

# Capítulo 6

## Conclusiones y líneas futuras

### 6.1 Conclusiones y reflexión del autor

Al principio del proyecto, durante su planificación (página 9), se determinaron los objetivos básicos que debía cumplir el robot. Haciendo memoria, fueron los siguientes:

1. Desarrollar una plataforma móvil articulada que incluya ocho motores.
2. La estructura mecánica tiene que apoyarse en cuatro extremidades.
3. Hay que ser capaces de controlar la posición de los ejes de los motores.
4. El sistema electrónico de control tiene que ser modular y basado en la familia de microcontroladores de Motorola 68hc11 o 68302.
5. El robot tiene que ser capaz de realizar los movimientos básicos, es decir ir recto, girar y hacer algún gesto gracioso.

Repasando todo lo realizado hasta ahora, se puede comprobar cómo el resultado final ha superado con creces las expectativas iniciales. Si al principio del proyecto se planteaba la construcción de un cuadrúpedo que tuviese una funcionalidad mínima, al final se ha conseguido que el robot sea mucho mejor de lo pensado originalmente. Para lograr esto, ha sido necesario introducir algunos cambios en las especificaciones originales, cambios que a continuación se van a describir, indicando qué mejoras se han conseguido con ellos:

1. Al principio se planificó usar ocho motores para realizar los movimientos básicos, pero después de una primera versión se optó por ampliar el número a doce y así permitir muchos más movimientos. Por ejemplo, mientras que con la anterior estructura se giraba sin control, mediante la nueva se puede controlar el radio de giro, es decir se ha conseguido un movimiento mucho más general. Pero no sólo se ha producido esa mejora en lo concerniente a la mecánica, sino que los propios motores se han cambiado por otros mejores. En concreto seis servomecanismos Futaba 3003 se han sustituido por el modelo Futaba 9404. Estos ofrecen más par y velocidad de movimiento, aunque como todo lo bueno, cuestan más que los anteriores. Pero aún así, merece la pena, sobre todo cuando se aprecia que el robot tiene más fuerza y se mueve con mayor soltura que en su primera versión. Además, la sustitución, ha permitido implementar acciones como levantarse, arrastrarse y sentarse.

2. En el planteamiento original, toda esta mecánica estaba acompañada de una electrónica modular que permitía posicionar los ejes de los motores en los ángulos correctos, haciendo que el robot se moviera adecuadamente. Dicha electrónica estaba formada por dos módulos esclavos, que se encargaban de mover los motores, y por un módulo maestro que controlaba a los anteriores. Se planteó que los módulos esclavos estuvieran formados por una tarjeta electrónica, basada en el microcontrolador MC68hc11 de Motorola, y diseñada a medida para este proyecto. Por el contrario, el módulo maestro estaría basado en una tarjeta ya disponible, también basada en el MC68hc11, y sólo en el caso de que no sirviera se procedería a la construcción de otra. Al final, en este apartado no ha habido muchos cambios, todo lo contrario, la planificación inicial ha permitido cumplir los objetivos propuestos, incluso superarlos.

El diseño del módulo esclavo ha sido un éxito: se ha conseguido tener en un espacio muy reducido una electrónica capaz de mover cuatro servomecanismos. Además, el programa desarrollado a medida para dicho módulo permite que únicamente indicando la posición en donde se quiere situar el eje del motor, la tarjeta se encargue de moverlo y mantenerlo en dicha posición de forma autónoma. La buena realización de los dos puntos anteriores, la tarjeta y el programa, ha permitido que la red de control no esté saturada de información y que el módulo maestro sea muy sencillo de implementar. Esto ha evitado el tener que diseñar otra tarjeta electrónica, ahorrando tiempo y dinero al proyecto. Además, cuando se modificó el robot para ampliarlo a doce motores, no hubo ningún problema por parte de la electrónica, tan sólo hubo que añadir un módulo esclavo más. Si la red de control no se hubiese planteado como modular, lo anterior habría supuesto rehacer una parte importante del sistema. Incluso, y basado en las estimaciones hechas en el capítulo cuatro, la red puede ampliarse hasta 82 módulos esclavos manteniendo la velocidad de movimiento actual.

