

## Periféricos de almacenamiento

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Los periféricos de almacenamiento tienen varios usos. El más importante es como medio de almacenamiento masivo, donde se almacenan datos y programas, y necesitan estar directamente accesibles al ordenador. Esto tiene un doble propósito, por una parte, reducir la capacidad necesaria en la memoria principal del ordenador, que es cara, y por otra garantizar la retención de la información cuando cae la alimentación del sistema, en cuyo caso el contenido de la memoria principal, se pierde. La segunda función de los periféricos de almacenamiento es el de almacenar una copia de salvaguarda o respaldo ("back-up"), es decir, hacer una copia duplicada de los datos del medio de almacenamiento masivo, para seguridad. Los dispositivos de almacenamiento para esta segunda función tienen medios intercambiables, de muy alta capacidad y de coste reducido. El principal inconveniente de este tipo de dispositivos es su velocidad de acceso. Los periféricos de almacenamiento con medios separables se pueden usar también para permitir la entrada de programas al sistema, y la transferencia de datos de un sistema a otro. Esto requiere que ambos sistemas puedan manejar el mismo tipo de medios, y puedan entender la información grabada en él. Existen formatos estándar para asegurar esto (formatos definidos normalmente por el sistema operativo).

Los periféricos de almacenamiento difieren de la memoria principal del ordenador, especialmente en la no volatilidad (no necesitan alimentación para retener la información almacenada), tienen costes más reducidos por megabyte almacenado, y considerablemente más lentos en términos de tiempo de acceso. Se alcanza este bajo costo, usando medios de almacenamiento en forma de superficies bidimensionales continuas. Uno de los problemas de este tipo de medios es que no disponen de celdas predefinidas para almacenar los datos, y esta debe incorporar también la información necesaria para poder distinguir las distintas celdas de almacenamiento durante los procesos de lectura. Se dispone un pequeño número de puntos de acceso, o cabezas (a menudo una sola); la cabeza o la superficie, o ambas, están en movimiento para hacer coincidir la cabeza y el dato requerido en un mismo punto; por este motivo, el término de almacenamiento dinámico se usa algunas veces. Esto significa que los periféricos de almacenamiento, a diferencia del almacenamiento principal, son dispositivos electromecánicos con partes en movimiento, lo que les hace menos fiables que los puramente semiconductores. Existen dispositivos de almacenamiento no volátil de naturaleza puramente electrónica o basada en semiconductor y con unos tiempos de acceso inferiores pero su elevado coste restringe notablemente su rango de aplicaciones. Otro problema, es que no es posible asegurar que el medio

de almacenamiento esté completamente libre de defectos sin que el coste se vea fuertemente incrementado. Por esta razón, todos los periféricos de almacenamiento hacen alguna previsión para detectar errores en los datos almacenados, y también para corregir estos errores.

La mayoría de los dispositivos de disco se basan en la tecnología de grabación magnética. Después de más de 40 años de desarrollo esta tecnología puede considerarse, al menos en sus fundamentos, como una materia estable y madura. En todo almacenamiento magnético se distinguen dos procesos: lectura y escritura.

Todo medio de almacenamiento, se basa en la alteración de alguna propiedad de un medio material. Si esta alteración es reversible el medio puede almacenar distinta información en distintos momentos. Si no lo es, tan sólo se podrá grabar una vez y la información permanecerá en el medio en el futuro. La propiedad que emplean los dispositivos magnéticos, es la orientación de los dominios magnéticos de un material ferromagnético. Los materiales ferromagnéticos tienen la particularidad de que los dominios magnéticos, que son las porciones de material más pequeñas que tienen una misma orientación de su campo magnético, pueden ser orientados por un campo magnético externo y mantienen esta orientación cuando el campo magnético desaparece. En esto se distinguen de los medios diamagnéticos en los que los dominios vuelven a sus posiciones iniciales cuando el campo externo desaparece. Si posteriormente se aplica un campo magnético en otra dirección los dominios o dipolos magnéticos se reorientan de acuerdo al nuevo campo. Es por tanto un proceso reversible y como consecuencia los materiales magnéticos pueden alterarse tantas veces como se desee.

## 2.2 TAMBORES Y DISCOS MAGNÉTICOS

Los medios de almacenamiento masivo han sido una parte esencial de los sistemas computadores, desde el inicio de estos. El primer medio de almacenamiento masivo que se usó, fue el tambor magnético, el cual desembocó en los discos magnéticos, que han sido el pilar fundamental del almacenamiento masivo de los ordenadores desde los años sesenta. En los noventa, los almacenamientos magnéticos están sufriendo un serio cambio hacia el almacenamiento óptico. En la actualidad, los discos magnéticos son aún los dispositivos de almacenamiento más usados, y de hecho, con el teclado y la pantalla, el más común de todos los periféricos. La importancia de este tipo de dispositivos está avalada por varias razones:

- ◆ Todos los sistemas informáticos disponen de algún disco duro.
- ◆ Es uno de los sistemas de almacenamiento más experimentado, debido en parte a ser de los más antiguos.
- ◆ Presentan un compromiso interesante entre coste y prestaciones.
- ◆ Tienen una influencia considerable en las prestaciones globales del sistema completo.
- ◆ Es uno de los puntos más críticos y más débiles del sistema.

Las características básicas que tiene un medio de almacenamiento masivo son: no volatilidad, y menor coste en comparación con la memoria principal de la computadora. Los tiempos de acceso son mucho mayores que los de la memoria principal, a veces se vuelven demasiado grandes y limitan el rendimiento del sistema. La transferencia de datos hacia y desde la unidad básica debe ser razonablemente rápida con velocidades que varían entre 10 Mbytes y 80 Mbytes por segundo e incluso superiores en sistemas de última generación. Estos parámetros se consideraban bastante buenos, hasta que apareció un serio competidor en los primeros discos ópticos, surgidos en el mercado a finales de los 80.

Los almacenamientos magnéticos son intrínsecamente no volátiles, y las tecnologías de grabación magnética han ido evolucionando desde las cintas utilizadas en las primeras

computadoras, que tenían tiempos de acceso bastante elevados (hasta de minutos). Los cortos tiempos de acceso requeridos por la unidad básica, hacen necesario ir directamente al dato buscado sin que se tenga que pasar por otros (como sucede en la cinta, en la que el acceso es secuencial). Para estos requerimientos, las formas convenientes son los discos y tambores, y los dispositivos que utilizan esta forma de medio se describen como dispositivos de almacenamiento de acceso directo o DASD ('Direct Access Storage Device').

La distinción entre RAM ('Random Access Memory'), y el DASD, es que el primero accede de forma inmediata a cualquier byte de datos requerido, mientras que el DASD accede sólo a un bloque que contiene típicamente un Kbyte de datos, más o menos. El bloque se transfiere entero a la RAM, y sólo entonces la unidad básica puede acceder a bytes específicos. El acceso a los bloques sin embargo es totalmente aleatorio pudiendo acceder a cualquiera de ellos sin tener que pasar por otros. No obstante, este acceso a los bloques de un determinado fichero no es totalmente directo puesto que el sistema debe localizar primero la ubicación del archivo y su distribución sobre el soporte magnético. Para poder acceder a esta información el sistema operativo debe consultar la estructura jerárquica de su sistema de archivos, que obviamente también estará almacenada en el medio magnético, pero una vez consultada esta tabla y localizado el fichero, el acceso a un bloque concreto puede hacerse de forma directa sin necesidad de recorrer otros bloques del mismo. Esta situación no es posible en el caso de las cintas magnéticas de cualquier tipo, donde para que la cabeza de lectura alcance un determinado bloque dentro del fichero ha tenido que recorrer todos los bloques anteriores aunque no sean leídos y transferidos al sistema principal.

Hay también varias formas cualitativas, en las que se pueden clasificar los DASD. Una forma de distinguir los dispositivos es clasificándolos en medios flexibles y rígidos; otra es entre dispositivos en los que se puede intercambiar el medio y en los que éste permanece fijo en su sitio. Normalmente, los discos realizados con material rígido son fijos, por lo que se les ha dado en llamar discos duros, aunque no tardaron en diseñarse los discos extraíbles con material rígido. Junto a los discos rígidos, se desarrolló otro tipo de discos que utilizaban medios flexibles, típicamente llamados disquetes ('floppy disk').

## **2.3 CABEZAS POR PISTA Y MOVIMIENTO DE LAS CABEZAS**

Un rasgo fundamental en el diseño de los dispositivos de acceso directo, en contraste con los de acceso secuencial, es que los datos están almacenados en un gran número de pistas separadas, cada una de las cuales almacena sólo unos pocos Kbytes de datos. Los accesos rápidos se consiguen permitiendo que se acceda a cualquier pista, escrutándose los datos secuencialmente. Los primeros dispositivos de acceso directo en los que ocurría esto antes que los discos eran los tambores, y aparecieron en dos versiones. En la primera versión tenían cabezas separadas para cada una de las pistas, a menudo varios cientos de cabezas. Esto se dio en llamar tambor de cabeza por pista. En otra versión, una cabeza simple, o un pequeño grupo de cabezas, podía moverse paralelamente al eje del tambor, para enfrentarla a una pista o grupo de pistas. Esto se llamó tambor de cabeza móvil.

