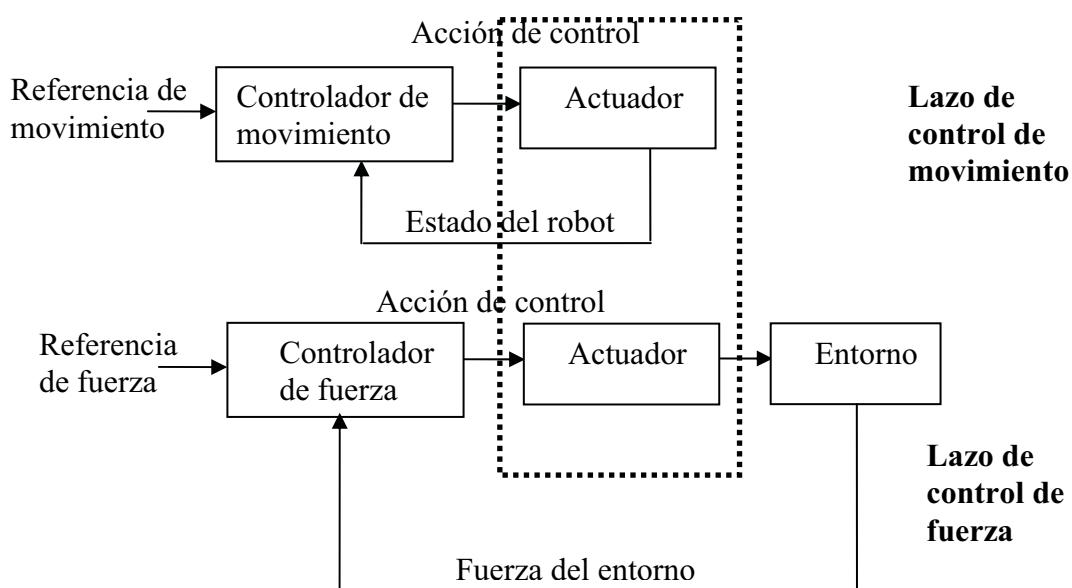


Figura 5.25. Lazos de control con control de movimiento y control de fuerza.

La figura 5.26 ilustra gráficamente una tarea de atornillar donde se remarcán las direcciones ("x" e "y") en las cuales se realiza un control de movimiento y la dirección ("z") en la cual se ejecuta un control de fuerza debido a que el movimiento en dicha dirección está restringido por la interacción entre el destornillador y el tornillo. El destornillador está acoplado (unido) al brazo robótico a través de su extremo operativo. Cuando se combinan dos estrategias de control (movimiento y fuerza) para realizar una tarea se denomina control híbrido.

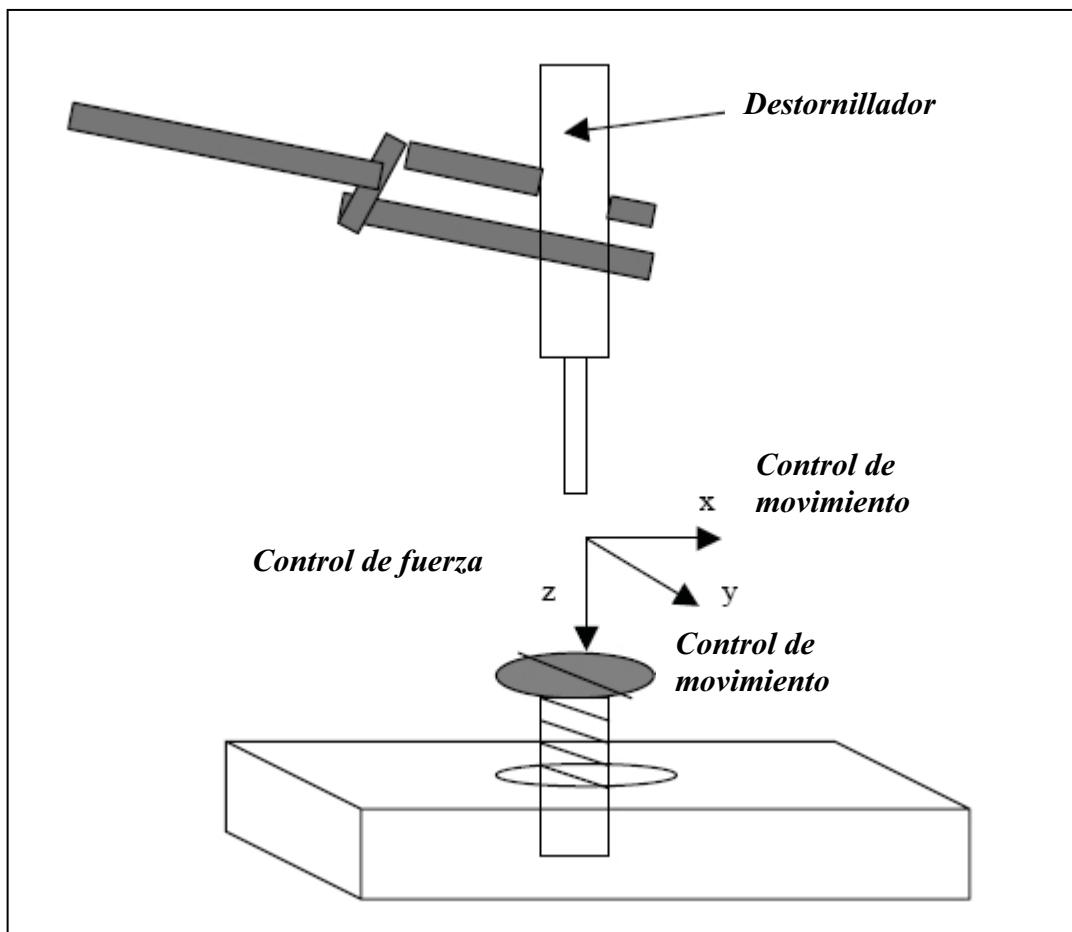


Figura 5.26. Ejemplo de control híbrido entre control de movimiento y control de fuerza.

Otra solución se basa en definir una relación deseada entre la fuerza de interacción entre el robot y su entorno y la posición del robot. Especificando el movimiento y controlando esa relación dinámica denominada impedancia deseada, puede obtenerse un movimiento de interacción con acomodación de las fuerzas de contacto. La impedancia de un sistema mecánico se define como la relación dinámica entre la fuerza aplicada y la velocidad de desplazamiento [9]. Para establecer el control de impedancia, debe especificarse la impedancia deseada que determina el comportamiento del robot en interacción. Es intuitivo, establecer una relación simple que tenga una analogía física conocida. Por ello, el control de impedancia aplicado al control en interacción tanto de robots manipuladores como de robots móviles se basa

en una analogía con un sistema masa-resorte con fricción (estrictamente hablando existen muchos términos matemáticos que representan determinadas clases de fricción, la utilizada se denominada fricción viscosa) al que se aplica una fuerza para desplazar la masa, como se ilustra en la figura 5.27. Este desplazamiento para una fuerza dada depende de la elasticidad del resorte (más duro o más blando), el nivel de amortiguamiento (mayor o menor fricción) y el valor de la masa (más pesado o más liviano). Este desplazamiento de la masa virtual se asocia a un cambio de la referencia que termina dándose al control de movimiento del robot en un lazo de control más interno, como se muestra en la figura 5.28. Típicamente se especifican valores de elasticidad altos en las direcciones que requieren alta precisión de posicionamiento y bajos cuando se requieren pequeñas fuerzas de interacción, mientras que se utilizan valores grandes de fricción cuando se requiere alta dissipación de energía. Finalmente y dependiendo de la aplicación, se desea que el robot se comporte como un objeto más pesado o más liviano. Por ejemplo, una masa virtual más pesada brindará un comportamiento suave del extremo del robot ante las fuerzas de contacto.

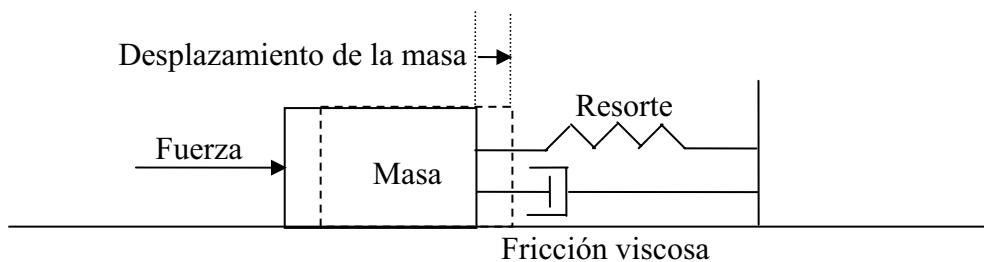


Figura 5.27. Analogía del control de impedancia con un sistema masa-resorte con fricción viscosa.

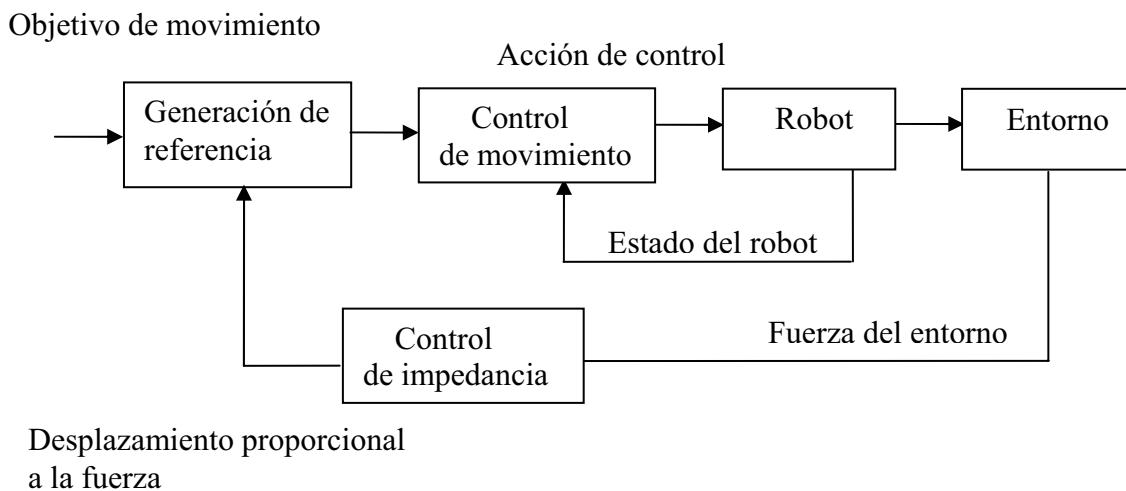


Figura 5.28. Lazos de control de impedancia y control de movimiento.

Otro tipo de controlador utilizado en robótica se basa en la información visual obtenida a través de una cámara de video [24], la cual se representa mediante características de la imagen, es decir mediante información extraída de la imagen que representa de alguna manera la relación entre un robot y los objetos de su entorno (ver capítulo 4). Dicha información se puede utilizar directamente en un controlador de bajo nivel, el cual tiene como salida las acciones de control a ser aplicadas al sistema de actuación. Por ejemplo, un controlador basado en la información provista por una cámara de video denominado control visual directo, donde la acción de control aplicada al robot se obtiene directamente a partir de la diferencia entre las características deseadas de la imagen y las características actuales de la imagen, como se ilustra en la figura 5.29.

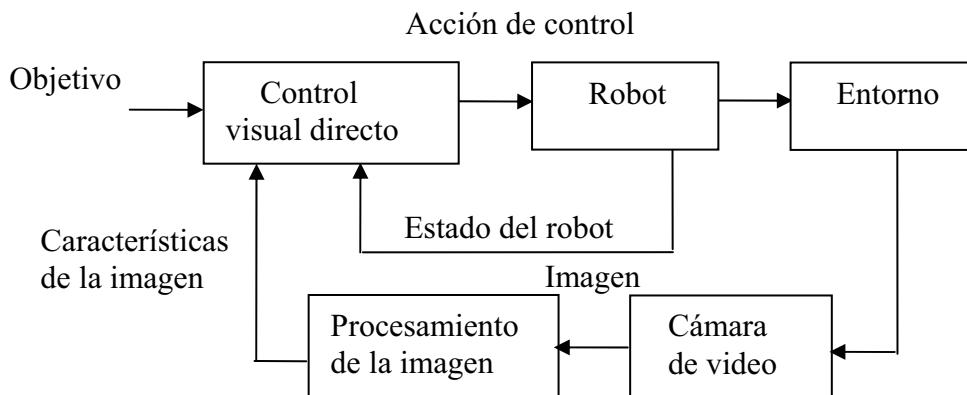


Figura 5.29. Control visual directo de un robot.

Un ejemplo típico en robótica usando un sistema de visión es cuando un robot manipulador tiene montado una cámara de video sobre el extremo operativo, donde el objetivo de control se establece como mover el robot de tal manera que el objeto visualizado por la cámara aparezca en una posición y orientación deseada en el plano de la imagen (cómo y dónde el objeto se ve desde la cámara), como se ilustra gráficamente en la figura 5.30.

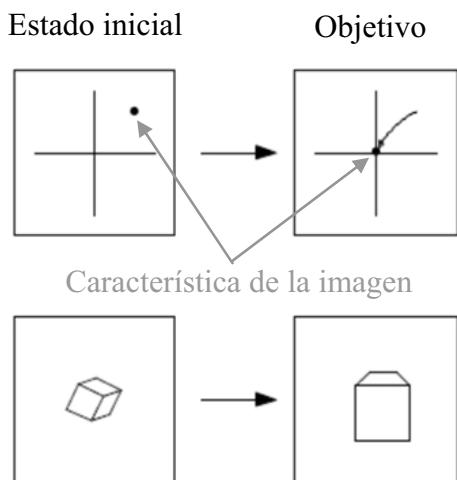


Figura 5.30. Ejemplo de objetivo de un sistema de control visual directo basado en el error computado de características de la imagen.

### **5.4.3 Control de robots móviles con ruedas**

En esta sección se describirá como conceptualmente funciona el sistema de control de un robot móvil con ruedas (por ejemplo tipo automóvil) basado en ejemplos de distintas tareas de desplazamiento para ir desde un lugar a otro [26].

Cuando un robot móvil se desplaza en espacio libre, es decir sin objetos en su entorno; se utiliza algún controlador de movimiento basado en la realimentación del estado del robot (generalmente velocidad y posición) y su comparación con un camino o trayectoria de referencia, donde la diferencia principal con el control de movimiento de un robot manipulador es el modelo (comportamiento) de estos tipos de robots (manipuladores y móviles con ruedas), lo cual es considerado en mayor o menor medida por el respectivo controlador.

En el caso general de un robot móvil desplazándose por un entorno con objetos (quietos y móviles), ¿Qué comportamiento debería tener el robot?... ¿El concepto de control de impedancia se puede utilizar si el robot es móvil? ...

El control de impedancia visto en robots manipuladores requiere la realimentación de la fuerza de interacción entre el robot y su entorno. Pero las fuerzas físicas de interacción implican contactos físicos con el entorno, lo cual en el caso de robots móviles significa una colisión. Para evitar esto, la fuerza de interacción se representa por una fuerza ficticia, la cual depende de la distancia entre el robot móvil y los obstáculos presentes en su entorno [105], como se muestra en la figura 5.31.

La magnitud de la fuerza ficticia es mayor a medida que la distancia entre el robot y el objeto es menor. En la práctica de control de robots móviles, la distancia se puede medir con alguna de las técnicas descriptas en el capítulo 4 o se pueden integrar varias de ellas de forma de aprovechar las bondades de las distintas tecnologías y lograr una medición de mayor precisión y robustez que si se usara un solo tipo de sensor [20].

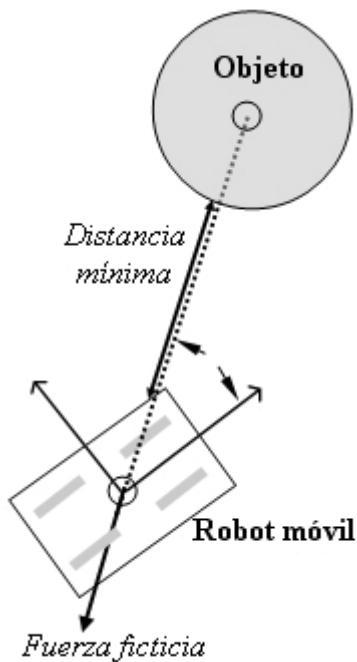


Figura 5.31. Fuerza ficticia empleada en robots móviles.

Al igual que en el caso de un robot manipulador, la impedancia deseada en el controlador de impedancia cambia la trayectoria de referencia del robot móvil en función de la fuerza ficticia que representa la distancia a los obstáculos (equivalente a la fuerza de contacto utilizada en robots manipuladores). Este cambio cumple el efecto conceptual de empujar la trayectoria de referencia deformando la misma y retomando su forma original en caso de desaparecer dicha fuerza.

A continuación se ilustran tres trabajos físicos a través de las figuras 5.32, 5.33, y 5.34, que puede hacer un robot móvil y que al igual que los ejemplos dados utilizando un robot manipulador van desde una menor complejidad del entorno y la tarea hacia una mayor complejidad de las mismas.

Específicamente, la figura 5.32 muestra un ejemplo de camino de referencia establecido por un operador humano que podría seguir un robot móvil para ir desde una posición inicial hasta un posición objetivo en espacio libre mediante un control de la velocidad y la dirección del mismo.

En la figura 5.33, se muestra el mismo ejemplo pero se incluye un objeto en el camino de referencia (línea punteada). En este caso, el robot móvil tiene que

tener la capacidad de cambiar su camino de referencia establecido a priori de forma de evitar una colisión con el obstáculo. Para ello, se podría utilizar por ejemplo un control de impedancia basado en una fuerza ficticia calculada a partir de la distancia medida entre el robot y los objetos de su entorno.

Finalmente, en la figura 5.34 el operador humano solamente establece la posición objetivo (dada una posición inicial del robot móvil) y el robot móvil tiene que establecer y seguir un camino entre dichas posiciones sin chocar con ningún objeto (los objetos pueden estar quietos o no) ni persona del entorno. Es decir, el robot móvil debe tener la capacidad de planificar permanentemente en caso que fuera necesario un camino libre de colisión (por ejemplo ante el movimiento de un obstáculo móvil en dirección al robot) y controlar su velocidad y dirección para ejecutar el camino de referencia computado por el robot.

¿Qué información debería medir un controlador para tener en cuenta objetos móviles en su cálculo?...

Como se mencionó anteriormente, el concepto de fuerza ficticia se puede utilizar para evitar un posible choque entre un robot móvil y los objetos de su entorno. Sin embargo, esta señal no es la única que puede representar una interacción entre un robot móvil y los objetos cercanos a él. La misma es representativa de la distancia entre el robot móvil y los objetos próximos al mismo. Otra opción es computar la probabilidad de choque entre el robot y cada objeto de su entorno de forma de considerar solamente aquellos objetos que tengan probabilidades de choque significativas. Dicha probabilidad se puede computar a partir de la medición de la velocidad y dirección relativa entre el robot y cada objeto (utilizando mediciones de distancia provistas por ejemplo por un sensor láser 2D) y a partir de esto se calcula el área de choque (se supone que se mantiene el movimiento relativo medido actualmente) y el tiempo de contacto (en caso que el área de choque no sea nula) de forma de emplear estos para finalmente computar la probabilidad de choque. Este cálculo se basa en hacer una predicción del movimiento que tienen los objetos de interés (por ejemplo un robot móvil y un objeto cercano), tal cual lo hace una persona permanentemente por ejemplo cuando maneja o al cruzar una calle, utilizando su sentido visual y la predicción del movimiento relativo. La figura 5.35 ilustra el caso de un peatón al decidir si cruza o no una calle de acuerdo a

su predicción del movimiento del vehículo o vehículos que se acercan al paso peatonal.

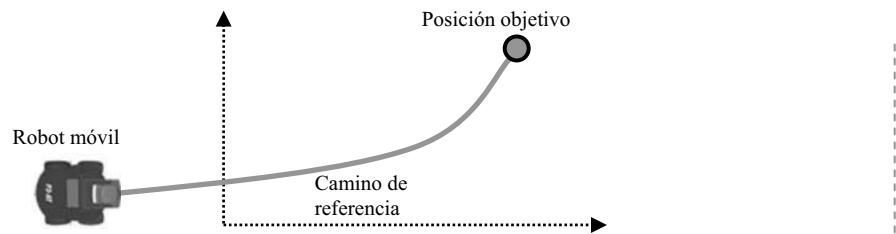


Figura 5.32. Seguimiento de camino y trayectoria.

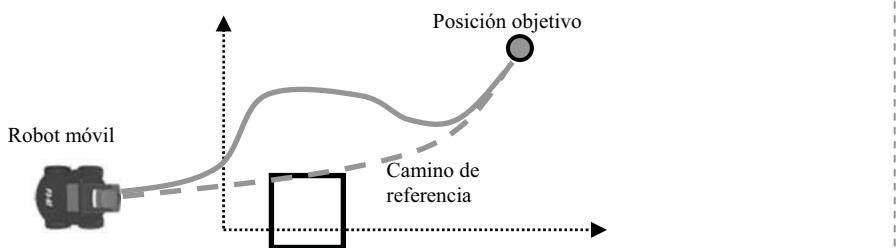


Figura 5.33. Evitar colisiones con objetos usando un comportamiento de reacción.

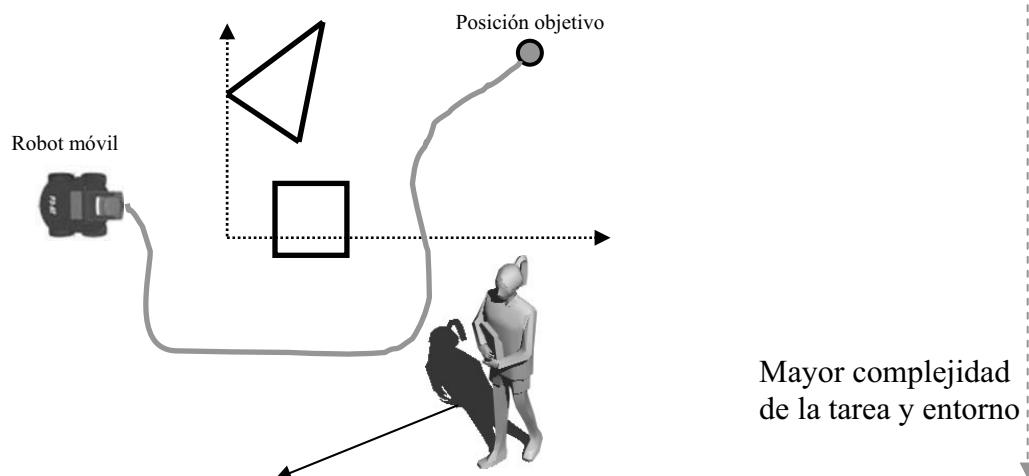


Figura 5.34. Planeamiento inteligente del camino considerando múltiples objetos y personas.

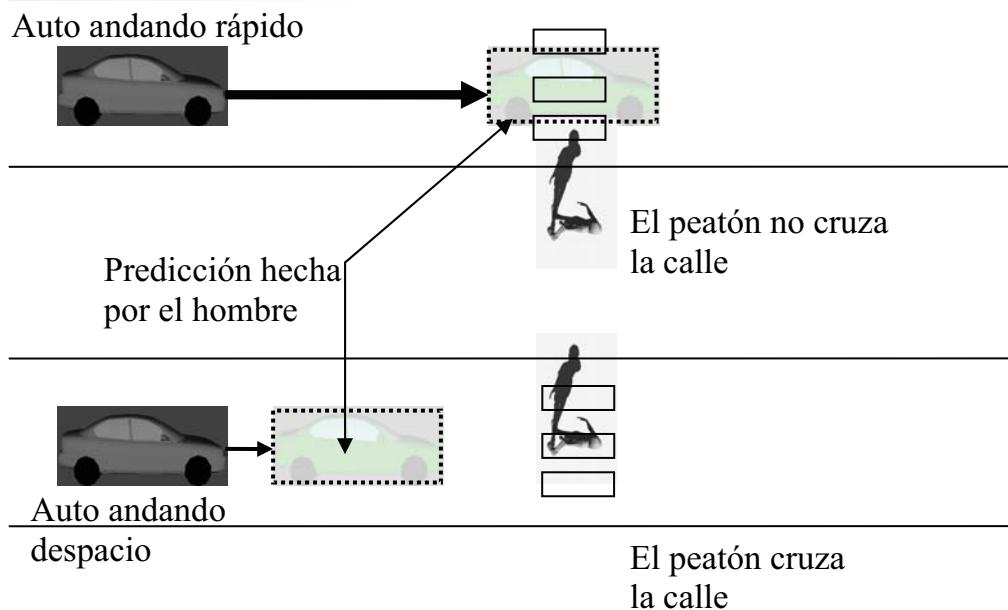


Figura 5.35. Predicción de movimiento.

La figura 5.36 muestra un diagrama típico de un procedimiento para computar la probabilidad de choque, donde se detectan los objetos cercanos, se realiza un seguimiento de los mismos de forma de calcular la velocidad y dirección de movimiento relativas entre el robot móvil y cada objeto de su entorno y se calcula dicha probabilidad utilizando la predicción del área de choque y la predicción del tiempo de contacto.

Respecto a la figura 5.34 donde se ilustra un planeamiento inteligente de camino, ¿Cómo un robot móvil puede computar un camino libre de colisión entre la posición inicial y una posición objetivo dada? ...¿Existe más de un camino?... si este es el caso, ¿Cuál elijo?...

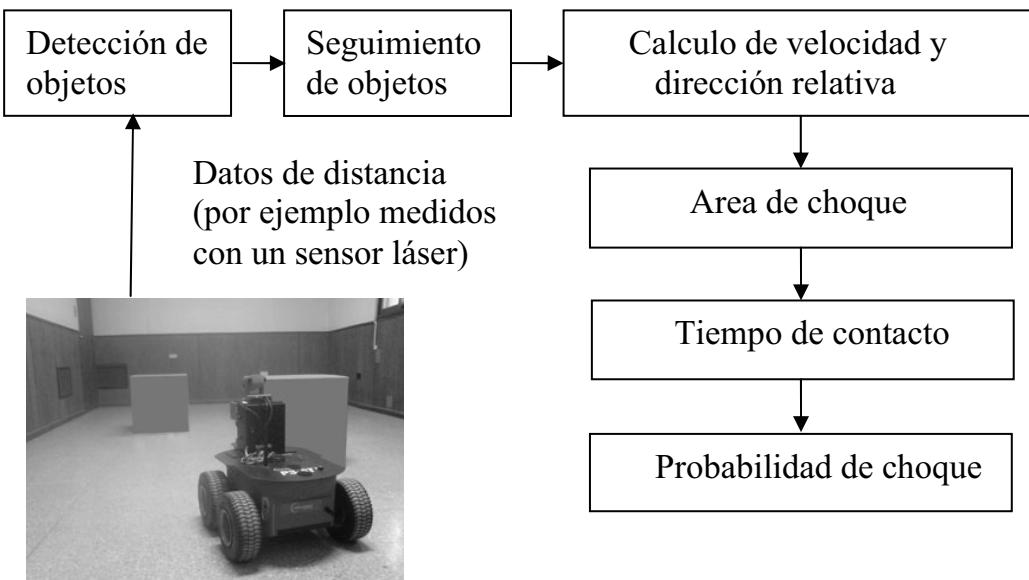


Figura 5.36. Ejemplo de cálculo de probabilidad de choque.

En la literatura actual, existen numerosos métodos o algoritmos que posibilitan obtener un camino libre de colisión entre una posición inicial y una posición objetivo [30]. Generalmente, los algoritmos disponen de algún muestreo aleatorio (o seudo-aleatorio) del espacio de trabajo de forma de considerar probabilísticamente el mayor grado posible de los puntos del espacio de trabajo ya que analizar todos los puntos de un espacio (cuantificado con una resolución adecuada de acuerdo al problema, por ejemplo en el caso de un auto automatizado para estacionar se podrían tomar puntos cada 5 cm) es impráctico. Un ejemplo de un algoritmo de planeamiento de caminos es el denominado árbol de exploración rápida RRT (por sus siglas en inglés *Rapidly-exploring Random Tree*) [29]. Inicialmente se inicializa una estructura denominada árbol fijando el nodo inicial (posición inicial del robot móvil) como raíz. El árbol está compuesto por estructuras de datos llamadas nodos. Luego, se hace una expansión del árbol basada en la generación aleatoria de nodos (posiciones) y su posible inserción en el árbol en caso de que el camino entre el nuevo nodo y el nodo más cercano perteneciente al árbol se encuentre libre de colisión. El proceso se repite hasta que un nodo del árbol se encuentre suficientemente cerca de la posición objetivo. La figura 5.37 ilustra el proceso

seguido para encontrar un camino libre de colisión entre dos puntos (posición inicial y objetivo) utilizando un algoritmo de planeamiento de camino basado en RRT. El camino se obtiene recorriendo el árbol en sentido inverso (desde el objetivo hacia la posición inicial).

El algoritmo descripto (RRT) podría ejecutarse varias veces de forma de encontrar diferentes caminos para ir desde la posición inicial hasta la posición objetivo. En este caso se debe establecer (el diseñador del robot y/o el operador humano) un criterio de selección para optimizar de algún modo el camino generado en forma autónoma tal como el camino más corto o el camino más seguro o hasta incluso considerar patrones más complejos a través de una red neuronal [14] (ver capítulo 3).

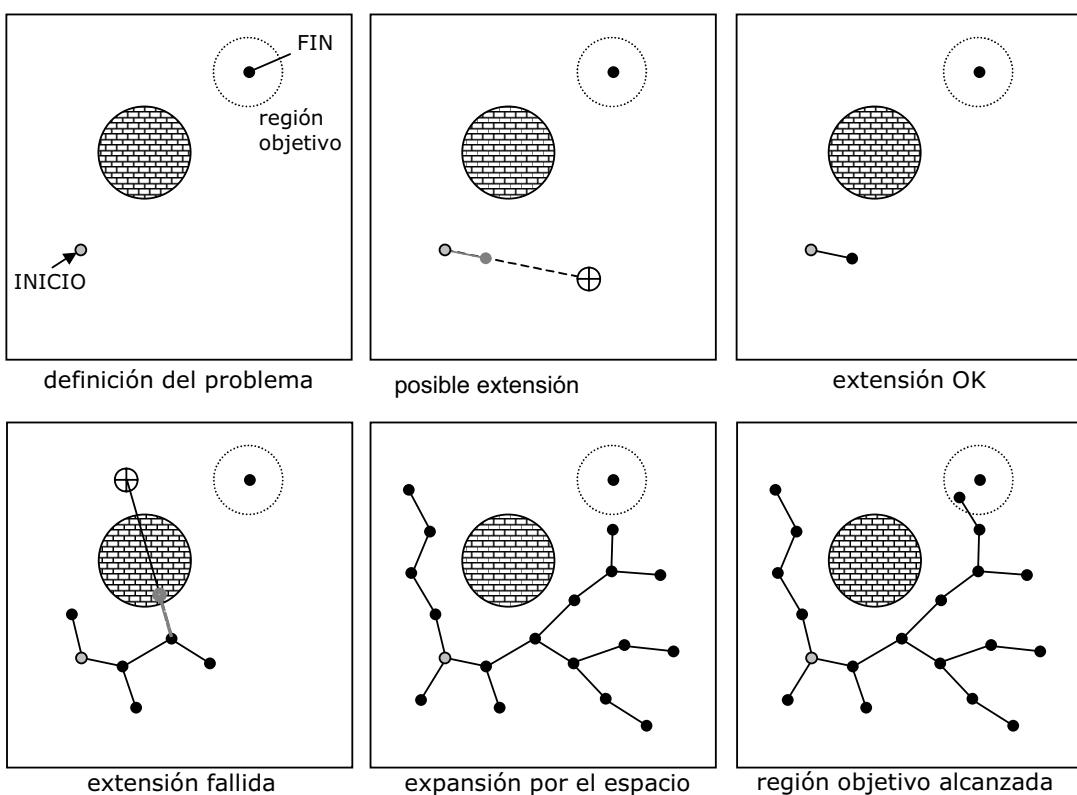


Figura 5.37. Proceso de expansión de un RRT.

Además, la mayoría de los planificadores (tal como RRT u otro) pueden ser implementados en entornos a priori desconocidos donde se va reconstruyendo

un mapa a medida que el robot móvil va avanzando. Por ejemplo, la figura 5.38 muestra el camino recorrido por un robot móvil dotado de un planificador RRT y un control de movimiento (cuya referencia es entregada por el planificador) en un entorno desconocido donde se va reconstruyendo en línea un mapa del ambiente a partir de la información sensorial proporcionada por un láser 2D [157].

Coordenada Y [cm]

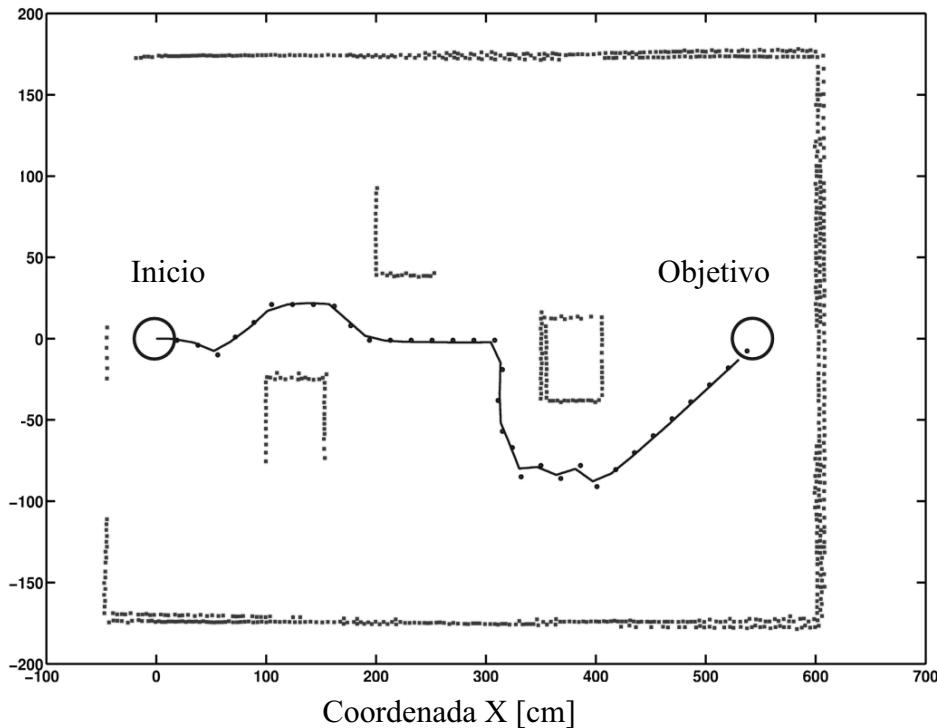


Figura 5.38. Camino seguido por un robot móvil utilizando un planeamiento de camino RRT en un entorno desconocido.

Por otro lado, es difícil que un único controlador (razonamiento implementado electrónicamente) programado para gobernar el movimiento de un robot móvil se adapte a cualquier tipo de comportamiento requerido por la tarea en un momento dado, como por ejemplo seguimiento de un contorno tal como una pared, cruzar una puerta, esquivar un obstáculo, y buscar un objeto determinado, entre otras. Entonces se podrían diseñar un grupo de comportamientos básicos implementados a través de distintos controladores de forma tal que una tarea compleja puede ser realizada a través de una conmutación de comportamientos y además, de acuerdo a la situación podría activarse alguno en particular [28]. Por ejemplo ante la aparición de un

obstáculo no previsto se podría ejecutar un comportamiento diseñado para esquivar obstáculos. El control basado en comportamientos es independiente del tipo de robot, por ejemplo se puede aplicar al control de un robot manipulador.

#### **5.4.4 Control cooperativo entre robots**

El control cooperativo entre robots tiene por objetivo controlar simultáneamente cada robot para que trabaje en equipo de forma tal que el conjunto de robots realice una tarea deseada, como por ejemplo mantener una formación preestablecida (figura 5.39), transportar cargas de gran tamaño entre dos robots (figura 5.40), tareas de ensamble en la industria automotriz (figura 5.41), entre otros. Así, el robot necesita un sistema de percepción no solamente del entorno y su estado sino también del estado de los otros robots y del conocimiento de la tarea.



Figura 5.39. Robots móviles manteniendo una formación.

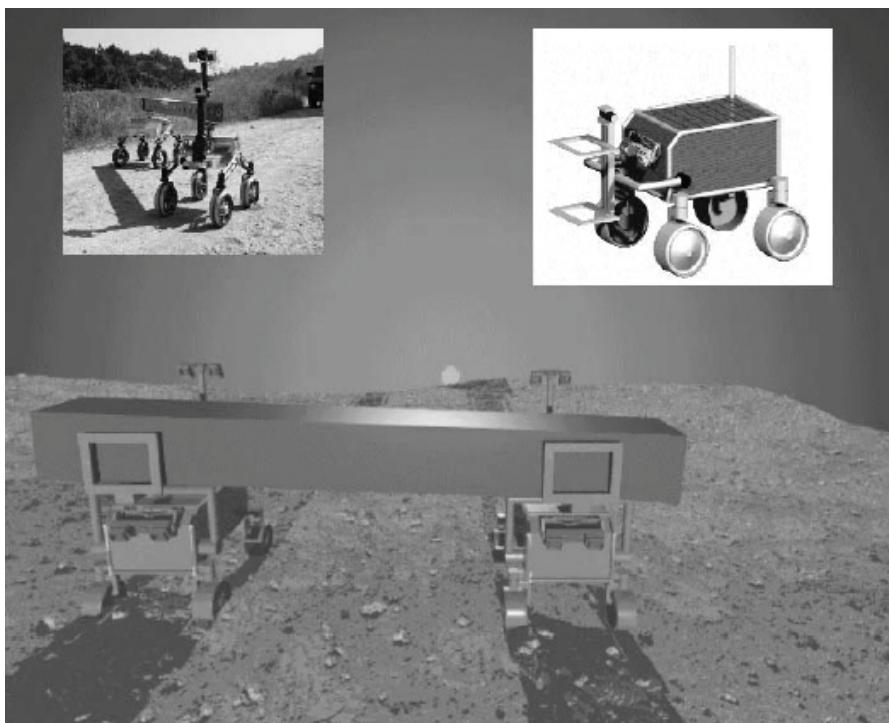


Figura 5.40. Trabajos cooperativos entre robot-robot para exploración espacial.

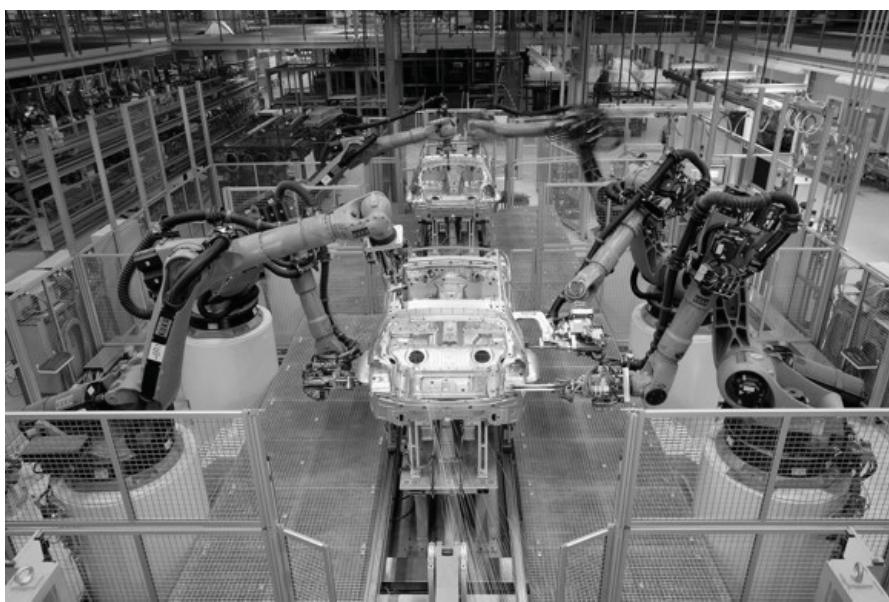


Figura 5.41. Trabajos cooperativos entre robots manipuladores en la industria automotriz.

### 5.4.5 Control de alto nivel cognitivo en robots

Durante el desarrollo de este capítulo, se mostró conceptualmente cómo funcionan los controladores de robots manipuladores y robots móviles para gobernar el movimiento de dichos robots en interacción con su entorno, donde al menos la persona estableció una posición o fuerza deseada u objetivo. Es intuitivo notar que una tarea medianamente compleja seguramente se puede dividir en varias sub-tareas más simples tales como desplazarse desde un lugar determinado a un lugar objetivo, agarrar un objeto, trasladar un objeto, soltar un objeto, etc.

Por ejemplo, la figura 5.42 muestra un esquema conceptual de control aplicado al control de un robot tipo mini-helicóptero que dispone de servo-motores eléctricos (actuadores), un sistema sensorial compuesto por diversos sensores tales como cámaras de video, GPS, giroscopio, acelerómetro, e inclinómetro, entre otros; y un sistema empotrado utilizado para procesamiento de datos, comunicación y control. Se puede observar en la figura 5.42 que existe una jerarquía vertical de niveles de cada bloque de control del sistema, donde una mayor jerarquía de control implica un mayor nivel de cognición de dicho bloque.

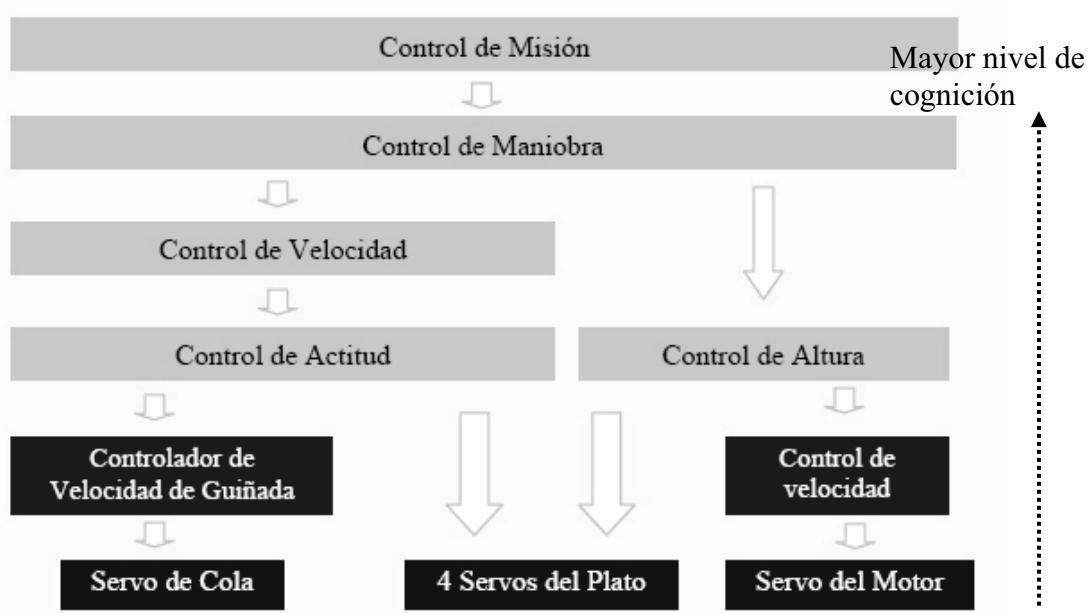


Figura 5.42. Sistema de control de un robot tipo helicóptero.