3. Uno de los grandes retos del proyecto ha sido buscar las secuencias de movimiento del robot. En un principio no se dió mucha importancia a este punto, y se pensó, que una vez construida la estructura y la red de control, no habría problema para buscar las posiciones y las secuencias adecuadas para moverlo correctamente. Pero esto no fue así: en un robot de este tipo, articulado y con doce motores, no es posible intuir las secuencias de movimiento. Por eso, la realización de una herramienta de ayuda software era algo imprescindible. Y así se ha hecho. Utilizando herramientas disponibles en Linux se ha desarrollado un software que permite programar los pasos del robot de una manera ordenada, fotograma a fotograma. Tan grande ha sido la utilidad aportada por esta herramienta, denominada XPucho, que muchas de las mejoras y líneas propuestas para este proyecto se basan en ella.

El software anterior se completó con otro pequeño programa que permite controlar desde el ordenador al robot. En lugar de ir cargando y ejecutando las secuencias según se quiera que el robot haga una cosa u otra, este programa permite mediante cursores ir ejecutando diferentes movimientos predeterminados. Si bien no estaba dentro de los objetivos iniciales del proyecto, y tampoco sirve como herramienta de trabajo, sí es útil para poder hacer demostraciones. Seguro que será utilizada una vez que se quiera grabar secuencias de movimiento autónomo en el robot.

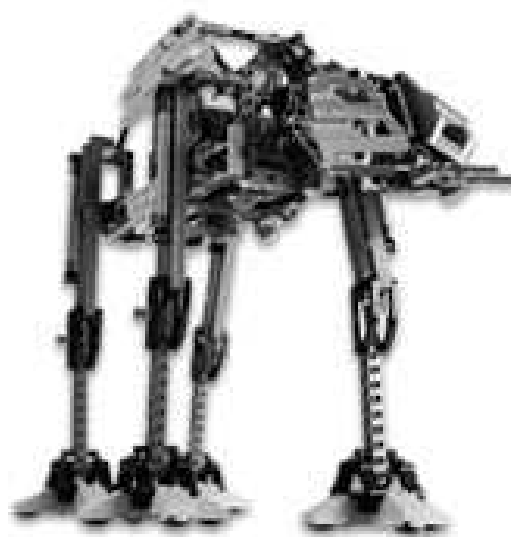


Figura 6.1: Robot cuadrúpedo de LEGO Mindstorms[11].

4. También se especificó que el robot tenía que ser autónomo, es decir, que se pudiese mover sin necesidad de tener el PC conectado a él o, lo que es lo mismo, que la electrónica interna permitiese generar o reproducir las secuencias de movimiento. Esto no ha sido difícil de implementar, sobre todo porque la herramienta de programación XPUCHO permite convertir una secuencia de movimiento almacenada en el PC, en un archivo compatible con el ensamblador del MC68hc11. Esto significa que, una vez obtenidas las secuencias de movimiento, se pueden ir grabando en el módulo maestro para que sea éste el que las reproduzca sin necesidad de la presencia del PC. En nuestro caso, el robot tiene dos modos de funcionamiento: mediante el primero lo controlamos desde el PC utilizando el software de análisis descrito en el punto tres; en el segundo modo, el robot se comporta de forma autónoma, y en concreto lo que hace es ir caminando hacia adelante.

Por último, durante la elaboración del proyecto se ha podido comprobar cómo algunos de los robots investigados en la etapa de búsqueda de datos, capítulo primero, han evolucionado y se han hecho mucho más conocidos y asequibles. Por ejemplo se mencionó la reciente aparición del perro robot de Sony Aibo, pues bien, en todo este tiempo ha crecido su página WEB y han surgido en Internet bastantes foros al respecto. Pero tal vez la evolución más espectacular ha sido el Lego MindStorm, que si bien al inicio de este proyecto no estaba muy extendido, se puede considerar como uno de los grandes aciertos de Lego. Ha sorprendido incluso a los mismos creadores, que a pesar de enfocarlo, al principio, a un público joven, rápidamente se dieron cuenta que eran los profesionales los que lo estaban utilizando en mayor cantidad. Ejemplos de este incremento se encuentran en la página oficial de LEGO Mindstorms [11] o en otras muchas fácilmente localizables<sup>1</sup>, como por ejemplo <http://member.nifty.ne.jp/mindstorms>. En la foto 6.1 se puede ver uno de los kits ofrecidos por esta compañía.