## **2.4 TAMBORES Y DISCOS**

Los primeros dispositivos de almacenamiento de acceso directo, se fabricaron en forma de tambor, debido en parte a la facilidad de fabricación, y en parte para que todas las pistas fuesen idénticas con lo que se simplificaba el diseño. Cuando se incrementaron las necesidades de almacenamiento, se hizo difícil mantener los cilindros de tamaño razonable, además la deposición de la película magnética en la superficie plana de un disco es mucho más sencilla y fiable que

sobre la superficie curva del cilindro. Cambiándose a la forma de disco (con el gramófono como precedente), fue posible un diseño más compacto, usando ambas superficies del disco. Esto también facilitó la aparición de medios intercambiables, al menos en los dispositivos con cabeza en movimiento. El siguiente paso lógico, fue el usar varios discos. Los dispositivos de disco fijo con una cabeza por pista (HPT, 'Head Per Track') se han estado usando hasta hace poco, aunque para distinguirlos nos referimos a ellos como tambores, para distinguirlos de los dispositivos de cabeza en movimiento, a los cuales se les aplica ahora el término universal de unidades de disco. Algunos sistemas combinan dos técnicas; la sección principal con cabeza en movimiento, y una sección suplementaria con un pequeño número de cabezas fijas para usarlas donde se necesitan unos accesos mucho más rápidos.

Las pistas de los discos magnéticos están dispuestas en círculos concéntricos. En consecuencia, todas las pistas no son iguales, ya que el diámetro de cada una difiere del de las demás. Aunque podrían emplearse otras soluciones (como en los discos compactos), todos los discos magnéticos modernos giran a una velocidad constante, y escriben y leen datos a una velocidad constante. La longitud de la pista ocupada por cada uno de los bits de datos, varía por tanto, de una pista a otra. En la práctica, la pista utiliza una parte relativamente limitada de la superficie del disco, el radio de la pista más interna está entre la mitad y las dos terceras partes del radio de la pista más externa, pero esto todavía requiere una gran tolerancia en el sistema de lectura/escritura. En muchos discos, uno o más parámetros del disco se cambian con el radio variable de la pista que se comienza a acceder; normalmente sólo la corriente de escritura que determina la fuerza del campo magnético usado para escribir datos en el disco. Otra modificación consiste en la precompensación que se describirá más adelante.

## 2.5 DISCOS Y CABEZAS MÚLTIPLES

Ya hemos visto que las razones principales por las que cambiamos del tambor al disco, son la disponibilidad de uso de ambas caras del disco y de discos múltiples. En principio, podría ser posible el empleo de una sola cabeza de lectura/escritura, y moverla de superficie a superficie. Esto no sería una solución práctica, puesto que el coste y el bajo rendimiento aparecerían como factores negativos. Todas las unidades de disco magnético tienen cabezas separadas (algunas veces más de una), para cada una de las superficies de grabación (Fig. 2.1 a). En la figura (2.1 b) se muestra la imagen del interior de un disco duro donde se aprecian varios platos circulares junto con los brazos que soportan y desplazan las cabezas. Por otra parte, a excepción de algunos pocos dispositivos especializados, hay un único canal de datos, que se conecta a la cabeza requerida mediante un árbol de multiplexores electrónicos.

De esta forma, sólo se usa una cabeza cada vez, por lo que no es necesario mover cada una de las cabezas por separado, y se mueven todas juntas para situar una sola cabeza. Estas, se sitúan al final de una serie de brazos, de modo que cada brazo alcanza a pares de superficies adyacentes. Es decir, al final de cada brazo hay un par de cabezas, una por cada superficie adyacente, excepto el brazo adyacente a las superficies más externas, que tienen una sola cabeza cada uno. En unidades con discos intercambiables, la superficie más externa no se usa, porque el riesgo de daño es grande, excepto cuando los discos están permanentemente cerrados en la carcasa. Siempre habrá una pista (una por cada superficie de grabación), que está enfrentada a la cabeza correspondiente en cierta posición, y por tanto, accesible simplemente conmutando sin ningún movimiento de cabeza; el conjunto de pistas de todas las superficies que simultáneamente están enfrentadas a las distintas cabezas es lo que se llama cilindro. Es decir, la 'superficie cilíndrica' está formada por un número de pistas idénticas y dispuestas verticalmente sobre cada uno de los discos (Fig. 2.1 a). El número de cilindro es una de las tres componentes de dirección necesarias para encontrar una dirección específica. Las otras dos componentes son el número de cabeza y el número de sector. Hay que tener en cuenta que un disco con más de una superficie de almacenamiento, que es lo

habitual, tiene una estructura tridimensional, por lo que se requieren tres coordenadas para acceder a un determinado elemento de información.

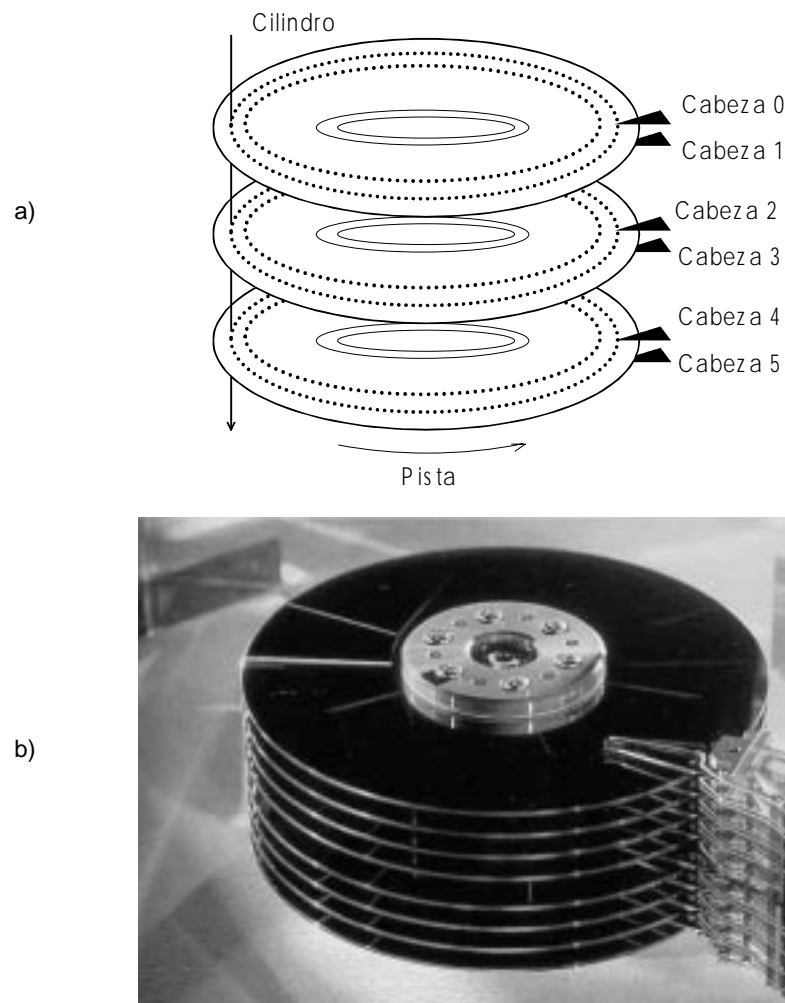


Fig. 2.1 Esquema de un disco con múltiples platos y cabezas (a). Imagen que muestra el interior de un disco duro donde se aprecian los distintos platos y los brazos que soportan y desplazan las cabezas (b).

El tiempo de acceso entre bloques de datos dentro del mismo cilindro, es más corto que el acceso a los datos de otros cilindros, porque las cabezas no necesitan desplazarse, aunque sí hay que tener en cuenta el tiempo de latencia que es el tiempo que transcurre desde que la cabeza se posiciona en la pista o cilindro adecuado hasta que el sector a leer se enfrenta con la cabeza. Este tiempo tiene una cota máxima que es el tiempo que tarda el disco en dar una vuelta completa, ya que durante este periodo todos los sectores pasan por delante de la cabeza de lectura/escritura. El tiempo de latencia es más bajo que el de posicionamiento sobre la pista, ya que al estar girando constantemente no se precisa vencer la inercia. Este tiempo de latencia viene dado únicamente por la velocidad de giro del disco y en principio interesa que sea lo más alta posible. Sin embargo, esto tiene varios problemas: por una parte supone un mayor desgaste de los rodamientos, un mayor consumo y un calentamiento mayor y por otra exige una velocidad de transferencia más alta lo que implica un diseño del canal de transferencia mucho más costoso. Como tiempo medio de latencia se considera el tiempo que tarda en completar 1/2 vuelta. De esta forma un disco que gira a 7200 rpm. tiene un tiempo de latencia medio de 4.2 ms.