Entonces se podría hablar de objetivos de bajo nivel como por ejemplo una posición o fuerza deseada y objetivos de alto nivel como por ejemplo que el helicóptero fumigue solamente las zonas necesarias de un campo de acuerdo al estado detectado e interpretado del cultivo, como por ejemplo el color de las hojas de las plantas.

¿Quién establece los objetivos de alto nivel? ¿Usuario? ¿Robot? ¿Ambos?...

El robot tiene que ser diseñado e implementado para tener la capacidad en cierto grado y dependiendo de su aplicación de comprender ciertos objetivos de alto nivel establecidos por el operador humano (usuario) de manera de poder “desmenuzar” dicho objetivo de alto nivel en objetivos de bajo nivel utilizando un razonamiento empotrado de alto nivel cognitivo equivalente en alguna medida al razonamiento e inteligencia de un hombre experto. Además, el sistema automatizado debe ejecutar dichos objetivos de bajo nivel a través del uso de un control de movimiento pero adaptándose a la situación actual a través de un sistema sensorial. El sistema de actuación y el sistema sensorial tienen una similitud conceptual con la acción física y percepción táctil y visual del hombre, mientras que los objetivos de bajo nivel e incluso muchas veces los objetivos de alto nivel podrían ser brindados por un sistema de control tal como lo hace el hombre a través de su razonamiento e inteligencia. Esta similitud conceptual entre hombre y robot se ilustra gráficamente en el diagrama de control de la figura 5.43.

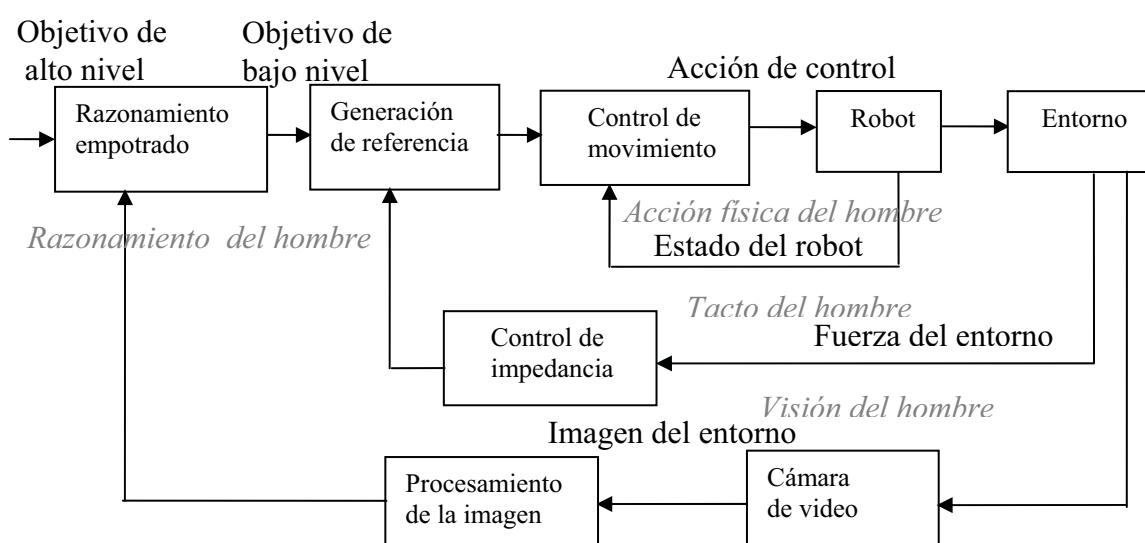


Figura 5.43. Control con lazos de control de movimiento, impedancia y visión.

## **5.5 Síntesis del capítulo**

Un robot es una máquina que posee la capacidad para realizar un trabajo físico en forma independiente. Existe una gran diversidad de posibles aplicaciones de la robótica tanto en la industria y producción como en el área de servicios, y que son empleadas por el hombre tanto en su trabajo como en el hogar.

Una máquina convencional se puede transformar en un robot adicionando los sensores y actuadores necesarios para ejecutar la tarea de interés e incorporando un sistema de cómputo donde se incorpora un razonamiento de control implementado en un sistema electrónico tal como una computadora.

Los tipos de robots más utilizados son los robots manipuladores y los robots móviles o la combinación entre ellos. Los robots manipuladores tienen una similitud con un brazo humano pero ponen de manifiesto las ventajas en cuanto a velocidad, exactitud y fuerza de un sistema robótico respecto al hombre. Por otro lado, los robots móviles permiten desplazarse de un lugar a otro tanto por tierra, por aire o por agua, donde se automatizan los sistemas de transporte convencionales tales como automóvil, helicóptero, avión y submarino e incluso existen robots tipo humanoides en su forma y dotados con la capacidad de caminar tal cual lo hace una persona.

El control de robots utilizado depende del tipo de robot, del entorno y del nivel de complejidad de la tarea que se desea realizar en forma autónoma. A medida que la tarea a realizar es más compleja, generalmente se requiere una mayor capacidad cognitiva del robot.

En un típico sistema de control de un robot existen varios lazos anidados de control, que se pueden asociar a ciertas características del hombre y más aún, se pueden relacionar a un hombre experto en la aplicación en particular y con sus capacidades físicas extendidas (por ejemplo mayor velocidad y fuerza). Dichas características del operador humano que son emuladas en su concepto por un robot son la acción física del hombre (emulada mediante un control de movimiento), la capacidad de percepción del usuario tal como el tacto y su

visión (emulada a través de un sistema sensorial), y la comprensión, razonamiento e inteligencia del hombre (por ejemplo un algoritmo de planeamiento de camino optimizado con algún criterio implementado con redes neuronales).

El uso de robots en distintas áreas va en constante crecimiento debido a las ventajas potenciales de los mismos referidas a un manejo de energía controlada para hacer rápidamente un trabajo físico con elevada exactitud y precisión, y también la gran flexibilidad para hacer distintos tipos de tareas como así también sus comportamientos que se pueden adaptar a la situación actual.

# *Capítulo 6*

*Interfaz de un sistema*

*hombre-máquina*



# Capítulo 6

## Interfaz de un sistema hombre-máquina

Este capítulo tiene como objetivo que el lector incorpore el significado de una interfaz de un *sistema hombre-máquina* y comprenda los diferentes modos de comunicar información entre una persona y una máquina. Respecto al diseño de estos sistemas, se pretende explicar los conceptos utilizados en las interfaces de estos sistemas desde un punto de vista de cómo se realiza una adecuada comunicación entre dos personas y cómo esto se podría considerar de alguna manera para lograr una buena comunicación entre una máquina inteligente y un operador humano.

Además, se describen los principales dispositivos actualmente disponibles en el mercado basados en la tecnología actual (capítulo 3) para comunicar información desde el hombre hacia la máquina y viceversa.

### 6.1 Introducción

Las interfaces de sistemas hombre-máquina permiten una comunicación bidireccional entre un hombre y una máquina, lo cual es esencial para lograr que el operador humano pueda extender y ampliar sus capacidades físicas a través de la máquina. Dicha comunicación involucra tanto cómo la persona envía información a la máquina como así también la forma en que la máquina realimenta información al operador humano [113].

Desde hace muchos años se utilizan en la industria interfaces simples, compuestas por dispositivos manejados por el hombre a través de sus manos y pies (como por ejemplo, pedales, botones, palancas, volantes, etc.) de forma de generar comandos hacia la máquina, y tableros de monitoreo formados por

indicadores de aguja o digitales como así también de alarmas de forma de realimentar tanto información visual como sonora al operador humano.

Es decir que el operador humano puede generar comandos a partir de sus acciones tales como hablar, escribir, aplicación de fuerza a dispositivos, movimiento de sus manos, brazos y ojos, e incluso a través de sus gestos y emociones. Por otro lado, él percibe información a través de la estimulación de sus sentidos de visión, tacto, audición, gusto y olfato mediante dispositivos tales como monitores, sistemas de sonido y sistemas para realimentar fuerza, entre otros [131]. La figura 6.1 ilustra gráficamente las acciones y sentidos del hombre utilizados para establecer una comunicación con una máquina tal como lo hace con otra persona.

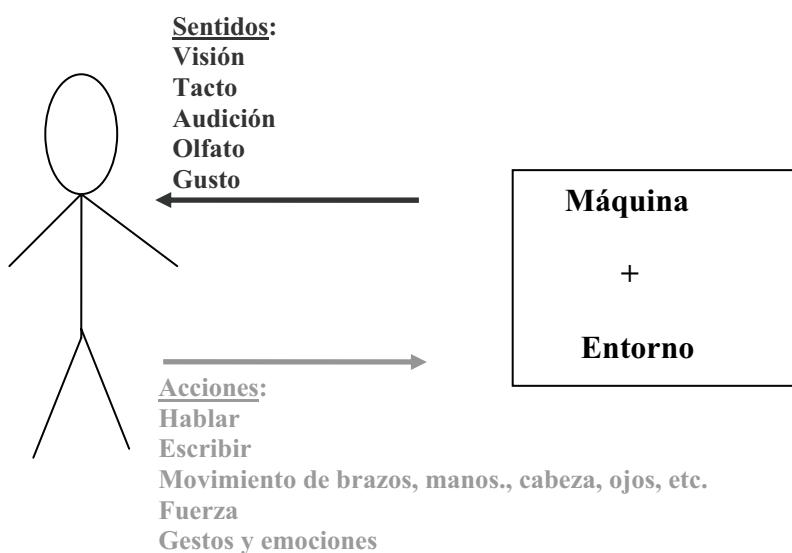


Figura 6.1. Acciones y sentidos del hombre utilizados para comunicarse con una máquina.

## 6.2 Conversión bilateral de señales entre el hombre y la máquina a través de un sistema de interfaz

La interfaz de un sistema hombre-máquina relaciona al operador humano con una máquina de manera bilateral y dicho sistema puede verse como un sistema

que transforma las señales de la máquina para ser percibidas de algún modo por un usuario y a la vez convierte las señales generadas por el operador humano de forma que ellas sean entendidas por una computadora a bordo de la máquina.

Es decir que a través de una interfaz ocurre una transformación entre señales generadas y percibidas por el hombre y señales eléctricas (interpretadas y producidas por una computadora). Las acciones del operador humano son medidas y transferidas de alguna manera al sistema de control, y la información que se desea realimentar al usuario es convertida hacia un tipo de señal que pueda ser percibida por el hombre a través del uso de sus sentidos. Por ejemplo, se puede utilizar un joystick o volante con realimentación de fuerza donde la acción del hombre es medida a través de la posición del joystick o volante y a su vez el usuario recibe una fuerza (por ejemplo a través de una fuerza constante o vibración ejercida sobre las manos del usuario por medio del control de un actuador eléctrico) que informa al mismo de cierta manera la situación actual de la máquina y/o del entorno.

Generalmente, el operador humano interactúa con una interfaz gráfica de usuario, donde diversa información visual acerca del entorno es presentada con el fin de ver el estado del sistema. Los sistemas de interfaz hombre-máquina generalmente están compuestos por más de un dispositivo, por ejemplo un monitor y un joystick. Además, existen algunos dispositivos que permiten un flujo de información bilateral entre el operador humano y la máquina y otros que son unidireccionales, como por ejemplo un monitor tipo *touch screen* es bidireccional y un monitor estándar es unidireccional (permite realimentar solamente información desde la máquina hacia el operador humano).

La figura 6.2 ilustra la relación desde un punto de vista de conversión de señales entre un operador humano y un sistema interfaz hombre-máquina que detecta acciones físicas del usuario. Aquí se muestra explícitamente la conversión de la información a realimentar al usuario en señales visuales,

táctiles y/o auditivas, las cuales el operador percibe, interpreta y analiza para tomar una decisión y cómo su acción física es convertida a señales eléctricas para su posterior uso por el sistema de control.

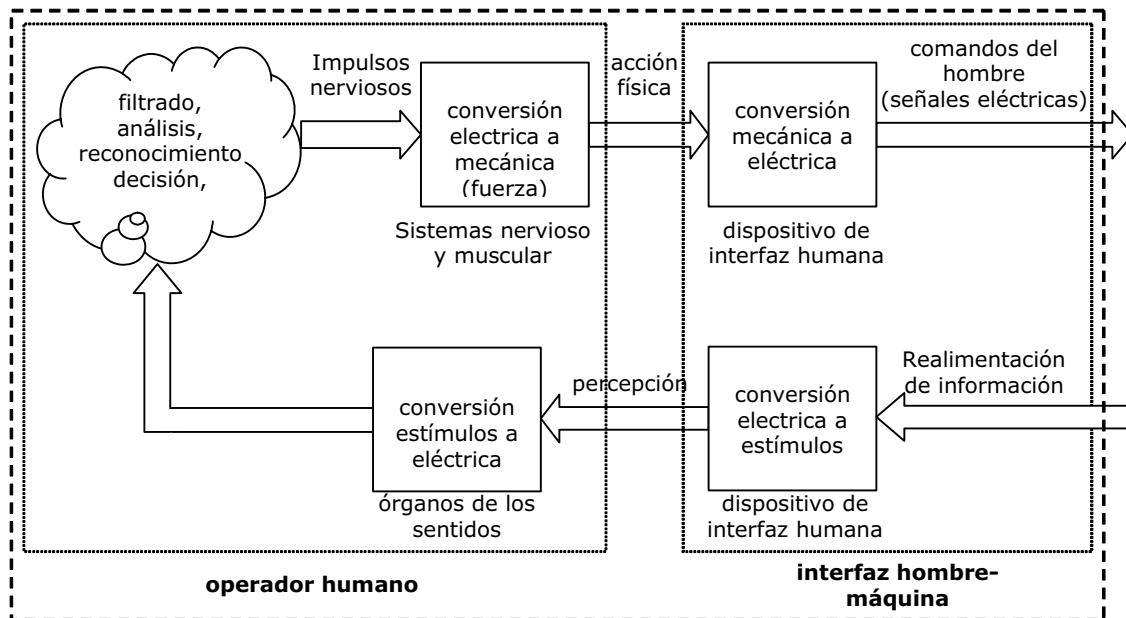


Figura 6.2. Conversión y sentido de señales en una interfaz hombre-máquina.

### 6.3 Generación de comandos

En esta sección se describirán brevemente los dispositivos mas utilizados actualmente para que un operador humano genere comandos hacia una máquina. Esto tiene una alta relación con los dispositivos que se utilizan para comunicarse con una computadora. Aunque se mencionó anteriormente, se remarca que muchos dispositivos permiten directamente la comunicación bidireccional entre el operador humano y la máquina, como por ejemplo un joystick con realimentación de fuerza.

#### 6.3.1 Dispositivos comerciales para video-juegos y periféricos estándar de una PC

Son ampliamente conocidos los dispositivos empleados para utilizar una computadora tales como el mouse, el teclado y un joystick estándar, los cuales

se muestran en la figura 6.3. En general, los dispositivos empleados en aplicaciones interactivas tales como video-juegos son también utilizados en sistemas hombre-máquina para generar comandos.

El teclado permite al usuario transmitir un texto hacia una computadora o máquina tanto como la activación de funciones especiales activando determinadas teclas. Por otro lado, el Mouse permite generar señales bidimensionales 2D (por ejemplo especificar simultáneamente un ancho y un alto deseados) y un joystick permite generar señales 3D (tres dimensiones) al mover la palanca del mismo una cierta cantidad hacia delante o atrás, otra determinada magnitud hacia la derecha o izquierda y otra cantidad independiente rotando la palanca un cierto ángulo en sentido horario o sentido anti-horario.



Figura 6.3. Interfaz al usuario compuesta por mouse, teclado y joystick.

### **6.3.2 Movimiento de la mano del hombre**

Otra forma que tiene el hombre para comunicar información es a través del movimiento de sus manos.

El movimiento en tres dimensiones de las manos puede ser seguido a través del procesamiento de la información provista por dos cámaras, como se ilustra en la figura 6.4 donde se navega por un ambiente virtual 3D (parte superior de la figura) en base a los comandos 3D generados con el movimiento de la mano del usuario captados por un sistema de visión estéreo (parte inferior de la figura 6.4).



Figura 6.4. Uso de visión estéreo para navegar por un ambiente virtual 3D.

Además, se pueden medir los movimientos de los dedos y palma de la mano respecto a la muñeca del operador humano sin utilizar cámaras de video mediante el uso de guantes como por ejemplo el sistema inalámbrico *CyberGlove* (figura 6.5) el cual proporciona 22 mediciones de ángulo que representan el movimiento de los dedos y la palma de la mano. El guante tiene tres sensores de flexión y cuatro sensores de abducción por cada dedo, y sensores para medir el arco de la palma y su flexión tanto como su abducción. Cada sensor es extremadamente delgado y flexible, y además el material del guante es muy suave y elástico. Esto hace que los sensores sean prácticamente indetectables por el usuario y por lo tanto no lo molesta y puede realizar cómodamente tareas tales como agarrar y manipular objetos virtuales.



Figura 6.5. Guante CyberGlobe fabricado por Inmersion.

### **6.3.3. Interfaces basadas en sensores inerciales de movimiento**

La introducción de sensores inerciales de movimiento de tamaño reducido y bajo costo tal como los acelerómetros y los giróscopos, ha permitido diseñar interfaces capaces de utilizar el movimiento de las manos y brazos para controlar dispositivos. Un ejemplo muy reciente de esta tecnología puede apreciarse en el mando de juegos inalámbrico, como por ejemplo el dispositivo mostrado en la figura 6.6. También se encuentran dispositivos capaces de reconocer movimientos del antebrazo y cambios en la posición de la muñeca. Estos dispositivos pueden enviar comandos a una computadora actuando como un ratón virtual. La figura 6.7 muestra un dispositivo comercial de este tipo.



Figura 6.6. Controlador Revolution para consola de video-juegos fabricado por Nintendo.

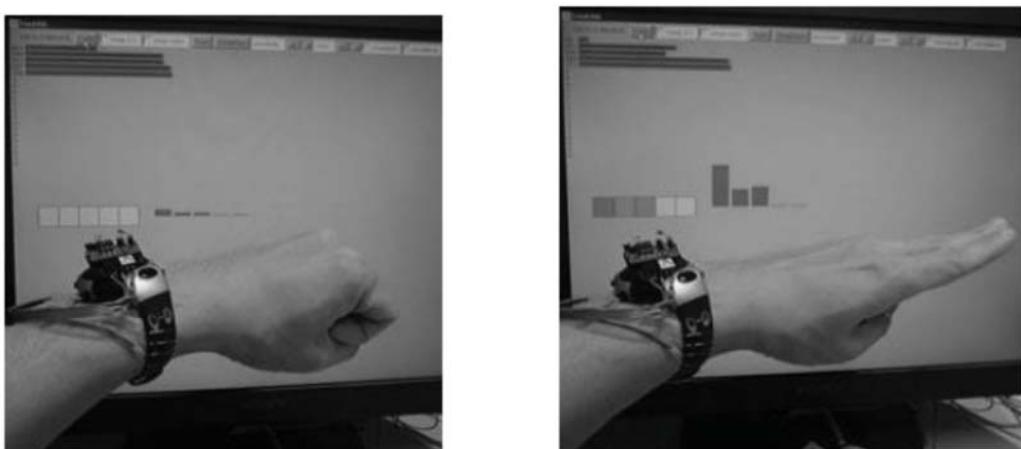


Figura 6.7. Dispositivo Gesture Wrist de Sony.

#### **6.3.4 Mirada del usuario**

Un operador humano puede generar comandos a través de la dirección de su mirada. Existen en el mercado dispositivos que integran el seguimiento del movimiento de cabeza (utilizando un sistema de visión, un sistema de medición

de movimiento inercial o ambos) y el movimiento de la posición relativa de la pupila dentro del contorno del ojo (utilizando un sistema de visión) de forma tal de entregar permanentemente en línea la dirección de vista del usuario. Es decir se puede medir un vector 3D representativo del lugar hacia donde está mirando la persona [120] [124] [126]. La figura 6.8 muestra dispositivos utilizados para seguir la mirada 3D del usuario utilizando una cámara de video y sensores inerciales de forma de detectar simultáneamente el movimiento de la pupila del ojo y el movimiento de la cabeza, respectivamente.

En el caso de utilizar solamente un sistema de visión, se debe utilizar un sistema de visión estéreo, donde se deben procesar simultáneamente las imágenes provistas por dos cámaras de video y relacionar los objetos o elementos detectados por cada imagen de forma de calcular la información deseada en 3 dimensiones. La figura 6.9 muestra un sistema de visión estéreo económico basado en el uso de dos webCam, mientras la figura 6.10 muestra un sistema estéreo de mayor tecnología que incluye también emisores infrarrojos para visión nocturna y que es montado sobre un automóvil de forma de detectar la dirección de la mirada en 3 dimensiones del conductor.



Figura 6.8. Dispositivos fabricados por EyeTracker utilizados para seguir la mirada 3D de un usuario.



Figura 6.9. Seguimiento de la mirada en 3D utilizando visión estéreo.



Figura 6.10. Sistema de visión estéreo montado en un automóvil para detectar la mirada 3D del conductor.

### 6.3.5 Reconocimiento de texto

Las interfaces capaces de reconocer caracteres manuscritos han tomado un nuevo auge con la masificación de las agendas y tabletas digitales y se espera un crecimiento aún mayor con la introducción del papel electrónico. En la actualidad las investigaciones se han dirigido a desarrollar sistemas de reconocimiento de escritura más tolerantes a las particularidades de cada individuo, así como a la capacidad de realizar análisis lexicográficos sobre el contenido del documento. Así mismo, se han desarrollado sistemas para reconocimiento de gráficos y para usos específicos, como por ejemplo la edición de partituras musicales. Hasta el momento, esta característica es utilizada principalmente en sistemas hombre-computadora y no mucho en sistemas de control hombre-máquina.

### 6.2.6 Reconocimiento de voz

En todas las interacciones entre hombre y computadora se definen protocolos para establecer un diálogo entre ellos. Este diálogo es en cierto modo metafórico si no se dispone de una interfaz de voz. Los primeros sintetizadores y reconocedores de voz tenían características técnicas bastante limitadas. Sin embargo, en los últimos años, ha habido enormes progresos en la generación y procesamiento de voz, con lo cual surgen interfaces capaces de establecer diálogos breves, al menos en contextos puntuales [133].

Un campo donde los reconocedores de voz han crecido de manera importante es en los sistemas telefónicos de respuesta interactiva IVR (por sus siglas en inglés de *Interactive Voice Response*). En los sistemas convencionales, el usuario responde a una serie de opciones a través del teclado, lo cual tiene un alto nivel de insatisfacción en parte por la molestia de tener que alejar el teléfono portátil o móvil del oído para poder presionar la tecla correspondiente. Los reconocedores de voz para sistemas IVR empezaron por aceptar palabras sencillas (*sí, no*, el número de la opción a elegir) pero ahora se han hecho sistemas populares con vocabularios mucho más amplios capaces de entender frases simples y se realizan grandes progresos en sistemas capaces de

reconocer estructuras sintácticas complejas. Las interfaces de voz para telefonía celular también han visto enormes avances en los últimos años. Los modernos dispositivos móviles son capaces de reconocer comandos para marcado, búsqueda de nombres y navegación de menús con una buena eficiencia y sin tener que pasar por una fase tediosa de entrenamiento como se hacía en los primeros sistemas. Poco a poco, estas interfaces van mejorando su funcionalidad como reconocedores de lenguaje y van surgiendo sistemas capaces de tomar dictado, aunque con resultados moderados. En dispositivos tales como teléfonos celulares, una limitación es la capacidad de memoria y velocidad de procesamiento generalmente empleadas. Sin embargo, la tecnología avanza a pasos agigantados en cuanto a miniaturización de chips electrónicos para procesar información.

Recientemente han aparecido algunos sistemas que utilizan interfaces de voz para activar dispositivos en el hogar a través de frases simples (como “encender la luz de la sala”, “apagar la televisión”). En este entorno, así como en el automóvil, y en general, cuando el micrófono no está cercano a la boca, el ruido ambiental puede degradar severamente el desempeño del reconocedor de voz. Para estos ambientes, se están diseñando soluciones que utilizan micrófonos ambientales y sistemas inteligentes capaces de filtrar distintas fuentes de sonido.

En resumen, el reconocimiento de voz es una herramienta muy útil para el diseño de una interfaz de un *sistema hombre-máquina inteligente*.

#### **6.2.7 Interfaces basadas en señales cerebrales**

En el cuerpo humano se generan diferentes señales bioeléctricas debido al funcionamiento de órganos tales como el cerebro, el corazón, los ojos, y los músculos. Estas señales reciben nombres característicos dependiendo del órgano en el que se originan. Para los órganos mencionados, las señales reciben el nombre de electroencefalográficas, electrocardiográficas, electro-oculográficas y electromiográficas, respectivamente. Las señales bioeléctricas son utilizadas principalmente en diagnóstico médico para detectar patologías

en los órganos que las producen, pero también pueden ser utilizadas para controlar interfaces de sistemas hombre-máquina, particularmente aquellas que son generadas de manera voluntaria, como por ejemplo las señales generadas por el cerebro [130].

En este contexto, el objetivo es proveer un canal de comunicación y control que no requiera el sistema nervioso periférico o la actividad muscular del hombre. Una posible solución es interpretar la actividad eléctrica del cerebro para controlar dispositivos tales como computadoras, prótesis o sillas de ruedas y máquinas en general.

Por ejemplo, las señales electromiográficas (EMG) o también conocidas como mioeléctricas son señales eléctricas que se producen en los músculos cuando estos se contraen o se distienden. Estas señales se pueden medir con un equipo adecuado, y ser procesadas para extraer cierta información dependiendo de la aplicación, como por ejemplo diagnosticar patologías del sistema muscular. Otra aplicación que se da a estas señales es el control de interfaces de sistemas hombre–máquina, donde las señales EMG medidas en músculos activados voluntariamente por un usuario, se procesan y se utilizan como comandos para controlar máquinas o interfaces de tipo software. Aunque este campo donde se conjugan la electrónica y la medicina inicialmente se orientó principalmente a ayudar a personas con incapacidades físicas, actualmente posee una gran diversidad de posibles áreas de aplicación que van desde el control de ratones y teclados de una computadora hasta el control de prótesis e incluso el control de robots móviles y robots manipuladores. La figura 6.11 muestra un diagrama en bloques que representa un sistema típico de control basado en señales bioeléctricas que utiliza dichas señales para generar comandos de referencia para controlar una máquina.

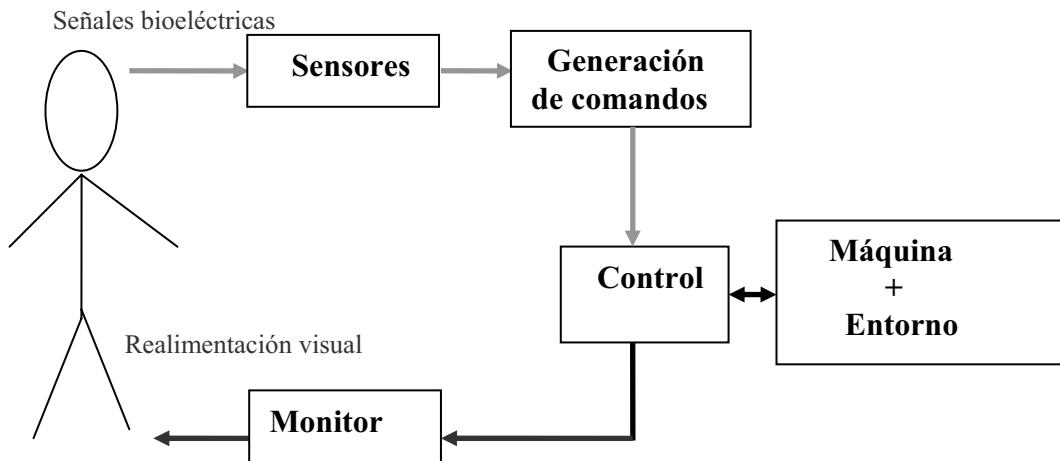


Figura 6.11. Comandos generados mediante señales bioeléctricas del hombre con realimentación visual.

### 6.3 Realimentación al usuario

En esta sección se describirán brevemente los dispositivos actualmente disponibles en el mercado para realimentar información al usuario. Dichos dispositivos transmiten información al operador humano estimulando de alguna manera los sentidos táctil, visual y auditivo del hombre.

#### 6.3.1 Realimentación visual

El sentido de la vista es quizás el sentido más utilizado por el hombre para recibir información, por lo que se ha trabajado intensamente en crear imágenes tridimensionales (3D) que ofrezcan una gran riqueza visual para la interpretación de los distintos fenómenos. El hombre puede percibir profundidad principalmente gracias a que las dos imágenes que se forman en su retina están ligeramente desfasadas, y es el cerebro el cual integra adecuadamente las mismas.

En base a este principio, los sistemas estereoscópicos buscan que la imagen que recibe cada ojo sea ligeramente distinta. Probablemente la técnica más conocida consiste en utilizar anteojos polarizados que filtran distintas partes de la escena para cada lente.

Sin embargo, al filtrar la imagen se pierde parte de su riqueza cromática. Otra técnica utiliza anteojos con pequeñas pantallas LCD para cada ojo (figura 6.12), sincronizadas con la fuente emisora, típicamente una pantalla de computadora. Las pantallas se activan y desactivan a alta velocidad conforme se despliega la imagen correspondiente a cada ojo. Además, se puede desplegar una imagen distinta para cada ojo.



Figura 6.12. Gafas NVIDIA 3D Vision.

Sin embargo, el uso de anteojos, cascos o dispositivos similares, puede ser molesto para los usuarios. Esto ha dado lugar a la creación de muy variadas técnicas de visualización que no requieren de dispositivos externos, tal como los *display* que incorporan efectos que emulan una imagen 3D sobre una pantalla plana (2), como se ilustra conceptualmente en la figura 6.13.



Figura 6.13. Ilustración de un display 3D.

### 6.3.2 Realimentación táctil de fuerza

Las interfaces denominadas en inglés *haptic interface* permiten una interacción entre el hombre y una computadora o máquina estimulando el sentido del tacto a través de fuerzas, vibraciones o movimientos sobre su mano [129]. Un ejemplo muy sencillo y muy común de estimulación tipo *haptic* es el modo vibrador de los teléfonos móviles. Estas interfaces permiten incrementar el flujo de información entre la computadora y el usuario al poder percibir la sensación de tocar un objeto o sentir un efecto físico determinado, como por ejemplo percibir el peso de un objeto que fue agarrado por un robot manipulador.

El uso de interfaces con realimentación de fuerza es creciente ya que existen interfaces de muy bajo costo. Por ejemplo, en los juegos de computadora son cada vez más populares los joystick y volantes con retorno de fuerza para dar una mayor sensación derealismo y aumentar la experiencia del usuario. Por ejemplo las figuras 6.14 y 6.15 muestran un volante comercial utilizado para video-juegos y el uso combinado de un volante comercial con realimentación de fuerza tipo vibración y un joystick desarrollado en el área de investigación que posee realimentación de fuerza y sensores de la fuerza ejercida por el operador humano (sensores tipo *flexiforce*).

Un aspecto importante a resaltar de las interfaces con realimentación de fuerza es la capacidad de sentir lo que ocurre en la interacción física entre una máquina y su entorno a pesar que dicha interacción no esté directamente acoplada al hombre. Además, el uso de una realimentación táctil permite aliviar otros sentidos del hombre durante la realización de una tarea como por ejemplo su vista.



Figura 6.14. Volante con realimentación de fuerza fabricado por Logitech.



Figura 6.15. Combinación de un volante comercial típico de video-juego con un joystick desarrollado por el INAUT de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

Además, se encuentran actualmente disponibles en el mercado sistemas de alta complejidad utilizados principalmente por universidades e institutos de investigación, aunque paulatinamente y tal como sucedió con las computadoras, los mismos van disminuyendo de precio. Por ejemplo, la interfaz denominada *CyberGrasp* es un sistema de realimentación de fuerza sobre los dedos y la mano de un usuario de forma de percibir objetos virtuales relativos a un ambiente virtual o percibir objetos reales que no están en contacto directo con el hombre. Este dispositivo se puede colocar sobre un guante tal como el descripto anteriormente *CyberGlove* (ver figura 6.16), adicionando así realimentación de fuerza sobre cada dedo de forma que los usuarios sean capaces de sentir el tamaño y forma de objetos, como por ejemplo interactuar con objetos virtuales generados mediante un mundo virtual simulado.

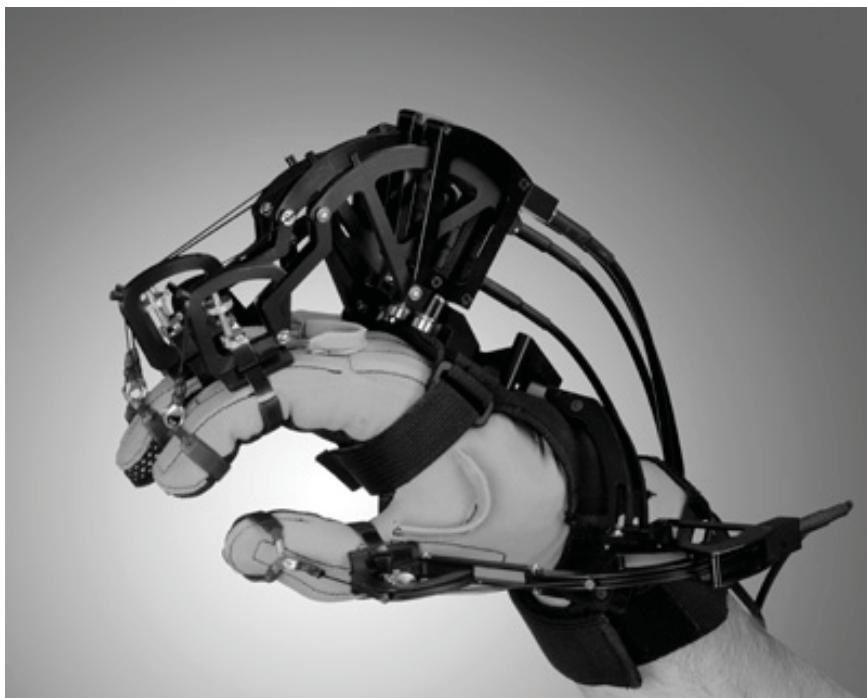


Figura 6.16. Interfaz basado en los dispositivos Cyberglove y CyberGrasp.

Las fuerzas sobre cada dedo son generadas por tensores que están montados físicamente de tal forma de jalar cada dedo de la mano con una fuerza controlada en amplitud (ver figura 6.16). El dispositivo cuenta con 5 actuadores de elevado ancho de banda, uno por cada dedo, los cuales son programados independientemente. Además, el dispositivo ejerce fuerzas en una dirección

aproximadamente perpendicular a la punta de los dedos en todo el rango de movimiento sin obstaculizar el movimiento de la mano del usuario.

Otro dispositivo utilizado para realimentar fuerza al usuario es el sistema denominado *CyberTouch*, el cual se utiliza generalmente también con un guante tipo *Cyberglove* (ver figura 6.17). El mismo cuenta con pequeños estimuladores vibro-táctiles sobre cada dedo y sobre la palma del sistema *CyberGlove*. Cada estimulador puede ser programado individualmente variando la intensidad y frecuencia de la sensación de contacto. El arreglo de estimuladores puede generar simples sensaciones tales como pulsos o una vibración sostenida hasta combinaciones más complejas para realimentar patrones predefinidos de fuerza de acuerdo al tipo de aplicación.

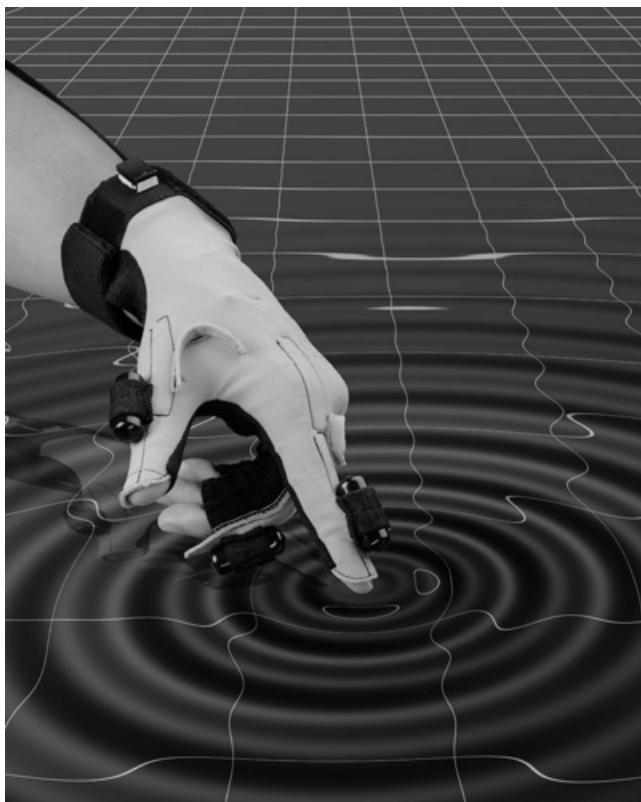


Figura 6.17. Guante Cyberglove aumentado con el uso de un sistema Cybertouch.

También existen en el mercado dispositivos con realimentación de fuerza tipo robot manipulador pero de un peso ligero de forma de poder ser manipulados fácilmente por una persona. Por ejemplo el sistema *CyberForce* es una

armadura con realimentación de fuerza que no sólo transmite fuerzas a la mano y al brazo, sino también ofrece seis grados de libertad de seguimiento de posición midiendo con precisión la traslación y rotación de la mano del usuario en tres dimensiones. Se puede utilizar el sistema *CyberForce* junto con los sistemas *CyberGrasp* y *CyberGlove* (figura 6.18) de manera de sentir el peso y la inercia de un objeto virtual al levantar y trasladar el mismo o tocar diferentes objetos virtuales rígidos y blandos tales como paredes o una almohada respectivamente.

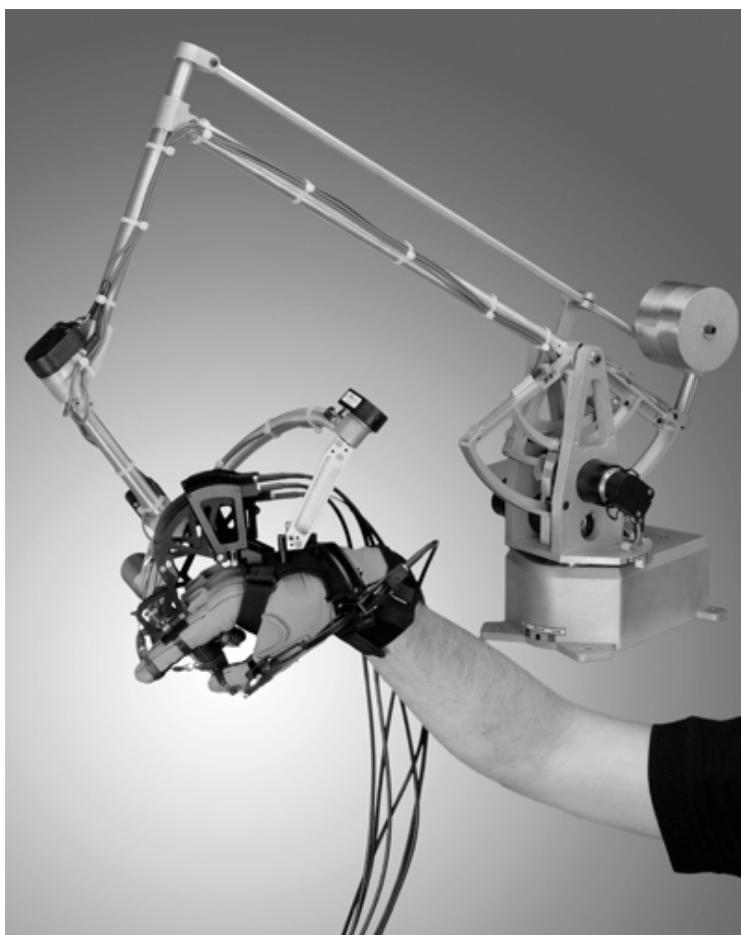


Figura 6.18. Dispositivos *Cyberforce*, *Cybergrasp* y *Cyberglove* utilizados simultáneamente.

Los dispositivos PHANTOM modelos Desktop, Omni y Premium fabricados por SensAble Technologies, permiten a los usuarios utilizar aplicaciones que requieran una realimentación de fuerza en 3 o 6 (3 fuerzas y 3 pares) grados de libertad de acuerdo al modelo, generando a su vez comandos de posición

en 6 grados de libertad (movimientos de traslación sobre tres ejes perpendiculares entre si y las rotaciones respecto a cada eje). Las figuras 6.19 y 6.20 muestran los dispositivos Omni y Premium, respectivamente. Una alternativa reciente de bajo costo, es el dispositivo Novint Falcon con realimentación de fuerza 3D, el cual se muestra en la figura 6.21.



Figura 6.19. Dispositivo Phantom Omni con realimentación de fuerza 3D.

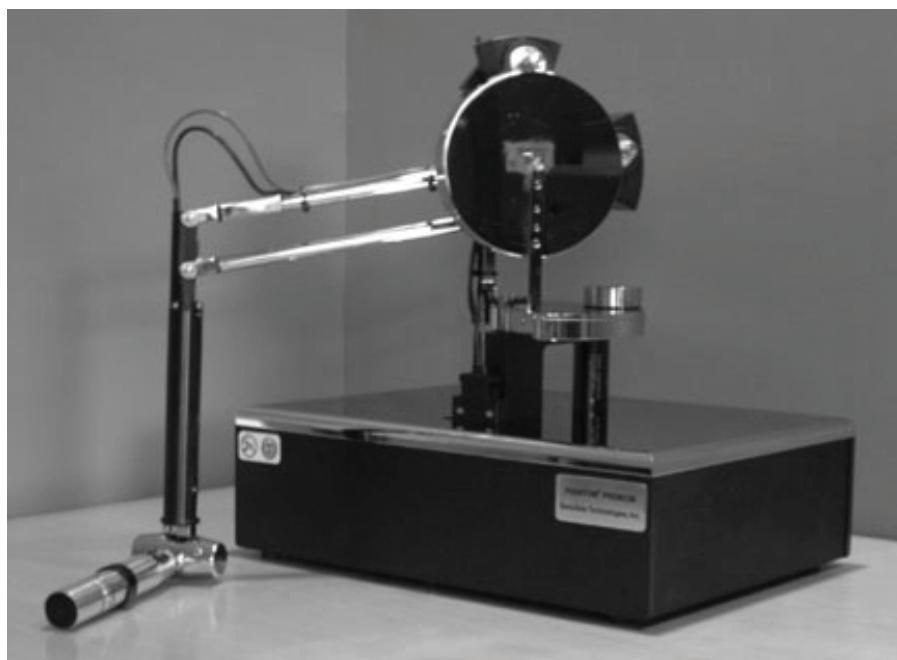


Figura 6.20. Dispositivo Phantom Premium con realimentación de fuerza 6D.



Figura 6.21. Dispositivo Novint Falcon con realimentación de fuerza 3D.

### **6.3.3 Realimentación de sonido 3D**

El sonido 3D se refiere a la generación de sonido cuya fuente de emisión tiene una posición y velocidad con respecto al usuario (oyente). Es decir que se desea emular un sonido real, lo cual implica que el sonido provenga de una posición determinada en el espacio. Por ejemplo, la figura 6.22 muestra una típica disposición de sonido 3D para el hogar donde la persona puede escuchar sonidos provenientes desde el frente del usuario, desde atrás del mismo y desde ambos lados.