Todo este auge en la robótica 'casera', por distinguirla de la industrial, hace que los contenidos del proyecto sean novedosos, sobre todo para aquellas personas que se quie-

<sup>1</sup>En mi caso he utilizado el buscador *google* y como palabra de búsqueda *mindstorms*.

ran introducir en el mundillo de los robots articulados. Además, como el robot se ha construido y ha funcionado superando las expectativas iniciales, el proyecto adquiere un valor añadido en lo que a experiencia se refiere. Lo presentado aquí no es un estudio teórico de robótica, sino un manual práctico de cómo hacer un robot cuadrúpedo. Por eso, y siguiendo la línea de otros proyectos realizados por el autor, este trabajo se publicará en la página WEB de Microbótica S.L. [10], esperando que sirva de base a otros muchos proyectos que se encuadren en el marco de la robótica, y aunque tal vez no se utilice la estructura de un cuadrúpedo, tal vez sí se pueda usar la red de control o algunas de las características mecánicas mencionadas en el capítulo 2.

Para terminar doy las gracias a todas las personas que me han ayudado en la realización del proyecto, ya sea por los consejos técnicos que me han dado como por la ayuda moral que me ha permitido seguir adelante en los momentos de flaqueza.

## 6.2 Líneas futuras de desarrollo

Hasta obtener el último prototipo del robot ha sido necesario realizar muchas modificaciones, la mayor parte de ellas impuestas por la imposibilidad de realizar ciertos movimientos considerados como imprescindibles. Pero aún habiendo solventado todos ellos, todavía quedan mejoras por hacer, las cuales se han organizado en tres grupos:

1. El primero es el de las mejoras mecánicas, en él se exponen las mejoras o cambios relacionadas con la morfología del robot. En este punto es importante tener los pies en el suelo, al hablar de mejoras se puede divagar mucho, sobre todo después de ver robots como el de SONY (ver figura 1.7, página 12), pero hay que ser conscientes de nuestras posibilidades y de nuestros recursos. Por ese motivo las mejoras expuestas son las más fáciles o cercanas al autor del proyecto.
2. El segundo grupo de mejoras hace referencia al software. Al igual que antes se pueden plantear muchas, pero la ventaja es que ahora no depende tanto de la tecnología sino del tiempo de que uno quiera dedicarle.
3. Por último hay una serie de mejoras que según la opinión del autor son las más importantes. Se trata de todo aquello relacionado con el entorno del robot. Es decir la posibilidad de que el robot pueda recibir información del entorno que le rodea, o lo que es lo mismo, dotarle de sensores.

Con estas propuestas se espera conseguir motivar a otras personas para continuar con el proyecto, y quién sabe, al final tal vez tengamos la mascota artificial que suele salir en las películas de ciencia ficción y que nos hace soñar con vivir el futuro.

### Mejoras mecánicas

1. Se podrían cambiar los motores ya que los utilizados al final han sido más caros y más pesados que los previstos inicialmente. Esto hace que, considerando el factor coste, al empezar a diseñar un nuevo robot uno pueda buscar motores entre una gama más amplia. La consecuencia de esto son cambios en la morfología del robot

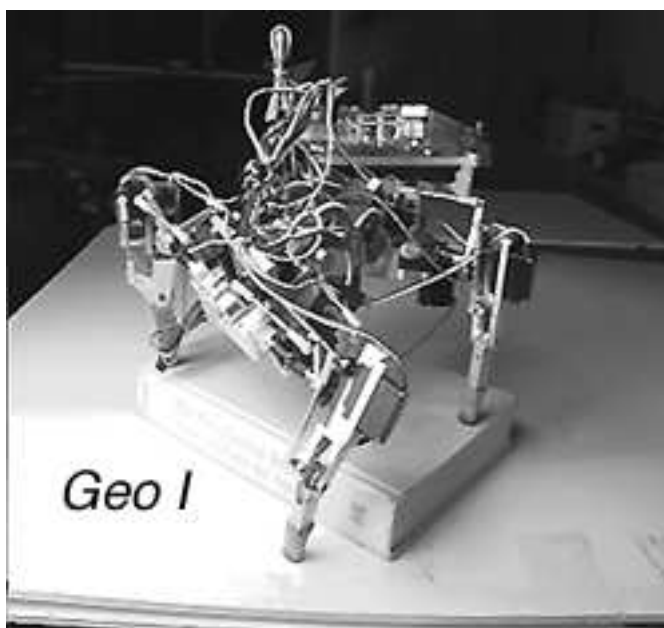


Figura 6.2: Foto del robot GEO I.