Cuando el tiempo de acceso es importante, cada superficie puede incorporar dos o incluso más cabezas. En este caso existe igualmente un movimiento de cabezas, pero hay espacios separados radialmente, de forma que cada una de las cabezas usa la mitad de las pistas. El árbol de

multiplexores se extiende para permitir las cabezas extras; el efecto es el doble número de pistas por cilindro, y dividimos el número de cilindros. El posicionamiento de la cabeza, ahora, sólo necesita moverse en la mitad del rango original, y la media de movimiento queda dividida por dos. De esta forma, el tiempo medio de búsqueda (tiempo en mover la cabeza a la pista requerida), y el número de búsquedas (p. ej. cambios de cilindro), se reducen ambos, aunque no existe reducción en la latencia. El problema de la variación del espaciado de bits entre pistas, es de más fácil solución, ya que cada una de las cabezas se puede optimizar para su propia selección de pistas. En algunos discos de cabezas móviles de alto rendimiento hay dos posicionadores de cabezas separadas, donde cada uno tiene acceso a la mitad de las pistas en cada una de las superficies, uno a la mitad interna y el otro a la mitad externa. Esto, reduce de nuevo el tiempo medio de acceso, así como el número de movimientos de cabeza necesarios, aunque la extensión de esto varía mucho con la aplicación. Muchos actuadores incrementan bastante el coste de la unidad, el uso de dos unidades cada una con la mitad de capacidad suele ser la mejor solución. La única forma de reducir la latencia, es proporcionar dos cabezas por pista, diametralmente opuestas, una a otra. Esto obliga a dos actuadores independientes, ya que si se situasen en el mismo brazo, cuando una de las cabezas se estuviese moviendo hacia el centro, la otra lo haría hacia el exterior y no estarían simultáneamente sobre la misma pista. Otra forma de reducir el tiempo de acceso, es proporcionar una memoria caché, que podemos considerar como un 'buffer' muy grande. No obstante, ésto queda normalmente fuera del ámbito de los discos magnéticos siendo una tarea más propia de los distintos sistemas operativos.

## 2.6 ESPACIADO ENTRE CABEZAL Y DISCO

Los discos flexibles, normalmente giran en contacto con la cabeza de lectura/escritura, al igual que las cintas magnéticas. La densidad de datos de estos discos es baja, lo que permite tener una espesa capa magnética en el disco, y una cabeza robusta. El disco gira relativamente lento (300 r.p.m.), y cuando los datos no se leen ni escriben, la cabeza se retira del contacto con el disco y éste deja de girar. Por tanto, aunque haya algún desgaste de la cabeza o del disco, si éste es pequeño, no importa demasiado ya que sólo se produce cuando hay lectura o escritura.

Este no es el caso de los discos duros y tambores, en los que hay una capa más delgada y cabezas más pequeñas, y giran a unas 3600 r.p.m. y algunos más modernos a 7200 e incluso más. Estos discos están girando constantemente ya que al ser su masa mayor tienen una gran inercia lo que hace que se incremente el tiempo que tarda en alcanzar la velocidad estacionaria de trabajo. Aquí es necesario evitar el contacto entre la cabeza y la superficie de grabación ya que el rozamiento es constante. Al ser la densidad de grabación mucho mayor, la capa magnética debe ser mucho más fina lo que origina unos campos magnéticos más débiles y por lo tanto la distancia entre la cabeza y la superficie debe ser muy pequeña y constante. Esto es debido a que las líneas de fuerza del campo magnético tienden a abrirse con la distancia, en otras palabras, la intensidad del campo disminuye y además se amplía la zona de influencia del campo con lo que la zona magnetizada se hace mayor lo que impediría el aumento de la densidad. Para resolver este problema, se desarrollaron varias técnicas con objeto de reducir y mantener constante la distancia entre la superficie y la cabeza (4 micras es un valor usual). La primera consistió en que la cabeza se acercaba a la superficie mediante un tornillo hasta que rozase con la superficie del disco, y a continuación, se aflojaba un poco este tornillo. Esta técnica tuvo poco éxito, y pronto surgió otra técnica derivada del comportamiento del aire, en la que la separación de la cabeza depende de la forma de la cabeza, y de la capa de aire existente entre la cabeza y la superficie del disco (Fig. 2.2). De esta forma, esta película de aire empuja a la cabeza hacia arriba, mientras que un resorte que soporta a la cabeza, empuja hacia abajo, llegándose a un equilibrio entre ambas fuerzas bastante cerca de la superficie manteniendo constante la distancia entre cabeza y disco. Dicha distancia ha ido decreciendo gradualmente, hasta que en los discos actuales se ha llegado a la aproximación anteriormente mencionada.

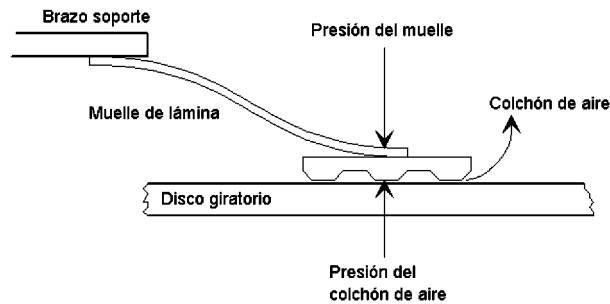


Fig. 2.2 Cabezal 'volando' sobre el disco

En este vuelo de cabezas surgen dos problemas: el primero de ellos está asociado al hecho de que el vuelo sólo se mantiene cuando el disco gira a su velocidad normal. Si el disco disminuye su velocidad, la altura del vuelo va decreciendo y finalmente la cabeza tocará la superficie del disco empujada por el soporte del disco. Existen algunas técnicas para evitar esto, como por ejemplo quitar el soporte que empuja a la cabeza cuando el disco pierde velocidad. Este mecanismo es complejo, y por lo tanto caro. Otro método utilizado consiste en llevar la cabeza a un lugar del disco donde no haya datos (aparcar la cabeza). Indudablemente hay un desgaste de la cabeza, el cual es mínimo, ya que sólo se produce durante el arranque y la parada del disco, es decir los momentos en los que el disco no gira a su régimen normal. Este aparcado de cabezas debe realizarse en una zona no destinada a datos, ya que aunque la cabeza pueda soportar el ligero desgaste del rozamiento de arranque y parada, la delicada película magnética sí podría dañarse, ya que al contrario que en los discos flexibles, no está recubierta por una capa protectora. Esto obliga a retirar la cabeza hacia el interior o el exterior del disco cuando se corta la alimentación. Esto se consigue con un resorte que la alimentación mantiene desactivado y al fallar ésta, automáticamente empuja la cabeza hacia uno u otro extremo de su recorrido antes de que el disco deje de girar completamente. Hay que tener en cuenta que una vez que se corta la alimentación, el disco sigue girando durante algún tiempo debido a su inercia y al bajo rozamiento que presenta.

El otro problema existente con el vuelo de los cabezales ocurre cuando en la superficie del disco existen rugosidades, o contaminación debido a las impurezas del aire, tales como polvo, ceniza de tabaco, etc., lo cual obliga a tener una serie de prevenciones en el almacenamiento del disco.

La solución introducida por IBM fue el 'winchester', en el que el disco y la cabeza se ensamblan juntos en un recinto cerrado que no vuelve a abrirse nunca más. Esto significa que los discos 'winchester' intercambiables no sólo son los discos, sino también incluyen las cabezas y mecanismos de movimiento de éstas.

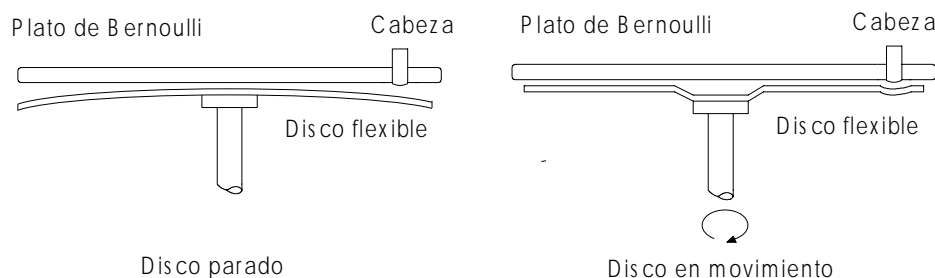


Fig. 2.3 Disco de tipo Bernoulli en funcionamiento.