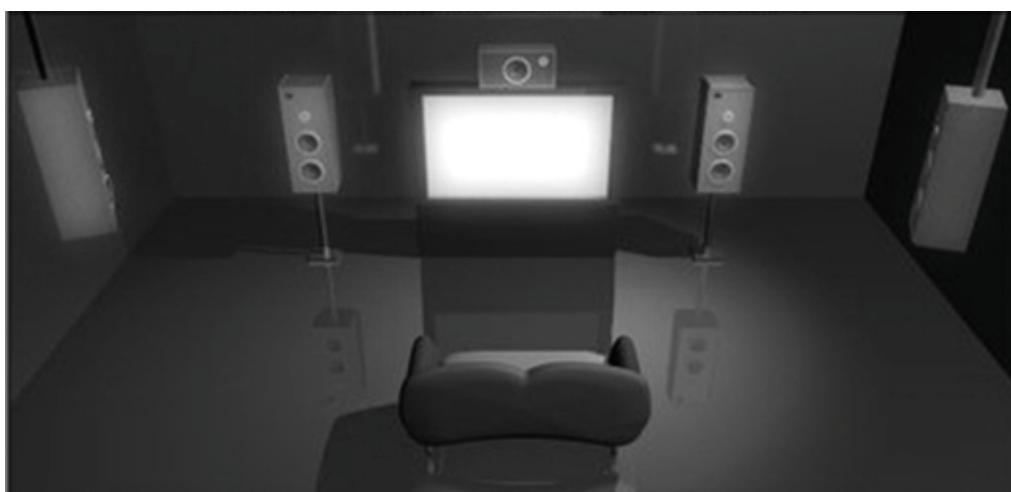


Figura 6.22. Ejemplo de tecnología utilizada para generar un sonido 3D.

#### 6.3.4 Realimentación de voz

En cuanto a la generación de voz, también se han logrado grandes avances. Con el uso de procesadores de señales sofisticados, así como recurriendo a segmentos de frases pregrabados, los nuevos sintetizadores de voz o sistemas de texto a diálogo (TTS, *Text To Speech*) disponen de una calidad aceptable muy superior a la voz poco humana que tenían los primeros sistemas.

Los principales problemas en la actualidad consisten en lograr que estas interfaces permitan una interacción más cercana al lenguaje natural con el fin de explotar las enormes habilidades lingüísticas y conversacionales que como especie hemos cultivado a lo largo de nuestra existencia.

Este es un problema complejo que requiere de la colaboración de disciplinas tan diversas como la filosofía, sociología, psicología, teoría de la información, electrónica, y la computación. Se han desarrollado prototipos capaces de mantener una conversación relativamente fluida en contextos particulares como la predicción meteorológica o la programación de películas, pero este tipo de interfaces son sumamente costosas en términos computacionales.

Aún así, el reconocimiento de lenguaje natural se encuentra en una etapa muy temprana de desarrollo, y parece lejana la posibilidad de contar con interfaces capaces de hacer reconocimiento de voz en varios idiomas. Tanto en los Estados Unidos como en Europa se están desarrollando proyectos muy ambiciosos para reconocimiento y traducción de diálogos en varios idiomas, como por ejemplo los proyectos GALE y SpeeCon. Entre las razones que hacen muy difícil a una computadora comprender el significado de un texto, está el hecho de que éstas carecen de un conocimiento base que les permita inferir y dar contexto a las frases aisladas. Algunos científicos han propuesto un ingenioso sistema con el que la enciclopedia libre *wikipedia* podría proporcionar ese conocimiento base a los programas analizadores de lenguaje. Esta podría ser una alternativa, por lo menos hasta el momento, para lograr que las interfaces de voz sean mucho más eficientes.

Por otra parte, hay un interés creciente por el diseño y desarrollo de interfaces multimodales (se definirán en la sección 6.4.1), en las que las interfaces de voz son una componente muy importante [123]. Un canal de voz sofisticado en una interfaz multimodal puede ser de gran utilidad para complementar otro tipo de información recibida. Por ejemplo para enfatizar un detalle, aclarar situaciones ambiguas, repetir información, o reactivar la atención del usuario que se encuentra percibiendo una realimentación visual.

Dentro de estas interfaces, el diseño del canal de voz puede ser menos demandante al tomar en cuenta el contexto. Por ejemplo, un usuario puede ser más tolerante en esperar una respuesta (vocal) si al mismo tiempo observa en la pantalla un mensaje indicando que la misma se está procesando. Al mismo tiempo, no es necesario desarrollar frases elaboradas para entender el mensaje, pues éste se complementa con los demás medios de la interfaz (por ejemplo realimentación visual). Sin embargo, también se presentan grandes retos precisamente por la dependencia contextual del lenguaje humano. Por ejemplo, el simple hecho de no sincronizar apropiadamente las acciones del ratón en una computadora con los mensajes emitidos de voz, puede generar una gran confusión en el usuario.

Finalmente, una fecunda área de investigación reciente, está relacionada con las llamadas interfaces perceptivas o cómputo afectivo. Las interfaces de voz, sobre todo al aproximarse a un diálogo natural, no sólo establecen un canal de comunicación; sino que también activan una dimensión cognitiva adicional capaz de despertar vínculos más estrechos entre el usuario y la computadora o máquina. La búsqueda de una interacción aún más fluida requiere de la capacidad de interpretar, y eventualmente de reproducir, las sutilezas de la comunicación humana en la que el estilo del diálogo, las inflexiones, y hasta las expresiones corporales dan matiz y complementan el mensaje que se desea transmitir [128].

### **6.3.5 Realidad aumentada 3D**

La realidad aumentada combina objetos virtuales 3D sobre un entorno real 3D en tiempo real y tiene como objetivo suplementar la realidad y no reemplazar la

misma. La figura 6.23 muestra un ejemplo de realidad aumentada aplicado en robots móviles donde se combina la imagen captada por una cámara de video con un grafico 3D representativo del robot real [108], mientras que la figura 6.24 muestra la aplicación de realidad aumentada sobre teléfonos celulares donde se combina el video captado por la video cámara del teléfono con gráficos basados en la información de mapas y medición actual de un GPS integrado en el equipo.

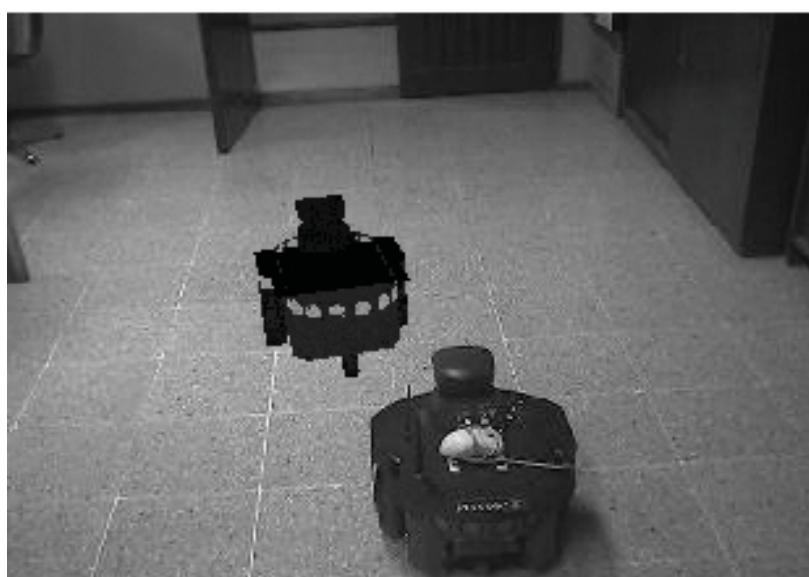


Figura 6.23. Ejemplo de realidad aumentada aplicada en robots móviles.



Figura 6.24. Realidad aumentada aplicada en teléfonos celulares.

La figura 6.25 muestra conceptualmente como se mezclan los denominados entornos reales (tal como lo ve una persona) con los entornos virtuales 3D (típicos ambientes utilizados en los video-juegos modernos).

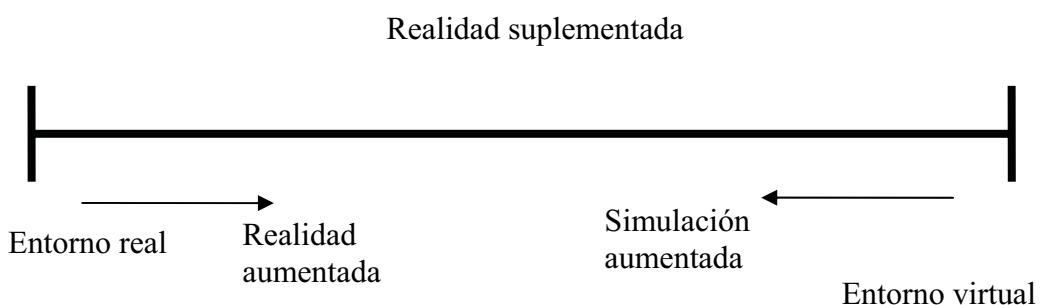


Figura 6.25. Relación entre realidad aumentada y entornos reales y virtuales.

#### 6.4 Conceptos sobre Interfaces

Algunos estudios analizaron que la gente a menudo se comunica con las computadoras o máquinas inteligentes en modos similares a como ellos interactúan socialmente con otras personas. Ya que las máquinas y las personas que las utilizan necesitan comunicarse y cooperar entre si y debido a que la gente está acostumbrada a comunicarse diariamente con otras personas, es intuitivo pensar que las mismas costumbres sociales que se aplican a las personas también podrían aplicarse a las máquinas inteligentes [43]. Es decir, los individuos se encuentran más atraídos por otras personas que parecen tener personalidades similares a las suyas. Este fenómeno, los psicólogos lo denominan “hipótesis de una atracción social” [112].

¿Cómo se deben diseñar las interfaces hombre-máquina?... ¿Qué criterios de diseño se deberían utilizar?... ¿Se pueden comparar cuantitativamente dos diferentes interfaces hombre-máquina?...

En el contexto de interfaces hombre-máquina, se denomina una buena etiqueta (en inglés *etiquette*) a un conjunto de prácticas en el comportamiento que hacen aceptable y eficiente la interacción entre personas maduras [58]. Algunos estudios plantean cuatro premisas para lograr una cooperación en una conversación (*etiquette*), y por lo tanto así alcanzar una buena comunicación. Dichas premisas son las siguientes:

- 1.** Máximo de cantidad: Diga lo que sirve al propósito presente, pero no más.
- 2.** Máximo de calidad: Diga lo que usted sabe que es cierto sobre la base de suficientes pruebas.
- 3.** Máximo de relación: Ser pertinentes, para mejorar la conversación actual.
- 4.** Máximo de forma: Evite la oscuridad de expresión, la palabrería, la ambigüedad y el desorden.

Estos cuatro puntos fueron considerados por otros trabajos para el diseño de interfaces al usuario proponiendo las siguientes reglas a utilizar por los diseñadores [58] [70]:

- 1.** Hacer muchos movimientos de conversación por cada error cometido.
- 2.** Que cualquier error sea muy fácil de reemplazar y corregir.
- 3.** Conocer cuando se equivoca, aceptando que se lo diga el usuario.
- 4.** No cometer el mismo error dos veces.
- 5.** Sólo porque usted puede hacer algo no significa que deba.
- 6.** Hablar explícitamente sobre lo que está haciendo y por qué lo está haciendo (Las personas dedican mucho tiempo a este tipo de comunicación).

7. Utilice varias modalidades y canales de información redundantemente.
8. No suponga que es lo mismo cualquier usuario, se debe ser sensible y adaptarse a las diferencias individuales, culturales, sociales y contextuales de cada usuario.
9. Sea consciente de lo que el usuario conoce, sobre todo lo que usted acaba de transmitir (por ejemplo, no sea reiterativo).
10. Dar información sólo en la medida que favorece sus objetivos de conversación.

En definitiva, los distintos métodos que existen para diseñar interfaces al usuario en sistemas hombre-máquina se basan en mayor o menor medida en emular la forma en que se comunican las personas.

#### **6.4.1 Interfaces ecológicas y multimodales**

Aunque actualmente no existe una metodología aceptada por la comunidad científica como la más adecuada en términos generales, existen varias ideas que fueron conceptualizadas y que colaboran en el diseño de interfaces hombre-máquina, tal como los conceptos de interfaz ecológica [92] e interfaz multimodal [122] [127] que a continuación se describen.

Los sistemas que proporcionan información al usuario respecto a los modos de automatización, estados del sistema, y acciones automáticas futuras pueden mejorar la comunicación entre el hombre y la automatización y por lo tanto podrían incrementar el rendimiento del sistema. Si el uso de dicha realimentación requiere un amplio procesamiento cognitivo de parte del usuario, cualquier posible beneficio podría ser contrarestado por el aumento de la carga cognitiva sobre él. Consecuentemente, surge necesario desarrollar interfaces que proporcionen realimentación sobre los estados y comportamientos de la automatización en una manera que requiera poco o bajo esfuerzo cognitivo pero que a su vez dicha información sea fácilmente

interpretada permitiendo una rápida acción del usuario, es decir que permitan un uso natural y espontáneo de la interfaz. Dichas interfaces han sido denominadas como interfaces ecológicas o naturales EID [93], por sus siglas en inglés *ecological interface design*.

Por otro lado, para asegurar un intercambio fructífero de información, los hombres usan todo medio disponible para comunicarse con sus pares. Los individuos constantemente toman decisiones acerca de qué formas de comunicación utilizar para expresar mejor sus ideas. Así surgen los sistemas multimodales aplicados a sistemas hombre-máquina. Estrictamente hablando, un sistema multimodal es simplemente un sistema que utiliza simultáneamente más de una modalidad o canal de comunicación (por ejemplo, mediante una conversación con gestos, voz y escritura) conteniendo cada modalidad información asociada al mensaje que se desea transmitir a otra persona o máquina. Es decir, estas interfaces emulan cómo se comunican las personas, las cuales utilizan varios modos de comunicación simultáneamente de manera de transmitir un mensaje a otra persona lo mejor posible. La figura 6.26 ilustra una comunicación bidireccional entre un profesor y un alumno donde ambos utilizan la escritura, gestos faciales, movimientos de brazos y manos, voz y sonidos, etc. para transmitir un mensaje hacia su par humano estimulando sus sentidos tales como la visión y la audición.

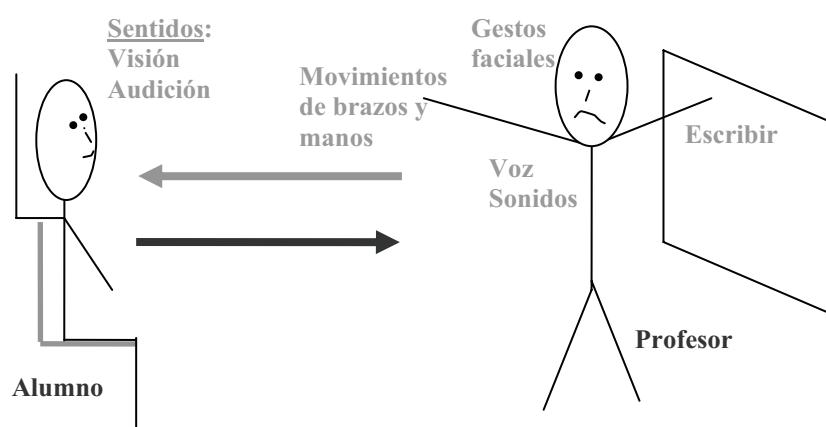


Figura 6.26. Comunicación multimodal entre profesor-alumno.

La interfaz de un sistema hombre-máquina es fundamental en la mayoría de las aplicaciones, por ejemplo la figura 6.27 (página 203) muestra un robot guiando una visita a un museo donde el robot posee un modo de comunicación amigable a través de un sintetizador de voz ayudado por comportamientos no verbales basado en gestos de la cabeza del robot que utiliza en sus explicaciones durante la visita. Otro ejemplo también es mostrado en la figura 6.28 (página 203), donde un robot tiene incorporado ciertos tipos de expresiones emocionales a través de expresiones faciales y el uso de sintetizadores de voz (con parámetros modificados en línea tales como el volumen, velocidad, etc.) controlados de acuerdo a ciertas características detectadas en las personas tal como distracciones visuales o determinados tipos de movimientos.

## **6.5 Síntesis del capítulo**

Una interfaz de un sistema hombre-máquina representa la forma en que se comunican el hombre y una máquina de manera bidireccional.

El operador humano utiliza diversos dispositivos y distintas tecnologías para generar comandos tanto como para percibir mediante sus sentidos información del estado de la máquina y del estado del entorno de ella.

El hombre puede generar comandos con diversos dispositivos que van desde el uso de los periféricos utilizados para manejar una computadora tales como ratones, teclados y joysticks hasta dispositivos mas complejos que detectan y miden el movimiento de las manos del hombre, la dirección de la mirada del usuario, a través del reconocimiento de texto y de voz, y incluso midiendo determinadas señales cerebrales del hombre.

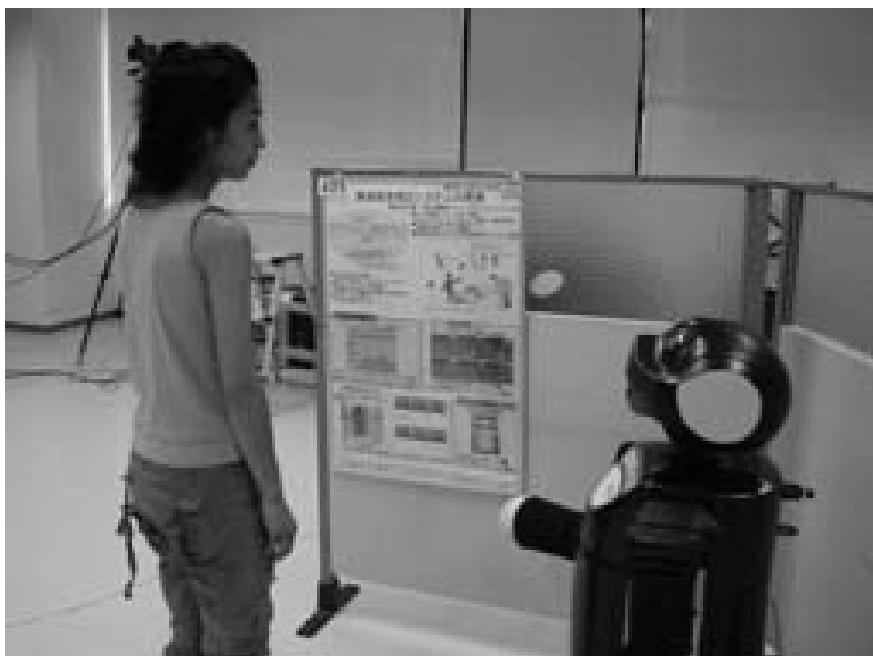


Figura 6.27. Visita guiada a un museo por un robot.



Figura 6.28. Robot llamado *Robotinho* guiando un huésped durante el encuentro RoboCup@Home 2009.

Por otro lado, el operador humano recibe información a través de diferentes dispositivos que estimulan el sentido visual, táctil y/o auditivo del hombre. Los

monitores estándar, pantallas con efectos 3D, anteojos polarizados con filtros, y gafas con una pantalla LCD para cada ojo son empleados para ejercer una realimentación visual hacia el operador humano. Por otro lado, los dispositivos con realimentación de fuerza tal como joysticks, volantes y dispositivos de múltiples grados de libertad que permiten realimentar al hombre una fuerza y par en tres dimensiones sobre su mano tanto como fuerzas controladas sobre cada dedo de la mano de forma de estimular el sentido táctil del usuario tal como si él estuviese tocando o agarrando un objeto real. Además, se puede utilizar un sonido 3D para excitar el canal auditivo del operador humano.

Aunque no existe una metodología general para el diseño de una interfaz de un sistema hombre-máquina, existen varias conceptualizaciones que ayudan a diseñar las mismas tales como los fundamentos de las etiquetas en una conversación, interfaces ecológicas y las interfaces multimodales.

Las etiquetas de una conversación involucran reglas y prácticas que deben cumplirse para lograr una buena y fluida comunicación entre dos o más partes. En cambio, las interfaces ecológicas involucran el desarrollo de interfaces que proporcionen realimentación sobre los estados y comportamientos de la automatización en una manera que requiera poco o bajo esfuerzo cognitivo y que sea fácilmente interpretada y utilizada naturalmente por un usuario. Por otro lado, un sistema multimodal implica el uso simultáneo de más de una modalidad o canal de comunicación conteniendo cada modalidad información asociada al mensaje que se desea transmitir hacia una persona o hacia una máquina.

En general, las interfaces de un sistema hombre-máquina se basan en mayor o menor medida en emular la forma en que se comunican las personas entre sí.

# *Capítulo 7*

## *Factores humanos*



# **Capítulo 7**

## **Factores humanos**

El objetivo de este capítulo es transmitir al lector la comprensión de los factores humanos no solamente físicos sino también psicológicos que tanto afectan como son modificados de alguna manera por el comportamiento de un sistema que posee cierto nivel de automatización. Aunque algunos de ellos se pueden entender en forma intuitiva, los conceptos brindados en este capítulo se basan en el estudio teórico y experimental realizado hasta el momento en el ámbito científico que involucra no solamente estudios de ingeniería sino también estudios de psicología acerca de los factores humanos en los sistemas automatizados.

### **7.1 Introducción**

Los Países más desarrollados son los que tienen mayor índice de automatización en sus procesos productivos contando a su vez por lo general, con los menores índices de desempleos y los salarios mas elevados en términos reales con el menor número de accidentes laborales. Esto afirma la potencialidad de utilizar sistemas automatizados en los sistemas de producción.

Así, la automatización de sistemas y procesos pretende optimizar los recursos, aumentar la seguridad de los operarios y la calidad del trabajo disminuyendo la carga física y mental de los usuarios, disminuir costos, aumentar la flexibilidad, permitir el control en paralelo y de sistemas complejos, y mejorar la velocidad y precisión de un sistema, extendiendo las capacidades del hombre e incluso evitando errores provocados accidentalmente por el mismo.

En cuanto a su utilización, la automatización de sistemas y procesos tiene una amplia aplicación en tareas cuyo espacio de trabajo se encuentra dentro de un entorno estructurado donde el sistema de control no tiene una interrelación directa con las personas. Estos sistemas tienen un gran espectro que va desde simples sistemas como el control de temperatura de un aire acondicionado donde la persona establece la temperatura deseada hasta tareas de ensamblaje y pintado de piezas utilizados en la industria automotriz, donde el operador humano establece como deben ensamblarse las piezas y el color de cada una de las mismas lo cual requiere que el sistema automático tenga la capacidad de detectar y clasificar piezas según su forma, tamaño, etc. y la capacidad mecánica de realizar la tarea de ensamblaje y pintado con gran precisión y calidad. Las tareas a su vez pueden ser altamente repetitivas o no y pueden requerir una interacción simple o compleja entre la máquina controlada y su entorno. A medida que las tareas son más complejas (como por ejemplo realizar una tarea de exploración con un robot en Marte) y/o las personas están más directamente afectadas (como por ejemplo el manejo de un avión de transporte de pasajeros), se requiere una mayor complejidad en el sistema de percepción, de control, y de actuación del sistema de control. De esta forma, la interacción entre un operador humano y el sistema automatizado pasa de una relación pasiva a ser activa, donde el operador humano participa permanentemente en el control y monitoreo del sistema.

A pesar de las numerosas ventajas de la automatización, muchas preguntas y pensamientos surgen en relación a la introducción de mayores niveles de automatización y su efecto sobre el comportamiento del hombre (factores humanos), tales como:

“la pregunta ya no es si una u otra función puede ser automatizada, sino, en cambio, si esto debería ser”

El hombre que tanto conoce sobre: ¿Qué está haciendo el sistema autónomo? ¿Por qué está haciendo esto? ¿Qué será lo próximo que haga?

¿Alguna característica subjetiva del operador humano influye sobre cómo él utilizará la automatización?

¿Con qué criterio un operador humano decide usar o no usar la automatización y en qué nivel se utilizará durante situaciones típicas y en situaciones críticas en tiempo?

¿El diseño de un sistema automatizado debería considerar los factores humanos o solamente factores económicos y de rendimiento?

Durante este capítulo se describirán los factores humanos dentro del contexto de sistemas hombre-máquina. Estos afectan el “uso de la automatización”, esto abarca los factores humanos que influyen en la activación o utilización voluntaria de la automatización por parte de los usuarios. Además, los factores humanos pueden causar un “mal uso” de la automatización, lo cual puede ocasionar fallas en el monitoreo o errores en la toma de decisiones del operador humano debido a una falta de comprensión de la automatización. También se analizan cuales factores humanos provocan un “desuso de la automatización” u omisión de la misma tanto como los factores que afectan un “abuso de la automatización” por parte de los ingenieros diseñadores y su implementación en la práctica sin tener debidamente en cuenta las consecuencias en el rendimiento y confort del hombre. En definitiva, un mal diseño de un sistema hombre-máquina podría promover un mal uso o desuso de la automatización por parte de los usuarios [73].

## **7.2 Modelos de factores humanos**

En los capítulos anteriores se vio que un sistema de control automático se puede diseñar mejor si se conoce el modelo del sistema. De la misma forma, el conocimiento de cómo se comporta y funciona internamente un sistema dado y la comprensión de los factores humanos podrían ser utilizadas en el diseño de sistemas de control hombre-máquina, como se ilustra en la figura 7.1.

El conocimiento de los factores humanos depende del desarrollo de construcciones y principios para promover una mejor comprensión de la actuación humana en los sistemas complejos [66]. Para su aplicación en la práctica real de sistemas de control, dichos desarrollos deberían ser expresados en la forma de modelos matemáticos o computacionales como así también deben estar sustentados con pruebas experimentales verificadas en la práctica real (a través de numerosas tareas en laboratorio, utilizando simuladores y por supuesto en dominios reales de trabajo) [42].

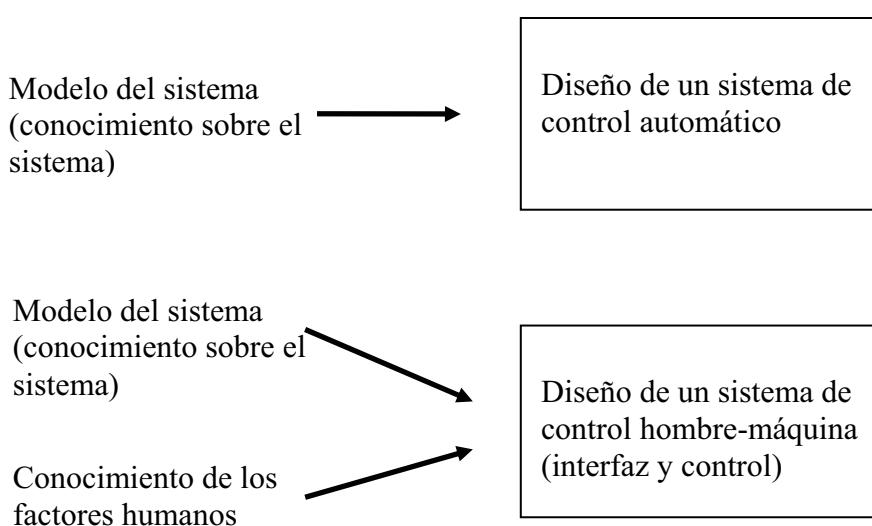


Figura 7.1. Diseño de sistemas de control automático y diseño de sistemas de control hombre-máquina.

El objetivo del conocimiento en los factores humanos es utilizar los mismos para el diseño de sistemas de control hombre-máquina (respecto al control e interfaz de estos sistemas) de forma de lograr sistemas que sean más efectivos, seguros y agradables para el trabajo del hombre.

A continuación se describirán los factores humanos que son cambiados y a la vez afectan el uso, mal uso, desuso y abuso de la automatización [73].

### **7.3 Comportamiento de reacción del operador humano**

La complejidad en el procesamiento de la información en el cerebro humano y las complejas reglas de toma de decisión y comportamiento, así como el complicado proceso de raciocinio y aprendizaje, hacen casi imposible la obtención de un modelo que represente fielmente a un operador humano. Además, existe una gran diversidad de comportamientos entre diferentes personas para hacer alguna tarea física y/o cognitiva. De hecho, estos procesos se dan en cada persona de manera diferente y son producto de la experiencia y vivencias a lo largo de los años, dando lugar a individuales formas de pensar y racionar. Por tanto, la toma de decisiones ante estímulos externos, la cual se refleja en las acciones del operador en forma de comandos, es un proceso individual y difícil de modelar.

Sin embargo, algunos comportamientos del hombre si se pueden representar o modelar, como el proceso de reacción del hombre ante un estímulo de entrada tal como un estímulo visual, un estímulo auditivo o un estímulo táctil de fuerza [55] [119]. Dicho modelo se caracteriza por un tiempo de reacción promedio (ya que cada operador humano posee diferentes tiempos de reacción) ante el estímulo de entrada (por ejemplo el hombre reacciona más rápido a un estímulo auditivo que ante un estímulo visual) y un tiempo que representa la respuesta neuro-muscular del hombre luego de haber percibido el estímulo de entrada.

Por ejemplo de forma experimental, se han obtenido valores típicos entre 0.2 y 0.4 segundos de tiempo de reacción del hombre ante un estímulo táctil de fuerza y entre 0.5 y 2 segundos frente a un estímulo visual. Por otro lado, se ha detectado un tiempo promedio de 0.25 segundos para la respuesta neuro-muscular del hombre para reaccionar a través de su mano ante una tarea sin carga mental, por ejemplo mover una única palanca. Es decir, el hombre recibe un estímulo, luego del tiempo de reacción dicho estímulo ya es percibido por el cerebro del hombre y considerando una acción solamente de reacción y no por ejemplo una toma de decisión (cuya demora depende de la complejidad de la misma), entonces el tiempo de respuesta neuro-muscular representa la demora

de tiempo desde que el cerebro da una señal de movimiento a alguna parte de su cuerpo como manos, brazos, pies, etc. hasta que el hombre mueve significativamente la misma. Por ejemplo, el tiempo de respuesta neuromuscular para mover una pierna es mayor (más lento) que para mover un brazo debido a la mayor masa de la primera.

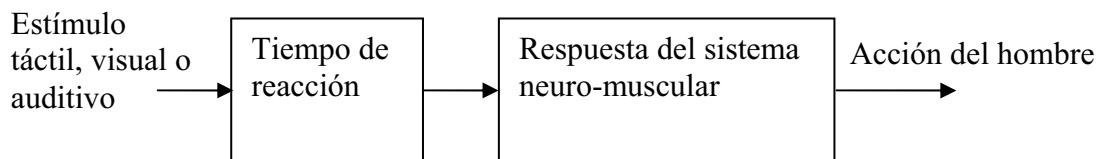


Figura 7.2. Modelo de reacción del hombre ante un estímulo.

La figura 7.3 ilustra el efecto del tiempo de reacción ante un estímulo visual en un conductor. Dicho tiempo transcurre entre el instante que el conductor recibe un estímulo visual (en este caso el momento en el cual el conductor ve a un peatón cruzando la calle) y el instante en el cual el conductor “empieza” a frenar.

#### 7.4 Fatiga

La fatiga se define como una declinación que experimenta un operador humano para continuar realizando su tarea actual [116] [117] [118].

Algunos autores definen fatiga como un "estado del hombre en el que las capacidades de rendimiento se encuentran temporalmente incapacitadas o bloqueadas por las demandas continuas de actividad que exceden la capacidad actual de rendimiento del usuario".

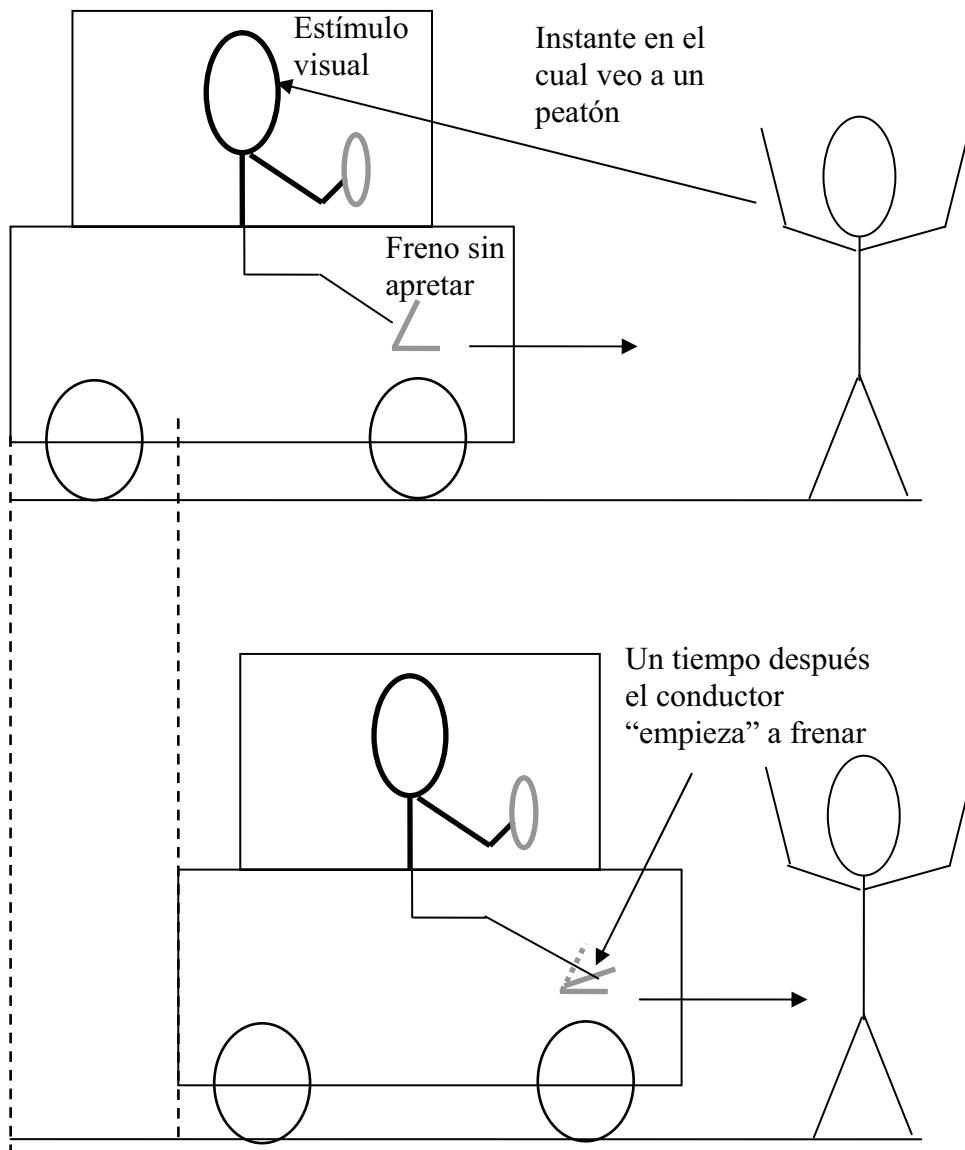


Figura 7.3. Ilustración del tiempo de reacción en un conductor, el proceso total puede estar en el orden de 1.25 segundos.

Existen numerosos métodos para medir instantáneamente la fatiga de un operador humano, los cuales se basen en las siguientes metodologías:

- Detección por señales fisiológicas: Este método está basado en el hecho que las señales fisiológicas (como por ejemplo las señales EEG)

muestran diferentes patrones a diferentes niveles de vigilancia del hombre.

- Detección por cambios físicos del hombre: Cualquier cambio físico relacionado a la posición de la cabeza, frecuencia de parpadeo, movimiento de los ojos y tamaño de la pupila se puede utilizar para estimar de alguna manera el nivel de fatiga de un operador humano.
- Detección por mediciones del estado de la máquina: Midiendo determinadas variables del estado de la máquina se puede inferir la fatiga del operador, como por ejemplo midiendo la posición angular del volante de un conductor mientras maneja un automóvil se pueden detectar anomalías en dicha señal que pueden tener una similitud con algún patrón de fatiga.

Los efectos de la fatiga se manifiestan en cuatro categorías:

- Fisiológicos (regulación del sistema nervioso y vegetativo)
- Cognitivos (percepción y procesamiento de información)
- Motores (comportamiento)
- Subjetivos (experiencia)

Los cambios en las tres primeras categorías son generalmente accesibles para observación y medición “objetiva”, pero esto no es el caso de la experiencia subjetiva de una persona fatigada. Además, con frecuencia no hay relación directa entre parámetros “objetivos” y la experiencia subjetiva, ya que esta última tiene una gran diversidad y la misma es afectada por características propias de cada persona tales como gusto personal y satisfacción.

Los síntomas y efectos de la fatiga se pueden resumir cómo se describe en la tabla 7.1.

Categoría	Síntomas y efectos de la fatiga
Fisiológica	Reducida estimulación psico-fisiológica
Cognitiva	Reducida alerta y vigilancia  Procesamiento de la información y toma de decisión involucra una demora mayor
Motora	Tiempo de reacción se incrementa pudiendo ser demasiado alto respecto a eventos críticos  Reacciones de control son más fluctuantes, bruscas y menos efectivas

Tabla 7.1. Clasificación de síntomas y efectos de la fatiga.

## 7.5 Distracción

La atención es un concepto, que todos hemos experimentado y que es un requisito esencial, que permite a una persona seleccionar información (que proviene de las cercanías de la persona), procesar la misma y controlar su acción.

Al realizar una tarea o actividad, inevitablemente los operadores humanos asignan permanentemente sus recursos de atención tanto a la tarea o actividad en sí denominada actividad primaria, como a otras actividades no concernientes a la tarea denominadas actividades secundarias.

Los operadores humanos se pueden distraer por una actividad o evento en la medida que ellos no asignan suficiente atención a la tarea primaria comprometiendo el rendimiento del sistema. En este sentido, la distracción del hombre resulta cuando el mismo no puede dividir adecuadamente su atención entre las tareas primarias y las tareas secundarias manteniendo un satisfactorio nivel de rendimiento del sistema [114] [115].

La distracción puede ocurrir porque la tarea secundaria es demasiado compleja o consume mucho tiempo en cuyo caso los usuarios podrían fallar en asignar (o priorizar) suficiente atención a las actividades primarias o porque las demandas de la tarea principal son tan altas que ellas no permiten un rendimiento aceptable si una tarea secundaria es realizada por el usuario en algún momento.

La distracción del operador humano se clasifica en distracción visual y distracción cognitiva. Es decir que un operador humano puede tener en un determinado momento un cierto nivel de distracción visual, de distracción cognitiva o de ambas (denominada distracción combinada). Un ejemplo típico de distracción visual es el caso de un conductor de automóvil que desvía su mirada del camino cuando conduce debido a alguna causa externa que lo distrajo como una publicidad al costado del camino. Por otro lado, un ejemplo en la distracción cognitiva de un conductor es cuando la persona no desvía necesariamente la mirada pero está pensado en otra cosa, descuidando así por distracción su actividad principal (conducir el vehículo).

La distracción tiene una gran importancia en muchas áreas como por ejemplo en seguridad vial donde la falta de atención del conductor (distracción) contribuye alrededor del 25 por ciento en los choques de automóviles (datos estimados por la *National Highway Trace Safety Administration*, NHTSA).

En general, los métodos para computar la distracción visual y la distracción cognitiva pueden utilizar el estado del operador humano (como por ejemplo la dirección de la mirada), el estado de la interfaz (por ejemplo la posición angular de un joystick o volante manejado por el usuario para generar comandos) y el

estado de la máquina-entorno (como por ejemplo la velocidad de la máquina y la posición de los objetos de su entorno), como se ilustra en la figura 7.4.

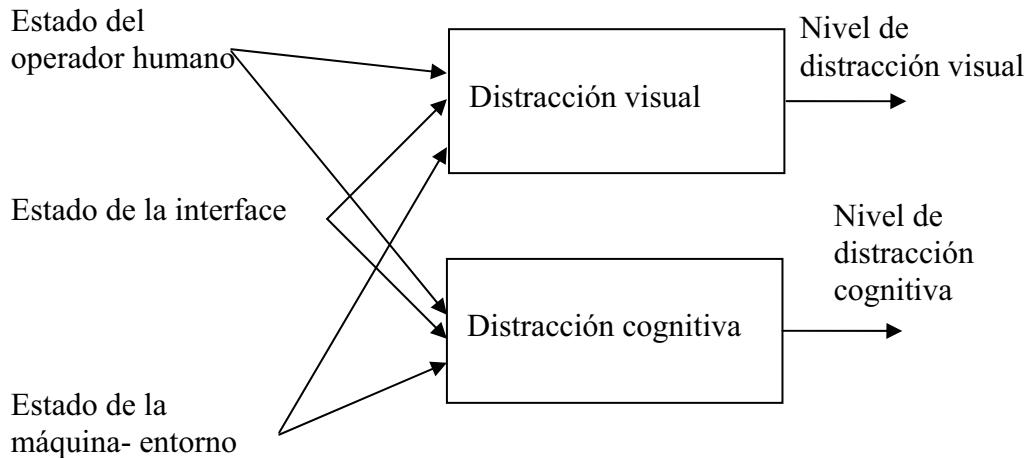


Figura 7.4. Computo de distracción visual y distracción cognitiva.

Por ejemplo, en el caso de un conductor manejando un automóvil, se utilizan principalmente para detectar la distracción del conductor la información acerca de su mirada (estado del hombre), la posición del automóvil dentro de su vía de avance (estado de la máquina-entorno), y el movimiento del volante (estado de la interfaz). La tabla 7.2 muestra los efectos sobre la mirada del conductor, la posición del automóvil respecto al centro de su vía de avance y en los comandos generados por un conductor para controlar la dirección del vehículo a través del volante, provocados por la distracción visual y la distracción cognitiva.

Los métodos para medir la distracción visual son numerosos pero en general se basan en el análisis del seguimiento de la dirección de la mirada. Por ejemplo en el caso de un hombre manejando un automóvil, la estima de la distracción visual informa el grado de compatibilidad entre la dirección actual de vista del conductor y el camino. Es decir, en este ejemplo el nivel de distracción visual puede de alguna forma cuantificarse a partir de la evolución de la dirección de la mirada respecto al camino.

	<b>Distacción visual</b>	<b>Distacción cognitiva</b>
Mirada	Alta frecuencia de miradas hacia fuera del camino, alto porcentaje de tiempo mirando hacia fuera del camino y bajo porcentaje de mirada hacia el centro del camino.	Mirada fija hacia una dirección en un intervalo grande de tiempo. Generalmente hacia el centro del camino
Posición sobre la vía de avance	Grandes variaciones de la posición del vehículo	Variaciones pequeñas o insignificantes de la posición del vehículo
Control del volante	Grandes magnitudes de corrección (por ejemplo mayores que 5°).	Pequeñas magnitudes de corrección (por ejemplo menores a 3°).

Tabla 7.2. Efectos de la distracción visual y cognitiva sobre el comportamiento del conductor.

La figura 7.5 ilustra un conductor visualmente atento y un conductor con distracción visual. Por otro lado, la distracción cognitiva resulta en efectos sutiles, inconscientes y relativamente extensos sobre el comportamiento del usuario. Su detección generalmente requiere integrar varias fuentes de información. En el ejemplo del conductor de un automóvil, la detección de la distracción cognitiva generalmente integra mediciones de la mirada del conductor y mediciones del desempeño del manejo (por ejemplo distancia de un vehículo hasta el centro de su carril de avance) considerando los cambios

de ambas señales respecto a un patrón pre-establecido de manejo normal en un plazo relativamente largo de tiempo, tal como varios segundos.