ya que no todos los motores tienen la forma de los servomecanismos. El peso del motor es difícil reducirlo ya que los servomecanismos utilizan materiales ligeros tipo plástico. En este aspecto se pueden considerar optimizados sobre todo si se tiene en cuenta que su diseño es específico para modelos aeronáuticos.

2. Otra mejora sería utilizar materiales mixtos para realizar la estructura del robot, de esa forma se puede reducir el coste, el peso y el tiempo de desarrollo final. Es más fácil cortar el plástico que el aluminio y por otro lado es más resistente el aluminio plegado que el plástico pegado. En el perro se ha utilizado aluminio, pero se podrían haber hecho piezas de plástico (la madera no se recomienda). Por ejemplo, las articulaciones del robot, al ser piezas simples que incluso no necesitan doblarse, podrían haber sido de plástico. Por el contrario el hombro es una pieza difícil de obtener en plástico, sobre todo por la cantidad de pliegues que hay que hacer y la resistencia que debe tener, por eso no se recomienda tocarla.
3. Por último otra mejora previsible sería cambiar la morfología del robot pero esta vez para adaptar o mejorar los movimientos del mismo. Por ejemplo se puede plantear una estructura que tenga todos los motores en el cuerpo y que mediante engranajes transmita el movimiento hasta las articulaciones de las patas. En la foto 6.2 se puede ver un ejemplo.

### Mejoras software

1. Los programas que se han desarrollado son los básicos para poder probar el robot y ver que todo funciona. Mediante ellos se pueden buscar las secuencias de movimiento, reproducirlas y mandarlas al robot, pero aún así, con todo esto, todavía quedan cosas por hacer. Lo más destacable es que ahora mismo no se puede recibir infor-

mación del entorno, por lo que el PC no sabe si el robot realmente se ha movido o no. Es decir, no se ha implementado la recepción de datos provenientes del robot, el control del robot se hace en bucle abierto. Por lo tanto una mejora sería adaptar los programas para que el PC pueda recibir datos enviados desde el robot.

2. En línea con lo anterior, se plantea la siguiente mejora: Cuando se programó el módulo maestro para que enviase las tramas por la red de control, hubo que introducir pausas para dar tiempo a los motores a llegar a la posición indicada. Pues bien, una mejora muy buena es que sea el propio módulo esclavo el que gestione este tiempo, de manera que cuando se cumpla avise al módulo maestro para que éste, si quiere, le envíe nuevas tramas. La forma de gestionar esos tiempos por parte de los módulos esclavos puede realizarse de dos formas:
  - (a) Mediante espera activa. Se calcula un promedio y ese es el tiempo que se espera en todos los casos. Método parecido al que hay ahora.
  - (b) Leyendo la posición del eje del motor o lo que es lo mismo, cerrando el bucle. De esta forma el módulo esclavo tendrá conocimiento de cuándo ha llegado el motor a su posición y dará luz verde a la recepción de una nueva trama para el mismo. Este método es mejor que el anterior pero más complejo de realizar.
3. Otra mejora reside en la forma de programar el robot. Ahora la programación del mismo es visual mediante barras deslizadoras, pero se podría mejorar si se utiliza un modelo virtual del robot. En la figura 6.3 se puede ver un ejemplo aplicado a un brazo. Con ese modelo la programación sería más fácil ya que no se necesitaría tener conectado el robot para ver la posición final de los motores. Incluso se podría hacer, en caso de tener ganas y paciencia, un modelado físico del mismo para ver si sería capaz de moverse o no, sin necesidad de probar con el prototipo real. Esto último es algo que se ha venido haciendo frecuentemente en la robótica, aunque por un motivo diferente, la no existencia del robot real. Lo que aquí se propone es lo contrario, mueve el robot virtual, facilita la programación y el estudio mediante el PC, y asegura en todo momento que lo que el modelo virtual hace también lo puede hacer el real.
4. Todavía más avanzada sería una aplicación para programar el robot gestualmente, mediante la cual las secuencias de movimiento se buscarían directamente moviendo el robot real con las manos. El procedimiento sería colocar manualmente el robot en la posición deseada y luego dar la orden al PC de leer el estado de los motores del robot, almacenándose así dicha información como si fuese un fotograma. Finalmente, otra vez se movería manualmente el robot hasta colocarlo en la siguiente posición. Se volvería a grabar en el ordenador y así sucesivamente hasta completar la secuencia deseada de movimiento. La ventaja de este método es que contiene a los demás, es decir, se puede tener el robot virtual a la vez que el real, y se puede usar cualquiera de los dos para buscar las secuencias de movimiento. Esta idea no es nueva, en Jurassic Park<sup>2</sup> se usó para animar a los dinosaurios. Al principio sólo se tenían