Aunque ya en desuso, han existido otro tipo de dispositivos que combinan alguna de las características de los discos rígidos y flexibles en el dispositivo, usando el principio de Bernoulli (Fig. 2.3). En estos dispositivos, un disco flexible gira paralelo al piso de metal. Una delgada

película de aire se forma entre los dos, y el espesor de ésta es estable. Como acabamos de describir, las cabezas de lectura/escritura vuelan sobre el disco rígido. El disco también volará sobre cualquier pequeña protuberancia del 'plato', formando pequeños rizos. Esto, no sólo significa que pasará, sin producir daño, sobre el polvo, sino que también sobre las cabezas de lectura/escritura que se mueven radialmente sobre el plato.

## 2.7 DISEÑO DE CABEZAS

La cabeza es un pequeño dispositivo que lee y escribe los datos en el medio magnético. Durante la escritura de datos, pulsos eléctricos enviados a la cabeza crean áreas magnéticas en el medio orientando los dominios magnéticos del material en uno u otro sentido en función del sentido de la corriente enviada a la cabeza. Durante la lectura, estas áreas magnéticas crean pulsos eléctricos en la cabeza. Para ser más precisos, los pulsos son creados por la transición o el paso de la cabeza de una zona magnetizada en un sentido a otra magnetizada en sentido contrario, ya que un campo magnético constante no es capaz de inducir ninguna corriente. Para que se induzca una corriente es preciso un cambio en el campo magnético. Ver figura (2.9).

Los vuelos de las cabezas es lo más difícil de diseñar en una unidad de disco. Hay requerimientos eléctricos, magnéticos, mecánicos y aerodinámicos y algunos de ellos entran en conflicto entre sí.

Fundamentalmente, las cabezas convencionales de grabación consisten (Fig. 2.4) en un anillo o núcleo de material con una baja reluctancia magnética, con un estrecho hueco cortado en él que constituye el entrehierro (la reluctancia puede considerarse, en el campo magnético, el equivalente a la resistencia).

Se coloca un arrollamiento conductor en el núcleo, de tal forma que cuando pasa la corriente a través de la bobina se produce un campo magnético. Si no hubiese aire en el núcleo de metal, el campo magnético estaría concentrado dentro del material, puesto que su reluctancia es mucho menor que la de los alrededores. Sin embargo, el aire (o el material magnético) del entrehierro tiene mucha mayor reluctancia que el núcleo del material, y por lo tanto, el campo magnético tiende a esparcirse mucho más (Fig. 2.5). Si un disco o cinta con una capa magnética se coloca muy cerca del entrehierro, algunas de las líneas de fuerza del campo magnético pasarán muy cerca de la capa y pueden cambiar el estado magnético de ésta.

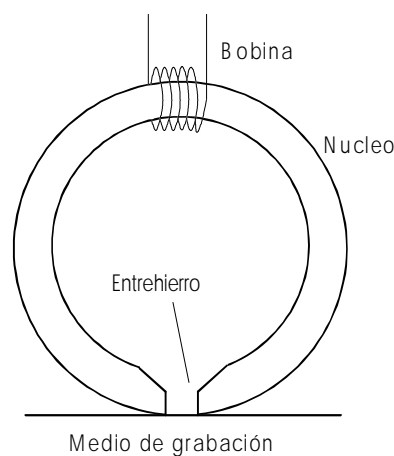


Fig. 2.4 Modelo simplificado de cabeza magnética

A diferencia del núcleo, la capa permanece magnetizada después de que el campo magnético desaparezca debido a la histéresis magnética. La dirección de magnetización depende de la dirección de la corriente a través de la bobina, y esta corriente puede ser reversible. En el disco o cinta, la capa magnética va moviéndose constantemente bajo el hueco del núcleo. Por lo tanto, se produce una secuencia de cambios de flujo magnético sobre ella que se corresponden con los cambios en las corrientes del arrollamiento. Este flujo magnetiza la capa del medio de forma permanente, hasta que se aplique un campo magnético en sentido contrario.

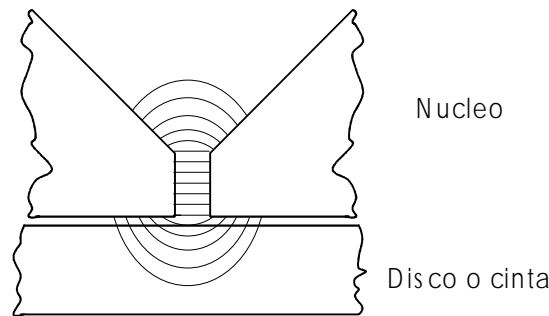


Fig. 2.5 Campo magnético en el entrehierro

Cuando leemos, el campo magnético realmente induce un voltaje en el núcleo, correspondiente a la dirección de la corriente en la que se produjo este campo magnético remanente. El ancho del entrehierro (separación entre los polos) del núcleo (que puede ser menor de un micrón) determina la longitud más corta de la capa que puede ser magnetizada en una dirección, y por tanto, la densidad con la que los datos se pueden empaquetar a lo largo de la pista. El ancho del núcleo en sí mismo, medido perpendicularmente a la dirección del movimiento, es uno de los factores que determina el espaciado de las pistas. Este es considerablemente más grande que la abertura del entrehierro, por lo que la celda de grabación es mucho más ancha que larga. El material del núcleo es usualmente ferrita aunque actualmente se emplean distintos tipos de materiales cerámicos amorfos.

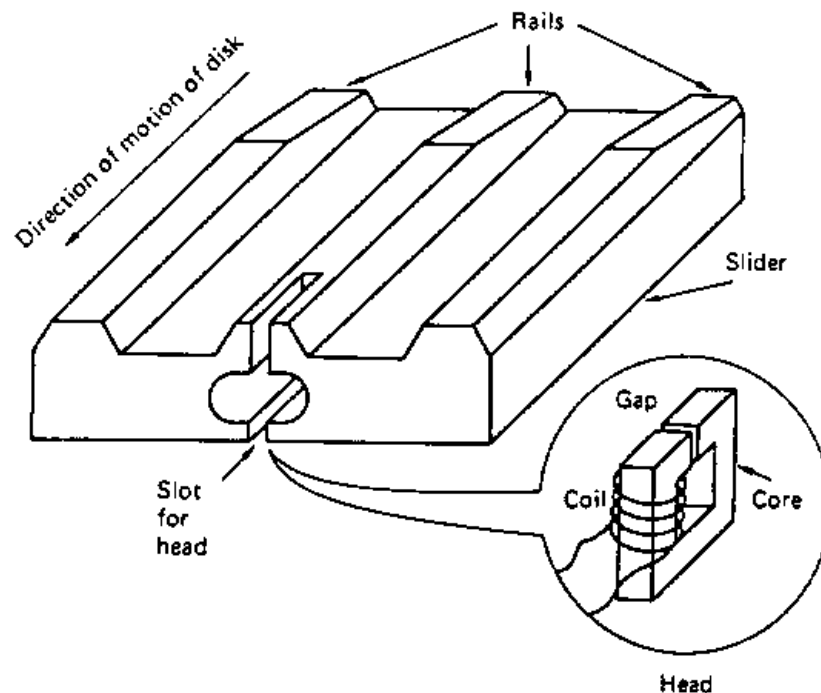


Fig. 2.6 Composición de la cabeza en el cabezal

En la actualidad, existen dos tipos de cabezas: monolíticas y de película delgada. El primer tipo ha sido usado durante muchos años. Consiste en un núcleo de ferrita, en el que se arrolla la bobina (de cable extremadamente fino). Todo el núcleo está diseñado para darle unas propiedades aerodinámicas para que pueda volar a una distancia correcta de la superficie del disco. La mecanización del soporte de la cabeza involucra normalmente tres railes en la cara de la cabeza, paralelos a la dirección en la cual se mueve el disco (Fig. 2.6). La película de aire entre estos railes y la superficie del disco, hace que la cabeza vuele. Dos de estos railes están a los lados de la cabeza. El tercero, en el centro, es el activo y en él está situado el espacio para insertar el núcleo de ferrita que constituye el elemento magnéticamente activo. Una variante de esto, son las cabezas compuestas. La carcasa de la cabeza está hecha de material magnético inerte, y la cabeza de ferrita es mucho más pequeña y está insertada en la carcasa.