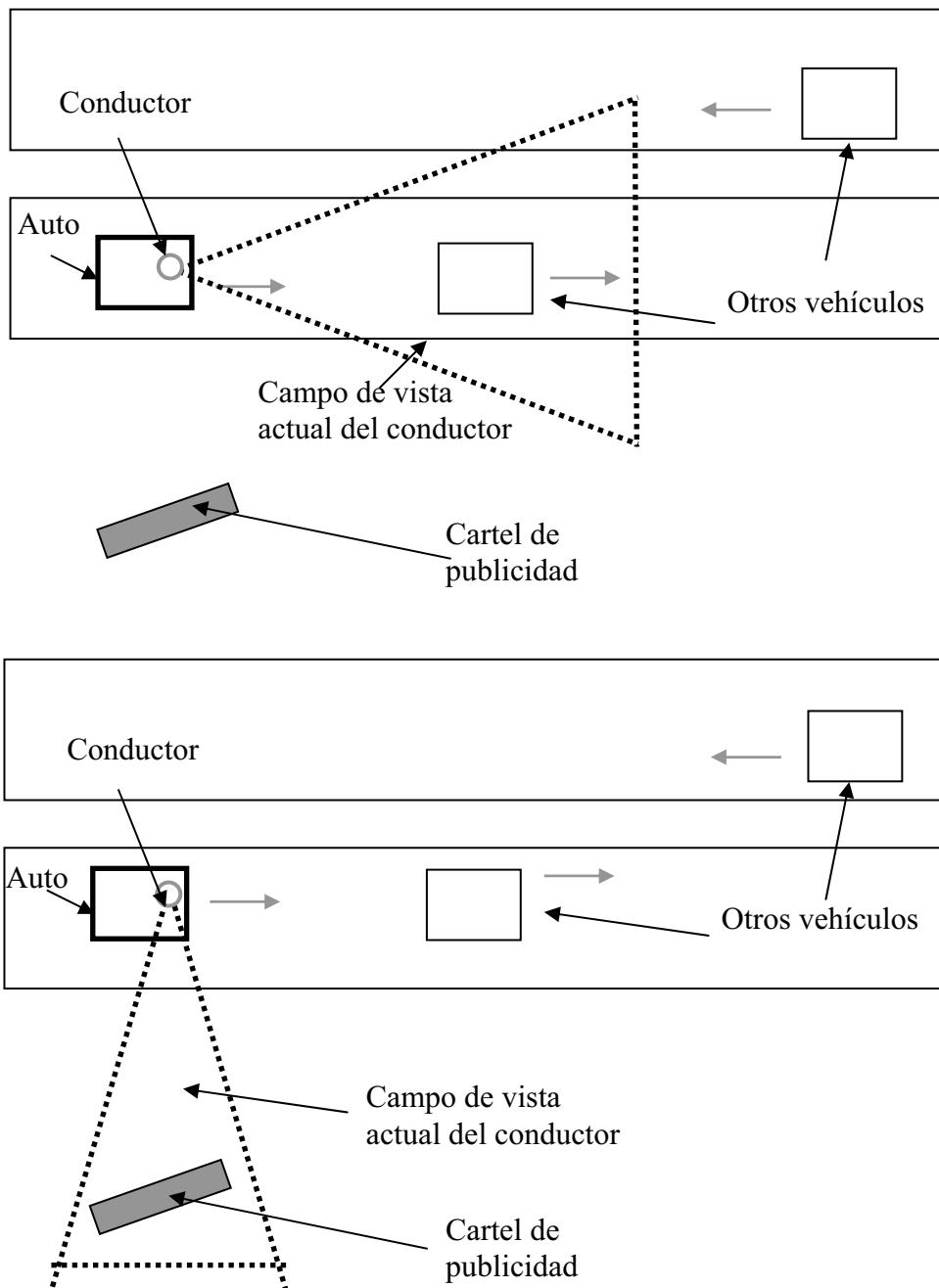


Figura 7.5. Conductor visualmente atento (arriba) y conductor con distracción visual (abajo).

## 7.6 Modelos mentales

Un modelo mental es una representación cognitiva que cada individuo posee internamente de cómo un sistema opera y trabaja. Los modelos mentales permiten a los individuos describir, explicar y predecir las operaciones de un sistema.

Los estudios hechos en psicología aceptan la idea respecto a que los modelos mentales permiten a los individuos hacer inferencias y predicciones para comprender fenómenos, decidir que acción tomar, y controlar su ejecución.

Los principales trabajos en esta temática [36] [46] [87] proporcionan una descripción de modelos mentales basada en tres funciones, como se ilustra en la figura 7.6.

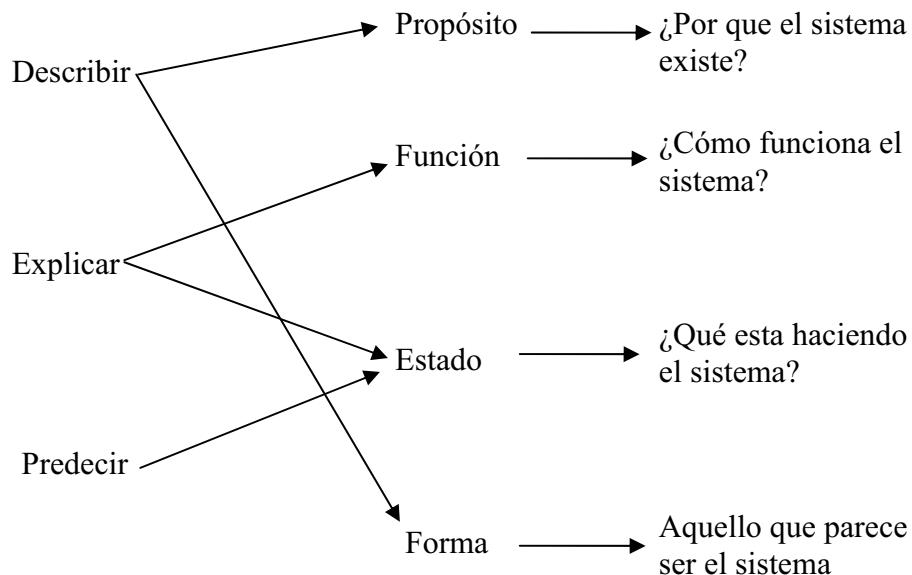


Figura 7.6. Naturaleza de modelos mentales.

El modelo representado en la figura 7.6 posee una función de descripción la cual esta relacionada al conocimiento de una persona del propósito y descripción del sistema, y una función de la operación del sistema y su estado

actual. Además, el modelo dispone de una función de predicción que se relaciona con la capacidad de una persona para formar sus expectativas acerca de las operaciones y estados futuros del sistema.

Varios estudios examinan como los modelos mentales afectan el rendimiento de un equipo trabajando en sistemas complejos. Entonces si las componentes descriptiva, explicativa y predictiva de los modelos mentales se pueden aplicar a las interacciones de compañeros de un equipo humano, entonces dichas componentes deberían aplicarse también cuando un compañero de equipo es en realidad una parte automatizada. En este contexto, la investigación actual usa el concepto de modelo mental como una comprensión de que roles cada miembro del equipo (en este caso, el operador humano y la ayuda automatizada) cumplirá en la ejecución de una tarea, y como el rendimiento de uno afecta el rendimiento del otro.

Dentro del ámbito de sistemas hombre-máquina, la pregunta que se debe analizar respecto a un modelo mental es la siguiente: ¿De que depende el modelo mental de una persona o dicho de otra forma en base a que sucesos se forma el modelo mental de cada usuario?...

El modelo mental de una persona se considera que varía lentamente y que se desarrolla con el transcurso del tiempo en base a su experiencia personal y al nivel de capacitación del mismo. Se remarca que el nivel de capacitación no es necesariamente estático sino que el usuario puede adquirir frecuentemente una cierta capacitación en el sistema. La figura 7.7 ilustra gráficamente las entradas y salidas de un modelo mental dentro del contexto de sistemas hombre-máquina.

Una principal característica de los sistemas autónomos es la complejidad. Diseñadores e ingenieros de sistemas de control han desarrollado sistemas autónomos con una gran cantidad de componentes los cuales a su vez interactúan entre sí, lo cual hace que la comprensión de todos los efectos posibles sea muy difícil de entender por los operadores humanos. La falta de comprensión surge debido a una diferencia entre el modelo mental del hombre

y los comportamientos del sistema autónomo de acuerdo a como ha sido programado por el diseñador. Por lo tanto, muchos estudios reconocen que un modelo mental inválido o erróneo es una posible causa del error humano en sistemas hombre-máquina.

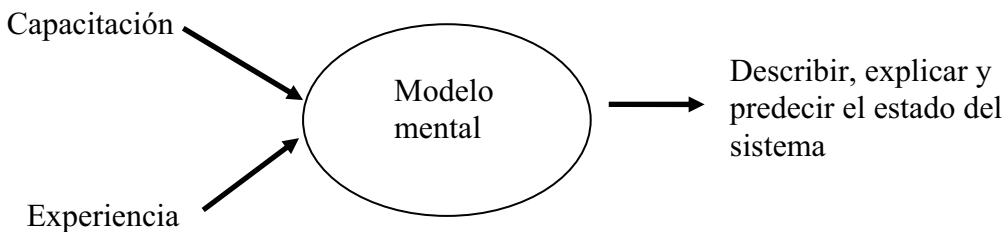


Figura 7.7. Modelo mental del hombre acerca de un sistema.

Por otro lado, las denominadas “sorpresas de la automatización” [77] son situaciones donde los sistemas autónomos actúan en algún modo fuera de las expectativas de sus operadores humanos. Se pueden medir mejor las expectativas del usuario acerca de un sistema automatizado a través de medidas subjetivas mientras mas objetivamente se miden las cualidades del sistema en el que un operador basa sus juicios y expectativas.

El estudio de modelos mentales sugiere que hay diferencia de comportamiento entre gente que tiene poca, exacta o inexacta información y capacitación acerca del funcionamiento del sistema automatizado. Por lo tanto, un mejor conocimiento del operador de cómo la automatización trabaja ayudará a mejorar el modelo mental del hombre y por ende colaborará en elevar el rendimiento de un sistema dado. Es decir, se recomienda proporcionar a los operadores humanos una capacitación no solamente de qué hace un sistema automatizado sino también de cómo la automatización trabaja entrenando a ellos en el uso de la misma. Este concepto indica que sistemas más avanzados de automatización no implican operarios menos especializados sino por el

contrario, involucran *sistemas hombre máquina inteligente* con operarios más especializados y con mejor capacitación y formación.

## 7.7 Confianza del operador humano

Los operadores humanos no siempre utilizan los sistemas automatizados en los modos destinados o pensados por los diseñadores. Un factor importante es la confianza, la cual hace alusión a un estado cognitivo de cada usuario que normalmente influye en la actual dependencia del mismo (en comportamiento) en la automatización [45] [51] [52].

La confianza del hombre respecto a una máquina se refiere al grado en que un usuario tiene confianza en las recomendaciones, acciones y decisiones brindadas por un sistema artificialmente inteligente y por lo tanto, en qué medida él estaría dispuesto a actuar en base a las mismas.

¿La confianza en un sistema automatizado depende de cada persona?...

El nivel de confianza (actitud) provoca efectos sobre el accionar del operador humano que en mayor o menor medida afectan el rendimiento del sistema hombre-máquina. Dichos efectos van más allá de las características de la automatización en sí misma pero de alguna manera están relacionadas con ella [63] [64] [65].

Uno de los efectos de la confianza se denomina “dependencia” del operador humano en la automatización [53]. Generalmente, los sistemas automáticos son altamente confiables, lo cual sumado a su frecuente baja transparencia (el usuario generalmente no conoce cómo funciona internamente) y complejidad, puede llevar a los operadores a confiar incuestionablemente en la automatización. En este caso, el operador humano tiene una alta tendencia hacia la automatización denominada dependencia, lo cual se ve reflejado en que el operador humano acepta irreprochablemente los consejos y acciones de la automatización aún cuando ésta pueda cometer errores.

Muchos estudios enfatizan que la dependencia es un comportamiento y por lo tanto, la misma es cuantificable debido a que los comportamientos pueden ser observados. Por el contrario, la confianza no es cuantificable porque las actitudes no se pueden medir. Así, se podrían obtener medidas objetivas de dependencia y medidas subjetivas de confianza.

Por ejemplo, en el caso de un piloto de avión que puede decidir cuánto tiempo tiene activado el control denominado piloto automático y cuánto tiempo utiliza el control manual. Este comportamiento relacionado a dependencia se puede medir. Siguiendo con este caso, la confianza del usuario en el piloto automático podría cuantificarse a partir de las respuestas subjetivas del piloto ante un cuestionario adecuado que podría extraer las actitudes en cuanto al nivel de confianza que el piloto tuvo durante determinadas situaciones en un vuelo. Las respuestas ante un cuestionario dependen de cada piloto y poseen cierto grado de subjetividad y por lo tanto en la práctica, se realiza un cuestionario a una gran cantidad de pilotos de forma de obtener un nivel de confianza promedio para un sistema en particular. La figura 7.8 ilustra la obtención de la confianza y la dependencia del operador humano respecto a la automatización de un sistema dado.

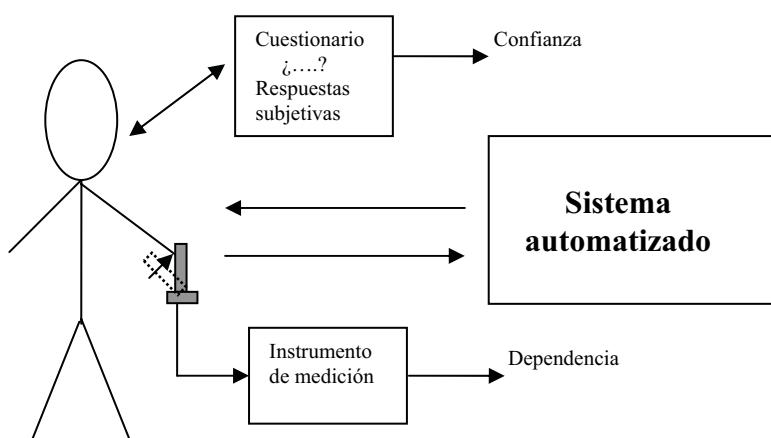


Figura 7.8. Cuantificación de confianza y dependencia en la automatización.

Por otro lado, un exceso de confianza en la automatización que en la práctica como cualquier sistema no funciona siempre perfecto, también puede llevar hacia una falta de seguimiento de las fuentes de información suministradas por el sistema automatizado proporcionando un abuso de la automatización, denominada complacencia del usuario [60] [71]. Este efecto se ve reflejado en un inapropiado monitoreo de las funciones automatizadas lo cual directamente implica el riesgo de perder o no ver posibles fallas de la automatización y por lo tanto no actuar rápidamente ante una situación imprevista o problema de funcionamiento del sistema automatizado [56] [59], como se ilustra en la figura 7.9.

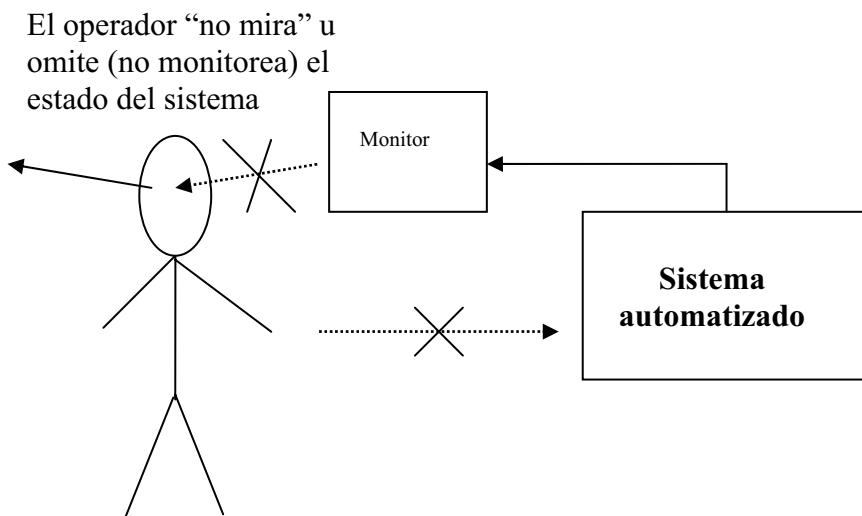


Figura 7.9. Complacencia del usuario.

El rendimiento de un sistema hombre-máquina es afectado por la forma que el usuario monitorea y percibe las funciones automatizadas. En este caso, la decisión más importante que el diseñador debe tomar es establecer el umbral de una señal de alerta, lo cual resulta en una relación de compromiso entre dos clases de errores de la automatización: omisiones de errores o peligros (umbral no sensible) y falsas alarmas (umbral sensible) [54] [57].

Esto presenta un dilema para los diseñadores en cuanto a como fijar el umbral de señales de alerta. Los diseñadores a menudo establecen el mismo en

valores demasiado sensibles ya que las consecuencias de una omisión de la automatización producen mayores costos que una falsa alarma. Sin embargo, una frecuencia de falsas alarmas elevada comparada a la frecuencia de eventos reales peligrosos puede ocasionar que el operador humano ignore muchas de ellas y que en términos generales realice un inadecuado o pobre monitoreo del sistema automatizado. Por ejemplo, la tasa alta de alarmas sobre el pronóstico de posibles catástrofes, donde la tasa de falsas alarmas para la previsión de tornados es tan alta como 75%, pero esta característica es preferible respecto a una posible omisión. La figura 7.10 ilustra el establecimiento de un umbral sensible o poco sensible en un sistema de alerta a un conductor de automóvil sobre un posible peligro.

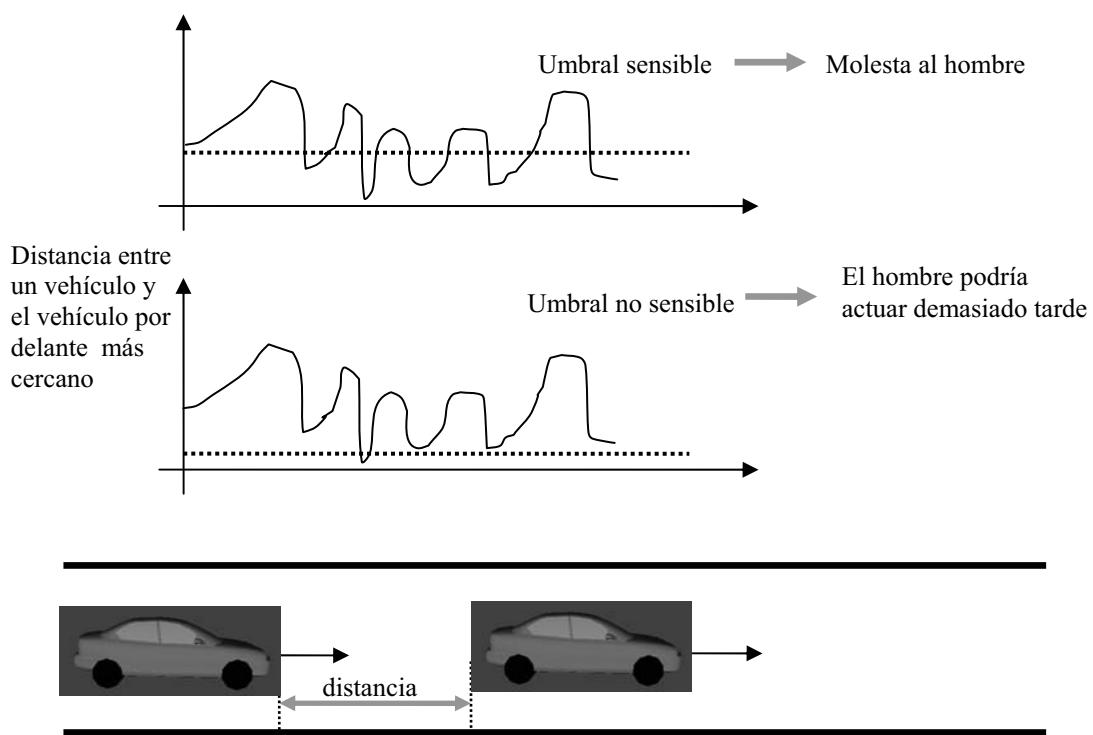


Figura 7.10. Ejemplo del umbral establecido para alertar a un conductor de la distancia al vehículo por delante más cercano.

Por lo tanto, la decisión de establecer umbrales sensibles de alerta debe ser analizada cuidadosamente ya que la dependencia y la complacencia son afectadas por la misma. No hay una única alternativa al problema de establecer

el valor del umbral en un sistema de alerta. Posibles soluciones incluyen capacitación de operadores ante inevitables falsas alarmas, usar visualizaciones que proporcionen niveles intermedios basados en probabilidades y predicciones, y proporcionar un acceso más fácil a los datos de forma que la confiabilidad de la alerta puede ser verificada de manera rápida y natural por el hombre.

En algunos casos, un sistema automatizado puede interpretarse como una caja negra en el sentido que el operador humano no conoce cómo funciona y razona, sino solamente lo que hace. Además, el sistema automatizado podría ser pobremente monitoreado por el operador humano debido a un excesivo nivel de confianza, como se ilustra en la figura 7.11. Se remarca que el nivel de confianza en un sistema automatizado dado es diferente para cada operador humano. Esta actitud permisiva del hombre respecto al control de un sistema se puede considerar adecuada si la máquina aunque sea automatizada tiene una relación pasiva con el operador humano pero en cambio, esto no es aconsejable si la interacción en cuanto al control entre el sistema automatizado y el hombre es activa o al menos debería serlo, como por ejemplo la relación entre un piloto humano y el auto-piloto automático de un avión de transporte de pasajeros. Por otro lado, es recomendable que el operador humano supervise adecuadamente el funcionamiento del sistema automatizado.

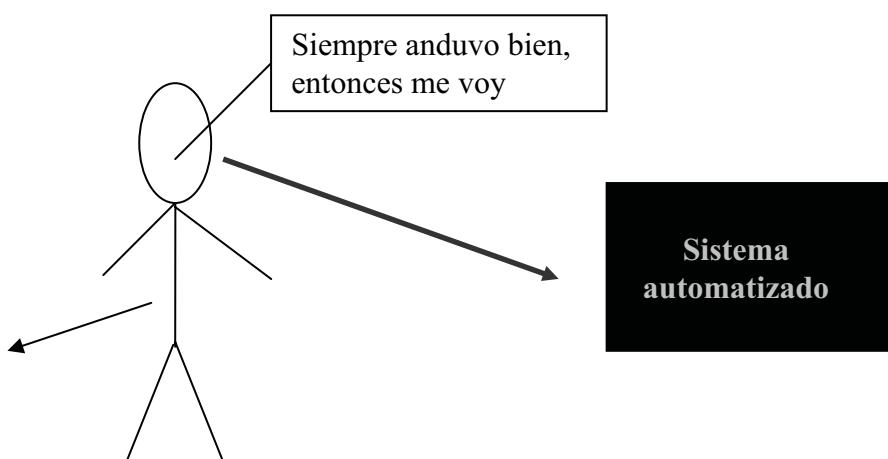


Figura 7.11. Ilustración de un sistema automatizado visto por el usuario como una “caja negra” y su posible sobre-confianza.

¿La confianza y el modelo mental de una persona respecto a un sistema automatizado tienen alguna relación?...

El modelo mental que posee una persona acerca de un determinado sistema automatizado indudablemente afecta el nivel de confianza que un operador humano posee respecto a dicho sistema. Además, la evolución del modelo mental de una persona con su experiencia lleva a un nivel de confianza más representativo de un sistema automatizado en particular y refleja el nivel de aceptación del operador de la automatización y el rechazo en situaciones en las cuales la automatización no es al menos en la práctica confiable para él.

Aunque un operador tiene un modelo mental tanto del sistema como del comportamiento de la automatización en una situación en particular, e incluso interactuando el sistema con su entorno, su confianza depende de otros factores tales como el tipo y la frecuencia de las fallas de la automatización experimentado por cada usuario, como se ilustra en la figura 7.12. Además, en la medida que aparecen imperfecciones y fallas de la automatización, una pérdida generalizada del nivel de confianza en el sistema automatizado puede ser producido sobre todo si el usuario posee un inadecuado nivel de capacitación. Es decir, el usuario puede perder su confianza en el sistema en forma general mas allá de la situación particular en la cual falló el sistema o no funciono como se pretendía.

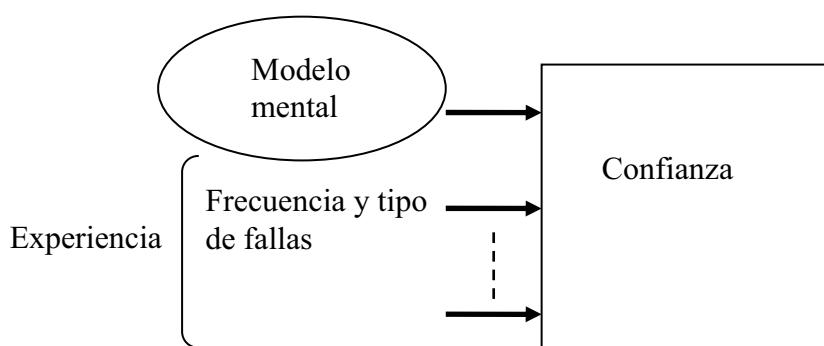


Figura 7.12. Confianza y modelo mental.

El uso humano de la automatización depende de su confianza en ella. Si la confianza del operador en su propia capacidad para controlar el sistema es mayor que la confianza en la automatización, ellos tienden a no usarla. Cuando lo opuesto es cierto, ellos tienden a usar la automatización. La figura 7.13 ilustra que el uso de la automatización es afectado por la confianza relativa, la cual depende de la confiabilidad percibida del usuario en la automatización, de la confiabilidad percibida del usuario en el control manual, y de la utilidad percibida del rendimiento cuando se utiliza un sistema automatizado y cuando se emplea control manual. Es decir que la percepción del operador acerca de la utilidad de la automatización conduce a la confianza relativa en la automatización, y entonces al uso de la misma. Algunos trabajos sugieren que la confianza del operador es más probable que la utilidad percibida de sufrir como resultado de una falta de comprensión de cómo funciona la automatización.

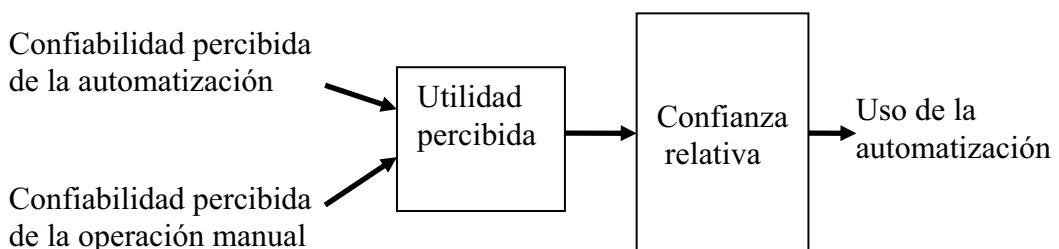


Figura 7.13. Proceso cognitivo del uso de la automatización basado en la confianza relativa y utilidad percibida.

El concepto de confianza en la automatización proporciona una sólida base con respecto a cómo la gente siente y piensa acerca de la automatización y cómo las personas se comportan frente a la misma. Algunos trabajos sugieren que el hombre va cambiando su confianza hacia un nivel garantizado por el rendimiento de la máquina. Otros estudios, en cambio, aconsejan focalizar el diseño hacia una confianza apropiada y no hacia una elevada confianza cuando se desarrollan los sistemas autónomos. Todo esto se ve reflejado en

que el rendimiento de los sistemas hombre-máquina podría ser mejorado si se forma a los operadores en cómo interpretar las posibles fallas de la automatización de forma de mantener un nivel beneficioso de confianza en el sistema [91]. Otro factor a tener en cuenta es que el operador humano muchas veces monitorea deficientemente el sistema automatizado si tiene alguna tarea manual secundaria que realizar.

Por otra parte, un modelo mental adecuado desarrollado a partir de una buena capacitación de los operarios ayudará en mantener un nivel de confianza adecuada del hombre en la automatización.

## **7.8 Conocimiento de la situación**

Uno de los factores humanos más relevantes en sistemas hombre-máquina se denomina “conocimiento de la situación”. Las investigaciones científicas [39] [40] [41] definen conocimiento de la situación de manera informal e intuitiva como "conocer qué está pasando" y más formalmente como "la percepción del conjunto de elementos en el entorno dentro de un volumen de tiempo y espacio, la comprensión de su significado y la proyección de su estado en el futuro próximo".

El conocimiento de la situación se puede dividir en tres niveles clasificados como: percepción, comprensión y proyección. Los niveles mayores dependen del éxito de los niveles menores. Así, una persona que supervisa el tráfico aéreo de aviones puede notar primero un cambio en la trayectoria de un avión en particular (o el inicio de una alerta de conflicto), entonces comprende que dicho avión se encuentra en una trayectoria convergente (lateral o vertical), y, finalmente, entiende cuando, en el futuro, un conflicto puede tener lugar y de lo grave que puede ser. La distinción entre estos tres niveles es importante, no sólo porque ellos apuntan a diferentes operaciones de percepción-cognición, sino también debido a que fallas en cada uno podrían estar vinculadas a diferentes formas para solucionar las mismas. Por ejemplo, una falla en el nivel de percepción podría llevar a la elaboración de mejores alertas, mientras que

una falla en el nivel de proyección podría conducir a la incorporación de pantallas predictivas.

¿Que diferencia existe entre un modelo mental y el conocimiento de la situación?...

La investigación científica sobre el conocimiento de la situación (*situation awareness* en inglés) sostiene que un modelo mental es general mientras que el conocimiento de la situación es específico a las circunstancias que uno encuentra segundo a segundo. Es decir el conocimiento de la situación depende de la percepción actual del usuario frente a situaciones o cambios instantáneos, mientras que el modelo mental depende de la concepción general del operador sobre el funcionamiento del sistema. Por ejemplo, el modelo mental es útil para conocer cómo se maneja un automóvil en términos generales mientras que el conocimiento de la situación es importante en el manejo de un automóvil en cada instante, por ejemplo ante una ocasión imprevista tal como la presencia repentina de animales en la ruta.

Entonces, el modelo mental de una persona consiste en componentes relativamente estáticos que se desarrollan con el tiempo y la experiencia, mientras que el conocimiento de la situación es más dinámico y aporta información para el modelo mental, desarrollándose el mismo todo el tiempo, como se ilustra en el esquema de la Figura 7.14. Por otra parte, varios trabajos remarcan que el conocimiento de la situación no es una acción o rendimiento y por lo tanto se debe cuantificar subjetivamente.

A partir del punto de vista científico sobre los modelos mentales, se infiere que ellos modifican y también son cambiados por el conocimiento de la situación (SA). Si el conocimiento de la situación es dinámico y cambiante, entonces los modelos mentales deben tener cualidades similares. Los modelos mentales no cambian tan frecuentemente como la comprensión segundo a segundo de la persona de una situación actual, sino que el modelo mental de una persona cambia y se desarrolla con la experiencia.

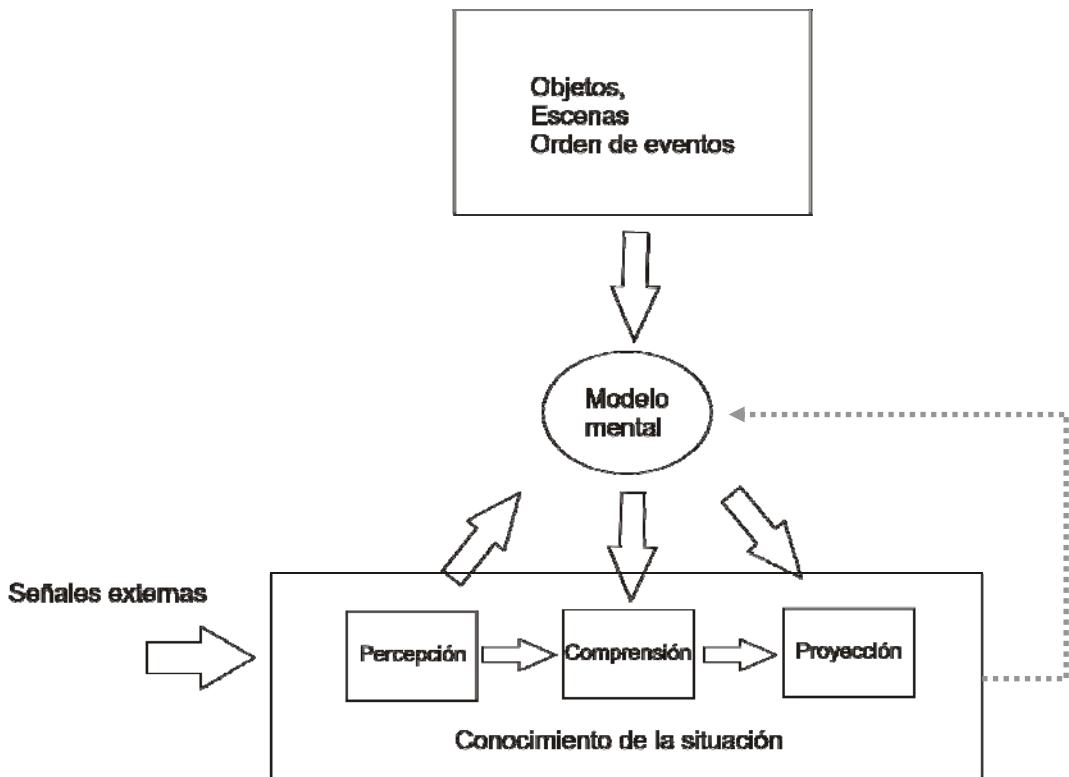


Figura 7.14. Modelo de conocimiento de la situación y modelo mental.

Por otro lado, el conocimiento de la situación puede ser medido utilizando alguna técnica, tal como la denominada SAGAT [35] (por su significado en inglés *Situation Awareness Global Assessment Technique*). SAGAT es una herramienta desarrollada para evaluar el conocimiento de la situación basado en una evaluación comprensiva del operador. Utilizando un simulador del sistema de interés, los operadores son consultados en forma aleatoria acerca de cómo es su percepción de la situación en dicho momento. En ese instante la simulación es detenida y la visualización de la misma se borra esperando una respuesta rápida del operador ante una consulta acerca de su percepción actual de la situación, lo cual involucra preguntas sobre la percepción de datos, sobre la comprensión del significado, y sobre la proyección en el futuro cercano considerando tanto el funcionamiento actual de la máquina como así también las características relevantes del entorno.

## **7.9 Carga física y mental de trabajo**

La carga física y mental de trabajo se puede describir como la relación entre la función que relaciona los recursos físicos y mentales demandados por una tarea y aquellos recursos disponibles para ser suministrados por el operador humano.

La carga de trabajo del hombre se refiere a la energía física y cognitiva, y a la energía consumida para prestar atención que el mismo debe emplear para utilizar un sistema dado [89].

¿Se puede medir objetivamente la carga mental de trabajo de un operador humano? ...

Existen varios métodos que se utilizan para medir subjetivamente la carga mental de trabajo. El método más utilizado se denomina *NASA- Task Load IndeX* [89] (NASA-TLX), debido a que este método se diseñó intentando minimizar la gran variabilidad que suelen tener las cuantificaciones basadas en índices subjetivos debido a la gran diversidad generalmente encontrada entre diferentes operadores humanos. En los últimos años, surgieron numerosos estudios que asocian la carga mental de trabajo con señales fisiológicas tales como medidas cardiovasculares, respiratorias y cerebrales de forma de obtener en línea indicadores del nivel de carga mental del usuario [95].

¿Se puede tener en cuenta de alguna forma la carga mental en el diseño de sistemas hombre-máquina? ...

Los sistemas automatizados podrían ser inapropiados cuando ellos interrumpen al hombre durante una alta carga mental o alta criticidad, o cuando adicionan nuevas cargas mentales en dichas situaciones.

En general, los trabajos científicos han mostrado que las medidas subjetivas de carga mental de trabajo disminuyen a medida que el nivel de automatización del sistema aumenta [48]. Por otro lado, una demasiada baja carga mental

puede producir una distracción del operador respecto a la tarea o actividad primaria realizada por el sistema automatizado destinando tiempo hacia actividades secundarias. Por ejemplo, en el diseño de un camino se prioriza obtener el recorrido más corto entre dos ubicaciones dadas. Suponga que tiene 1000 kilómetros que separan dos ciudades y existe la posibilidad de un camino recto entre las mismas, en este caso nadie objetará esta solución. Pero un recorrido tan largo en línea recta ocasiona muy baja carga mental al conductor, lo cual podría producir distracciones del mismo o incluso que el conductor se quede dormido, elevando peligrosamente la probabilidad de accidentes tal como choques frontales o vuelcos.

Aunque a priori un sistema automatizado indirectamente busca minimizar la carga física y mental de un operador humano para realizar un trabajo dado, la satisfacción del hombre de hacer un trabajo se debería tener en cuenta de alguna manera de forma de obtener sistemas que tengan alto rendimiento y que sean de alguna manera amenos y confortables para el hombre.

## **7.10 Neuro-ergonomía**

La neuro-ergonomía se define como el estudio en conjunto del cerebro y del comportamiento humano en el trabajo [75]. La misma se centra en las investigaciones de las funciones mentales y el rendimiento físico desde un punto de vista de funcionamiento interno del cerebro en actividades del hombre en relación con la tecnología, trabajo, ocio, transporte, atención médica y demás actividades en el mundo real. Los dos objetivos principales de la neuro-ergonomía son el uso del conocimiento de la función cerebral y el rendimiento humano en el diseño de sistemas hombre-máquina de forma de obtener sistemas más seguros y eficientes.

Esta área comprende la neurociencia y la ergonomía. La neurociencia es el estudio de la estructura y función del cerebro, mientras que la ergonomía (también conocida como factores humanos), examina el uso humano de la tecnología en el trabajo y en otros entornos del mundo real. En la intersección de estos dos campos, surge la neuro-ergonomía.

Es decir, la ergonomía se enfoca en las investigaciones de las funciones cerebrales perceptivas y cognitivas (tales como ver, escuchar, atender, recordar, decidir) y debido a que el cerebro humano interactúa con el mundo a través de un cuerpo físico, también la neuro-ergonomía se relaciona con la base neuronal del rendimiento físico (tal como agarrar, mover o levantar los objetos).

Así como el hombre diseña y desarrolla la tecnología y utiliza la misma, entonces los diseños de sistemas hombre-máquina pueden ser considerablemente enriquecidos si se considera de alguna manera el funcionamiento del cerebro humano que hace tal actividad posible.

### **7.11 Otros factores humanos**

Indudablemente los factores humanos sustentados por una base conceptual y experimental que afectan el uso de la automatización y son cambiados por la misma no es un tema cerrado.

Por ejemplo el confort y satisfacción del usuario ante una nueva interfaz de un sistema hombre-máquina es subjetiva y por lo tanto depende de cada usuario. Dichos factores afectan el uso del sistema automatizado. Por ejemplo el uso de un pedal acelerador y/ freno con realimentación de fuerza (controlada en base al estado del entorno respecto al vehículo) hacia el pie de un conductor de un vehículo podría ser de utilidad para algunas personas y ser molesto para otras.

Otro factor humano que se desea detectar es el estado emocional del hombre [121] en base a sus cambios de voz y gestos faciales [125]. Por ejemplo, esta característica del hombre podría ser utilizada para prevenir malos comandos en caso de un estado emocional inadecuado para la tarea que se desea realizar.

Por otra parte, existen numerosos trabajos que buscan detectar las intenciones del hombre para ser utilizadas en un control amigable de sistemas hombre-máquina, en el sentido que la parte automatizada colabore con el hombre para cumplir dicha intención en caso que la misma no involucre un peligro o riesgo

para el usuario pero de una manera más eficiente al aprovechar la velocidad, precisión y exactitud de los sistemas automáticos. Por ejemplo, en base a la medición en un vehículo del movimiento de manos y pies del conductor se podría inferir que el mismo desea detenerse en la banquina del camino.

Otro tema complejo es el estudio de los errores del hombre y las causas que lo originan yendo más allá de las causas típicas como distracción, fatiga, y alta carga mental de trabajo, entre otras. Por ejemplo, el caso de un conductor que se encuentra atento pero realiza una inadecuada maniobra.

## 7.12 Síntesis del capítulo

Aunque el estudio del comportamiento del hombre es un tema abierto, el conocimiento actual debe ser tenido en cuenta de alguna manera en el diseño de *sistemas hombre máquina inteligente* ya que los factores humanos afectan la aceptación social de estos sistemas en la práctica tanto como el rendimiento de dichos sistemas de manera indirecta a través de la forma de uso de los mismos. Es decir, los sistemas hombre-máquina no solamente deben diseñarse desde un punto de vista del rendimiento de una máquina y el conocimiento del sistema tal como se hace en el control de sistemas automáticos, sino que se debe considerar también los factores humanos y la calidad de vida percibida por el hombre.

La interrelación entre la automatización y el hombre afecta al uso, mal uso, y desuso de la automatización por parte del operador humano. Además, el desconocimiento de los factores humanos podría causar un abuso de un diseñador de *sistemas hombre máquina inteligente* en el sentido de automatizar algunas partes del sistema que no deberían ser automatizadas o asignar un nivel de automatización demasiado elevado a cierta tarea considerando solamente un criterio tecnológico y de costo.

La figura 7.15 ilustra los factores humanos descriptos en este capítulo. En *sistemas hombre máquina inteligente*, debería existir un equilibrio entre los

distintos factores humanos y la automatización respecto a que actividades automatizar y en que medida. Así, los factores humanos deberían ser utilizados de algún modo por los diseñadores de estos sistemas y deben ser tenidos en cuenta en metodologías de capacitación permanente de operarios de sistemas inteligentes ya que a medida que se incrementa el nivel de automatización se requiere un mayor nivel de formación de los usuarios.