---

<sup>2</sup>Jurassic Park: Película de cine del año 1993 dirigida por Steven Spielberg y escrita por Michael Crichton. En ella se cuenta como unos científicos clonan dinosaurios para crear un parque temático. En la fase de

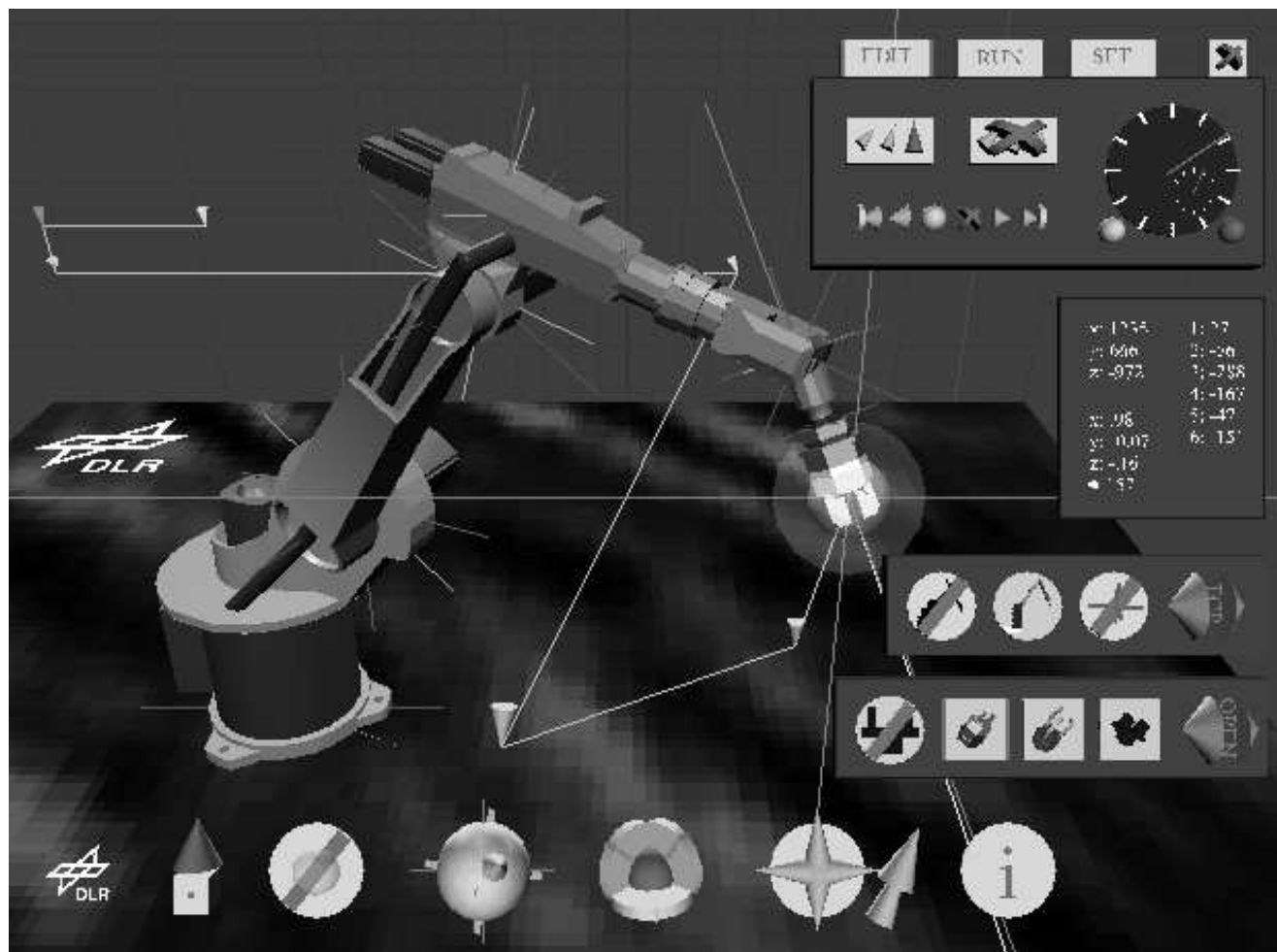


Figura 6.3: Ejemplo de un programador virtual de movimientos.

modelos virtuales en el ordenador pero pronto fue necesario utilizar el modelo robot. La razón de ello estaba en que los equipos de animadores no eran capaces de crear las secuencias y movimientos correctos sin usar la forma tradicional del cine. Es decir, utilizando maquetas y grabando fotograma a fotograma. Tal vez esta mejora sea una de las más avanzadas, y no sólo por el software, sino también porque en los motores o en las articulaciones hay que añadir algún sensor que nos informe del ángulo en el que se encuentra el eje del motor. En nuestro caso esto se ve facilitado mucho por los motores y la electrónica utilizados. Los motores ya tienen incorporado dicho sensor, por lo que tan sólo hace falta soldar un cable y sacarlo al exterior para tener la lectura del ángulo. Y la electrónica está a su vez preparada para leer la información anterior, que es analógica, y transformarla a digital. Una vez en ese estado se puede transmitir al PC. En resumen, con poco esfuerzo hardware pero mucho de programación se puede diseñar un prototipo de robot autónomo con programación gestual.

---

pruebas el parque sufre un sabotaje y los dinosaurios quedan en libertad, empezando una trama de acción que no para hasta el final. Lo destacable de esta película fue la innovación en efectos especiales al crear todos los dinosaurios con modelos virtuales en el ordenador.