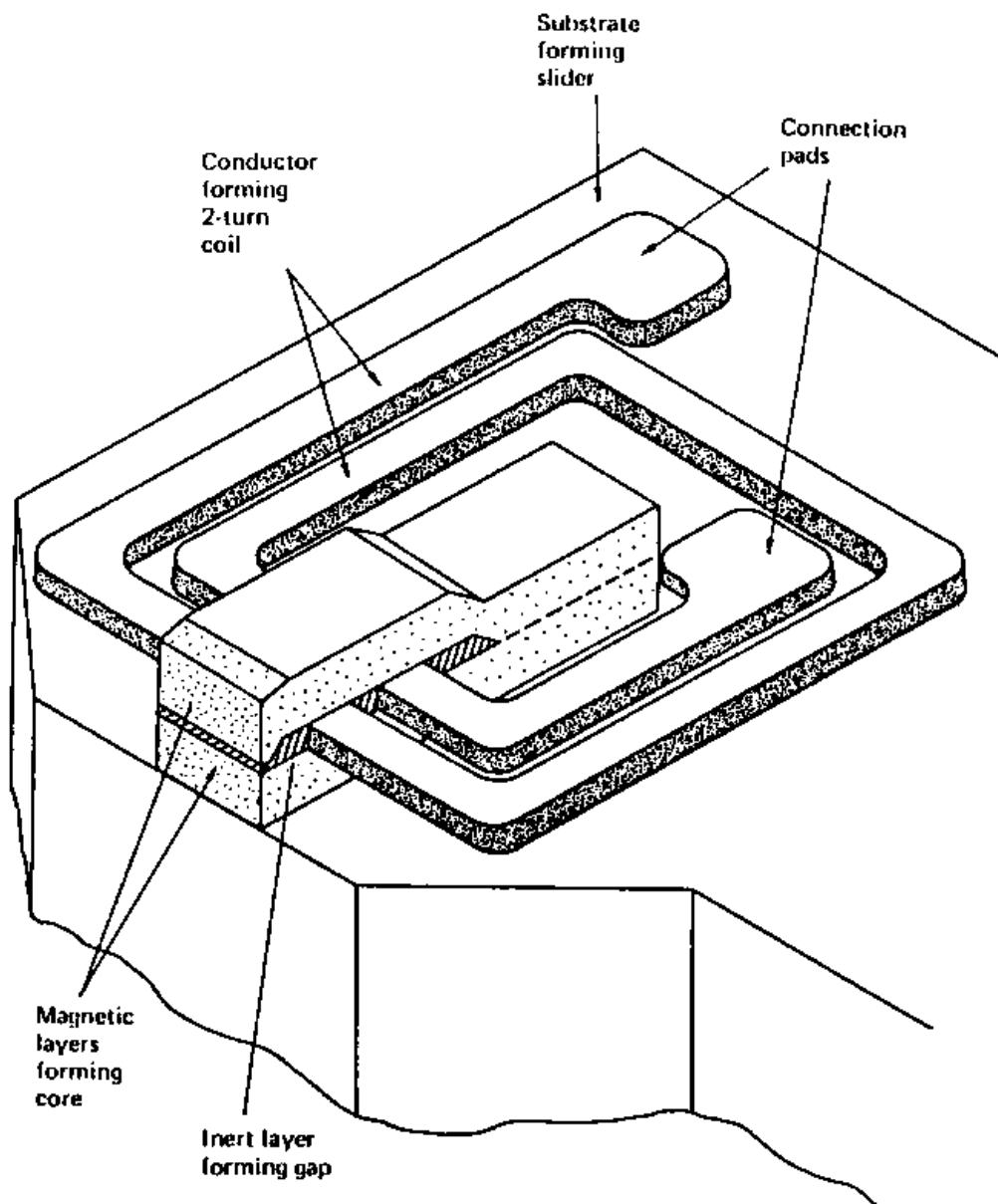


Fig. 2.7 Detalle de una cabeza de película delgada

En las cabezas de película delgada (Fig. 2.7) se usa también un deslizador inerte, pero en este caso, la parte activa de la cabeza está realizada poniendo varias capas en el sustrato, utilizando técnicas similares a las de la industria del semiconductor. El material del sustrato, generalmente

forma una 'carcasa' inerte en el deslizador. Al igual que se hace con los semiconductores, muchas cabezas se fabrican juntas en un único sustrato. La primera cara es una mezcla de metal, seguida de una cara inerte, la cual forma el entrehierro de la cabeza. Una o más caras siguen con el patrón de conducción entre las caras de aislamiento, que constituirán la parte de bobinas con unas cuantas vueltas (normalmente entre 2 y 20). Encima se pone otra mezcla de metal. Esto hace contacto con la primera, pero está separada de él por un hueco relleno. El sustrato es entonces cortado en cabezas individuales, y cada una de ellas es mecanizada con un deslizador para el correcto perfil de vuelo. Estas cabezas, suelen tener dos railes (Fig. 2.8) en vez de tres, y están fabricados con cabezas de película delgada separadas en cada rail. De estas dos cabezas solo se usa la que tiene mejores propiedades después del testeo. Las dos se hacen simplemente para incrementar la probabilidad de que una de las dos sea buena.

Las cabezas de película delgada pueden hacerse con dimensiones más finas y precisas que las cabezas monolíticas. En principio serían menos caras de hacer, aunque el paso de mecanización final es crítico y dificultoso.

## 2.8 POSICIONAMIENTO DE LA CABEZA

Hemos mencionado hasta ahora que existe un solo mecanismo de posicionamiento, que es el que mueve todas las cabezas a la vez. El diseño de este mecanismo tiene un considerable efecto en el coste del dispositivo completo y en su rendimiento, particularmente en el tiempo de acceso. El mecanismo tiene dos partes: el conjunto de los brazos que lleva las cabezas, y el actuador que controla su posición. El brazo está diseñado para moverse en línea recta, por lo que la cabeza se mueve a lo largo del radio del disco y su eje está siempre tangencial a la pista.

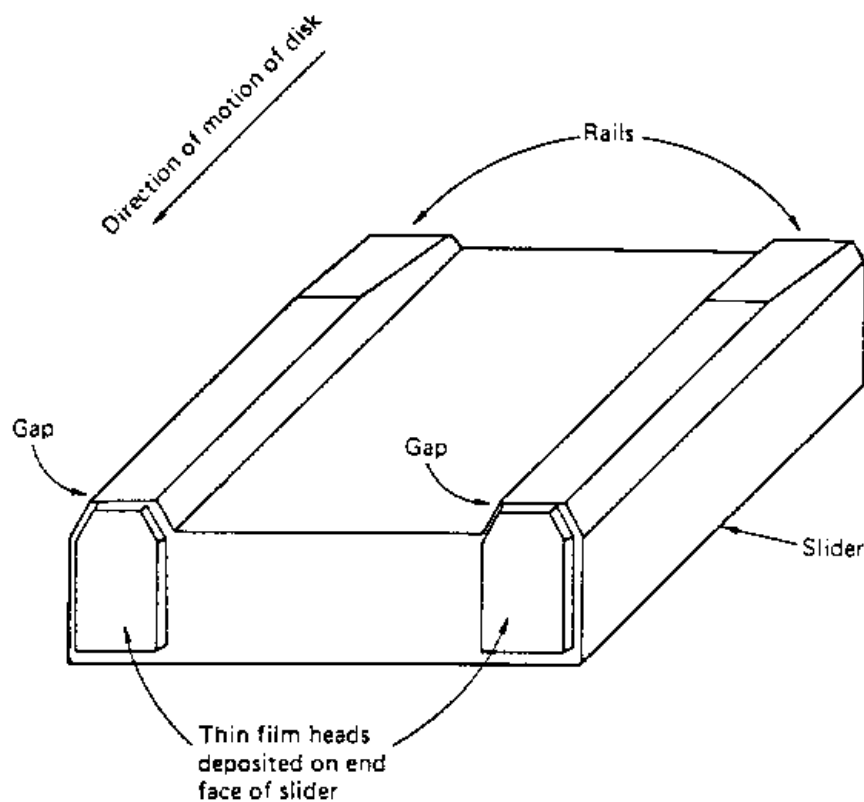


Fig. 2.8 Deslizador con cabezas de película delgada

La parte más crítica del mecanismo de posicionamiento es el actuador. Hay dos tipos básicos. Uno está basado en el motor paso a paso, "stepper motor", el cual es un simple motor que se puede girar a un ángulo definido mediante unos pulsos de corriente en su bobina. El segundo tipo es el actuador electrodinámico o de bobina móvil que se basa en el mismo principio de funcionamiento que los altavoces: esto es un simple bobinado en un campo magnético permanente (imán), como el de un altavoz, de ahí su nombre ("voice coil"). Este último es más rápido, consume mucha menos potencia y permite un mejor posicionamiento al no estar restringido a unas posiciones fijas como el motor paso a paso, pero es más caro y más difícil de controlar.