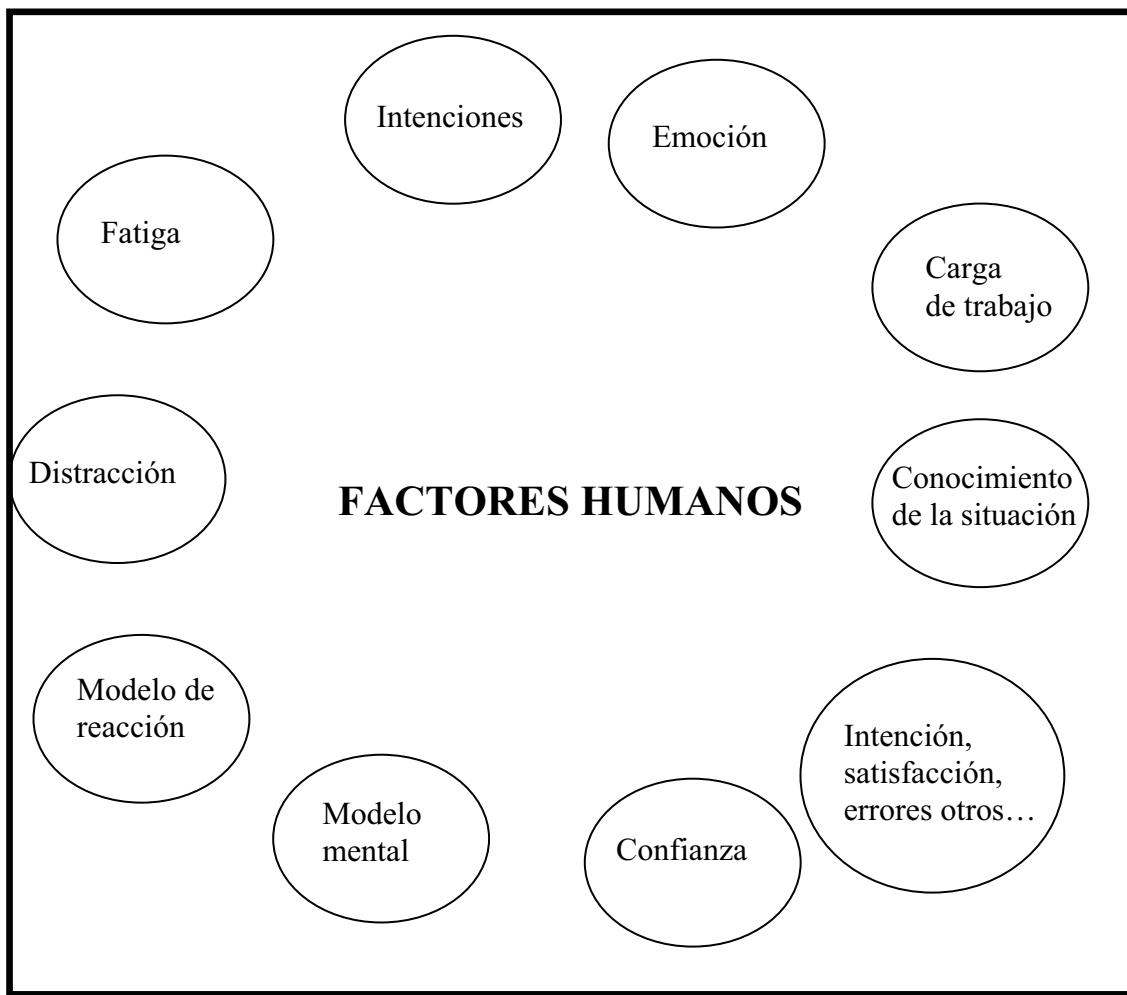


Figura 7.15. Factores humanos.



# *Capítulo 8*

*Control de sistemas*

*hombre-máquina*



## **Capítulo 8**

### **Control de sistemas hombre-máquina**

Este capítulo tiene como objetivo transmitir al lector los conceptos relacionados al diseño de los sistemas de control hombre-máquina y sus interfaces, no desde un punto de vista de formar un ingeniero de diseño, aunque los conceptos pueden servir de base para este objetivo, sino como ayuda constructiva para comprender de un mejor modo los sistemas donde el hombre y un sistema automatizado interactúen activamente entre si, ya que la introducción cada vez mayor de sistemas automatizados inteligentes a pesar que puede disminuir la carga física y también cognitiva en el trabajo requiere a su vez una mayor capacitación y formación de las personas para un uso adecuado en la práctica de estos sistemas.

#### **8.1 Introducción**

Tal vez, no hay ninguna faceta de la sociedad donde no se halla sentido la influencia de la tecnología y la automatización. La automatización puede ser vista como el proceso de asignar a una máquina actividades para realizar [88]. En este sentido, es conocido que la automatización puede ocasionar muchos beneficios tales como una mayor seguridad, una menor carga física y mental de trabajo, una mayor precisión y velocidad, y ser productiva las 24 horas del día sin descanso, entre otras ventajas de su uso. Pero así también, la misma puede presentar algunos problemas especialmente desde el punto de vista de la interrelación del hombre con la tecnología [82] [83] [96]. Es decir, que en paralelo al progreso tecnológico, los factores humanos también deben ser analizados continuamente de manera de obtener un crecimiento no solamente

desde el punto de vista económico y de rendimiento sino y sobre todo, respecto a la calidad de vida del ser humano.

A continuación se presentan los conceptos utilizados para el control de sistemas hombre-máquina que sintetizan el gran conocimiento científico actual, donde se remarca principalmente la diferencia que existe entre el control de un sistema completamente automatizado y el control de un *sistema hombre-máquina inteligente* donde los factores humanos deben ser tenidos en cuenta para que dichos sistemas funcionen bien en la práctica y sean aceptados por la sociedad.

## 8.2 Niveles y tareas de la automatización

Una de las tareas mas difíciles que se debe tomar en el diseño de un *sistema hombre-máquina inteligente* es decidir el nivel de automatización que debería tener el sistema para que funcione bien en la práctica. En la literatura clásica de sistemas hombre-máquina se presentan diez niveles para describir conceptualmente diferentes niveles de automatización. Aunque en la práctica existan muchas más posibilidades, dicha clasificación de niveles brinda una primera aproximación de lo que podría hacer un sistema automatizado desde no hacer nada hasta hacer todo el trabajo en forma independiente. Los niveles clásicos de automatización son los siguientes [67] [74] [90]:

1. La automatización no ofrece asistencia; el hombre debe hacer todo.
2. La automatización sugiere maneras alternativas para hacer la tarea.
3. La automatización selecciona un manera para hacer la tarea y,
4. ejecuta tal sugerencia si el hombre aprueba la misma, o
5. permite al hombre en un tiempo acotado rechazar la posible acción automática antes de su ejecución, o

6. ejecuta la sugerencia automáticamente, entonces necesariamente informa al hombre, o
7. ejecuta automáticamente la sugerencia, entonces informa al hombre solamente si él lo solicita
8. La automatización selecciona el método y ejecuta la tarea ignorando al hombre.

Por otro lado, en sistemas donde la seguridad del hombre puede ser afectada directamente por el menor o mayor uso de comportamientos automáticos, generalmente se adopta un criterio denominado automatización centrada en el hombre. Por ejemplo, en el caso de sistemas automáticos aplicados a sistemas de aviación, los principios clásicos de este tipo de automatización implican que el hombre tiene la responsabilidad final por la seguridad de un sistema de aviación. Por lo tanto, de acuerdo a un criterio centrado en el hombre se establece lo siguiente [34]:

- El hombre debe tener el comando
- Para comandar efectivamente, el hombre debe estar involucrado
- Para estar involucrado, el hombre debe estar informado
- Ciertas funciones podrían estar automatizadas solamente si existe una buena razón para hacer esto
- El hombre debe ser capaz de monitorear el sistema automatizado
- Por lo tanto, los sistemas automatizados deben ser predecibles

- Los sistemas automatizados deben ser capaces de monitorear al operador humano
- Cada elemento del sistema debe tener conocimiento de las intenciones de los demás
- La automatización debe ser simple de aprender y operar por un usuario

En el control automatizado centrado en el hombre, el control del sistema podría ser transferido desde el operador humano hacia la automatización y viceversa, pero siempre la transición de un modo a otro es iniciada por el operador humano. Sin embargo, y dependiendo del contexto de la aplicación y la situación, la invocación de la automatización no solamente debería surgir por pedido del hombre sino que en ciertos casos la automatización podría invocarse a sí misma, como por ejemplo la activación del sistema de frenos de un vehículo ante un inevitable accidente de tránsito. Esto pone de manifiesto que el nivel de automatización y la decisión acerca de si la automatización y/o el hombre deben iniciar las transiciones de control (por ejemplo de control manual a control automático) dependen de la situación y el contexto de la aplicación [94].

Por otro lado, los niveles de automatización también pueden ser analizados desde un punto de vista de etapas en el procesamiento de la información y cómo cada uno de ellos podría tener un mayor o menor grado de automatización. La figura 8.1 muestra las etapas en que se separa una automatización [72].

En las etapas mencionadas en la figura 8.1 el hombre podría tener diferentes niveles de intervención, por ejemplo la adquisición de la información podría ser completamente automática cuando se analizan las variables de un avión en vuelo, pero la implementación de las acciones podría ser compartida o inclusive realizada solamente por el hombre. Es decir que la automatización no necesariamente tiene que ser todo o nada sino que hay varios grados adecuados para diferentes contextos y problemas y que diferentes etapas del

proceso de un sistema complejo pueden tener diferentes grados de automatización.

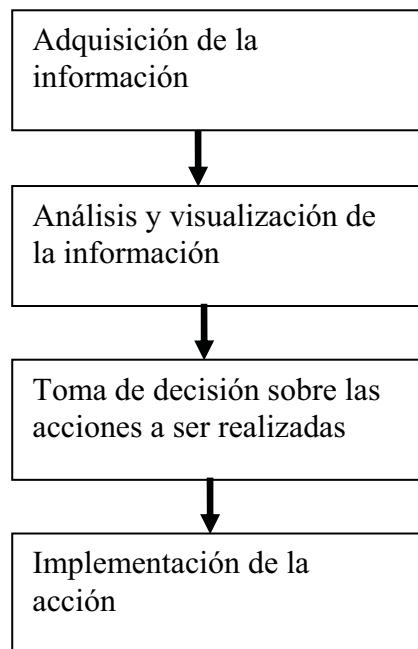


Figura 8.1. Etapas de la automatización.

Por otro lado, un punto fundamental dentro del contexto de sistemas hombre-máquina que vas mas allá del nivel de automatización es decidir qué actividades debería hacer el hombre y cuáles la automatización. En la literatura actual, existen algunos criterios para asignar tareas como así también razones para cuestionar los mismos (marcado entre corchetes), tales como [67] [88]:

1. Asignar al hombre las tareas mas adecuadas para él y asignar a la automatización las tareas más adecuadas para ella [Desafortunadamente no hay un consenso de cómo hacer esto. Además la política de asignación no es necesariamente fija y podría depender del contexto].

2. Mantener al operador humano en el lazo de control y decisión. Esto es bueno solamente para tareas de un ancho de banda (que tan rápidas son las interacciones entre la máquina y el entorno) intermedio [El hombre es demasiado lento para tareas de alto ancho de banda y podría tener grandes distracciones si la tarea es de un bajo ancho de banda].
3. Mantener al operador humano como la autoridad final sobre la automatización [los hombres son pobres monitores y en algunas decisiones podrían cometer errores, sobre todo en situaciones críticas en tiempo donde un usuario bajo presión y en situaciones complejas podría producir una pobre toma de decisión].
4. Hacer el trabajo más fácil, más agradable o más ameno al operador humano a través de una automatización amigable [las características de un trabajo fácil, agradable y ameno muchas veces podrían ser menos importantes que el desempeño del sistema].
5. Dar al operador humano hacia la mayor cantidad posible de tareas [sobrecarga de trabajo y desaprovechamiento de la automatización].
6. Asignar tareas de acuerdo a la confianza del operador humano [El hombre podría sobre confiar en la automatización].
7. Dar al operador humano un consejo acerca de cualquier cosa que él debería querer saber [la cantidad y complejidad de información podría abrumar al operador humano en una situación delicada, como por ejemplo en una situación crítica en tiempo].
8. Diseñar la automatización para reducir el error humano y minimizar la variabilidad de la respuesta [un margen acotado para el error humano durante la práctica ayuda al mismo a aprender de su propia experiencia].

9. Hacer al operador humano un supervisor de sistemas automáticos subordinados [en muchas situaciones, el control manual directo es mejor opción que el control supervisor].
10. Lograr la mejor combinación entre el hombre y el control automático, donde la opción mejor es definida explícitamente por objetivos o criterios determinados [Muy difícilmente exista o pueda ser deducida una función matemática que represente en forma general dicho criterio].

La figura 8.2 muestra el espectro continuo de posibles participaciones del hombre y la automatización (representado por una computadora) en el control de los sistemas hombre-máquina, yendo desde un control completamente manual (por ejemplo el manejo de una bicicleta) hasta un control completamente automatizado (tal como el piloto automático de un avión).

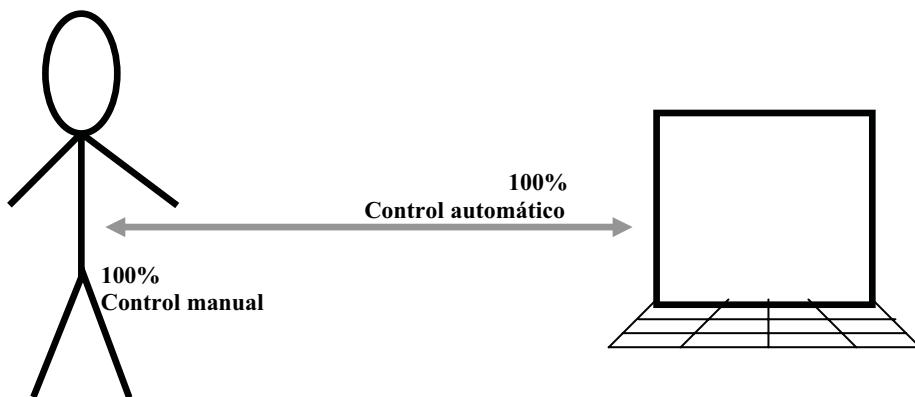


Figura 8.2. Espectro de sistemas de control entre completamente manual y completamente automatizado.

En el rango mencionado de posibilidades de control, existen diferentes regiones que pueden ser identificadas como control manual, control asistido, control semi-automático, control altamente automatizado y control completamente automatizado. Por ejemplo, un vehículo semi-automático tiene

la capacidad autónoma de una parte del movimiento del vehículo (por ejemplo control longitudinal o lateral), mientras que la automatización completa en este caso involucra la automatización del movimiento completo del vehículo. La figura 8.3 muestra el rol del hombre ante diferentes niveles de automatización en el caso de un vehículo, yendo desde un control totalmente manual hasta ser solamente un pasajero de un sistema completamente automatizado.

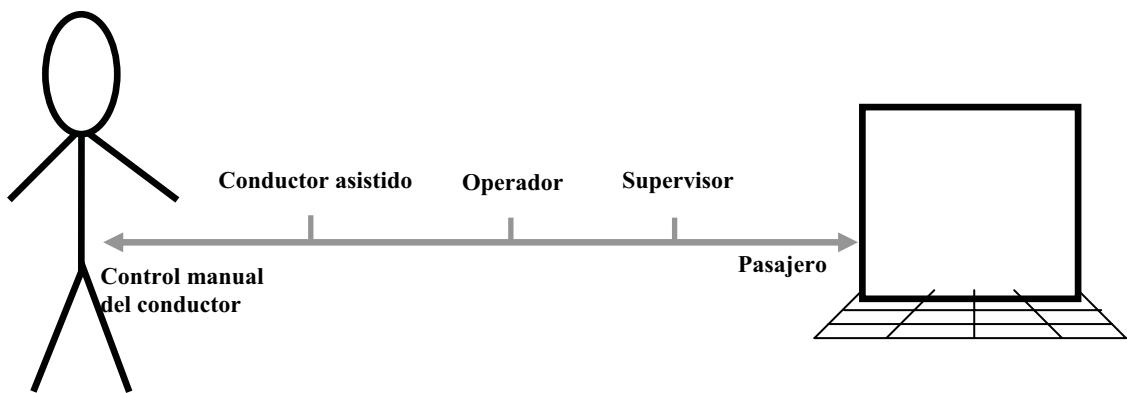


Figura 8.3. Rol del hombre ante diferentes niveles de automatización en el caso de un vehículo.

En el capítulo 3 se brindaron conceptualmente los criterios de diseño utilizados en sistemas automáticos, tales como optimización y convergencia del error a cero, y alta velocidad de respuesta. Pero el nivel de automatización ¿Afecta los factores humanos?...

Algunos estudios experimentales [38] [48] probaron que utilizando un control e interfaz típicos, a medida que el nivel de automatización aumenta, la carga mental de trabajo, y el conocimiento de la situación (del sistema controlado por la automatización) disminuyen. Este decremento en el conocimiento de la situación es una consecuencia de un comportamiento típico del operador humano en cuanto a monitorear en menor medida el proceso automatizado cuando el nivel de automatización es mayor. La figura 8.4 ilustra la variación de una reducción de la carga mental de trabajo y del conocimiento de la situación a medida que aumenta el nivel de automatización. Este punto de vista clama

que un nivel de automatización adecuado surge de una relación de compromiso entre estos dos factores.

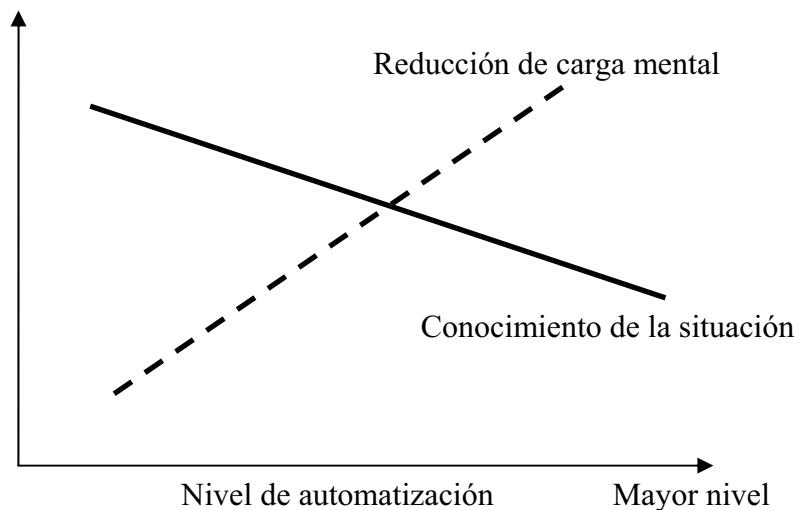


Figura 8.4. Carga mental y conocimiento de la situación dependiendo del nivel de automatización.

Sin embargo, un buen diseño de una interfaz junto con una capacitación permanente podría hacer que el conocimiento de la situación no necesariamente disminuya significativamente a medida que el nivel de automatización aumenta. Por otro lado, la carga mental debería tener un nivel adecuado más bien que un nivel mínimo, ya que tanto una muy baja o muy alta carga mental podría provocar efectos negativos en el rendimiento del sistema. Por ejemplo, una alta carga mental en situaciones críticas en tiempo podría ocasionar que el operador humano cometa errores, y por otro lado una muy baja carga mental podría ocasionar distracciones prolongadas del usuario. De todas maneras, es importante destacar que el nivel de automatización indudablemente afecta en mayor o menor medida los factores humanos y por lo tanto, el diseño de un sistema de control hombre-máquina es diferente del diseño de un sistema de control completamente automático.

## 8.3 Control de sistemas hombre-máquina inteligente

En esta sección se brindarán las estrategias de control más utilizadas hasta la actualidad y que son aplicadas a *sistemas hombre-máquina inteligente*, donde se remarca que el control de estos sistemas es un área abierta a mayores avances que logren mejorar la sinergía entre el hombre y un sistema automatizado que actúan interactivamente entre sí. Las estrategias que se describirán en esta sección se denominan control supervisor y control compartido y dentro de este último se destacan el control si-no, el control adaptivo y el control cooperativo [111]. Es decir, se describirá desde un punto de vista de control la manera en que se interrelacionan entre sí el hombre y la automatización en cada caso y cómo los factores humanos pueden ser considerados en ellos.

### 8.3.1 Control supervisor

En muchas aplicaciones, sobre todo en la industria en general, el rol principal del operador humano en un sistema automatizado es supervisar el funcionamiento del sistema. En la literatura se utiliza el término “control supervisor”, lo cual implica una determinada relación entre el hombre y una máquina inteligente [84] [85]. Esta forma de interacción difiere radicalmente de la interacción tradicional del ser humano con herramientas y dispositivos que no poseen inteligencia, en el sentido que una tarea dada era realizada completamente por el operador humano.

El supervisor humano de una o unas máquina/s automática/s tiene relación con un supervisor humano de inteligentes pero subordinadas personas, mediante el cual el supervisor da instrucciones (objetivos, restricciones y planes) y los subordinados ejecutan dichas instrucciones utilizando su propia capacidad de realizar un trabajo en forma independiente. La figura 8.5 ilustra el hecho de que un supervisor humano actúa como jefe dando directivas a los sistemas automatizados y monitorea los resultados para definir nuevas directivas.

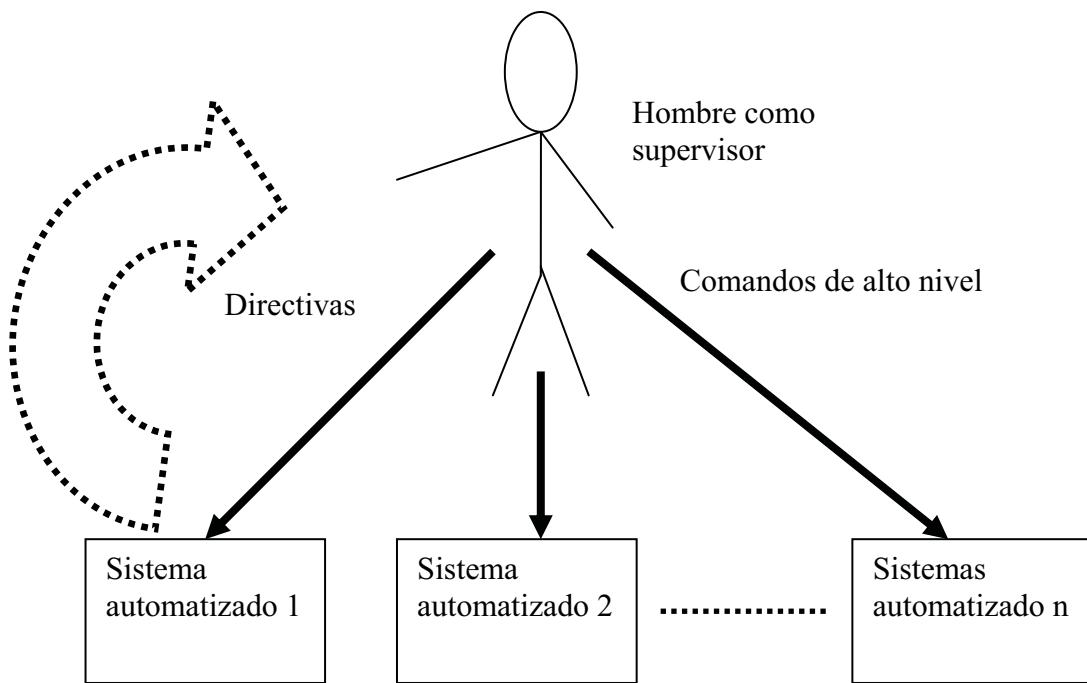


Figura 8.5. El hombre actuando como supervisor de sistemas automatizados.

Sin embargo, el concepto de control supervisor va más allá de dar directivas a uno o varios sistemas automatizados y realizar monitoreo de los resultados, sino que esto involucra diversas funciones que debe o debería realizar el hombre actuando como supervisor, las cuales se especifican en la tabla 8.1 [85].

En esta estructura de control, es muy importante el diseño de una interfaz que de alguna manera incentive un buen monitoreo del sistema automatizado por parte del supervisor humano. Además, la adecuada capacitación del usuario es fundamental de forma de comprender el funcionamiento del sistema y por ende poder interpretar interfaces que informen de ciertas variables de la máquina, del entorno y de la tarea.

<b>Funciones de supervisión</b>
<i>Planear</i> una estrategia para cumplir los objetivos establecidos
<i>Enseñar</i> a la automatización
<i>Monitorear</i>  La ejecución del plan diseñado Ver el estado actual y estimar el estado futuro del sistema Detectar fallas
<i>Intervenir</i> para abortar o asumir el control en caso necesario
<i>Aprender</i> de la experiencia

Tabla 8.1. Funciones principales de un supervisor humano.

En este tipo de esquema de control, el hombre no está incluido en el lazo de control sino que él mismo comunica comandos de alto nivel al sistema. En este caso, el modelo mental, el conocimiento de la situación y un adecuado nivel de confianza en la automatización son fundamentales para comprender y predecir el comportamiento del sistema automatizado y así, generar adecuadas directivas o comandos de alto nivel para la automatización [69] [78].

### **8.3.2 Control compartido**

Los esfuerzos de la comunidad científica están dirigidos hacia la búsqueda de una posible sinergia entre el hombre y el control automático. En general, el nivel de automatización podría variar en forma continua desde el control manual hasta un control automático puro de acuerdo a la situación y contexto actuales. A partir de esto, surge el concepto de control compartido donde el hombre y el controlador autónomo pueden tener control sobre el sistema al mismo tiempo. Sin embargo hay una premisa que se debe cumplir indefectiblemente y que implica que las acciones de ambos deben conducir al sistema en el mismo sentido o sea no deben ser opuestas entre sí.

También aparece el concepto de control cooperativo entre máquina y hombre donde el término cooperación puede ser visto como trabajar conjuntamente para lograr un objetivo en común tal como funciona un equipo de personas. Para lograr esto, el diseño interno (control) y externo (interfaz) de la automatización tiene que ser compatible con el hombre.

La figura 8.6 ilustra el funcionamiento de un sistema de control compartido donde el hombre y la automatización participan simultáneamente y afectan en alguna medida la acción aplicada sobre la máquina, sistema o proceso.

El control compartido es una estrategia activa en la que en un momento puede estar el sistema funcionamiento solamente con control manual o con control automático y también podrían estar colaborando ambos en la determinación de las acciones de control aplicadas al sistema. Dos de las representaciones más comunes dentro del contexto de control compartido son el control si-no (automático o manual) y el control adaptivo.

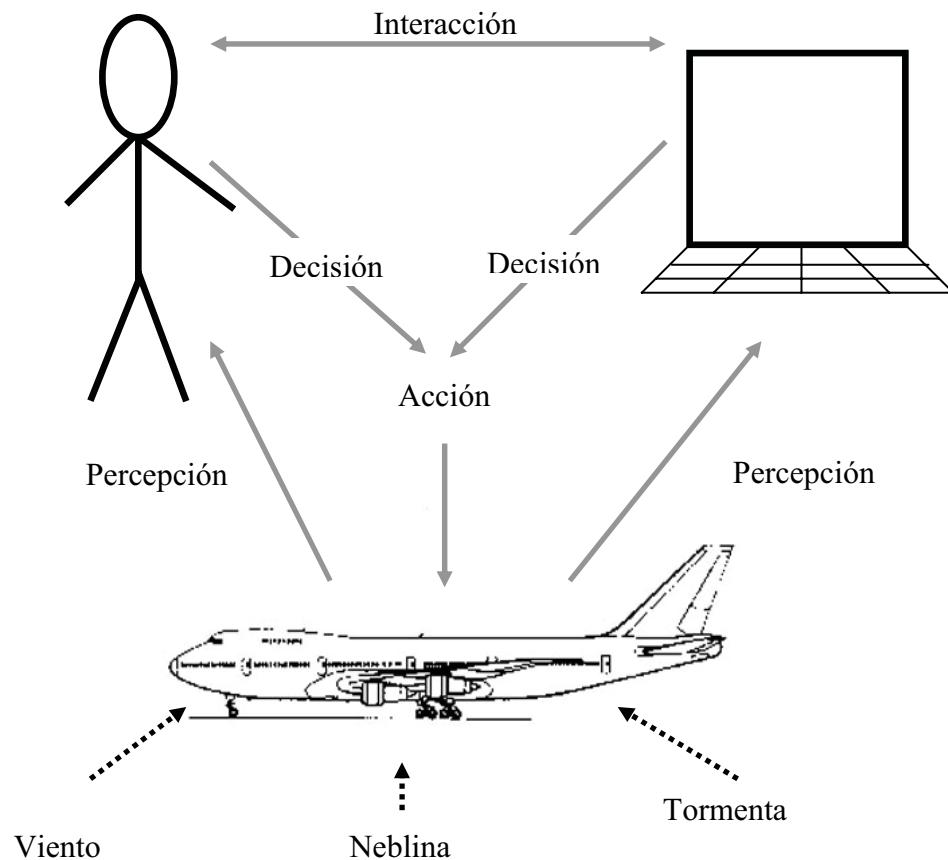


Figura 8.6. Control compartido.

### 8.3.2Control si-no

En la propuesta de control en sistemas hombre-máquina más común, el hombre y la automatización actúan como dos subsistemas relativamente independientes en una relación “uno u otro” como muestra la figura 8.7. Es decir que la automatización más simple opera en dos modos: automático o manual. La denominación en este libro de control si-no es adoptada por su analogía con el conocido control si-no utilizado en la industria, donde el sistema de actuación puede estar activo o inactivo (por ejemplo un motor prendido o apagado). En nuestro caso, podría estar funcionando el sistema con un control manual (manejado solamente por el hombre) o por un sistema automatizado (manejado solamente por un sistema automático). Es decir que en este tipo de

control no se integran los comandos generados por el operador humano y las señales de control computadas por la automatización.

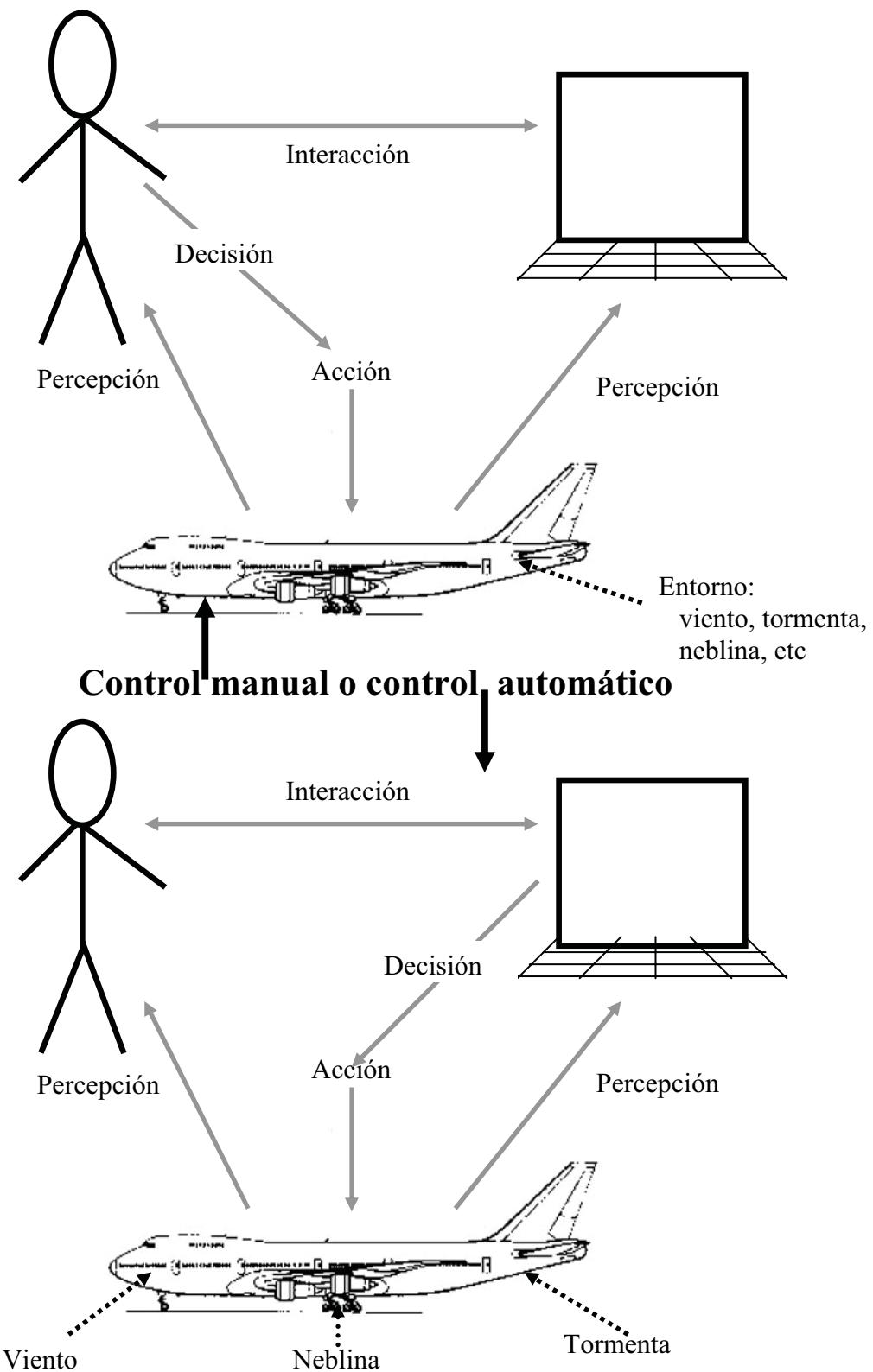


Figura 8.7. Comutación entre control manual y control automático.

Pero, ¿Quién decide en un determinado momento si actúa el control manual o el control automático?...¿Qué criterio se utiliza para conmutar entre estos dos modos de control?...¿El criterio utilizado para pasar de automático a manual debe ser igual al criterio empleado para conmutar al revés (de control manual a control automático)?...

### **8.3.4 Control adaptivo de sistemas hombre-máquina**

La automatización adaptiva es una forma de automatización que es flexible o dinámica en naturaleza [47] [61] [62] [79] [80]. En estos sistemas, las decisiones acerca del inicio, cese, y nivel y tipo de automatización son compartidas entre el operador humano y la máquina inteligente. Es decir, el nivel de participación de cada uno cambia de acuerdo a la situación y al contexto.

El criterio utilizado para invocar la participación de la automatización y en qué nivel es fundamental en una automatización adaptativa. Las principales técnicas de invocación de la automatización pueden ser divididas en cinco categorías [67] [68]:

- Eventos críticos
- Medición del rendimiento del operador
- Evaluación fisiológica del operador
- Modelo del operador
- Métodos híbridos.

En el método de eventos críticos, la automatización es invocada solamente si cierto evento externo ocurre. Por ejemplo, ciertos sistemas de defensa en aviones de guerra automatizan todas las opciones defensivas en caso que el sistema sensorial del avión detecte una situación de posible peligro. Sin embargo, si este evento no ocurre, la automatización nunca es invocada. Hay muchas aplicaciones donde la detección de un evento crítico dispara algún tipo de automatización.

El método de evento crítico tiene una estructura adaptable a muchos tipos de aplicaciones. Sin embargo, una desventaja de este método es su posible insensibilidad frente al desempeño actual del sistema y del operador humano. En el último ejemplo, este método invocará a la automatización independientemente si el piloto solicita o no la misma cuando el evento crítico ocurre.

La medición del estado fisiológico del operador humano y su desempeño pueden ser utilizados para superar la limitación del método anterior. En este caso, el objetivo es cambiar el nivel o tipo de automatización basado en la evaluación del estado del operador humano. Varios factores humanos podrían ser estimados (como por ejemplo fatiga, carga de trabajo e intenciones, entre otras) y utilizados de alguna manera en la lógica adaptiva del sistema de control [44].

Además, la evaluación fisiológica del operador humano ofrece otra entrada potencial para los sistemas de control adaptivos. Por ejemplo, las medidas fisiológicas podrían predecir que el nivel de fatiga de un operador humano está aumentando peligrosamente o que el usuario experimenta un alto aumento de su carga mental [81]. Así, un sistema de control adaptivo podría usar estas mediciones para proporcionar una ayuda (control) y/o consejo (interfaz) al operador humano. Es decir que la tecnología actual permite medir varias señales fisiológicas del operador, como por ejemplo cambios en la frecuencia cardiaca, señales cerebrales, etc. que podrían ser utilizados por un sistema de control adoptivo [81]. La principal ventaja del uso de estas señales es que pueden medirse objetivamente a diferencia de algunos factores humanos que son cuantificables mediante medidas subjetivas.

Las técnicas de modelación tienen la ventaja que ellas pueden ser analizadas y diseñadas utilizando completamente la riqueza de la teoría de sistemas de control de manera similar a cómo se utiliza en sistemas de control automático. Sin embargo, este método requiere de un modelo válido, lo cual es muy difícil de obtener para representar los comportamientos más significativos del hombre y la relación entre ellos y con el sistema.

Finalmente, los métodos híbridos pretenden aprovechar los beneficios relativos y desventajas de cada uno de los métodos descriptos. Actualmente, los métodos híbridos ofrecen la mejor alternativa general para implementar una automatización adaptiva. Sin embargo, hasta el momento ninguna solución definitiva ha sido producida en la práctica.

Además, los fundamentos del control adaptivo se podrían utilizar dentro de otros esquemas de control tal como control cooperativo hombre-automatización, donde ambos actúan coordinadamente para lograr un objetivo en común trabajando en equipo [37] [50]. La figura 8.8. ilustra un típico diagrama de un sistema de control cooperativo donde se remarca en qué lugar aparece el control adaptivo.

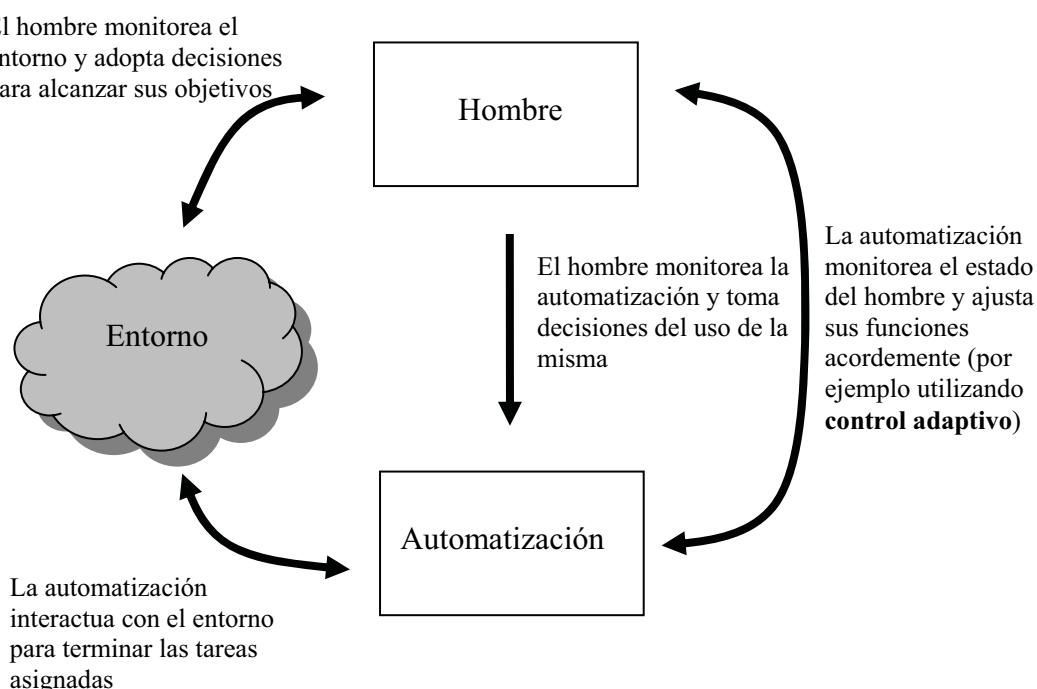


Figura 8.8. Relaciones entre hombre, entorno y automatización cooperativa.

Aunque se mencionó que actualmente no existe un método general para determinar cómo debería variar el nivel de automatización, existen estudios experimentales que varían el grado de automatización de acuerdo a algún

factor humano. Por ejemplo en varios trabajos, se emplean redes neuronales artificiales con múltiples medidas fisiológicas para identificar en tiempo real períodos de carga durante una simulación de manejo de un avión, de forma de establecer una mayor automatización en caso que se detecte una alta carga mental del piloto. Otros estudios probaron la factibilidad de un sistema adaptivo basado en la detección de fatiga a través de señales cerebrales. Por otro lado, se remarca que no existe una única metodología para medir características del hombre como por ejemplo fatiga y distracción, lo cual dificulta aún más establecer criterios generales de diseño.

Se puede decir que hasta el momento la tendencia tomada para control de sistemas hombre-máquina es medir (objetivamente o subjetivamente) los factores humanos y si ellos se degradan se establece un mayor nivel de automatización y viceversa. Por ejemplo si la distracción o fatiga de operador humano aumenta en un determinado momento entonces el sistema de control podría establecer un grado más alto de automatización en dicho instante y si luego el operador humano está completamente atento el control podría pasar a control manual puro o tener un bajo nivel de automatización dependiendo de la aplicación.

La figura 8.9 ilustra un diagrama que puede ser tomado como referencia de ayuda para relacionar una determinada aplicación con un tipo de control, tal como control supervisor sin monitoreo, control supervisor con monitoreo y control compartido con diferentes niveles de automatización y diferenciando si las transiciones son hechas por el hombre o si pueden ser también iniciadas por la automatización.

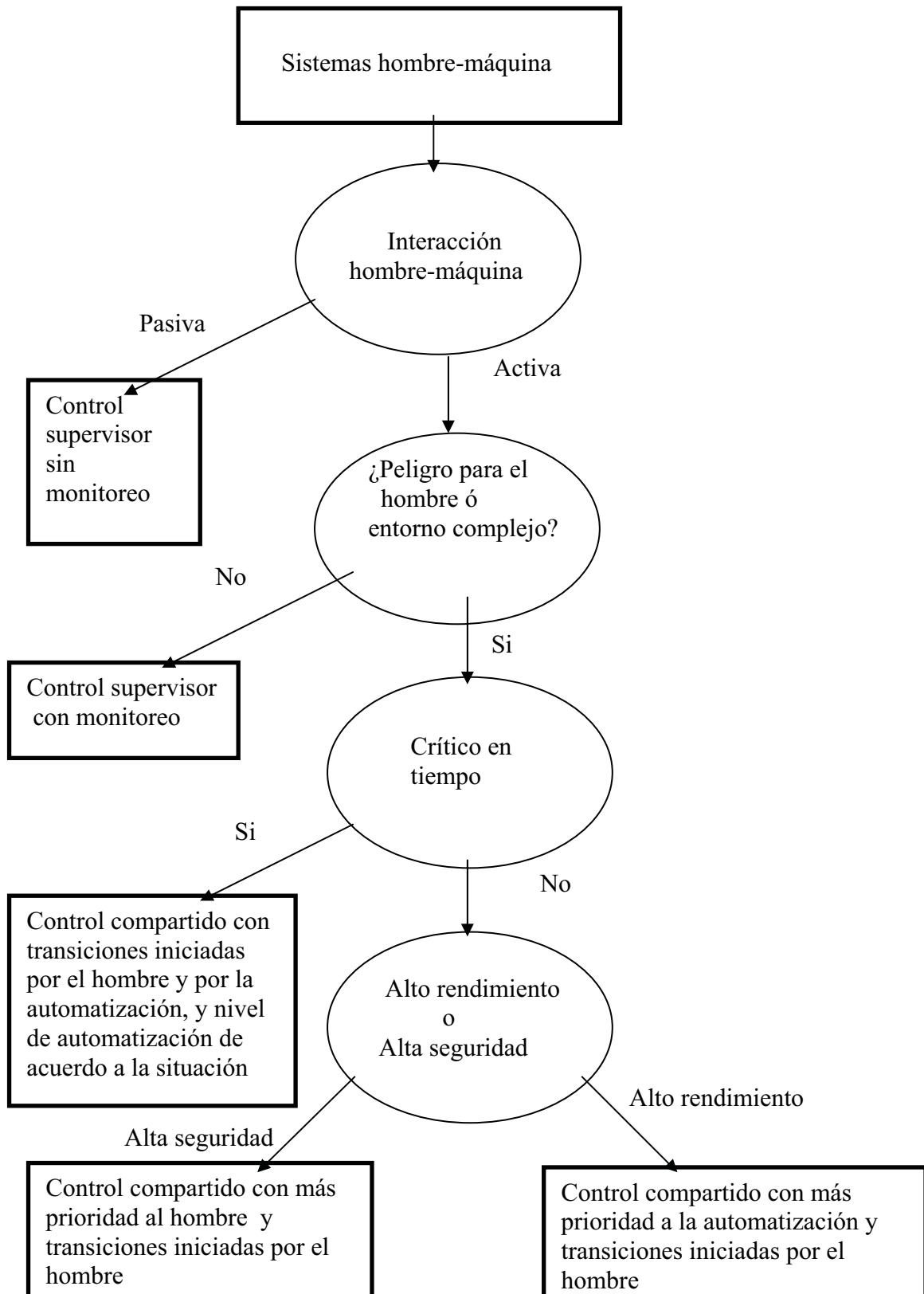


Figura 8.9. Control de acuerdo al tipo de aplicación

En la última figura se puede ver cómo de acuerdo a las características de una aplicación en particular, se puede establecer un tipo de control que a priori sería más adecuado.