## Interactuando con el entorno

Hasta ahora, todas las mejoras que se han propuesto, tratan de perfeccionar el robot, ya sea mejorando el movimiento o facilitando la búsqueda de secuencias. Ninguna de las mejoras anteriores ha considerado la relación del robot con el entorno. Es decir, una vez que se dispone de una plataforma que anda, gira y es fácilmente programable, queda por establecer la utilidad de la misma. La respuesta es difícil, ya que, tal y como está el robot ahora no dispone de sensores que capten información del entorno. Sin estos, no es posible realizar aplicaciones avanzadas y por eso una mejora imprescindible sería conectarle toda una batería de sensores. Mediante ellos se pueden obtener datos como temperatura ambiental, intensidad de luz, distancia a los objetos, imágenes y un sin fin de medidas más. Una vez que se cuente con alguno de ellos es más fácil pensar en una utilidad para el robot. Por ejemplo, mediante células fotoeléctricas se podría guiar al robot en función de la intensidad de luz recibida. Mediante ultrasonidos podría detectar obstáculos y evitar tropezarse o chocarse contra la pared. Más avanzado sería colocarle una pequeña cámara para poder detectar objetos, algo parecido a lo que hace AIBO, que localiza una pelota de ping-pong y le pega una patada.

Aún así, con el tema de los sensores hay que tener mucho cuidado y analizar bien las situaciones. Si se coloca una cámara alguien tendrá que procesar la información. Si lo hace el propio robot tendrá que tener una electrónica más potente, si lo hace el PC la señal de vídeo habrá que transmitirla por radio o tener conectado el robot al PC mediante un cable.

Independientemente de todo, en cuanto se ponga un sensor, por muy simple que sea habrá que pensar en modificar el software para permitir comunicaciones de ida y vuelta. Esto no es difícil, toda la electrónica esta preparada para ello, incluso la CT6811 y la BT6811 están preparadas para conectarle directamente algunos tipos de sensores sencillos. Como pueden ser bumpers, CNY70 (infrarrojos), LDR (células fotoeléctricas) y sensores de temperatura.