Asociado con el posicionamiento, debe haber algún método para determinar la posición actual de la cabeza. En las unidades de disco flexible, y en algunos de los discos duros más baratos, esto viene dado por el cómputo o cálculo estimado sin realimentación. La posición de la pista se localiza simplemente contando el número de pulsos aplicados al motor paso a paso, el cual se mueve un número fijo de pasos (a menudo uno) por pista. Esto es sólo satisfactorio cuando la densidad de pistas es relativamente baja, típicamente sobre 400 ó 500 pistas por pulgada. Igualmente, este espaciado sólo se puede conseguir en discos fijos, donde el mismo mecanismo es el que lee y escribe los datos. En los discos flexibles esto no ocurre, puesto que la lectura y escritura de datos se suele realizar en controladores de dispositivo distintos, por lo que la densidad de las pistas es menor. Para una alta densidad de pistas, con un intervalo de 2000 o más pistas por pulgada, es necesario algún tipo de servosistema. Todos los actuadores precisan de algún tipo de servosistema para controlar la posición de la cabeza, salvo algunos tipos de motores paso a paso.

El tiempo empleado por las cabezas para alcanzar la pista requerida y situarse sobre ella se llama tiempo de búsqueda. Es únicamente de unos 50 milisegundos, cuando el actuador es un motor paso a paso y con los actuadores electrodinámicos o de bobina móvil está por debajo de los 10 milisegundos. Este tiempo se mide normalmente, sumando el tiempo necesario para acceder a un elevado número de pistas en orden aleatorio y dividiendo al final la suma total por el número de búsquedas. El tiempo de búsqueda no incluye la latencia (que es el tiempo requerido desde que se sitúa la cabeza del disco en la pista, hasta que se encuentra el sector correcto). Este tiempo se establece como la mitad del periodo de revolución del disco, por lo que para un disco que gira a 3600 r.p.m. este tiempo será de 8.3 milisegundos si el disco tiene un único grupo de cabezas o de la mitad si el disco, tal y como se comentó anteriormente tiene dos grupos de cabezas diametralmente opuestas. Esto es porque el sector puede encontrarse con una cabeza dos veces en cada revolución. El tiempo total de acceso es la suma del tiempo de búsqueda y el tiempo de latencia.

## 2.9 EL MEDIO MAGNÉTICO

Las capas magnéticas de discos y tambores consisten en una fina capa activa (ej. magnetizable) en un sustrato inerte más robusto. En el caso de los discos flexibles, el sustrato se fabrica en plástico, generalmente poliéster, tal como MYHER. Este es el mismo material utilizado para las cintas magnéticas, pero el sustrato de los discos es mucho más grueso que el de la cinta para que conserve la forma cuando gire. La estabilidad geométrica o dimensional tiende a ser un problema con este material. El disco se expande y contrae un poco, a menudo más en una dirección que en otra, con las variaciones de temperatura y humedad. Esta es una de las razones por las que los discos flexibles tienen unas pistas más anchas, y por lo tanto, de menor capacidad. Al igual que en las cintas, los disquetes están recubiertos de una capa protectora ya que la cabeza está en contacto permanente con el mismo y de lo contrario la película magnética resultaría dañada. Los discos duros, por el contrario, carecen de esta última capa protectora. Los discos flexibles están siempre encerrados en una carcasa protectora. Existen dos tipos de estas envolturas. Las más viejas consisten en una simple envoltura de plástico con una capa de lana en la cara más interna para limpiar y reducir la fricción de la superficie del disco en su rotación. El agujero de esta carcasa

para el acceso de la cabeza no está protegido, por lo que se tiene una superficie vulnerable a huellas. El nuevo tipo es una carcasa de plástico rígido, con una contraventana corrediza, la cual cubre el agujero por el que la cabeza accede a la superficie, cuando el disco está fuera de la unidad de disco. Este tipo de diseño ofrece mayor protección, aunque aumenta un poco el coste. Todos los tipos de discos flexibles y de hecho, todos los discos intercambiables tienen alguna clase de protección contra la escritura, que se utiliza para prevenir la destrucción accidental de datos en el disco y que no puede ser modificable por software.

Los discos rígidos y tambores tienen un sustrato de metal, normalmente aluminio. Algunos modelos experimentales han sido fabricados con sustratos plásticos, más baratos, pero con un coeficiente de expansión varias veces mayor que el del aluminio, por lo que es más difícil conseguir un espaciado de pistas constante. También se ha experimentado con sustratos de cerámica y cristal ya que son menos sensibles a los cambios térmicos. El sustrato debe ser extremadamente liso, debido a que la más mínima rugosidad en la superficie influye bastante en la altura del vuelo de la cabeza.

Otra componente vital del disco es la capa magnética. Debemos tener también información sobre el espesor de esta capa. El espesor de la capa es uno de los factores que más directamente influyen en la densidad de datos del disco: a mayor densidad, menor debe ser el espesor de la capa de material magnético. En general, se usan dos tipos de capas: de óxido y de película delgada.

La capa de óxido consiste, generalmente, en partículas de óxido de hierro. La capa es aplicada en forma líquida. La medida de la cantidad de líquido se pone en el disco cuando éste gira, con lo que el líquido tiende a extenderse por toda la superficie. Esta cara tiende a ser más gruesa en el perímetro del disco, y algunas controladoras de disco compensan esta variación, cambiando la corriente de escritura con el radio de la pista.

La capa de óxido es usada en los discos más económicos. Esta tiene buenas propiedades magnéticas y los discos son relativamente baratos de hacer, pero puede ser difícil conseguir un grosor homogéneo y evitar los llamados "agujeros de alfiler", que son puntos pequeñísimos que no han quedado cubiertos por la película magnética, como si se hubiese tocado esta capa con la punta de un alfiler. La capa de óxido tiene un espesor típico de 20 a 30 micras.

La capa de película delgada es generalmente una aleación de metal. La composición exacta varía de un fabricante a otro, pero las componentes principales son cobalto, níquel y fósforo. La capa es más delgada que la de óxido y puede llegar hasta 2 o 3 micras. Hay dos métodos de fabricación comunes: uno es el 'plating', donde el sustrato se sumerge en un baño electrolítico, en el cual se deposita la capa. El segundo método es el 'sputtering'. En este método, el sustrato es introducido en una cavidad en la que se hace el vacío y en la que hay un cátodo fabricado con la aleación a ser depositada. Una corriente eléctrica provoca que las partículas sean emitidas por el cátodo cuando éste se calienta y se depositen en el disco. Este método es más caro que el 'plating', pero se controla mucho mejor la composición de la película, ya que en el baño electrolítico, conforme se deposita la película baja la concentración de la disolución y esto es difícil de controlar.

La gran mayoría de los discos magnéticos usan una grabación longitudinal. Cada una de las regiones de la capa magnética, la cual representa un bit, es magnetizada en el plano del disco y en la dirección de recorrido de la pista. En todo caso, en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario según si representa un cero o un uno. Sólo en los límites entre estas regiones, el campo es perpendicular a la superficie. Sin embargo, es posible obtener una mayor densidad de grabación si se usa una grabación vertical, en la que la lámina es magnetizada perpendicularmente a su plano; hacia arriba representa un uno y hacia abajo representa un cero o a la inversa. Sin embargo esta técnica no se usa porque requiere que el disco gire entre los polos de la cabeza que deberían estar perfectamente alineados en ambas caras lo cual no es sencillo con altas densidades de grabación.

Esta técnica sin embargo se emplea en los discos magnetoópticos donde este problema se elimina fabricando unos electrodos más grandes, y empleando un láser para que únicamente el punto iluminado por éste sea alterado magnéticamente como se explicará al final de este tema.

## 2.10 GRABACIÓN DE PULSOS. PRECOMPENSACIÓN

Cuando un medio magnético ha sido grabado, se ha alterado la orientación de los dominios repartidos por todo él. A partir de este momento, y aunque los medios magnéticos son normalmente bidimensionales, consideraremos que la orientación de los dominios se realiza de forma unidimensional. Es decir, los dominios que pueden considerarse como pequeños imanes, orientan sus polos norte-sur en una única dirección. La información se almacenará en este caso según el sentido de estos pequeños imanes: N-S o S-N a lo largo de la línea de almacenamiento. Para aprovechar la característica bidimensional, se emplean múltiples líneas similares, normalmente de forma circular y concéntricas. Al reorientar los dominios, se dice que hemos magnetizado el material en una determinada dirección. Como la orientación de estos dominios cambia a lo largo de la línea, la curva que representa esta orientación se denomina curva de magnetización. En la figura (2.9) se muestra un ejemplo de una pequeña porción de material magnético con zonas en distintas orientaciones. En esta figura se muestra la curva de magnetización ideal y la curva real. Si la magnetización fuese como la primera curva, las zonas que tienen una determinada orientación N-S o S-N se podrían hacer tan pequeñas como fuese necesario y como consecuencia, se podría almacenar una enorme cantidad de información. Sin embargo, la situación real limita la capacidad debido a esas zonas de transición que obligan a que para cambiar la magnetización del material se requiere un pequeño espacio.