Si la interacción entre el hombre y la máquina automatizada es pasiva, entonces el rol del operador humano generalmente es como supervisor e incluso con poco o nada de monitoreo, como por ejemplo el funcionamiento de un lavarropa automático. En caso que la interacción sea activa, pero que la aplicación no involucre un peligro o riesgo para el hombre ni un entorno complejo en el sentido que se requiera un grado de inteligencia muy difícil de emular por una computadora para interpretar las posibles diferentes situaciones, entonces se podría utilizar un control supervisor con un monitoreo frecuente o continuo. Por ejemplo, el caso de un proceso de horneado de alimentos en los cuales el hombre supervisa el proceso y selecciona la temperaturas de referencias que son alcanzadas a través del control automático de temperatura del horno.

Siguiendo con el esquema de la figura 8.9, si la interacción hombre-máquina es activa y existe peligro para el hombre o el entorno es complejo, entonces si la aplicación es crítica en tiempo resulta adecuado utilizar un control compartido con las transiciones entre la automatización y control manual iniciadas tanto por el hombre como por la automatización. Por ejemplo el caso de un automóvil donde ante un inevitable choque se podrían activar los frenos y el sistema de airbags del vehículo. En este tipo de aplicaciones, el nivel de automatización generalmente será establecido de acuerdo a la situación actual.

Finalmente, la última alternativa del diagrama se relaciona a las aplicaciones que tiene una interacción activa entre hombre y automatización, que no son críticas en tiempo e involucran un posible riesgo para el hombre o el entorno es complejo. En este caso, se emplea control compartido y las transiciones entre la automatización y control manual son iniciadas por el hombre. Además, si se pretende un alto rendimiento se tiende hacia un alto nivel de automatización y en cambio si se prioriza una alta seguridad se da mucha importancia al control manual, como por ejemplo un piloto de avión utiliza control manual para

despegar y aterrizar mientras que por otro lado activa el piloto automático cuando el avión está en vuelo estable y quiere mantener la velocidad altura constante con mucha exactitud.

#### 8.4 Relación entre sistemas de control automático y control de sistemas hombre-máquina

La figura 8.10 ilustra gráficamente los conceptos que se consideran en el diseño de un sistema automático y si ellos apuntan principalmente al control, a la interfaz o a la capacitación de los operados humanos. Estos sistemas consideran como criterio de control la velocidad, precisión, y exactitud del sistema y la optimización de recursos. Por el lado de la interfaz, generalmente se pretende que sean simples de aprender y fáciles de usar.

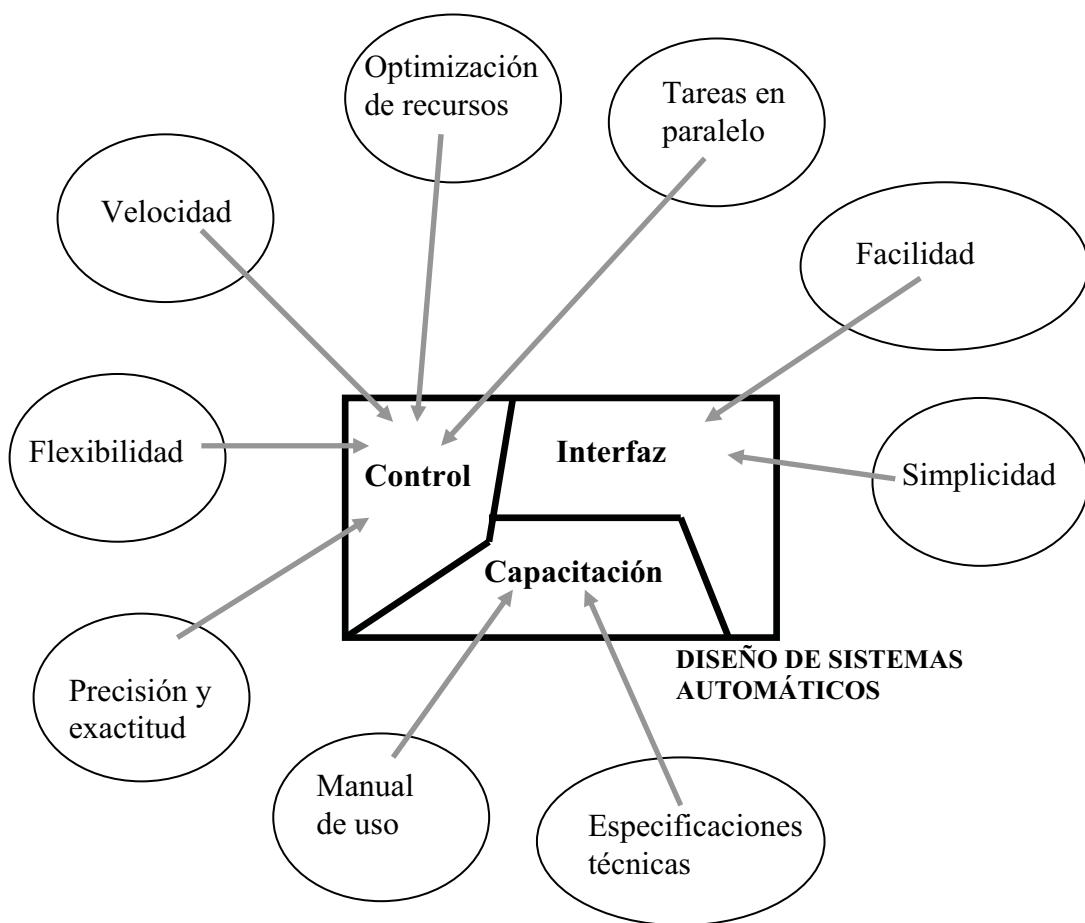


Figura 8.10. Conceptos utilizados en el diseño de sistemas automáticos respecto a control, interfaz y capacitación.

Por otro lado, cuando se diseña un *sistema hombre-máquina inteligente* también aparecen los factores humanos [76]. Estos factores deberían ser tenidos en cuenta en el control, interfaz y capacitación de estos sistemas, como se ilustra en la figura 8.11.

Por ejemplo, el diseño de una interfaz de un sistema con cierto nivel de automatización debería apuntar a mejorar el conocimiento del operador humano acerca del estado de la máquina, estado del entorno, acciones que computará la automatización e incluso del estado del propio operador. Otro punto relevante es capacitar fuertemente a los usuarios no solamente en la utilidad del sistema (qué hace) sino también en cómo trabaja internamente la automatización o qué criterio de funcionamiento emplea para tomar decisiones. Una mayor y mejor capacitación mejora la calidad del modelo mental del operador humano. Así, el usuario podría integrar su experiencia vivida cotidianamente con su modelo mental de alta calidad causando un uso adecuado de la automatización evitando comportamientos erróneos tales como los derivados por una sobre confianza o complacencia en la automatización.

Es importante integrar los aspectos mencionados en las figuras 8.10 Y 8.11 en un sistema hombre máquina. Respecto al control de sistemas hombre-máquina, surge la necesidad de adaptar la automatización al contexto y a la situación actual. Es muy difícil que un nivel estático de automatización pueda servir para todos los casos cuando existe una interacción activa entre el hombre y la automatización. Por ello, el control adaptivo con métodos híbridos (ellos consideran los factores humanos) que manejen las transiciones de control manual hacia automático y viceversa aparece como una herramienta muy útil dentro del control de sistemas hombre-máquina.

Finalmente se remarca que los diseñadores de un *sistema de control hombre-máquina inteligente* deben tener en cuenta todas las métricas disponibles que representen la interacción entre el hombre y la automatización [49].

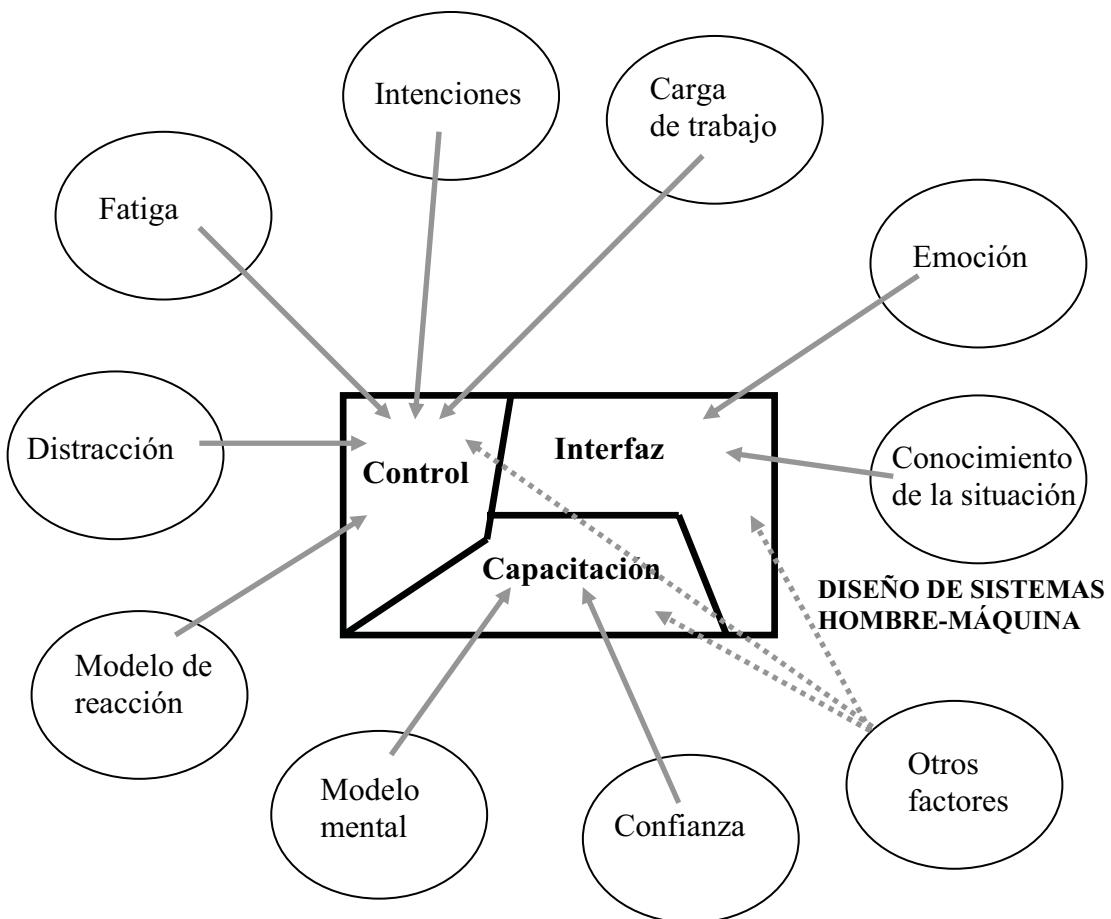


Figura 8.11. Diseño de sistemas hombre-máquina teniendo en cuenta los factores humanos en el control, interfaz y capacitación.

## 8.5 Síntesis del capítulo

A medida que aumenta el nivel de automatización de sistemas aplicados tanto en el trabajo como en el hogar, se requiere una mayor capacitación y formación de las personas para una buena comprensión y uso adecuado de estos sistemas en la práctica.

Las alternativas de control más adecuadas para sistemas hombre-máquina son control supervisor y control compartido. El control supervisor de uno o varios sistemas automatizados implica que el operador humano se comporta tal como el jefe de un grupo, donde él da directivas (comandos de alto nivel) y supervisa que los mismos sean cumplidos adecuadamente. Por otro lado, el

control compartido es una estrategia activa en la cual podrían estar funcionando el control manual y la automatización intermitentemente o incluso se podrían considerar simultáneamente tanto los comandos del hombre como las señales de control computadas por la automatización. Dos de las representaciones más comunes dentro del contexto de control compartido son el control si-no (automático o manual) y el control adaptivo. Cuando se utiliza control adaptivo, los métodos utilizados para iniciar una transición hacia algún nivel de automatización (los niveles van desde nada de automatización hasta un nivel completamente automático) pueden ser eventos críticos, medición del rendimiento del operador, evaluación fisiológica del operador, modelo del operador, y métodos híbridos.

Qué actividades se deben automatizar y en qué nivel es un problema todavía no resuelto en forma general. Además, existe una gran diversidad de tipos de sistemas y distintas aplicaciones también que dificulta aún más la decisión de qué y cómo automatizar. Sin embargo, las herramientas y conceptos disponibles en sistemas de control automático y en el estudio de los factores humanos pueden ser utilizados criteriosamente para encontrar soluciones adecuadas para una aplicación en particular.



# *Capítulo 9*

*Aplicaciones de sistemas*

*hombre-máquina*



## **Capítulo 9**

### **Aplicaciones de sistemas hombre-máquina**

El objetivo de este capítulo es afirmar los conceptos brindados en el libro empleando para ello diferentes aplicaciones de interés donde se utilizan y se remarca el uso de los fundamentos brindados en los capítulos previos de forma que el lector pueda formar un conocimiento constructivo base y sólido en la comprensión de sistemas donde el hombre interactúa con una parte automatizada.

#### **9.1. Introducción**

En este capítulo se brindarán diversas aplicaciones de sistemas donde interactúan una persona y un sistema automatizado.

Las aplicaciones propuestas a modo de ejemplos, son representativas en distintas áreas de aplicación de *sistemas hombre-máquina* tales como salud, servicios de asistencia personal, agricultura, seguridad vial y tecnología de avanzada. Los ejemplos que serán brindados en este capítulo son los siguientes:

- Silla de ruedas inteligente.
- Asistencia médica robotizada.
- Máquina cosechadora inteligente aplicada a la agricultura.
- Asistencia inteligente a un conductor de un automóvil.
- Teleoperación de robots móviles y robots manipuladores por Internet.

En cada aplicación, se describirá conceptualmente que factores humanos se deberían tener en cuenta así como se remarcará las ventajas de la automatización para dichas aplicaciones. Es decir, que la automatización y el hombre se deben complementar para lograr *sistemas hombre-máquina inteligente* que tengan un buen rendimiento y que eleven la calidad de vida del ser humano.

## 9.2. Silla de ruedas inteligente

La aplicación de *sistemas hombre-máquina* en áreas de interés general tal como salud es de gran importancia para la sociedad, como por ejemplo máquinas inteligentes diseñadas para el cuidado de enfermos y ancianos.

La característica fundamental que debe asegurar un robot asistencial es que posibilite a un usuario obtener capacidades aumentadas gracias a un sistema sensorial que cubrirá las deficiencias perceptivas del usuario y al uso de un sistema locomotor que ejecutará las acciones deseadas sobre el entorno cubriendo así sus deficiencias motoras. Sin embargo, este aspecto debe estar en equilibrio con el hecho de mantener al máximo su capacidad de decisión y ejecución de tareas, para que la persona se encuentre psicológicamente satisfecha.

En este caso se describirá una silla de ruedas inteligente, la cual es destinada a personas que no puedan caminar, donde ellas quizás posean mayores incapacidades físicas, como por ejemplo inmovilidad de brazos.

¿Cómo se hace para transformar una silla de ruedas convencional en una silla de rueda inteligente?...

Una silla inteligente se forma incorporando sensores, un sistema de cómputo, actuadores y una interfaz a una silla de ruedas convencional, como se ilustra en la figura 9.1.

Existen muchos métodos de control para una silla de ruedas, donde generalmente la principal diferencia se encuentra en cómo la persona genera comandos de alto nivel hacia un controlador automático de movimiento, es

decir la interfaz juega un rol fundamental para la aceptación del uso en la práctica de estos sistemas. Por ejemplo, la figura 9.2 muestra un secuencia (1, 2, 3, y 4) realizada por una silla de ruedas controlada por comandos de voz, donde el robot interpreta determinados comandos de alto nivel tal como “ir a una posición o área determinada” (en el caso del hogar, las áreas podrían ser baño, cocina, habitación, comedor, etc.) y ejecuta un control automático de movimiento de la silla de ruedas que traslada a la persona desde un lugar a otro. Estos sistemas generalmente funcionan en entornos conocidos por lo que las coordenadas de lugares específicos pueden ser almacenados a priori en la computadora de control.

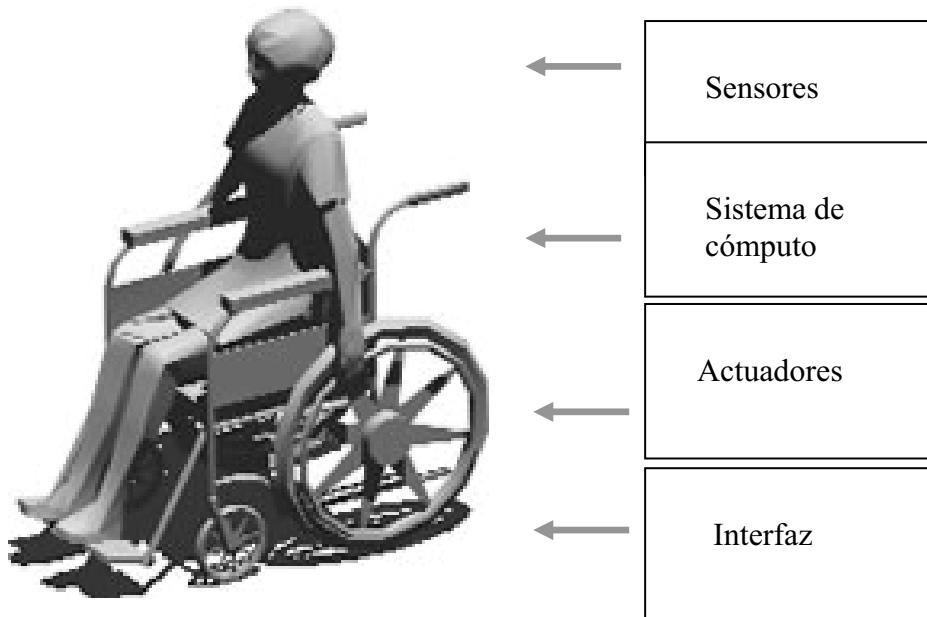


Figura 9.1. Silla de rueda automatizada.

Desde un punto de vista de la automatización, se desea hacer autónoma la mayor parte del sistema para disminuir lo máximo posible la carga física y mental de la persona que usará la silla de ruedas inteligente. Sin embargo, muchas veces en la práctica las personas que tienen discapacidades físicas en partes de su cuerpo desean utilizar sus capacidades físicas y mentales en un nivel tal de obtener una satisfacción respecto a sentirse partícipes de las actividades realizadas.

Por lo tanto, la interfaz podría ser diseñada teniendo en cuenta el tipo de discapacidad de la persona y una adecuada carga mental y física para el usuario, esta última estimulando las áreas sanas y/o de posible recuperación pero sin sobrecargar demasiado las mismas evitando por supuesto que una actividad cotidiana sea tediosa de realizar. Es decir, un buen control e interfaz deberían aprovechar la flexibilidad de la automatización para ser capaces de adaptarse a cada usuario.



Figura 9.2. Movimiento automatizado de una silla de ruedas controlada por comandos de voz desarrollada por la Universidad de Zaragoza, España.

¿Quién decide el nivel de automatización?... ¿De qué depende el diseño de la interfaz?...

Actualmente, una posible solución es dotar al sistema automatizado de un cuestionario ideado por el médico y empotrado por el diseñador de forma de consultar y almacenar continuamente el nivel de aceptación, confort y sensación de bienestar del usuario. El médico podría utilizar estos datos junto con sus pruebas médicas sobre el paciente para actualizar algún parámetro interno del sistema automatizado que influya en alguna medida en la interfaz y control del sistema y de esta forma fijar el nivel de automatización de la silla considerando la salud del hombre y su bienestar psicológico.

Es decir, la automatización (control e interfaz), el médico y la persona asistida deberían trabajar en conjunto para lograr sistemas automatizados que asistan humanamente a las personas (figura 9.2).

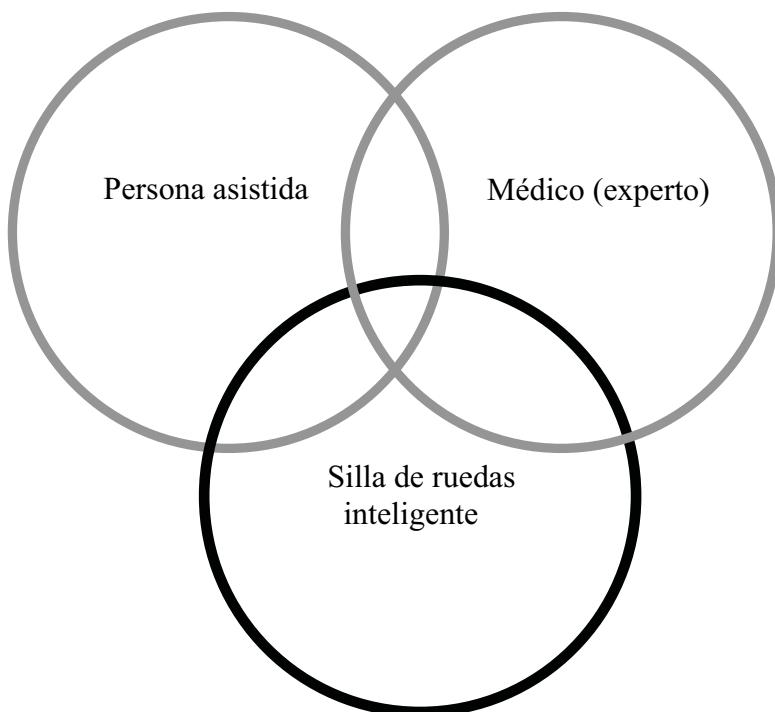


Figura 9.2. La persona asistida, el médico y la automatización deben trabajar en conjunto.

### **9.3. Robótica para cirugía y operaciones**

El desarrollo de robots quirúrgicos es motivado principalmente por el deseo de elevar la eficacia de una operación médica en una sala de intervención quirúrgica.

Un robot puede realizar una tarea con mayor precisión que el hombre, lo que proporciona la principal motivación para la cirugía robotizada. Además, los robots pueden trabajar en ambientes peligrosos para el ser humano (por ejemplo, ambientes con radiaciones de rayos X) o que no son fácilmente accesibles o incluso inaccesibles por el hombre (por ejemplo determinadas zonas en el interior de un paciente). Sin embargo, los robots quirúrgicos no son diseñados para sustituir a un miembro del equipo médico que hará una intervención quirúrgica ya que la atención médica requiere el juicio y el razonamiento humano para manejar la variedad y la complejidad de la anatomía humana y los procesos de enfermedad. Además, las acciones médicas son elegidas en base a la información de un número elevado de fuentes, incluyendo datos específicos del paciente (por ejemplo, los signos vitales), conocimientos de medicina general (por ejemplo el conocimiento médico de la anatomía humana) y la experiencia del médico.

Así, los sistemas robotizados en medicina están destinados a mejorar las capacidades del personal médico, tales como movimientos de alta precisión (evitando el temblor de la mano del médico), o incluso en ciertos casos hacer posible una determinada intervención quirúrgica debido a la accesibilidad de un sistema robótico a mayores lugares dentro del cuerpo humano.

Los sistemas de intervención médica asistidos por computadora pueden recopilar y presentar mucha información al médico de una manera significativa para su uso, a través de robots precisos y exactos que proporcionan herramientas inteligentes y versátiles que incrementan la capacidad del médico para tratar pacientes, mejorando así la calidad del resultado clínico.

Las intervenciones médicas son procesos altamente interactivos y muchas decisiones se toman en la sala de operaciones y se deben ejecutar inmediatamente. En general, se desea mejorar las cualidades del cirujano

mejorando sus capacidades de detección y manipulación, y aumentando el número de sensores y manipuladores disponibles, emulando así más ojos y manos. Por ejemplo, el sistema puede dotar al médico de capacidades sobrehumanas como la visión de rayos X, la eliminación del temblor de la mano, y la capacidad para realizar operaciones en zonas del cuerpo humano inaccesibles por una operación tradicional.

Un ejemplo de este tipo de sistemas es el conocido robot da Vinci desarrollado por *Intuitive Surgical Inc.* (figura 9.3), el cual consiste de un robot denominado esclavo que se encuentra junto al paciente y una consola de control denominada maestro (interfaz). Los movimientos del cirujano son reproducidos por el robot esclavo, el cual realimenta mediante un sistema de visión estéreo una imagen 3D de alta calidad de forma de mejorar la percepción visual del médico acerca de la operación el cual maneja un sistema de alta precisión y exactitud que manipula tejido en el interior del paciente en lugares donde la visualización directa del médico sería limitada.

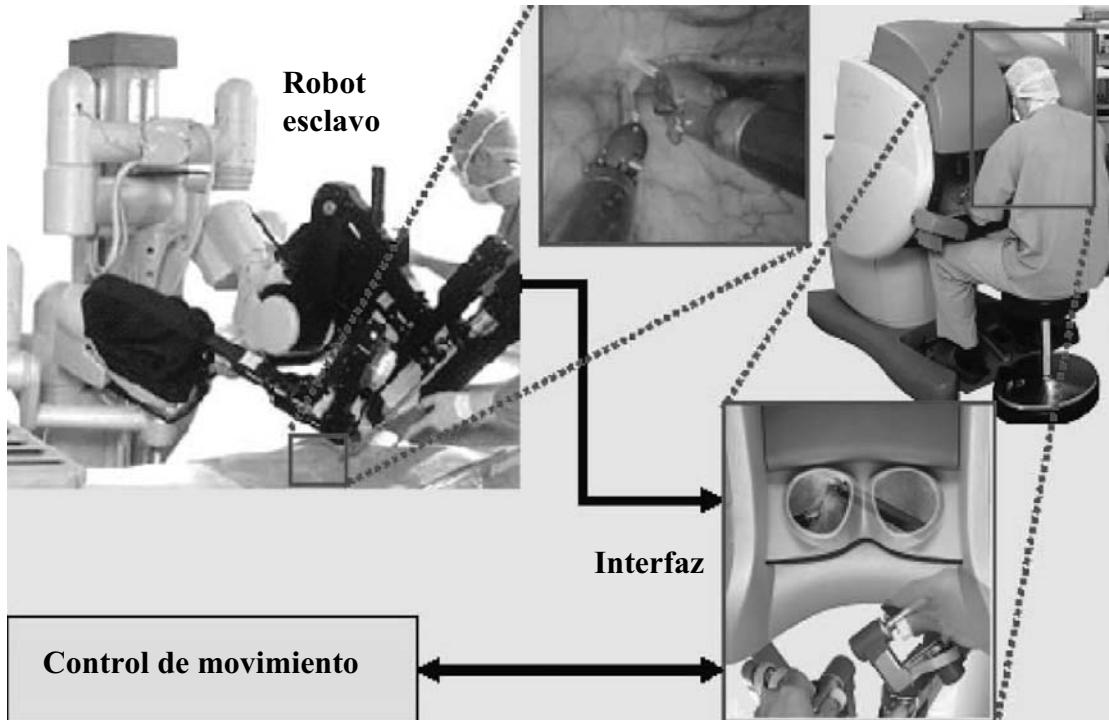


Figura 9.3. Operación médica robotizada mediante el robot Da Vinci.

#### **9.4. Control de una máquina para agricultura**

En este ejemplo se muestra el diseño de un sistema de control de la velocidad de avance de una cosechadora de granos o semillas (figura 9.4) debido a que el rendimiento de la máquina es influenciado por la velocidad de avance, la humedad del cultivo y las pérdidas por cabezal y por cola de la máquina.



Figura 9.4. Máquina cosechadora de granos y semillas.

Respecto a una cosecha mecanizada, se puede aumentar la productividad mejorando el trabajo de las cosechadoras, por ejemplo elevando la velocidad de avance de las cosechadoras se recolectan más granos o semillas por

unidad de tiempo. Sin embargo, a mayor velocidad de avance suelen aumentar también las pérdidas.

Se puede clasificar las pérdidas en la cosecha de granos o semillas en:

- Pérdidas por precosecha (por ejemplo 15% de las pérdidas totales en soja), producidas por desgrane natural y plantas volcadas que el cabezal de la cosechadora no alcanza a recolectar;
- Pérdidas por cosechadora (por ejemplo 85% de las pérdidas totales en soja), debidas a pérdidas de cabezal que surgen por desgrane, vuelco, altura de corte, cuchilla y caída, y pérdidas por cola de la cosechadora.

En la figura 9.5 están representadas los distintos tipos de pérdidas en una máquina cosechadora. Un porcentaje de las pérdidas por cosechadora (70% en soja) son ocasionadas por el cabezal , de las cuales 50% provienen del movimiento y fricción que imprime la barra de corte a las plantas, cuyos factores principales son exceso de velocidad de avance de la máquina cosechadora y deficiencias como desgaste de las cuchillas. El porcentaje de pérdidas restante corresponde a las pérdidas por cola. Como está representado también en la figura 9.5, las pérdidas por cola se producen también de varias maneras, por la fuga de granos por el cilindro (8% en soja), la zaranda (11% en soja) y el saca-paja (11% en soja) [1].

El congestionamiento o sobrecarga del cilindro de la cosechadora es debido a una densidad no uniforme del cultivo, humedad del terreno y cualquier otro motivo que origine sobrecarga, como ser el aumento del índice de alimentación. En estos casos, la sobrecarga aumenta el nivel de pérdidas por cola y éstos se corrigen con una disminución de la velocidad de avance, lo cual disminuye la tasa de alimentación (en kilos por hora) y por lo tanto la sobrecarga del cilindro.

La sobrecarga en la parte de saca-paja es debida al grano que no pasa por la zaranda y tiene las mismas causas. Sin embargo, en este caso es muy

importante considerar que la soja presenta dificultad de separación cuando la paja se encuentra muy húmeda o verde por falta de maduración al momento de la cosecha. En esta situación, el saca-pajitas no produce suficiente agitación, formando una capa impermeable para los granos, con aumento de las pérdidas por cola de la cosechadora. En estos casos es aconsejable también bajar el índice de alimentación de la cosechadora disminuyendo la velocidad de avance.

Estas pérdidas por cola están graficadas en la figura 9.6 donde también se muestra su correlación con el índice de alimentación de una cosechadora. Cuanto más ancho sea el cilindro y más potente el motor de la cosechadora, mayor será la cantidad de material (grano o semilla, paja, granza y malezas), que la máquina puede procesar por unidad de tiempo, expresada en toneladas/hora. Este valor es denominado índice de alimentación total (I.A.T.) y para un ancho de corte dado, es proporcional a la velocidad de avance de la cosechadora.

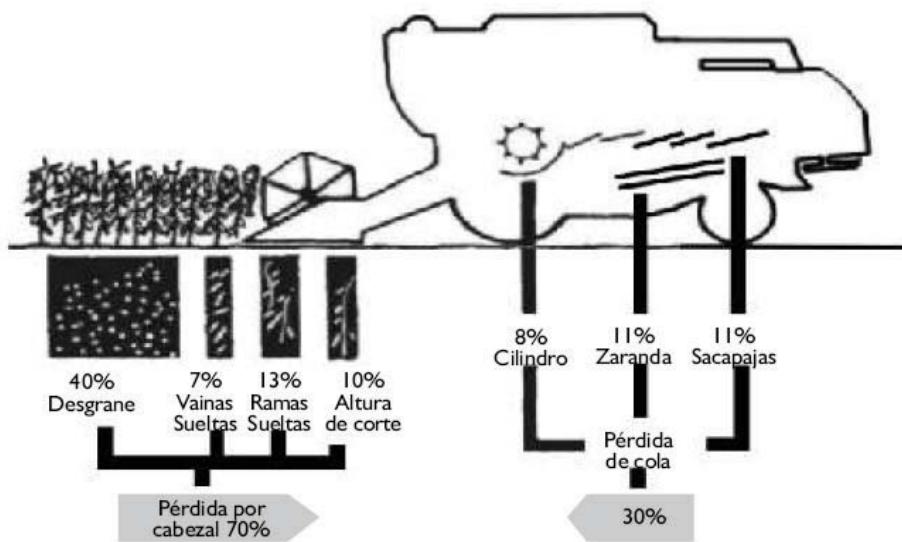


Figura 9.5. Esquema de una cosechadora enfrentando un cultivo donde se representan los distintos tipos de pérdidas de granos y sus proporciones relativas [1].

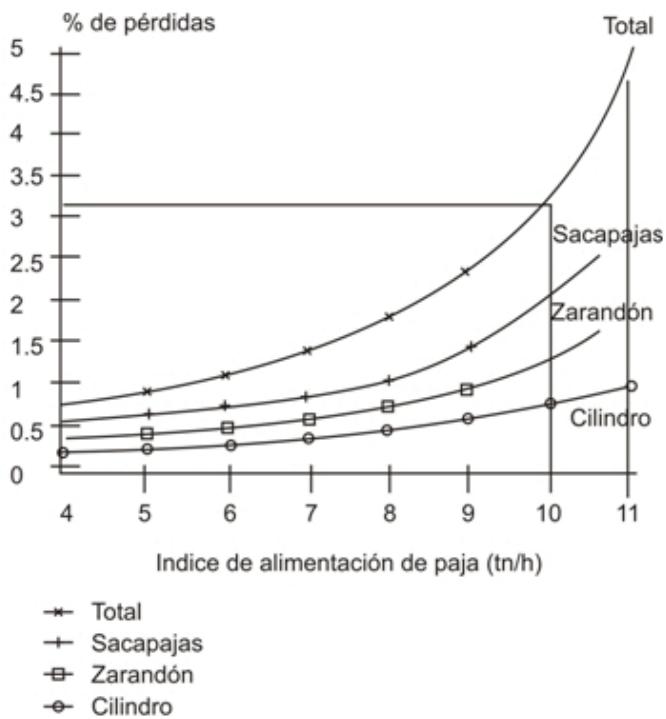


Figura 9.6. Gráfico de los niveles de las distintas pérdidas por cola en función de la velocidad de avance de la máquina cosechadora [1].

El sistema de control tiene como objetivo mejorar la cosecha de granos o semillas, por ejemplo soja, semilla de alfalfa, etc., regulando la velocidad de avance de la máquina cosechadora para disminuir las pérdidas de granos o semillas por la cola de la máquina. El objetivo planteado podría lograrse en cierto grado capacitando mejor a los operarios de la cosechadora o empotmando un sistema automático de avance o integrando ambas características como se pretende en este diseño [2], cuyo método expuesto es de tipo control compartido y puede tener diferentes niveles establecidos por el operador humano, como se ilustra en la figura 9.7.

La figura 9.8 muestra esquemáticamente la implementación del sistema de control [2], donde un control determina la velocidad de avance de la cosechadora en base al comando de velocidad generado por el operador humano a través de un acelerador electrónico (compuesto por un pedal acelerador y/o control de velocidad por palanca convencional más un sensor que entrega una señal eléctrica cuya magnitud representa la posición angular

del pedal y/o palanca) y considerando la información suministrada por un mapa georreferenciado de rendimiento actualizado permanentemente con la información proporcionada por un monitor de pérdidas por cola, sensores de la humedad del cultivo recolectado, de la velocidad de avance de la cosechadora y de la cantidad recolectada (en kilos), y de un GPS.

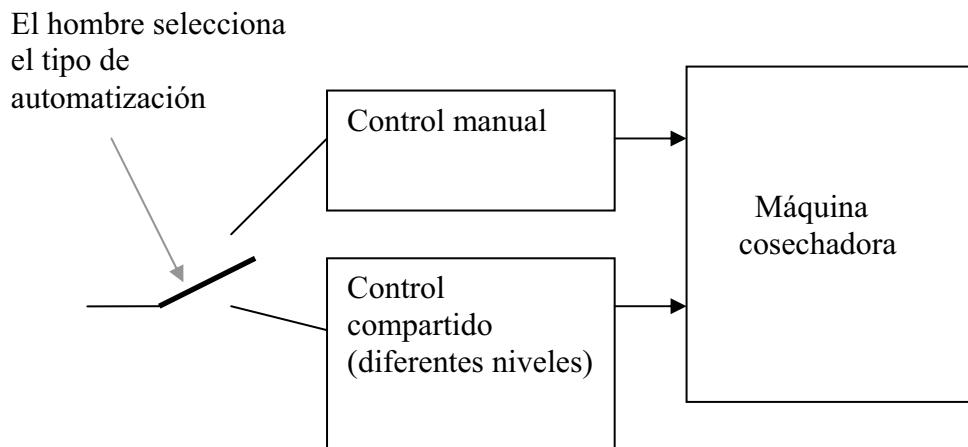


Figura. 9.7. Control compartido seleccionado por el operador humano.

Es importante recalcar que la información medida y procesada también es enviada al operador a través de una realimentación táctil de fuerza, sonora y/o visual para que el usuario actualice su comando en base a esa información que el hombre interpretará de mejor manera si conoce el proceso de la cosecha y el comportamiento de la máquina automatizada, y aprovecha su experiencia. Aunque también su comando será influenciado por su estado en relación al cansancio y la distracción, lo cual justifica la combinación del comando del operador con la acción rápida y de gran precisión producida por un sistema de control automático.

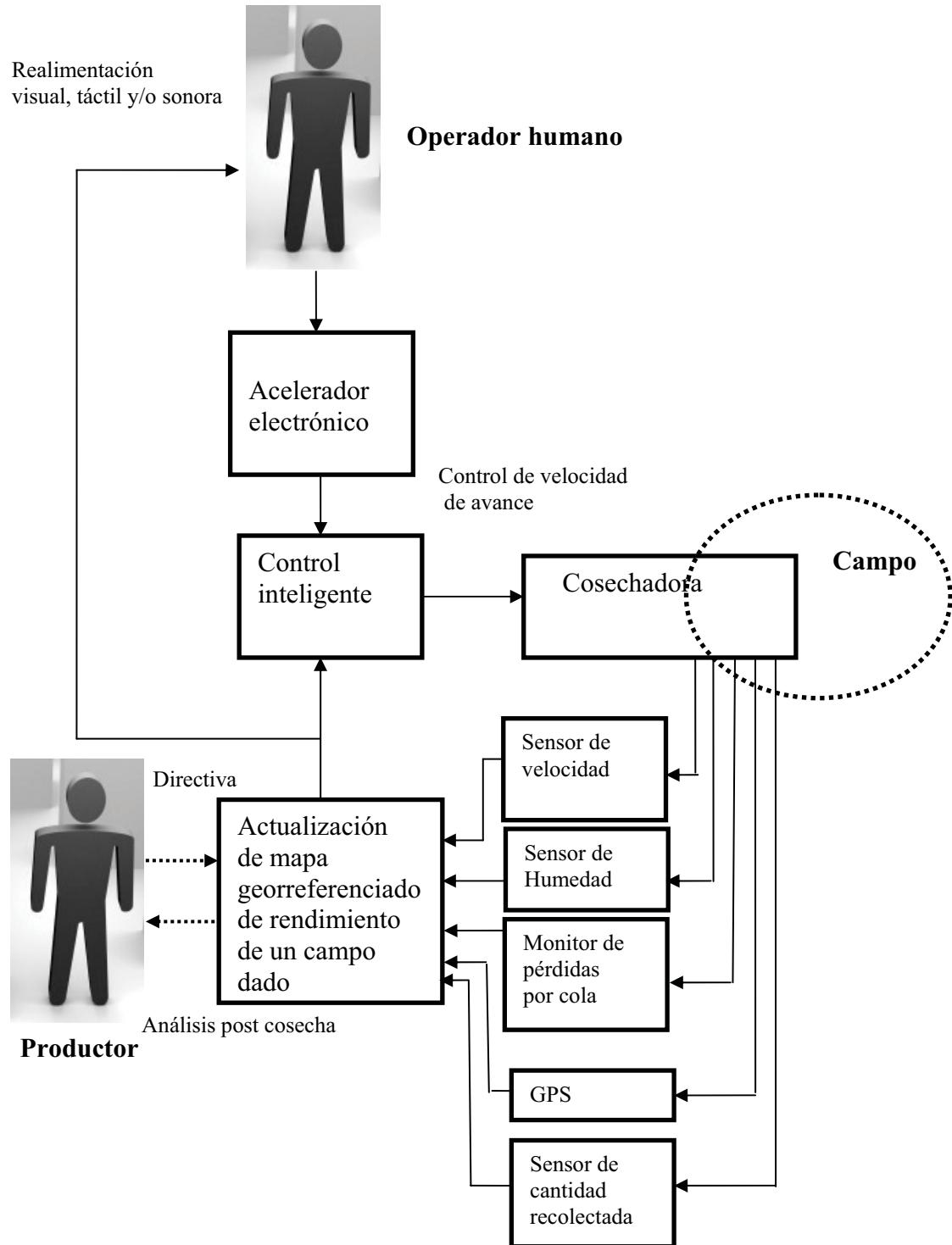


Figura 9.8. Sistema de control de la velocidad de avance de una cosechadora inteligente.

El sistema de control introduce cambios controlados y acotados de velocidad al comando generado por el operario para evitar sobrecargas y aprovechar mejor

la capacidad de cosecha (en kilos o toneladas por hora). Además, el sistema posee un sistema sensorial y conocimiento empotrado de forma de generar y actualizar permanentemente un mapa de rendimiento georreferenciado donde el mismo depende de la velocidad de avance. Esta información puede ser utilizada por el productor para ser analizada en post cosecha y en base a dicha información y a su experiencia, él puede ingresar al sistema una directiva sobre los kilos por hectárea (también podría incluir el tiempo requerido de cosecha por hectárea) que establece como objetivo para una zona georreferenciada dada. Esta directiva es considerada en un algoritmo de optimización interno del sistema de control junto con el mapa georreferenciado de rendimiento de manera de establecer una velocidad óptima de acuerdo al criterio establecido. El sistema de control modifica levemente el comando generado por el operador humano hacia el valor calculado como óptimo según la automatización e informa simultáneamente por medio de una realimentación táctil, sonora y/o visual al operador humano si debería aumentar o disminuir la velocidad de avance y en qué magnitud (mucho, poco, etc.). Esta realimentación es fundamental para que el operador humano conozca la actividad que actualmente está haciendo el sistema de control, lo que implica que el hombre tenga un adecuado conocimiento de la situación.

Es decir, el sistema de control considera la capacidad y experiencia del operario, la experiencia y criterio del productor y la precisión, exactitud y velocidad de respuesta de un sistema automático para conseguir un buen desempeño en la cosecha de granos o semillas, como se ilustra en la figura 9.9.

Finalmente se destaca que el nivel con el cual el comando del operador humano es cambiado para un contexto dado, podría ser establecido también a través de una selección del nivel de automatización, como por ejemplo: Control convencional de velocidad (control manual), automatización leve, intermedia o alta o completamente automatizado.

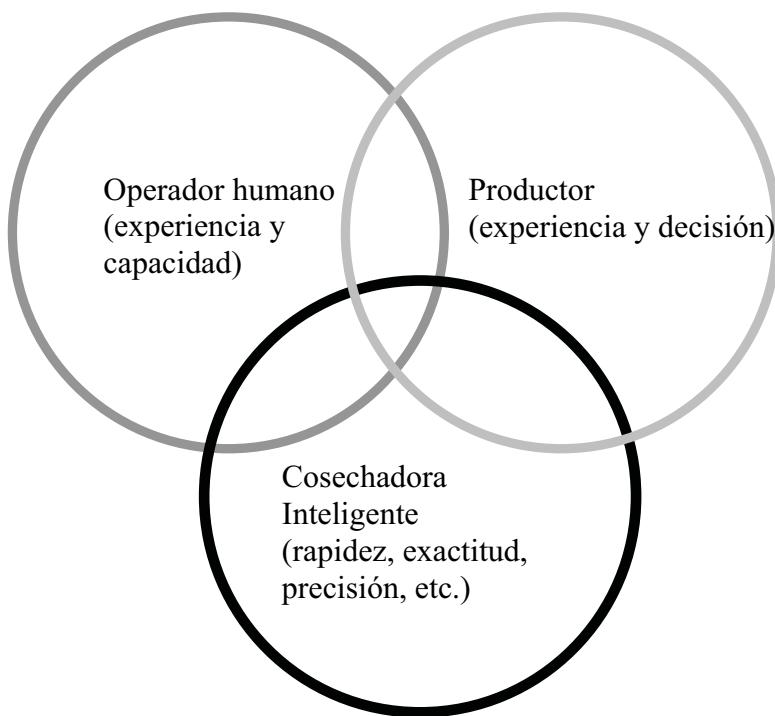


Figura 9.9. El sistema de control enlaza la decisión y experiencia del productor, la capacidad y experiencia del operador humano y la automatización.

## 9.5. Interfaz de un automóvil

En este ítem se presenta un diseño novedoso propuesto por los autores respecto a una interfaz entre hombre-máquina aplicada para asistir al conductor de un automóvil, como se ilustra en la figura 9.10. La interfaz realimenta al conductor una pequeña fuerza de vibración controlada sobre cada mano dependiendo del estado tanto del conductor como del estado del automóvil y del entorno, de forma de prevenir al mismo de posibles peligros de una forma amena para él sin obligarlo a desviar su vista del camino y entorno actual del vehículo ni escuchar sonidos frecuentes de alarmas que molesten al conductor.

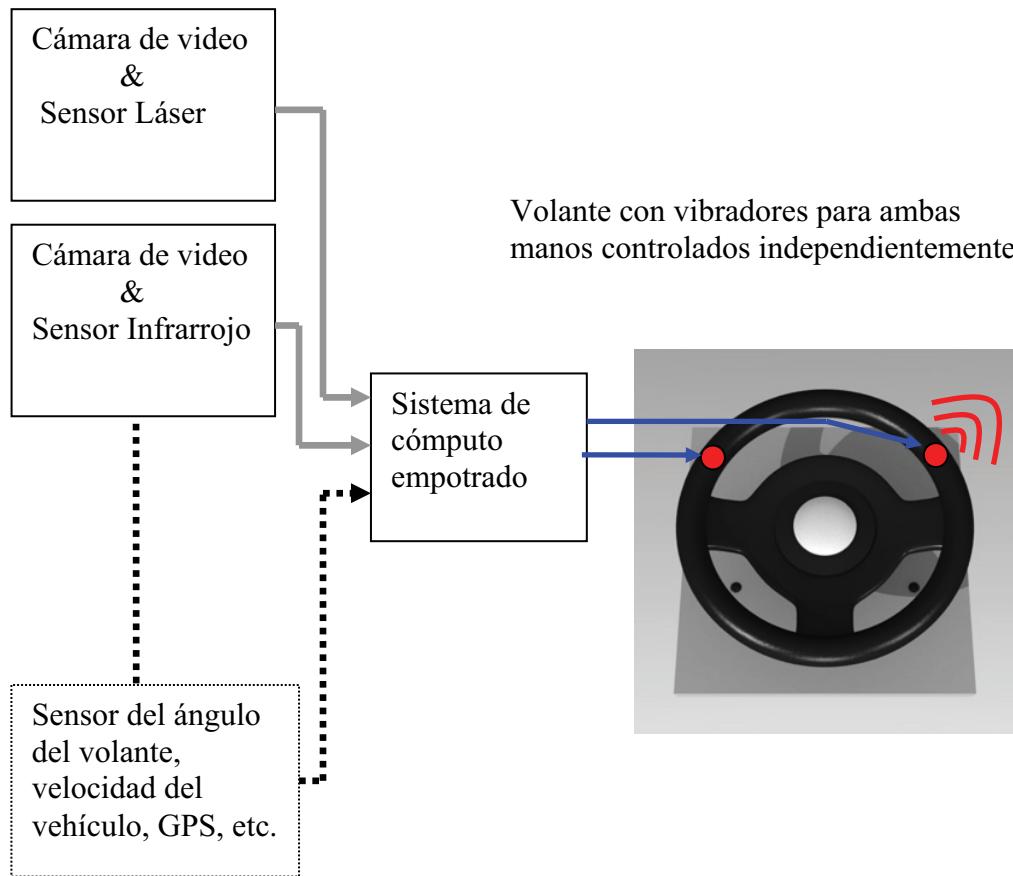


Figura 9.10. Interfaz para un automóvil basada en realimentación táctil de fuerza.

La interfaz diseñada se compone por un sistema sensorial formado por tres conjuntos de sensores, dos de ellos formados por una cámara de video y sensor infrarrojo o láser (ambos sensores podrían estar integradas en un solo tipo de sensor tal como las cámaras TOF). El primer sensor compuesto es montado en un lugar conveniente del automóvil de forma de captar los objetos ubicados por delante del vehículo (también se podría extender hacia los laterales y hacia atrás del mismo) y la posición relativa del vehículo respecto a la posición central de su vía de avance, es decir este sensor mide el estado del entorno y de la máquina relativa a éste. La figura 9.11 muestra una imagen captada por un sistema de visión y el resultado de un procesamiento de la imagen para detectar las vías del camino.



Figura 9.11. Detección de vías de un camino utilizando procesamiento de imagen.

Por otro lado, el segundo sensor compuesto es ubicado en la cabina de mando del vehículo de manera de detectar la distracción visual del conductor a través de la medición de la dirección 3D de la mirada del hombre, es decir este sensor mide el estado del conductor. El tercer grupo de sensores esta formado por un velocímetro digital, posición actual de los pedales acelerador y freno, etc. es decir los mismos miden el estado de la máquina (automóvil).

Además, el concepto desarrollado es independiente de la tecnología empleada e incluso puede ser mejorado si más sensores son incorporados así como si se extienden los patrones de fuerza aplicados al sistema de actuación manteniendo la premisa de alertar anticipadamente al conductor de posibles peligros de acuerdo al contexto actual representado por el estado del vehículo (velocidad, posición global, etc.), el estado del entorno (posición y velocidad relativa de los objetos del entorno tal como otros vehículos, peatones, etc.) y el estado del conductor (como por ejemplo su nivel de distracción, fatiga, etc.).

Además, la interfaz diseñada consta de un sistema de procesamiento y control basado en un sistema de computo empotrado; y un sistema de actuación basado en al menos dos mini-actuadores con capacidad de vibración montados sobre el volante de un automóvil de forma de realimentar sobre cada mano del conductor una sensación de vibración controlada en magnitud y frecuencia independientemente sobre cada mano y con amplitudes adecuadas para no molestar al hombre mientras maneja pero previniendo al mismo de posibles peligros futuros computados con un cálculo predictivo. Es decir, toda la información adquirida tal como distancia y velocidad relativa entre el automóvil y los objetos de su entorno, la posición del automóvil respecto al centro de su vía de avance dentro del camino y la distracción visual del conductor (la cual se puede computar a partir de la dirección de la mirada del conductor) se podría integrar para computar cualitativamente posibles peligros futuros y la dirección hacia donde el conductor debería focalizar su atención.

El sistema de actuación realimenta vibraciones controladas en magnitud y frecuencia dentro de un rango tal que no sean molestas para el conductor pero aprovechando la capacidad de percepción táctil de la persona. Es decir el hombre puede sentir en sus manos muy pequeñas vibraciones y discernir entre diferentes señales con pequeñas variaciones en magnitud y/o frecuencia, con lo cual sería posible por ejemplo detectar presencia, posición relativa y velocidad de los obstáculos. El sistema de actuación no hace vibrar el volante sino que utiliza estimuladores vibro-táctiles localizados sobre el volante donde el conductor generalmente sostiene el volante con sus manos.

Las figuras 9.12, 9.13, 9.14 y 9.15 ilustran cómo funciona el sistema interfaz ante diferentes situaciones típicas. Por ejemplo la figura 9.12 muestra cómo el sistema alerta al conductor acerca del acercamiento del vehículo hacia la banquina derecha. La figura 9.13 ilustra una alerta de probabilidad frontal de choque. La figura 9.14 muestra cómo el sistema trabaja ante una distracción visual del conductor. Finalmente, la figura 9.15 ilustra la “inteligencia” del volante al realimentar una fuerza diferencial de acuerdo al estado del entorno, al estado del vehículo y al estado del conductor. Los números indican la secuencia temporal desde la detección del peligro hasta la acción del hombre estimulado inteligentemente por el sistema interfaz.

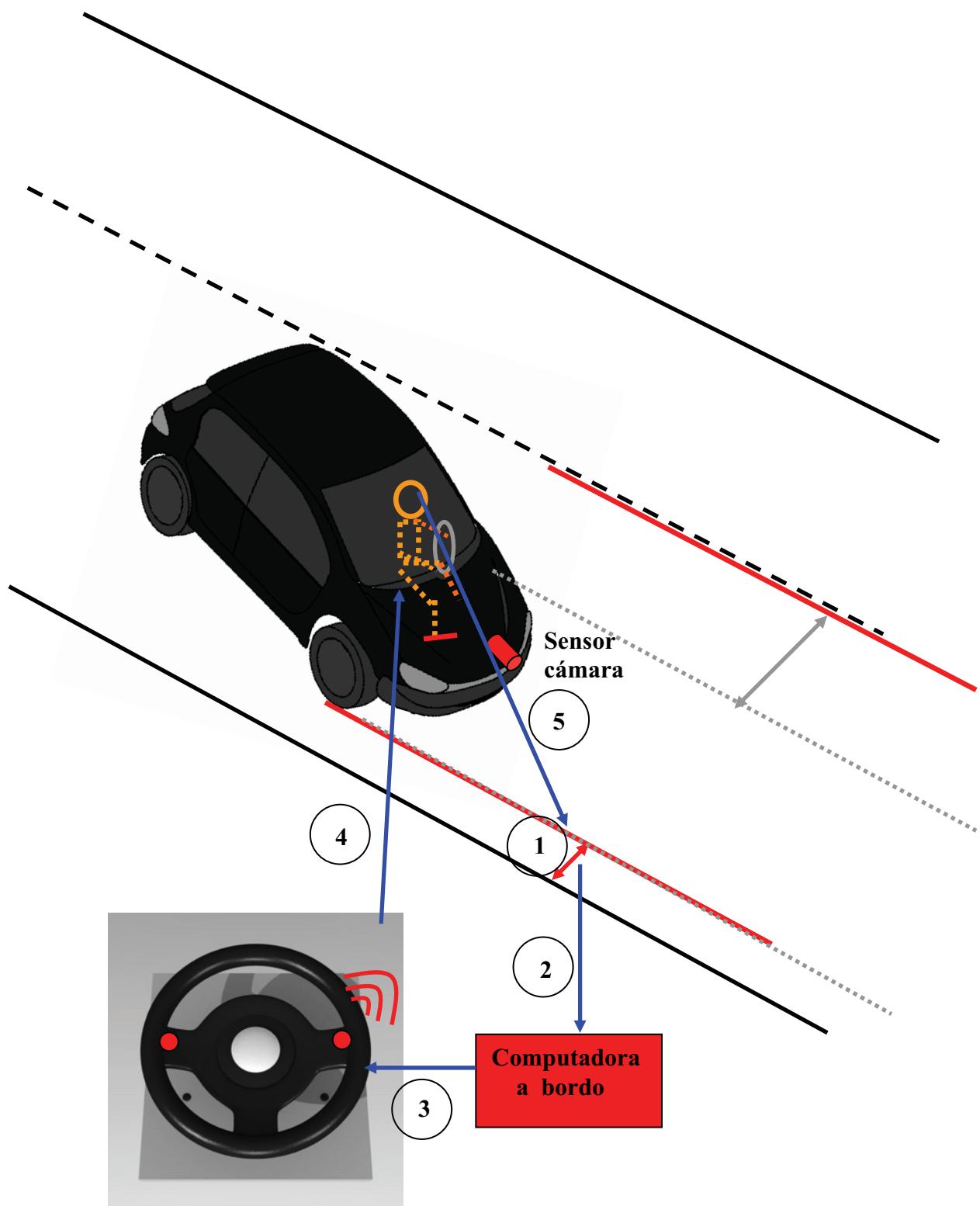


Figura 9.12. Alerta de proximidad a la banquina.

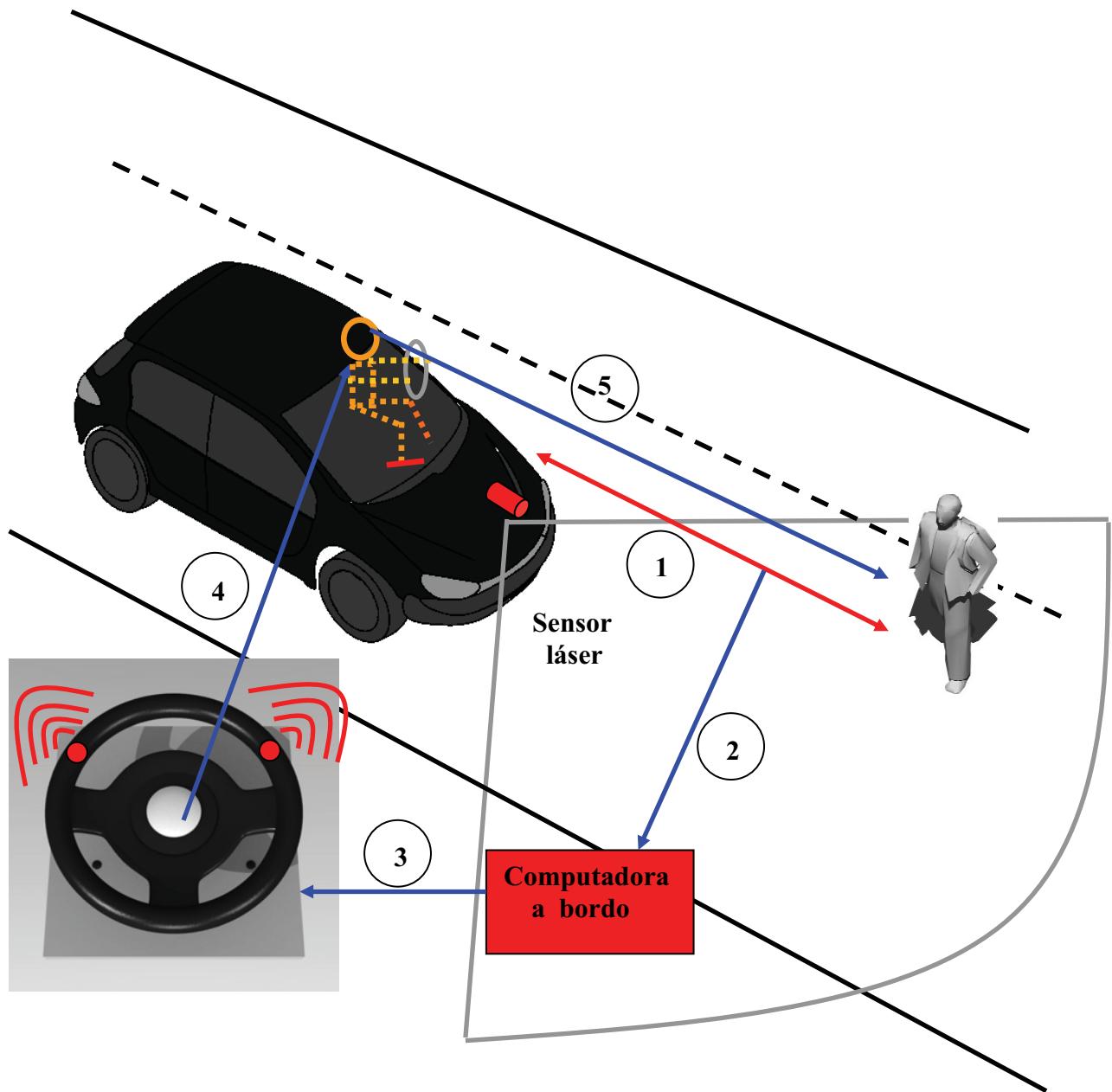


Figura 9.13. Alerta de probabilidad de choque.

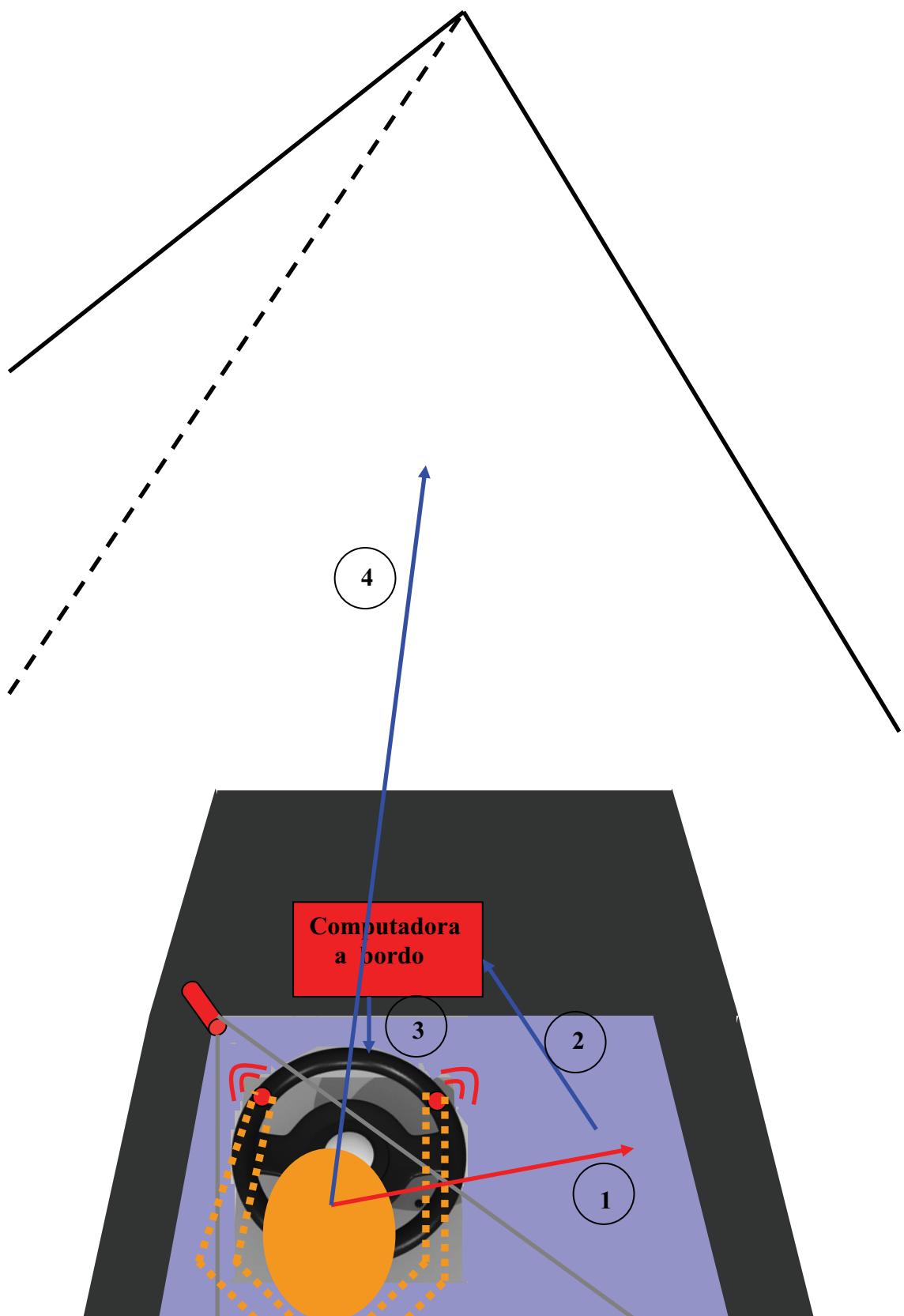


Figura 9.14. Alerta de distracción visual.

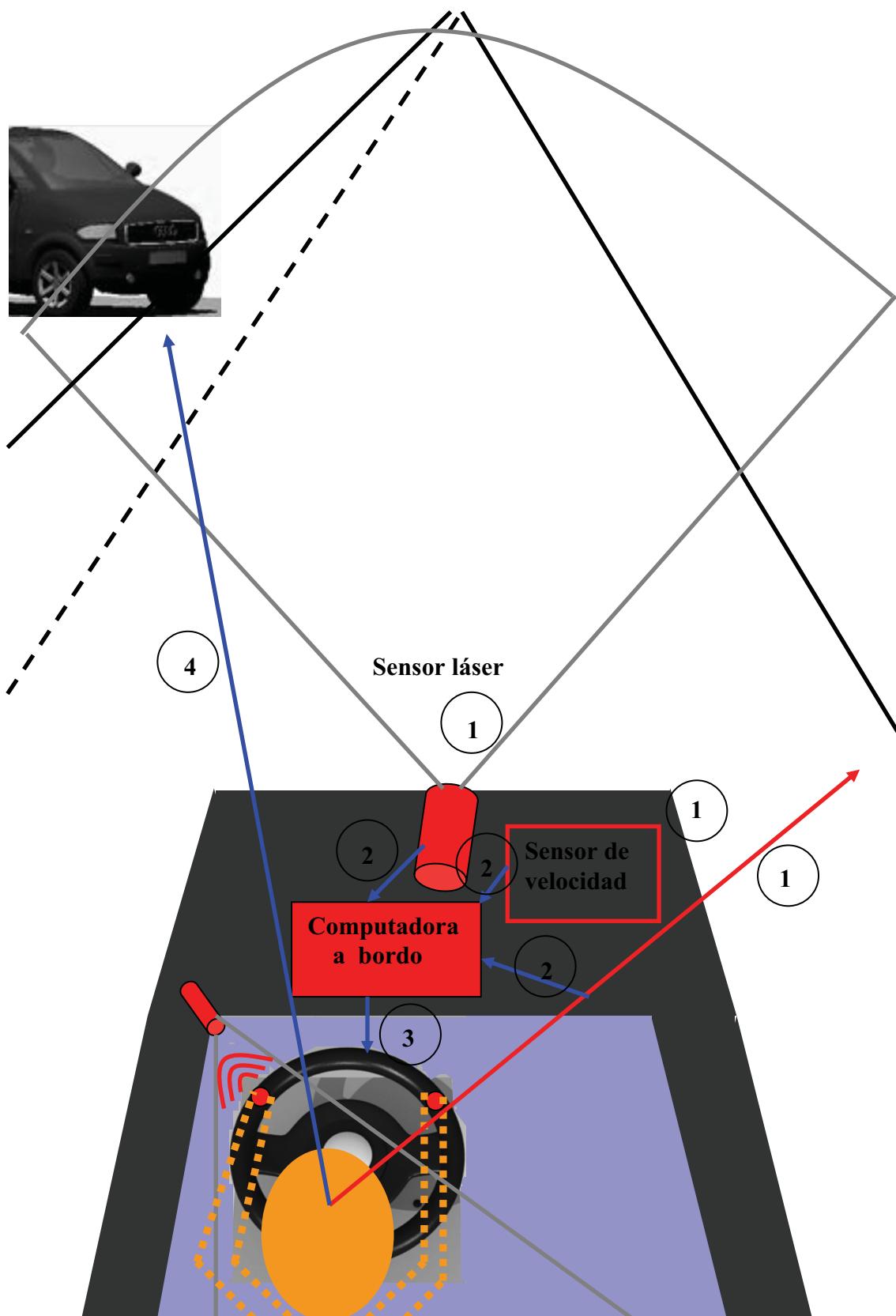


Figura 9.15. Realimentación inteligente al conductor para que el mismo focalice rápidamente su atención visual hacia una situación de posible peligro.

## **9.6. Teleoperación de Robots**

Los sistemas de teleoperación bilateral permiten a una persona desde su trabajo, casa o cualquier lugar en general, hacer un trabajo físico a distancia en un entorno remoto donde puede haber objetos, otros robots y hasta personas. Una teleoperación “bilateral” implica que la comunicación entre el robot y el hombre es continua y permanente tanto desde el robot hacia el hombre como desde el usuario hacia el robot.

Tal vez, Internet representa el canal de comunicación más atractivo debido a su uso cada vez mayor fomentado por sus altas prestaciones y bajo costo. La posibilidad de un operador humano ejecutando un trabajo físico a distancia representa una herramienta potente y útil para ser aplicada a diversas áreas tales como telemedicina, tele-servicios, exploración, tele-manufactura, agricultura, minería y entretenimiento, entre otros [99].

Sin embargo, el uso de Internet presenta problemas para el funcionamiento adecuado en la práctica de sistemas de control a distancia [86] [100] [103] ya que existe un retardo de tiempo (incluso es variante dependiendo del tráfico y congestión de la red) haciendo que la persona perciba la interacción entre el robot y el entorno remoto (objetos, personas, otros robots, etc.) un tiempo después que cuando realmente ocurre y los comandos enviados por él son recibidos por el robot un tiempo después también. Esto hace difícil el manejo seguro de un robot a distancia en forma manual y la automatización completa podría realizarse en caso que se conozca previamente el entorno y la forma de resolver la tarea. Por lo tanto, es necesario adicionar un sistema de control en el sistema de teleoperación que enlace la automatización y el hombre.

La figura 9.16 muestra un esquema general de teleoperación a través de Internet donde una persona maneja un robot móvil o robot manipulador a través de una interfaz.

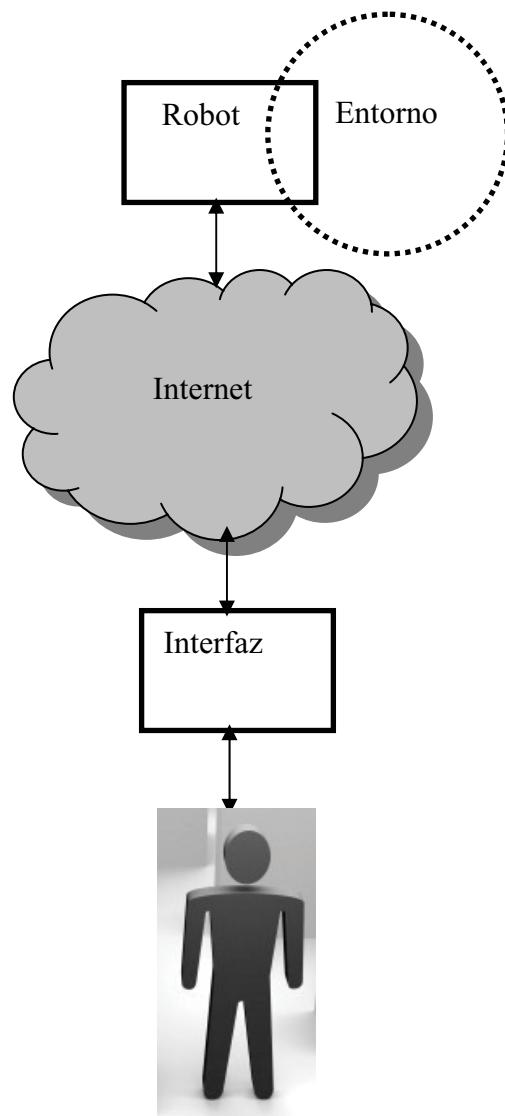


Figura 9.16. Teleoperación de un robot por Internet.

La mayoría de las estrategias de control empleadas en teleoperación tales como [98] [102] se basan en asegurar la estabilidad del sistema, el cual es un concepto fundamental en los sistemas automatizados. En este tipo de análisis se considera al operador humano como una caja negra que tiene una salida acotada ante un estímulo de entrada acotado también.

¿Se debería considerar de alguna manera algún factor humano en el diseño de un sistema de control para teleoperación de robots?...

En los sistemas de teleoperación surge el concepto de transparencia (aunque el concepto se podría generalizar a sistemas hombre-máquina), el cual

representa cómo el operador humano siente la interacción con la tarea remota [97] [104]. Es decir, que una teleoperación más transparente que otra implica que el hombre este más acoplado a la tarea remota en cuanto a su sensación de percepción y acción. Por ejemplo, el control supervisor tiene una baja transparencia ya que el operador humano esta desacoplado de la tarea a través de un sistema automático lo cual es adecuado para muchas aplicaciones pero inadecuado para algunos tipos de trabajos tales como tareas de exploración.

Entonces, ¿que debería ser priorizado: estabilidad o transparencia?...

Los esquemas de control deberían apuntar hacia una relación de compromiso entre transparencia (indirectamente representa un factor humano) y estabilidad (factor de la automatización) priorizando alguno de ellos de acuerdo a la aplicación. Por ejemplo, si la aplicación requiere poca capacidad del hombre para tomar decisiones entonces se podría priorizar la estabilidad del sistema de forma de obtener una respuesta precisa, exacta y rápida. Por otro lado, si el hombre debe o debería tomar decisiones continuamente, entonces la transparencia debería ser valorada para que él perciba lo mejor posible la tarea y entorno y genere comandos adecuados.

Se remarca que el control de sistemas de teleoperación es un tema abierto actualmente [101]. De todas formas, se describirá una posible alternativa que considera tanto la transparencia del sistema como su estabilidad y también el tiempo de reacción del hombre (factor humano). El sistema de control se representa en la figura 9.17 y es de tipo control compartido, donde el comando del usuario es modificado de acuerdo a la diferencia entre el contexto (estado de la máquina y del entorno) que siente y ve el operador humano cuando generó su comando y el contexto real medido por el robot. En el contexto que ve el hombre se puede tener en cuenta también el tiempo de reacción del hombre ante un estímulo visual, táctil y/o auditivo. Es decir que el nivel de automatización depende de la situación actual, y del contexto visto por el hombre y visto por la automatización.

Por otro lado, la información realimentada hacia el usuario no es cambiada por el control del sistema pero podría ser modificada por la interfaz por ejemplo entrelazando adecuadamente sonido 3D, realimentación de fuerza y realidad aumentada 3D, de forma de aprovechar la capacidad del hombre de interpretar y utilizar información integrada consistentemente.

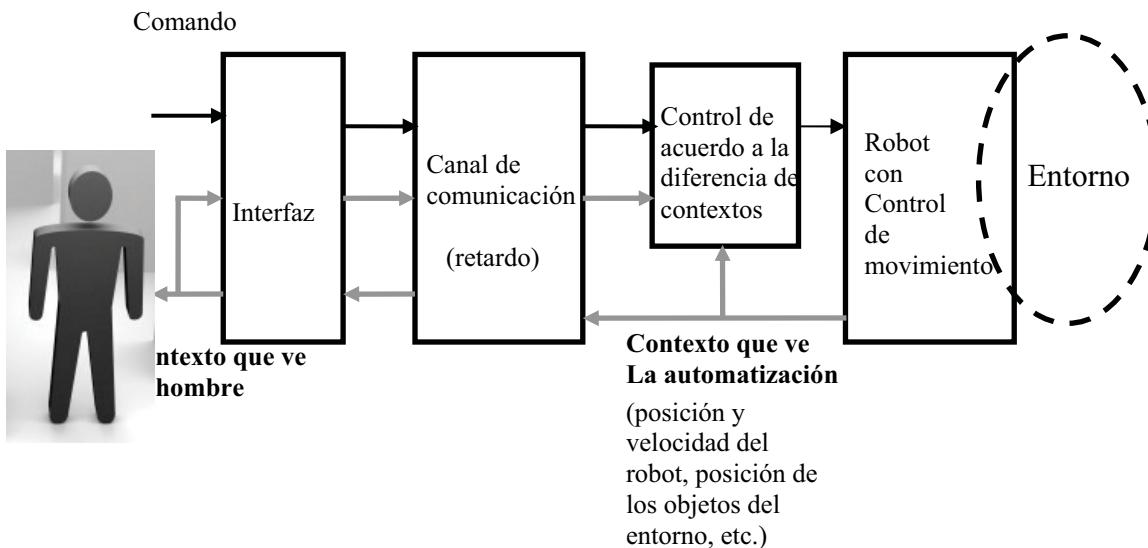


Figura 9.17. Sistema de control para teleoperación de robots.

El sistema de control es probado en la teleoperación de un robot fijo y luego con un robot móvil. En el primer experimento, un operador humano maneja un sistema interfaz compuesto por un dispositivo *Cyberforce* (ver capítulo 6) para teleoperar un robot tipo joystick para hacer un trabajo físico deseado con realimentación de la fuerza de contacto entre el robot y su entorno. En este caso la tarea implica realizar un movimiento horizontal de barrido manteniendo una pequeña fuerza de contacto (en dirección normal al movimiento deseado) con una superficie blanda manteniendo los ojos cerrados, es decir utilizando solamente el tacto. El retardo es variable con un valor medio de 1.25 segundos (los valores van entre 1 y 1.5), y es desconocido por el operador humano.

Las figuras 9.18 y 9.19 muestran la evolución temporal en las dos coordenadas utilizadas (denominadas coordenadas "x" e "y") de la posición del dispositivo interfaz y del robot (tipo joystick en este caso) y de la referencia compensada de acuerdo a la diferencia entre el contexto real y el contexto sentido por el

hombre al momento de generar su comando [106]. La posición y la fuerza son escaladas al intervalo [-1,1] utilizando los valores máximos (en posición y fuerza) de ambos dispositivos.

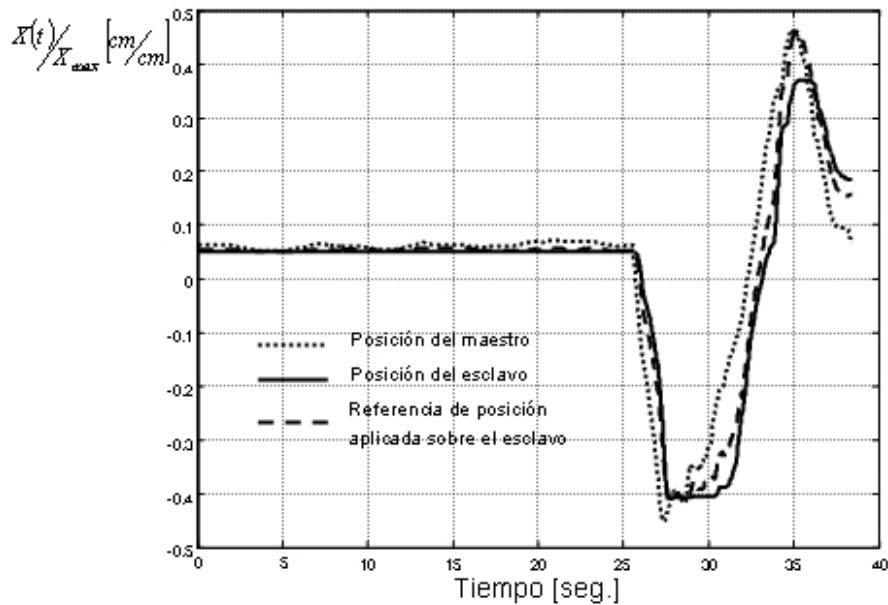


Figura 9.17. Posición a lo largo de la dirección  $x$  del dispositivo interfaz, el robot y de la referencia compensada por el sistema de control.

El esquema de control propuesto disminuye el posible sobre avance en posición del robot ocasionado por ejemplo cuando el operador humano no percibe realimentación de fuerza debido al retardo de tiempo continuando con su movimiento a pesar de que el robot real está en contacto físico algún objeto de su entorno (figura 9.18). En general, el sistema de control modifica el comando de posición aplicada sobre el robot usando la diferencia entre la fuerza actual (la fuerza de contacto representa el estado de la interacción entre el robot y su entorno) y la fuerza que sintió el operador humano cuando generó su comando de posición. La figura 9.20 muestra a través de una secuencia de imágenes de 1 a 8 cómo el usuario pudo realizar adecuadamente la tarea deseada empleando su sentido táctil de fuerza a pesar del retardo de tiempo.

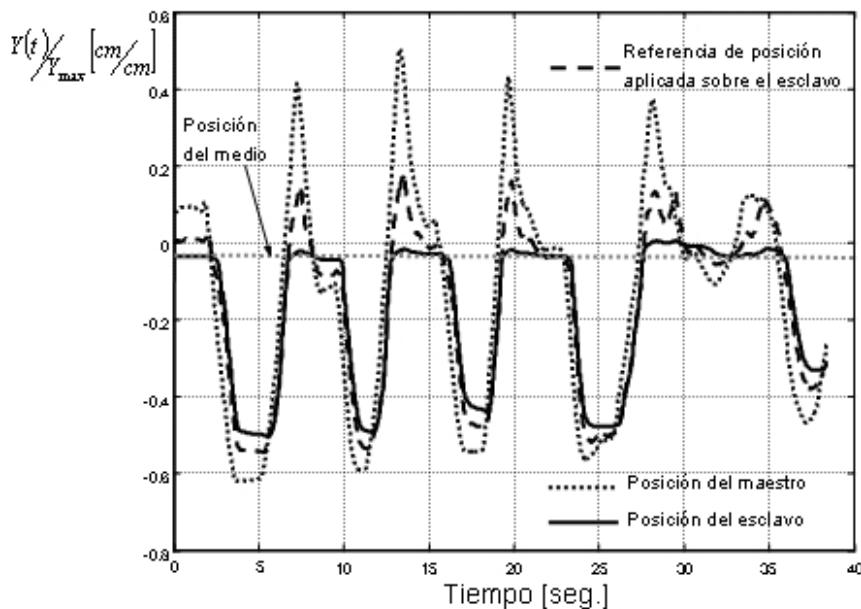


Figura 9.18. Posición a lo largo de la dirección  $y$  del dispositivo interfaz, el robot y de la referencia compensada por el sistema de control.

Este esquema también se puede aplicar a un robot móvil con realimentación visual hacia el operador [107], donde el contexto se interpreta mediante el estado del robot (posición y velocidad) y el entorno (por ejemplo la distancia a los obstáculos se podría representar mediante una fuerza ficticia como en el capítulo 5). El usuario se encuentra en una oficina y teleopera, utilizando una comunicación inalámbrica, un robot móvil dispuesto en un laboratorio (robot Pioneer modelo 2DX fabricado por Activmedia) a través de una interfaz compuesta por un volante y pedal acelerador y realimentación visual al operador humano suministrada por la imagen captada por un sistema de visión a bordo del robot y un ambiente gráfico que indica al operador humano la posición del robot, la posición del obstáculo, la posición de referencia (objetivo) y la posición del pedal acelerador (mediante una barra de amplitud proporcional al desplazamiento angular del acelerador).

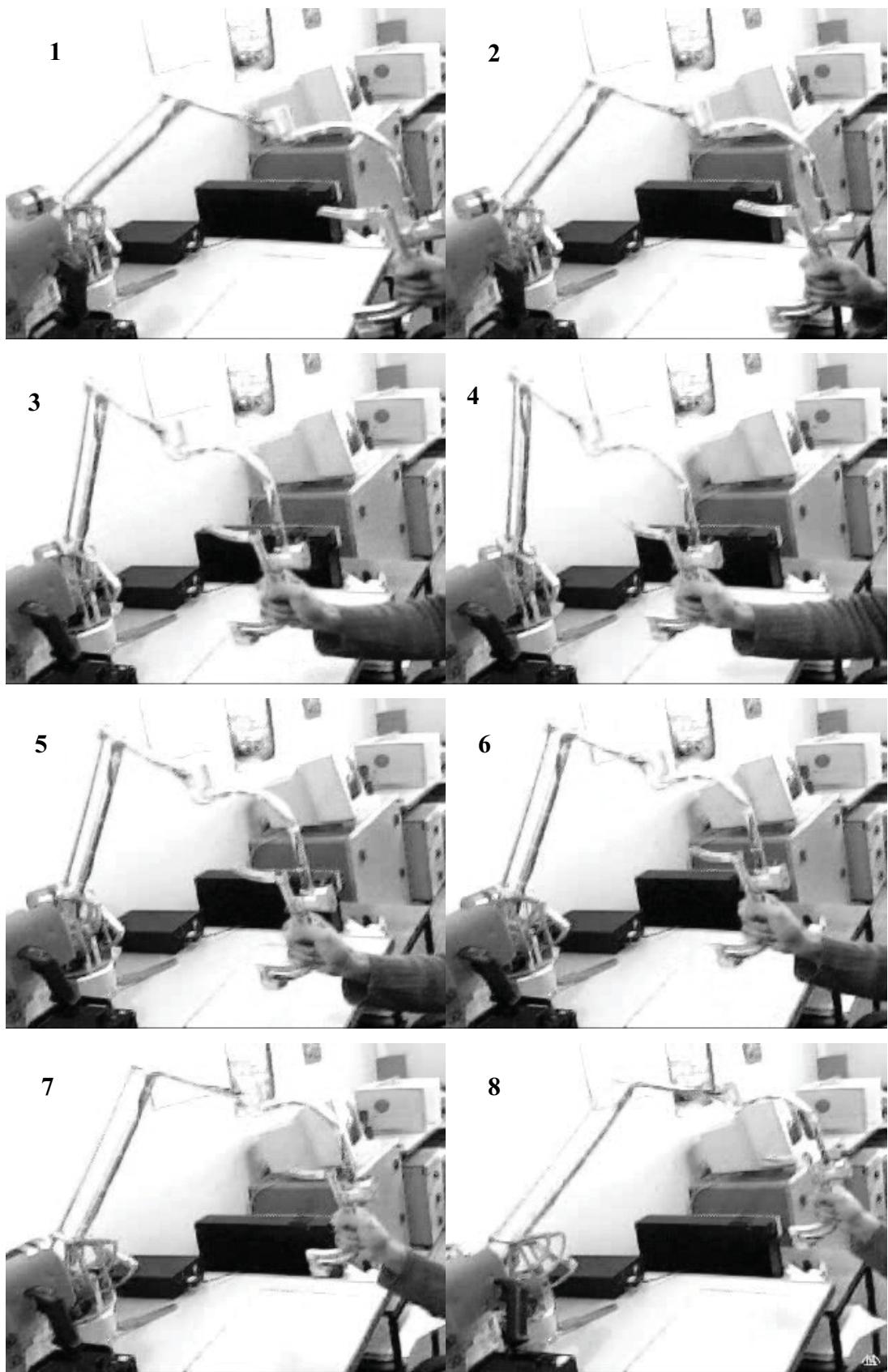
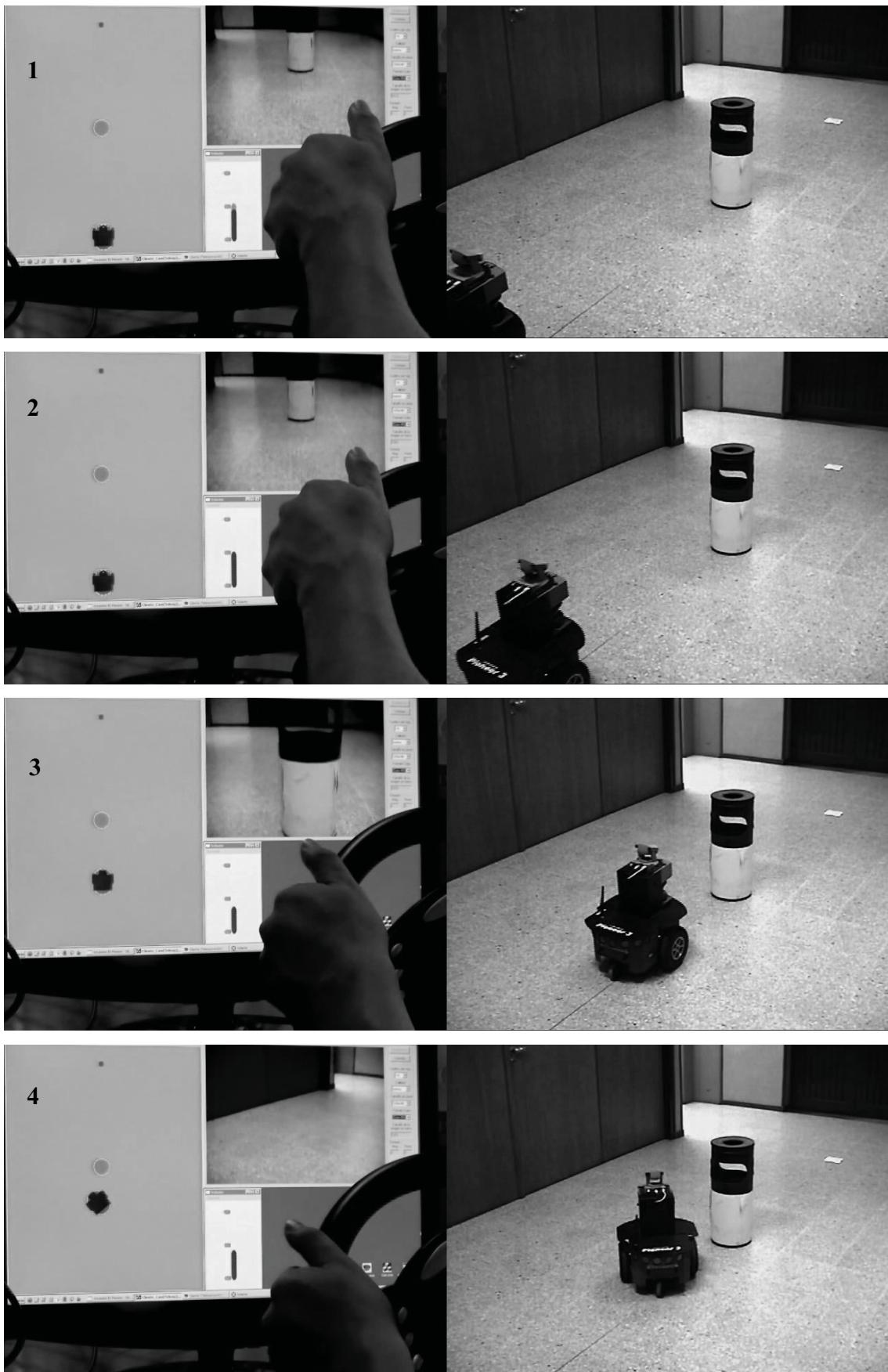


Figura 9.20. Teleoperación de un robot con realimentación de fuerza.