Este espacio depende de numerosos factores siendo los más importantes el grosor de la película, el tamaño de los dominios magnéticos del material, el tamaño de la cabeza, la velocidad de giro y la velocidad de variación de la corriente de escritura.

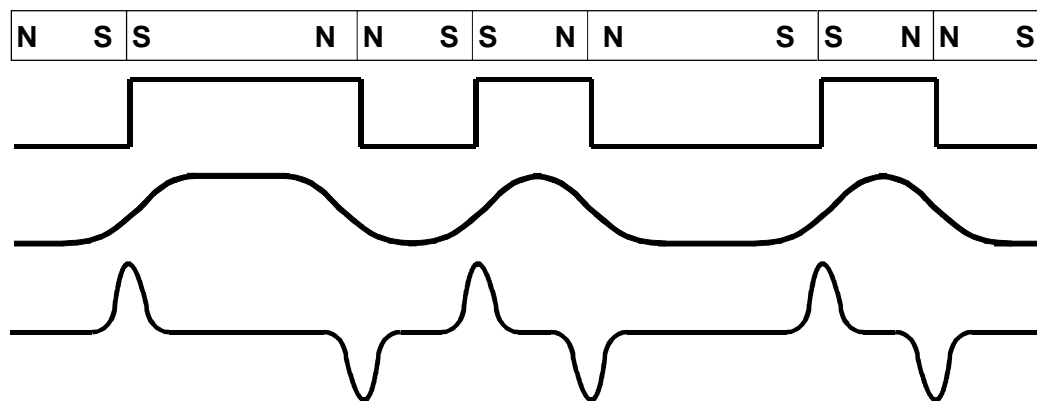


Fig. 2.9 Orientaciones de los dominios magnéticos a lo largo de una línea con la representación ideal de la curva de magnetización y su aproximación real en la que las transiciones no son abruptas. La última curva representa los pulsos de corriente inducida en la bobina de la cabeza durante el proceso de lectura.

Durante el proceso de lectura, hay que tener en cuenta que un campo magnético uniforme no induce ninguna corriente, por lo que la cabeza de lectura únicamente puede detectar los cambios de magnetización y en ese caso se produce un pulso de corriente que puede ser detectado. Este pulso de corriente será de un signo si se pasa de una zona N-S a una S-N y de signo contrario si el paso es a la inversa (de S-N a N-S) (Ver figura 2.9).

Estos pulsos se modelan habitualmente de tres formas distintas:

- Mediante una gaussiana:  $e^{-(x-x_0)^2}$
- Mediante la derivada del arcotangente:  $1/(1+(x-x_0)^2)$
- O mediante el coseno alzado:  $\frac{1}{2}(\cos(x-x_0)+1)$

Estos tres posibles modelos, como es de suponer, son muy similares, de hecho si realizamos su desarrollo en serie de Taylor obtenemos expresiones muy parecidas:

$$e^{-x^2} \approx 1 - x^2 + \frac{1}{2!}x^4 - \frac{1}{3!}x^6 + \dots$$

$$\frac{1}{2}(1 + \cos(x)) \approx 1 - \frac{1}{2 \cdot 2!}x^2 + \frac{1}{2 \cdot 4!}x^4 - \frac{1}{2 \cdot 6!}x^6 + \dots$$

$$\frac{1}{1+x^2} \approx 1 - x^2 + x^4 - x^6 + \dots$$

Todos los desarrollos incluyen únicamente los términos pares y los signos son alternos. Por este motivo podemos considerar una expresión más general:

$$P \approx 1 - a_2x^2 + a_4x^4 - a_6x^6 + \dots$$

donde los coeficientes  $a_i$  de la serie se determinan experimentalmente en el laboratorio.

### 2.10.1 Superposición lineal. Precompensación.

Como ya se ha comentado, durante el proceso de lectura, la cabeza únicamente detecta las variaciones de magnetización y las convierte a pulsos de corriente que se modelan como se acaba de comentar. Cada pulso en un sentido siempre irá seguido de un pulso en sentido contrario puesto que después de una transición N-S necesariamente debe venir una S-N y viceversa. De esta forma, si los dos pulsos están muy cercanos, se cancelarán parcialmente y habrá que considerar este efecto.

En la figura (2.10) se muestran dos pulsos de signo contrario, con un solapamiento muy ligero y otro par de pulsos con un solapamiento mayor. En este segundo caso se ve que se produce una reducción de la amplitud y un desplazamiento de la posición del máximo y del mínimo respecto de las posiciones que tendrían los pulsos aislados. De estos dos fenómenos, el más grave es el del desplazamiento de la posición de los máximos y mínimos, puesto que es la información que se emplea para sincronizar la lectura y definir de esta forma las distintas celdas. Este efecto se puede corregir parcialmente con una técnica denominada precompensación.

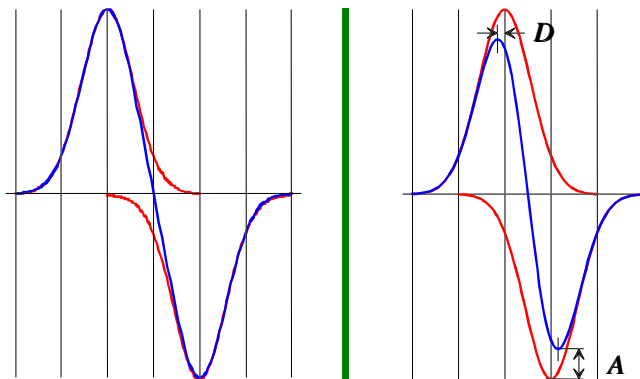


Fig. 2.10 Superposición de pulsos

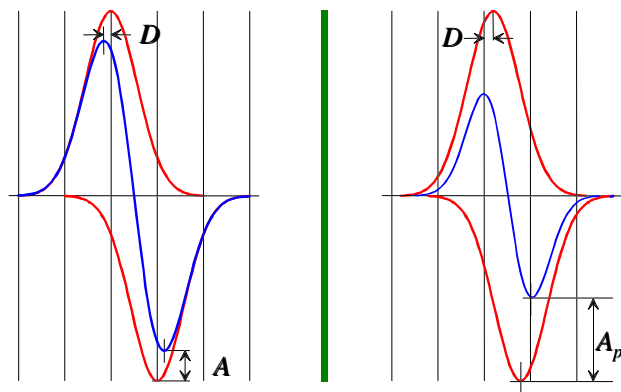


Fig. 2.11 Precompensación de escritura

Con este procedimiento, es posible ajustar las inversiones de flujo cuando están siendo escritas, de forma que la resultante esté en las posiciones en las que estarían los pulsos si no hubiese solapamiento. Las inversiones de flujo que proporcionen un pulso de lectura con un máximo anticipado son escritas más tarde mientras que las que proporcionen un pulso de lectura con un máximo retrasado son escritas de forma anticipada. Este método se ilustra en la figura (2.11). Resulta curioso que para corregir un efecto producido por la superposición estemos planteando más superposición, pero si se observa la figura (2.11) se ve que el desplazamiento de los extremos se ha corregido, pero como contrapartida tenemos una mayor atenuación. Esta mayor atenuación deberá ser corregida con una mayor amplificación. Esto puede amplificar también el ruido por lo que se requerirá también un filtrado. No obstante, esto puede realizarse sólo dentro de unos límites, ya que si la superposición es muy acusada, la atenuación será elevada y los pulsos no podrán ser detectados. De esta forma, el tamaño de una celda magnética, vendrá determinado por el espacio mínimo requerido para albergar una transición que pueda ser detectada.

## 2.11 OPTIMIZACIÓN DEL ESPACIO. "BANDING"

En relación con la superficie grabable de los dispositivos de almacenamiento magnético deben tenerse en cuenta dos consideraciones previas. En primer lugar la zona interior no se utiliza para almacenar información por tres razones fundamentales: es la zona de soporte del eje, tiene escasa capacidad y la velocidad lineal es excesivamente baja para mantener el vuelo de las cabezas. Por otro lado la zona exterior tampoco se utiliza para almacenar información debido a que es una zona en la que pueden influir notablemente los defectos de mecanizado, así como efectos aerodinámicos de borde y presenta problemas de deposición de la capa magnética si es del tipo de óxido. Por tanto, para calcular el espacio disponible para el almacenamiento debe considerarse únicamente la zona comprendida entre los radios interno y externo,  $R_i$  y  $R_e$ .