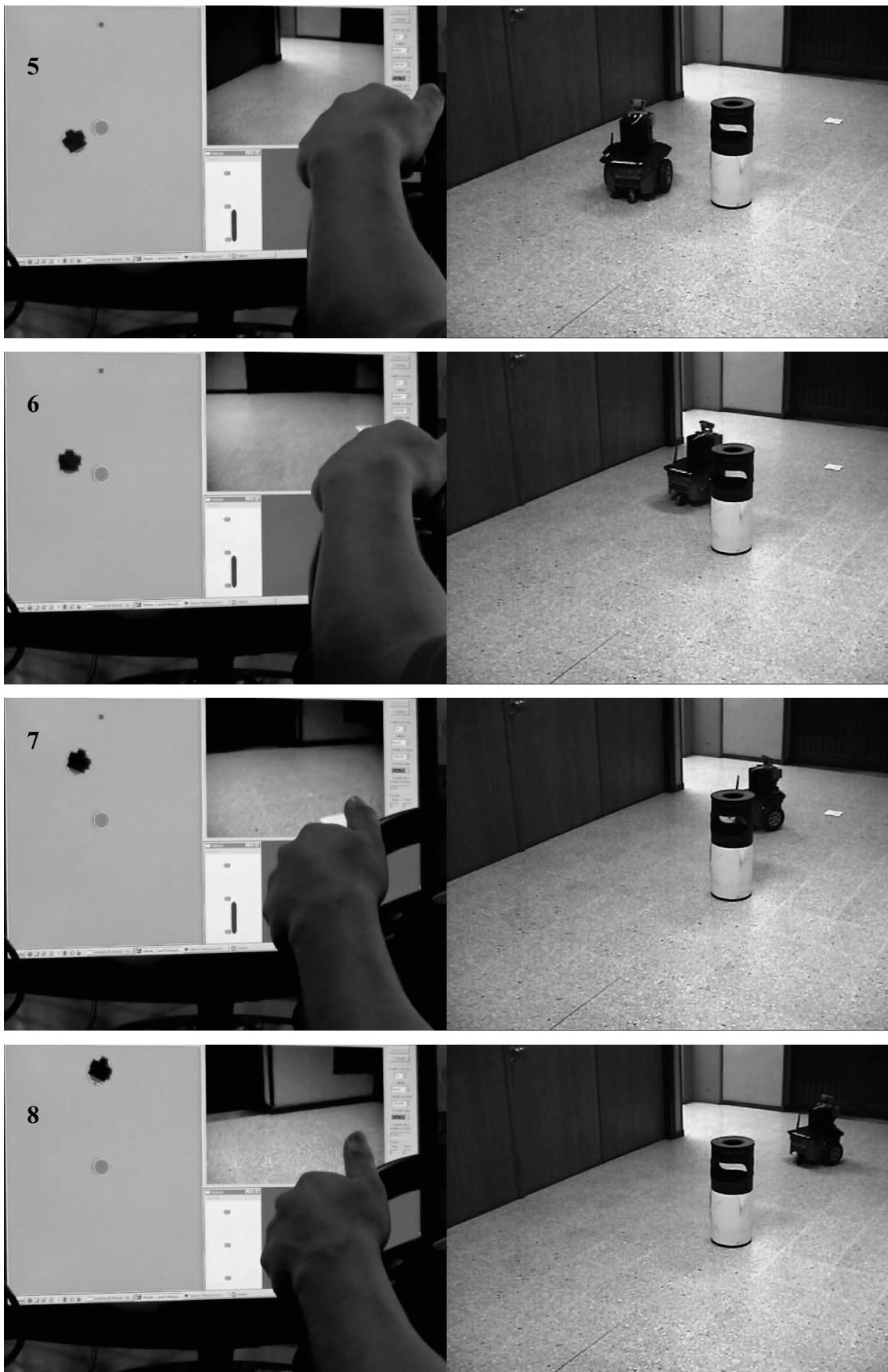


Figura 9.21. Teleoperación de un robot con realimentación visual.

La figura 9.21 muestra a través de una secuencia de imágenes de 1 a 8 ordenadas temporalmente cómo el operador humano pudo hacer que el robot móvil llegue a la posición deseada temporalmente de arriba hacia abajo. Cada imagen muestra en un instante de tiempo dado el robot y su entorno (parte derecha) y lo que ve y genera el operador humano a través de la interfaz utilizada (parte izquierda) en dicho instante. La diferencia de contexto es utilizada por el sistema de control, por ejemplo en la secuencia 2 se observa que el robot móvil se mueve a una cierta velocidad mientras el operador humano ve en ese mismo instante de tiempo que el robot está quieto (debido al retardo de tiempo).

Finalmente, el sistema de control se utiliza para hacer una teleoperación entre dos países conectando una persona con un robot por Internet para hacer un trabajo físico (en este caso desplazar un robot hacia una posición deseada). El experimento consiste en que diferentes operadores humanos manejen desde la Universidad Nacional de San Juan (Argentina); un robot móvil modelo Pioneer 2DX situado en la Universidad Federal de Espírito Santo, Vitoria (Brasil) [107]. El objetivo es teleoperar a un robot móvil por Internet para alcanzar una posición de referencia, donde el operador humano recibe realimentación visual de imagen (la cual es capturada mediante una webcam) a través de un monitor de PC y de un ambiente gráfico que solamente muestra el objetivo y la posición del robot. Es decir que los obstáculos solamente se ven a través de la imagen recibida, la cual tiene retardo.

La figura 9.22 muestra las trayectorias realizadas por el robot móvil teleoperado por dos distintos usuarios (denominados A y B). El retardo de tiempo presente durante los experimentos de teleoperación a través de Internet se midió en línea (figura 9.23).

El experimento de teleoperación es reproducido en la figura 9.24 a través de la secuencia de imágenes de 1 a 6, donde se muestra en cada una de las imágenes cómo esta manejando el operador humano en Argentina, y lo que ocurre en ese mismo instante de tiempo en Brasil sobre la parte inferior izquierda de cada imagen. Se observa en la secuencia de imágenes cómo el

operador humano puede llevar al robot móvil a una posición objetivo ayudado por el sistema de control que utiliza la diferencia entre la situación que ve el usuario y la situación que tiene realmente el robot móvil.

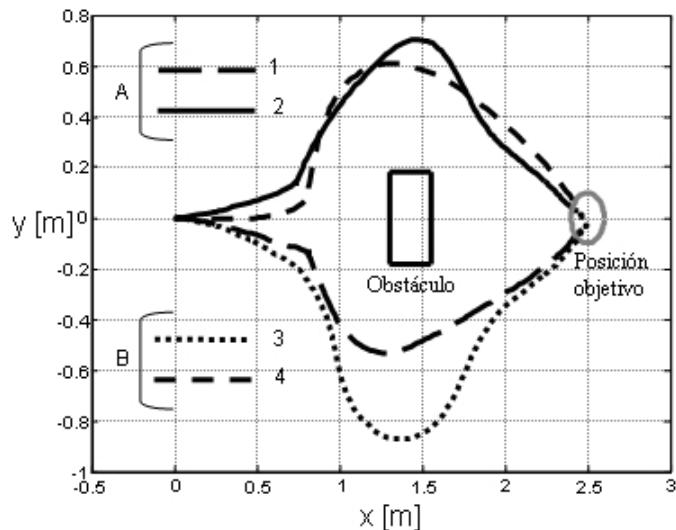


Figura 9.22. Trayectorias del robot móvil teleoperado por los operadores humanos A y B a través de Internet.

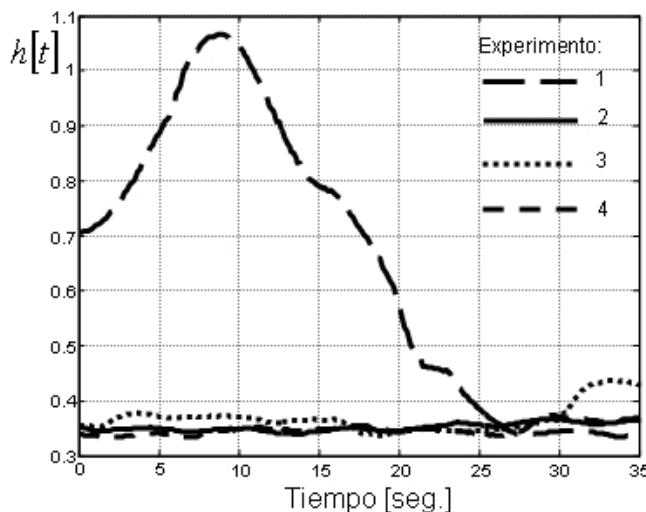


Figura 9.23. Retardo de tiempo  $h$  (ida y vuelta) medido en línea de Internet para los experimentos 1, 2, 3, y 4.



Figura 9.24. Teleoperación de un robot móvil situado en Vitoria (Brasil) desde San Juan (Argentina) a través de Internet.

Este ejemplo de teleoperación de robots o en general de un sistema automatizado permite remarcar una característica muy potente de los sistemas hombre-máquina que implica tener la capacidad para realizar uno o varios trabajos físicos a distancia en posiblemente diferentes partes del mundo de manera simultánea.

## **9.7. Síntesis del capítulo**

En este capítulo se han presentado una serie de ejemplos de aplicaciones típicas de sistemas hombre-máquina que intentan mostrar un espectro general de las posibles aplicaciones de este tipo de sistemas en distintos ámbitos como la salud (sistema robotizado para cirugía), servicios de asistencia personal (silla de ruedas inteligente), la agricultura (control de la velocidad de avance de una cosechadora de granos y/o semillas), seguridad vial (interfaz inteligente para asistencia de un conductor de automóvil) y las nuevas tecnologías (teleoperación de robots por Internet).

La principal diferencia de un sistema de control hombre-máquina respecto de un sistema de control automático en cuanto al diseño radica en la consideración de los factores humanos. Las aplicaciones descriptas ponen de manifiesto cómo el comportamiento del hombre afecta el desempeño del sistema.

Por ejemplo, en la aplicación de una silla de ruedas inteligente, la automatización aprovechando su flexibilidad debería intentar adaptarse a cada usuario consultándolo de alguna manera acerca de su bienestar psicológico. En el caso de un sistema robotizado para operaciones médicas, se aprovecha la exactitud, precisión y la posibilidad de alcanzar zonas difíciles de acceder de los sistemas robóticos. Sin embargo, la capacidad de diagnóstico y decisión del médico no es reemplazada sino que estos sistemas representan herramientas de alta complejidad que ayudan a obtener operaciones de mayor calidad.

La aplicación de un sistema de control en una cosechadora de soja u otro cultivo tiene un interés importante para el sistema productivo agrícola, ya que se entrelazan en este ejemplo el productor, el operador humano que maneja la cosechadora y un conocimiento experto en cosecha a través de un sistema automatizado. En este sistema, la interfaz es fundamental para que el usuario tenga un adecuado conocimiento de qué está haciendo el control de la cosechadora.

Luego, se describió una aplicación muy interesante dado la gran cantidad de accidentes de tránsito que ocurren todos los días. Se presenta una interfaz inteligente que alerta al conductor de un posible peligro de una forma tal que no provoca una distracción visual del hombre ni sonidos que pueden llegar a molestarlo. Por el contrario, a través de un sistema de realimentación táctil sobre el volante la interfaz busca enfocar la atención visual del conductor sobre una situación de posible riesgo.

Finalmente, la aplicación de teleoperación de robots ejemplifica cómo un control compartido entre el hombre y la automatización puede ser implementado considerando la situación y contexto actuales.

# *Capítulo 10*

## *Conclusiones y perspectivas*



## **Capítulo 10**

### **Conclusiones y perspectivas**

Durante los capítulos de este libro se brindaron de forma constructiva conceptos relacionados a *sistemas hombre-máquina* y su funcionamiento respecto al control utilizando para ello una gran cantidad de ejemplos desde sistemas muy simples que son utilizados cotidianamente por todas las personas hasta otros más avanzados pero de gran interés también, por sus temáticas relacionadas a los servicios, la producción, la salud, y la seguridad vial.

La utilización de sistemas con un mayor nivel de automatización aumenta continuamente cumpliendo un doble objetivo que se refleja en un incremento del desempeño de los sistemas productivos y de servicios, y un aumento en la calidad del trabajo. Este crecimiento de la tecnología y de su uso lleva a que las máquinas se transformen de pasivas a máquinas inteligentes, las cuales interactúan activamente con las personas y posiblemente con otras máquinas también.

Esto hace que el diseño de estos nuevos sistemas deba cambiar respecto al diseño de máquinas o sistemas automáticos pasivos en su relación con el hombre, ya que en el diseño de sistemas de control inteligentes interactivos se deben considerar provechosamente no solamente las bondades de los sistemas automáticos, los cuales están implementados con una tecnología cada vez mas elevada que permiten desarrollar sistemas muy precisos, muy exactos y muy veloces con trabajos múltiples en paralelo y en lugares remotos y/o peligrosos o insalubres para el ser humano, sino también en alguna medida

los factores humanos. Es decir se debe tener en cuenta cómo se comporta el hombre interactuando con una máquina inteligente.

Toda máquina o sistema se puede transformar en una máquina o sistema inteligente a través de un adecuado sistema de control, que incluye un sistema sensorial, un sistema de actuación y un sistema de cómputo que contempla el procesamiento de la información, el cálculo de las acciones de control y la implementación de todas las comunicaciones entre los distintos componentes del sistema; y una interfaz que posibilite una buena comunicación entre el hombre y la máquina utilizando múltiples modos tales como tacto, voz, gestos, etc. tal como ocurre en una conversación entre personas, con lo cual se logra extender las capacidades cognitivas y de raciocinio del ser humano hacia los procesos productivos y de servicios a través de las máquinas inteligentes.

La gran diversidad de posibles aplicaciones sugiere que el control e interfaz de un sistema hombre-máquina deberían diseñarse en conjunto para obtener una mejor interrelación entre el operador humano y la máquina inteligente, donde la persona ya no solamente debe conocer qué hace la máquina sino también cómo trabaja yendo más allá del funcionamiento físico, en el sentido de también comprender conceptualmente el criterio programado en un chip electrónico que utiliza la máquina inteligente para tomar decisiones y cambiar su funcionamiento.

Pero ¿Qué no debería ser automatizado aún cuando esto sea tecnológicamente posible? Un razonamiento podría ser que si la aplicación es tecnológicamente y económicamente viable para automatizar, entonces habría que hacerlo. También se podría plantear que una completa automatización podría eliminar el error humano eliminando o mejor dicho reemplazando al operador humano tanto como se pueda. Pero la automatización en definitiva es diseñada e implementada por el hombre, y además hay factores que son difíciles de medir y por lo tanto generalmente no son considerados en un diseño, tal como el hecho que el hombre aprende continuamente de sus errores (capacidades cognitivas y de razonamiento).

Por todo esto, surgen diferentes perspectivas de acuerdo al sector al que se refieran o al punto de vista desde donde se analicen los *sistemas hombre-máquina*. A nivel científico, la tendencia debería apuntar a seguir buscando comprender cada factor humano y la relación entre ellos con modelos o medidas cuantitativas o al menos cualitativas. Si se lograrán estos modelos o medidas de los factores humanos, ellos podrían ser incorporados en el diseño potenciando así los factores humanos que aumentan el desempeño del sistema y minimizando la acción de dichos factores que degradan el desempeño de un *sistema hombre-máquina*. Además, el estudio y desarrollo de ideas que involucren explícitamente en su concepción tanto factores humanos como factores de la automatización (por ejemplo la transparencia de un sistema de teleoperación) podría provocar grandes avances en el diseño de los *sistemas hombre-máquina*.

Por otro lado, desde un punto de vista social, una adecuada alternativa sugiere elevar paulatinamente el nivel de automatización inteligente sin descuidar de ninguna manera el contexto social en el cual el *sistema hombre-máquina inteligente* será aplicado y así, ir analizando los efectos positivos y negativos sobre el comportamiento individual, social y cultural frente a estos cambios ya que después de todo, el propósito final de la tecnología es mejorar la calidad de vida de las personas. Es decir, la aceptación social de innovaciones científicas-tecnológicas permitirá un crecimiento equilibrado y armonioso.

También se remarca que la introducción cada vez mayor de sistemas automatizados inteligentes, a pesar que puede disminuir la carga física y también cognitiva en el trabajo, requiere a su vez una mayor capacitación y formación de las personas para un uso adecuado de estos sistemas en la práctica. Por lo tanto, el incremento del nivel de automatización en un sistema productivo debe estar acompañado por el aumento del nivel de capacitación de los operadores humanos para obtener una mejora real en el desempeño del sistema.

Sin dudas el desafío de extender las capacidades humanas a través de máquinas inteligentes es actual y se potenciará en un futuro ayudado por el

continuo avance y desarrollo de la tecnología. Sin embargo, la tecnología aplicada a máquinas inteligentes debería estar sustentada por un equilibrio adecuado entre los distintos factores que intervienen y que se han intentado brindar constructivamente en este libro.

Por lo tanto, considerando el crecimiento constante de la tecnología que permite incorporar inteligencia implementada en forma electrónica a una máquina o sistema a costos cada vez más bajos respecto a la utilidad posible de alcanzar, se puede inferir que las máquinas inteligentes en un futuro podrían ocupar un protagonismo en la vida de las personas tal como hoy lo hace una computadora. Por ello, la incorporación de esta temática dentro del sistema educativo desde niveles intermedios podría contribuir en preparar a la sociedad en el uso adecuado y armonioso de las futuras tecnologías.

## Bibliografía

1. "Soja - Eficiencia de cosecha y post-cosecha", Manual técnico N°3, ISSN 1667-9199, Proyecto Eficiencia de Cosecha y Postcosecha de granos, INTA – PRECOP. Editores: M. Bragachini y C. Casini, Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), 2005.
2. Patente en trámite: "Método para disminuir pérdidas por cola en la cosecha de granos y dispositivo regulador de la velocidad de avance de una cosechadora", N° de acta: P070101521 Fecha de solicitud en INPI: 11/04/2007. Autores: Emanuel Slawiński, Vicente Mut. Propietario: CONICET.
3. Lyapunov A. M., *Problème Generale de la Stabilité du Mouvement*. French translation in 1907, photo-reproduced in Annals of Mathematics, Princeton Univ. Press, Princeton, N.J. (1949).
4. Vidyasagar, M., *Non-linear Systems Analysis*. Second Edition, Prentice Hall Int. (1993).
5. Khalil, H. (1996). *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, second ed. edition.
6. Astrom, Karl J. *Control PID avanzado*, Prentice Hall, ISBN: 9788483225110, 2009.
7. B. Kosko. *Neural networks and fuzzy systems*. Prentice-Hall, N. York, 1992.

8. R. F. Stengel. *Optimal control and estimation*. Dover Publications. N York. 1994.
9. Hogan, N. Impedance control: An approach to manipulation. Part 1 - Theory. Journ. of Dyn. Syst., Meas. And Control, Vol. 107, 1-7 (1985).
10. Melanie Mitchell. *An introduction to Genetic Algorithms*. The MIT Press, ISBN-13: 978-0-262-63185-3, 1998.
11. Goodwin, G. C., Graebe, S. F., & Salgado, M. E. (2001). *Control system design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
12. Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*, Ed: Prentice-Hall, 1998.
13. Katsuhiko Ogata, Sistemas de control en tiempo discreto. Ed: Prentice-Hall, 1996.
14. G. A. Bekey. K. Y. Goldberg. *Neural Networks in robotics*. Kluwer academic publishers, 1993.
15. M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. *Robot modeling and control*. Editorial: JOHN WILEY, 2006.
16. K.S. Fu, R.C. Gonzalez, C.S.G. Lee. *Robotica: Control, detección, visión e inteligencia*. McGraw-Hill, 1988.
17. F. Torres, J. Pomares, P. Gil, S. T. Puente, R. Aracil. *Robots y Sistemas Sensoriales*. 2002. Editorial: Prentice Hall.
18. L. Sciavicco y B. Siciliano , *Modeling and Control of Robot Manipulators*. 2º Edition. Editorial: Mc Graw Hill. 2000.

19. John J. Craig, *Introduction to Robotics, 3rd Edition*. Editorial: Addison-Wesley Publishing Company, 1998.
20. Abidi, M.A. and R.C. Gonzalez, *Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence*. Academic Press. UK, 1992.
21. Jones, J. L., *Mobile Robots: Inspiration to Implementation*. Ed. A. K. PETERS Ltd, USA, 1993.
22. Kuo, B., *Sistemas de control automático*. Editorial Pearson, 1986.
23. Robert G. Brown and Patrick Y. C. Hwang. *Introduction to random signals and applied Kalman filtering*. John Wiley & Sons. 1997.
24. K. Hashimoto. Visual servoing real time control of robot manipulators based on visual sensory feedback. World Scientific. 1994.
25. R. M. Murray, Z. Li y S. S. Sastry. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. Editorial: CRC Press, Inc, 1994.
26. Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press, 2004.
27. T. C. Henderson (ed.). Traditional and non-traditional robotic sensors. NATO ASI Series. Springer Verlag, Heidelberg, 1990.
28. R. Arkin. *Behavior-based robotics*, MIT PRESS, 1998.
29. S. M. LaValle. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. In Technical Report No. 98-11, October 1998.
30. S. LaValle. *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, 2006.

31. D.C. Slaughter, D.K. Giles and D. Downey, Autonomous robotic weed control systems: A review, Volume 61, Issue 1, April 2008, Pages 63-78.
32. K. Goldberg and R. Siegwart (Eds.). *Beyond Webcams: An Introduction to Online Robots*, MIT Press, 2002.
33. Ian Graham. Robot Technology, Evans Book, 2010.
34. Billings, C. E. (1997). *Aviation automation: The search for a human centered approach*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
35. Endsley, M.R. "Direct measurement of Situation Awareness: Validity and use of SAGAT," In Endsley, M. R., Garland, D. J. (Eds.) Situation Awareness Analysis and Measurement. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2003.
36. Rouse, W. B., and Morris, N. M. (1986). On looking into the black box: Prospects and limits in the search for mental models. *Psychological Bulletin*, 100(3), 349-363.
37. Christoffersen, K., & Woods, D. D (2002). How to make automated system team players. In E. Salas (Ed.), *Advances in human performance and cognitive engineering research* (vol. 2, pp. 1–12). Amsterdam: Elsevier.
38. Endsley, M., & Kaber, D. (1999). Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Ergonomics*, 42, 462–492.
39. Endsley, M. (1995). Measurement of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37, 65–84.

40. Endsley, M. (2006). Situation awareness. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors and ergonomics* (3rd ed., pp. 528–542). New York: Wiley.
41. Endsley, M., Bolte, B., & Jones, D. G. (2003). *Designing for situation awareness: An approach to human-centered design*. London: Taylor & Francis.
42. Parasuraman, R., Sheridan, T. B. & Wickens, C. D. (2008). Situation awareness, mental workload, and trust in automation: Viable, empirically supported cognitive engineering constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2(2), 140-160.
43. Grice, H. P. (1975). Logic and conversation. In P. Cole & J. Morgan (Eds.), *Syntax and semantics: Speech acts* (Vol. 3, pp. 276–290). New York: Academic.
44. P. A. Hancock, and W. B. Verwey. Fatigue, workload and adaptive driver systems, Accid. Anal. and Prev., Vol. 29, No. 4. pp 495-506. Elsevier Science Ltd, 1997.
45. McAllister, D.J. (1995). "Affect- and cognition-based trust as foundations for interpersonal cooperation in organizations." *Journal of The Academy of Management*, 38(1), 24 - 59.
46. M. R. Endsley, "Situation models: An avenue to the modeling of mental models," presented at 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, 2000.
47. Inagaki, T. (2003). Adaptive automation: Sharing and trading of control. In E. Hollnagel (Ed.), *Handbook of cognitive task design* (pp. 221–245). Mahwah, NJ: Erlbaum.

48. Kaber, D. B., & Endsley, M. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5, 113–153.
49. Aaron Steinfeld, Terrence Fong, David Kaber, Michael Lewis, Jean Scholtz, Alan Schultz, and Michael Goodrich. Common Metrics for Human-Robot Interaction. *HRI'06*, March 2–3, 2006, Salt Lake City, Utah, USA.
50. Klein, G., Woods, D. D., Bradshaw, J. M., Hoffman, R. R., & Feltovich, P. J. (2004). Ten challenges for making automation a team player in joint human-agent activity. *IEEE Intelligent Systems* 19(6), 91–95.
51. Lee, J. D., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, 35, 243–1270.
52. Lee, J., & Moray, N. (1994). Trust, self confidence, and operators' adaptation to automation. *International Journal of Human-Computer Studies*, 40, 153–184.
53. Lee, J., & See, J. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46, 50–80.
54. Barnes, L. R., Gruntfest, E. C., Hayden, M. H., Schultz, D. M., & Benight, C. (2007). False alarms and close calls: A conceptual model of warning accuracy *Weather and Forecasting*, 22, 1140-1147.
55. McRuer, D. T., & Jex, H. R. (1967). A review of quasi-linear pilot models. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, HFE-4(3), 231–249.
56. Metzger, U., & Parasuraman, R. (2001). Automation-related “complacency”: Theory, empirical data, and design implications. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual*

- Meeting (pp. 463–467). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
57. Meyer, J. (2001). Effects of warning validity and proximity on responses to warnings. *Human Factors*, 43, 563–572.
58. Miller, C. A. (2004). Human-computer etiquette [Special issue]. *Communications of the ACM*, 37(4).
59. Molloy, R., & Parasuraman, R. (1994). Automation-induced monitoring inefficiency: The role of display integration and redundant color coding. In M. Mouloua & R. Parasuraman (Eds.), *Human performance in automated systems: Current research and trends* (pp. 224–228). Mahwah, NJ: Erlbaum.
60. Moray, N., & Inagaki, T. (2001). Attention and complacency. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 1, 354–365.
61. Moray, N., Inagaki, T., & Itoh, M. (2000). Situation adaptive automation, trust and self-confidence in fault management of time-critical tasks. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(1), 44–58.
62. Morrison, J. G., & Gluckman, J. P. (1994). Definitions and prospective guidelines for the application of adaptive automation. In M. Mouloua & R. Parasuraman (Eds.), *Human performance in automated systems: Current research and trends* (pp. 256–263). Mahwah, NJ: Erlbaum.
63. Muir, B. M. (1988). Trust between humans and machines, and the design of decision aids. In E. Hollnagel, G. Mancini, & D. D. Woods (Eds.), *Cognitive engineering in complex dynamic worlds* (pp. 71–84). London: Academic.

64. Muir, B.M. (1994). "Trust in automation: Part 1. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems." *Ergonomics*, 37(11), 1905-1922.
65. Muir, B.M., & Moray, N. (1996). "Trust in automation. Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation." *Ergonomics*, 39(3), 429-460.
66. Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use: Empirical studies and quantitative models. *Ergonomics*, 43, 931–951.
67. Sheridan, T., & Parasuraman, R. "Human automation interaction," *Reviews of Human Factors and Ergonomics*, 1, 2006, 89-129.
68. Scerbo, M. S. (2007). Adaptive automation. In R. Parasuraman and M. Rizzo (Eds.) *Neuroergonomics: The brain at work*. New York: Oxford University Press.
69. Parasuraman, R., Galster, S., Squire, P., Furukawa, H., & Miller, C. A. (2005). A flexible delegation interface enhances system performance in human supervision of multiple autonomous robots: Empirical studies with RoboFlag. *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics* 35, 481–493.
70. Parasuraman, R., & Miller, C. (2004). Trust and etiquette in high-criticality automated systems. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 47(4), 51–55.
71. Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced "complacency." *International Journal of Aviation Psychology*, 3, 1–23.
72. Parasuraman, R., & Mouloua, M. (1996). *Automation and human performance: Theory and applications*. Mahwah, NJ: Erlbaum.

73. Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse and abuse. *Human Factors*, 39, 230–253.
74. Parasuraman, R., Sheridan, T., & Wickens, C. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-30(3), 286–297.
75. Parasuraman, R. Neuroergonomics: Research and Practice. *Theor. Issues in Ergon. Sci.*, 2003, vol. 4, nos. 1–2, 5–20, 2003.
76. Parasuraman, R., & Wickens, C. D. Humans: Still vital after all these years of automation. *Human Factors*, 50, 511–520, 2008.
77. Sarter, N., Woods, D., & Billings, C. E. (1997). Automation surprises. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of human factors and ergonomics* (2nd ed., pp. 1926–1943). New York: Wiley.
78. Sarter, N., & Woods, D. D. (1995). How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control. *Human Factors*, 37, 5–19.
79. Scerbo, M. W. (1996). Theoretical perspectives on adaptive automation. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation and human performance: Theory and applications* (pp. 37–63). Mahwah, NJ: Erlbaum.
80. Scerbo, M. W. (2001). Adaptive automation. In W. Karwowski (Ed.), *International encyclopedia of ergonomics and human factors* (pp. 1077–1079). London: Taylor & Francis.
81. Scerbo, M., Freeman, F., Mikulka, P. J., Di Nocera, F., Parasuraman, R., & Prinzel, L. (2001). *The efficacy of physiological measures for*

- implementing adaptive technology* (NASA Technical Memorandum). Hampton, VA: NASA Langley Research Center.
82. Sheridan, T. B., "Rumination on Automation, 1998", Annual Reviews in Control, Vol. 25, 2001, Elsevier Science Ltd (Pergamon), firstly presented at the IFAC-MMS Conference, Kyoto, Japan, 1998.
83. L. Bainbridge, "Ironies of automation", Automatica, Vol. 19, No. 6, pp. 775-779, 1983.
84. Sheridan, T. B. (1976). Toward a general model of supervisory control. In T. B. Sheridan & G. Johannsen (Eds.), *Monitoring behavior and supervisory control* (pp. 271–282). Elmsford, NY: Plenum.
85. Sheridan, T.B., *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. The MIT Press, Cambridge, MA (1992).
86. Sheridan, T.B., *Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 9 No.5, October (1993).
87. C. M. Jonker, M. Birna van Riemsdijk, and Bas Vermeulen. Shared Mental Models: A Conceptual Analysis. Proc. of 9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010), 2010.
88. Sheridan, T. B. (1998). Allocating functions rationally between humans and machines. *Ergonomics in Design*, 6(3), 20–25.
89. Hart, S., and Staveland, L. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. In Hancock, P. and Meshkati, N. eds. *Human Mental Workload*, North-Holland Elsevier Science, 1988.

90. Sheridan, T. B. (2002). *Humans and automation: Systems design and research issues*. Santa Monica/New York: Human Factors and Ergonomics Society/Wiley.
91. Sheridan, T., & Parasuraman, R. (2000). Human vs. automation in responding to failures: An expected value analysis. *Human Factors*, 42, 403–407.
92. Vicente, K. J. (2002). Ecological interface design: Progress and challenges. *Human Factors*, 44, 62–78.
93. Vicente, K., & Rasmussen, J. (1992). Ecological interface design: Theoretical foundations. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-22, 589–606.
94. Inagaki T., Smart collaboration between humans and machines based on mutual understanding. *Annual Reviews in Control* **32** 253–261, (2008).
95. Wilson, G. F., & Russell, C. A. (2003). Real-time assessment of mental workload using psychophysiological measures and artificial neural networks. *Human Factors*, 45, 635–643.
96. Woods, D. D. (1996). Decomposing automation: Apparent simplicity, real complexity. In R. Parasuraman & M. Mouloua (Eds.), *Automation technology and human performance*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
97. Lawrence, D.A., *Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 5, October, (1993).
98. Anderson, R.J. and M. Spong, *Bilateral control of Teleoperators with time delay*. IEEE Transaction and Automatic Control, 34(5):494-501 (1989).

99. Elhajj, I , Xi, N., Fung W.K. et. al., *Supermedia-Enhanced Internet-Based Telerobotics*, Proceedings of the IEEE, vol. 91, No. 3, pp. 396-421, March (2003).
100. Fiorini P. and R. Oboe, *Internet-Based Telerobotics: Problems and Approaches*. ICAR'97, Monterrey, CA, pp. 765-770, July 7-9 (1997).
101. PF Hokayem, MW Spong. *Bilateral teleoperation: An historical survey*. Automatica, Elsevier, (2006).
102. Niemeyer G. and J. Slotine, *Towards Force Reflecting Teleoperation over the Internet*. Proc. 1998 ICRA, pp. 1909-1915 (1998).
103. Richard, J.P., *Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problems*. Automatica 39, pp. 1667-1694 (2003).
104. Slawiński E., and V. Mut, "Transparency in Time for Teleoperation Systems", IEEE ICRA 2008, pp. 200-205, Pasadena, USA, 21-23 May, 2008.
105. Mut V., J. Postigo, E. Slawiński and B. Kuchen, *Bilateral Teleoperation of Mobile Robots*. Robotica - International Journal of Information, Education and Research in Robotics and Artificial Intelligence. Cambridge University Press. Vol. 20, Nº 2, pp. 213-221, March (2002).
106. Slawiński E., J. Postigo, V. Mut, Bilateral Teleoperation through the Internet. Journal of Robotics and Autonomous Systems. ISSN: 0921-8890, vol. 55, Nº3, pp. 205-215 March 2007, Elsevier, Printed in NORTH-HOLLAND. 2007
107. Slawiński E., V. Mut and J. Postigo (2007). "Teleoperation of mobile robots with time-varying delay", *IEEE Transactions on Robotics*, vol 23 Nº5 , pp. 1071-1082.

108. Slawiński E., V. Mut. Control Scheme including prediction and augmented reality for Teleoperation of Mobile Robots. ROBOTICA - International Journal of Information, Education and Research in Robotics and Artificial Intelligence. Vol. 28 pp. 11-22, Cambridge University Press. United Kingdom. 2010.
109. Bongiovanni, R.; Mantovani, E. C.; Best, S.; Roel, A (Ed.). 2006. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR/IICA.
110. Burnside, C.D. (1990) "Electromagnetic Distance Measurement", BSP Professional Books, John Street, London.
111. *Frank Flemisch, Johann Kelsch, Christian Löper, Anna Schieben, & Julian Schindler.* Automation spectrum, inner / outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation. *Human Factors for assistance and automation* (pp. 1 - 16). Maastricht, the Netherlands: Shaker Publishing, 2008
112. Nass, C., Moon, Y., Fogg, B. J., Reeves, B., & Dryer, D. C. (1995). Can computer personalities be human personalities? *International Journal of Human-Computer Studies*, 43, 223–239.
113. Michael A. Goodrich and Alan C. Schultz, Human–Robot Interaction: A Survey, Foundations and Trends in Human–Computer Interaction Vol. 1, No. 3 (2007) 203–275.
114. Kristie, Y., Michael, R., and Mike, H. (2003). Driver distraction: A review of the literature. Technical report, Monash University Accident Research Centre, Building 70, Clayton Campus, Victoria, 3800, Australia.
115. Ranney, T.A. (2008). Driver distraction: A review of the current state-of-knowledge. Technical report, National Highway Traffic Safety Administrations, 1200 New Jersey Avenue SE, Washington, DC 20590.

116. R. Bittner, K. Hána, L. Poušek, P. Smrka, P. Schreib and P. Vysoký, Detecting of Fatigue States of a Car Driver, ISMDA 2000, LNCS 1933, pp. 260–274, 2000.
117. Brown, I. D. (1994). Driver Fatigue. *Human Factors*, 36 (2), 298-314.
118. Hartley, L., Horberry, T. & Mabbot, N. (2000). *Review of fatigue detection and prediction technologies*. Melbourne: NTRC.
119. Modelling Human Operators in Control System Design. Robert Sutton. Ed. John Wiley & Sons Inc. 1990.
120. A.T. Duchowski, "A breadth-first survey of eye tracking applications," *Behavior Research Methods, Instruments, and Computing*, 34(4):455-70, 2002.
121. P. Ekman, ed., *Emotion in the Human Face*, Cambridge University Press, 1982.
122. N.O. Bernsen, "Foundations of multimodal representations: A taxonomy of representational modalities," *Interacting with Computers*, 6(4):347-71, 1994.
123. P.R. Cohen and S.L. Oviatt, "The role of voice in human-machine communication," *Voice Communication between Humans and Machines*, D. Roe and J. Wilpon, eds., National Academy Press, 1994.
124. Q. Ji and X. Yang, "Real-time eye, gaze, and face pose tracking for monitoring driver vigilance," *Real-Time Imaging*, 8:357-377, 2002.

125. H.J. Go, K.C. Kwak, D.J. Lee, and M. Chun, "Emotion recognition from facial image and speech signal," *Conf. on the Society of Instrument and Control Engineers*, 2003.
126. R. Jacob, "The use of eye movements in human-computer interactions techniques: What you look at is what you get," *ACM Trans. Information Systems*, 9(3):152-169, 1991.
127. S. Marcel, "Gestures for multi-modal interfaces: A Review," *Technical Report IDIAP-RR 02-34*, 2002.
128. I.R. Murray and J.L. Arnott, "Toward the simulation of emotion in synthetic speech: A review of the literature of human vocal emotion," *J. of the Acoustic Society of America*, 93(2):1097–1108, 1993.
129. M. Benali-Khoudja, M. Hafez, J.-M. Alexandre, and A. Kheddar, "Tactile interfaces: A state-of-the-art survey," *Int. Symposium on Robotics*, 2004.
130. Demarre, Dean; Michaels, David. *Bioelectronic Measurements*. Prentice Hall. 1983.
131. Canny, J. *The Future of Human Computer Interaction*. ACM Queue, Vol. 4 No. 6. pp24-32, 2006.
132. Harris, R., *Voice Interaction Design: Crafting the New Conversational Speech Systems*. Morgan Kaufmann Series in Interactive Technologies ISBN 1-55860768-4.
133. Kotelly, B. *The Art and Business of Speech Recognition*. Addison Wesley Professional. ISBN: 0-32115492-4, 2003

134. Pallas-Arenys R., Sensores y acondicionadores de señal Problemas resueltos. Editorial MARCOMBO, S.A. 2008.
135. Pallas-Arenys R., Sensores y acondicionadores de señal. Editorial MARCOMBO, S.A. 2000.
136. Creus Sole A., Neumática e hidráulica. Editorial Marcombo, ISBN 978-84-267-1420-6, (2007).
137. Pallas-Areny R. y Valdes Perez F. E. Microcontroladores. Fundamentos y aplicaciones con PIC. MARCOMBO, S.A. ISBN: 9788426714145 , 2007.
138. Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision, Thomson Learning, 3er. Edicion, 2008.
139. R.C. Gonzalez y R.E. Woods, “Digital Image Processing”(2<sup>a</sup> edición), Addison Wesley, 2002.
140. J. F. Vélez, A. B. Moreno, A. Sánchez y J. L. Esteban, “Visión por Computador”, Editorial Dykinson, 2003.
141. Kaplan E., “Understanding GPS principles and Applications”, Artech House, 1996.
142. Lawrence Harte, Ben Levitan. *Global Positioning Systema (GPS). Systems, Technology and Operation.* ISBN: 1-932813-30-6, (2009).
143. Bolton W., *Mecatronica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y electrónica.* Editorial AlfaOmega Grupo Editor, 2006.
144. Jean M. Rüeger (editor). *Electronic Distance Measurement: An Introduction* (Paperback). Springer, 1996.

145. Wireless sensor networks. F. Zhao, L. Guibas. Editorial: ELSEVIER, 2004.
146. Huidobro Moya, José Manuel, “Comunicaciones Móviles”, Ed. Thomson-Paraninfo, 2002.
147. James E. Katz (Editor), Handbook of Mobile Communication Studies. The MIT Press; illustrated edition edition (July 31, 2008).
148. Tanenbaum A. *Redes de Computadoras*. Editorial Prentice Hall, 2003.
149. Comer D.E., Interconnecting with TCP/IP. Prentice Hall, (1991).
150. Stevens, W. Richard, “TCP/IP Illustrated”, vol.1, Addison-Wesley, 1994.
151. USB complete. Jan Axelson, Published by LakeView Research. ISBN 13 978-1-931448-08-6(2009).
152. Serial Port Complete. Jan Axelson, Published by Lakeview Research, ISBN 0-9650819-2-3, (2000).
153. Etschberger Konrad, “Controller Area Network- Basics, Protocols, Chips and Applications”, IXXAT Automation GmbH, 2001.
154. Thomas Bräunl, Embedded Robotics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN-13 978-3-540-34318-9 (2006).
155. David E. Simon . An Embedded Software Primer Editorial: Addison-Wesley, (1999).

156. Frank Vahid and Tony Givargis. *Embedded System Design: A Unified Hardware/Software Introduction*. Editorial: John Wiley & Sons, (2002).
157. J. Nierto, E. Slawiński, V. Mut, B. Wagner, *Online Path Planning based on Rapidly-Exploring Random Trees*, Proc. of IEEE ICIT 2010, pp. 1431-1436, Vaplaraiso, Chile, (2010).
158. Wakerley J. F., *Diseño digital, principios y prácticas*. Editorial Pearson, 2001.
159. J. L. Peterson; A. Silberschatz. *Operating Systems Concepts*. Addison-Wesley, MA-USA, 1991.
160. Daneri P., *PLC – Automatización y control industrial*. ISBN-13: 978-9505282968, HASA (2008).