Teniendo en cuenta estas consideraciones, las longitudes del perímetro y las velocidades para una pista interior y una exterior son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Pista interior:} \quad L_i &= 2\pi R_i, & \text{velocidad} &= V_i = 2\pi\omega R_i \\ \text{Pista exterior:} \quad L_e &= 2\pi R_e, & \text{velocidad} &= V_e = 2\pi\omega R_e \end{aligned}$$

y dado que  $R_i < R_e$  entonces  $L_i < L_e$  y  $V_i < V_e$ . Además como es un dispositivo de velocidad angular constante,  $\omega = cte$ , entonces  $Nb_i = Nb_e$  siendo  $Nb_i$  y  $Nb_e$  el número de bits en las pistas interna y externa respectivamente. Teniendo en cuenta que la densidad de bits por unidad de longitud se define como:

$$B \equiv \frac{Nb}{L}$$

entonces  $B_i > B_e$ .

Por tanto si queremos mantener una velocidad de datos constante, todas las pistas deben tener el mismo número de bits, a pesar de que las pistas externas serían capaces de almacenar muchos más bits. La máxima densidad de bits está determinada por la pista más interna, que es la de menor perímetro y por lo tanto la de menor capacidad. Pero si considerásemos esta densidad para todas las pistas sucedería que en las pistas más externas y de perímetro mayor los bits estarían muy separados produciéndose un cierto desaprovechamiento de la superficie magnética.

En conclusión el límite lo marca la pista interior. Si el radio interior es pequeño la superficie de almacenamiento es grande pero la densidad es pequeña, pero si el radio interior es grande la superficie de almacenamiento es pequeña pero la densidad es grande. Inmediatamente se plantea la siguiente cuestión: ¿cuál es el radio óptimo de la pista interna?, es decir, ¿cuál es el radio de la pista interna que producirá la máxima capacidad posible?

Para responder a esta cuestión se define el número de bits en cada pista  $Nb_i = 2\pi R_i B_i$  y el número total de pistas  $Nt = (R_e - R_i)T$ , donde  $T$  es la densidad lineal de pistas ( $T = \text{Pistas/cm}$ ). El número total de bits,  $N$ , será el producto del número de bits de la pista interior por el número de pistas en el margen escogido:

$$N = 2\pi B_i R_i T (R_e - R_i) = 2\pi B_i T (R_e R_i - R_i^2)$$

que es la ecuación de una parábola.

Derivando

$$\frac{dN}{dR_i} = 2\pi B_i T \frac{d}{dR_i} (R_e R_i - R_i^2) = 0 \Rightarrow R_e - 2R_i = 0 \Rightarrow R_i = \frac{R_e}{2}$$

Sustituyendo en la expresión de  $N$ :

$$N_{m\acute{a}x} = \pi B T \frac{R_e^2}{2} = \frac{\pi B T D^2}{8}$$

donde  $D = 2R_e$ . Por tanto aunque la superficie total del disco es  $A = \frac{\pi D^2}{4} = \pi R_e^2$  y la

capacidad total sea  $C_{total} = \frac{\pi B T D^2}{4} = \pi B T R_e^2$ , incluso en el caso óptimo se tiene una eficiencia mucho menor:

$$\eta = \frac{N_{m\acute{a}x}}{C_{total}} = \frac{\pi B T D^2 / 8}{\pi B T D^2 / 4} = \frac{\pi B T R_e^2 / 2}{\pi B T R_e^2} = 50\%$$

### 2.11.1 Múltiples bandas

Dado que esta eficiencia es extremadamente baja es obvia la necesidad de obtener métodos que la mejoren. Una primera idea sería definir una sola pista con VLC (Velocidad Lineal Constante) en lugar de VAC (Velocidad Angular Constante). Esta es la técnica que se utiliza en los CD-DA y CD-ROM. Sin embargo para el caso de los dispositivos magnéticos presenta problemas en la velocidad de acceso debidos a dificultades de localización del sector buscado y problemas de inercia. Si la velocidad lineal se mantiene constante, al cambiar de una pista a otra, la velocidad angular debe variar, con lo que el disco deberá acelerar o frenar cada vez que hubiese un cambio de pista lo que provocaría unos accesos mucho más lentos, como sucede en los medios ópticos mencionados. Una segunda idea es realizar todas las pistas con la misma densidad pero tampoco es adecuada debido a que pistas contiguas no se diferenciarían en un sector completo sino en fragmentos de sector que no resulta eficiente.

La técnica que suele adoptarse para aumentar la eficiencia es conocida como “Banding”, dividir en bandas, y consiste en la división radial en zonas con distinta capacidad. De esta forma se consigue una gran superficie con alta densidad y es una solución de compromiso que aumenta la eficiencia del almacenamiento.

En esta técnica se consideran múltiples bandas tal que las distintas bandas mantienen la misma densidad lineal en la pista interior y todas las pistas de una misma banda tienen el mismo número de bits. Cada banda tiene un número de bits por pista creciente a medida que son más exteriores tal y como se muestra en la figura (2.12).

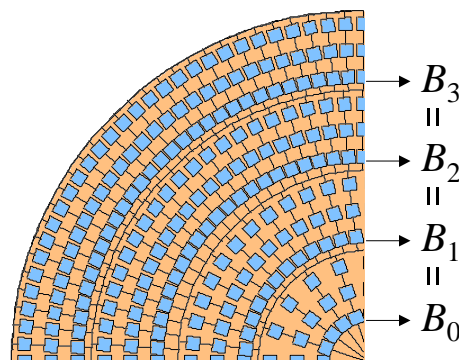


Fig. 2.12 Porción de un disco mostrando múltiples bandas

Para tratar el problema de manera general considérese que el área del disco está dividida en círculos concéntricos produciendo  $n$  bandas, donde  $n$  puede variar desde 1 hasta el número total de pistas.

Supóngase que todas las bandas tienen la misma anchura. Así el diámetro interno ( $d$ ) o el radio interno ( $r$ ) de una determinada banda ( $j$ -ésima) vendrá dado por:

$$d_j = d + j \left( \frac{D-d}{n} \right) \quad r_j = r + j \left( \frac{R-r}{n} \right)$$

y el radio externo de cada banda vendrá dado por el interno de la banda siguiente en sentido hacia el exterior:

$$R_j = r_{j+1}$$

Restando ambas expresiones:

$$R_j - r_j = \frac{R-r}{n}$$

Con esta configuración la capacidad de una banda,  $j$ , será:

$$N_j = 2\pi B T r_j (R_j - r_j)$$

y la capacidad total será la siguiente:

$$N_{Total} = \sum_{j=0}^{n-1} N_j = 2\pi B T \sum_{j=0}^{n-1} r_j (R_j - r_j) = \frac{2\pi B T (R-r)}{n} \sum_{j=0}^{n-1} r_j$$

Teniendo en cuenta que

$$\sum_{j=0}^{n-1} r_j = \sum_{j=0}^{n-1} nr + j \frac{R-r}{n} = nr + \frac{R-r}{n} \sum_{j=0}^{n-1} j = nr + \frac{R-r}{n} \frac{n(n-1)}{2}$$

se obtiene

$$N_{Total} = \frac{\pi B T}{n} [(n-1)R^2 + 2Rr - (n+1)r^2]$$

que es una parábola (siendo  $d$  la variable independiente). Para obtener el máximo número de bits se deriva la capacidad total y se iguala a cero

$$\frac{dN_{Total}}{dr} = \frac{\pi B T}{n} [2R - 2(n+1)r] = 0$$

despejando  $r$  al igual que se hizo con el disco de una única banda obtenemos:

$$r = \frac{R}{n+1}$$

y sustituyendo en la capacidad total se obtiene la capacidad óptima en función del número de bandas  $n$ :

$$N_{m\acute{a}x} = \pi B T R^2 \frac{n}{n+1}$$

y la eficiencia en el caso de múltiples bandas es: por tanto:

$$\eta = \frac{N_{m\acute{a}x}}{C_{total}} = \frac{n}{n+1}$$

Obsérvese que si  $n$  es grande la eficiencia se acerca al 100%. El máximo número de bandas se obtendrá cuando su número sea igual al número total de pistas. En este caso:

$$n = TR$$

La figura (2.13) muestra el número óptimo de bits en función del número de bandas,  $n$ . Como puede observarse el proceso es asintótico, es decir, la mayor ganancia en la capacidad se produce para un número dado de bandas después de las cuales el aumento en número de bandas produce un beneficio reducido. Por otro lado debe tenerse en cuenta que cuando el número de bandas crece, el diámetro de la pista interior disminuye, de modo que un aumento excesivo en el número de bandas se convierte en una situación impracticable.

En un disco multibanda, la velocidad de giro se mantiene constante para evitar los problemas de inercia mencionados anteriormente. Pero ahora, al contrario que en un disco con una sola banda, la velocidad de transferencia debe ajustarse puesto que cada banda requiere una velocidad de transferencia distinta lo que obliga a un diseño más elaborado del canal de lectura que engloba desde las cabezas al interfaz de conexión con el sistema principal. Esto es debido a que las celdas de bits de las bandas exteriores pasan más rápidamente por delante de la cabeza que las correspondientes a las pistas de las bandas interiores.

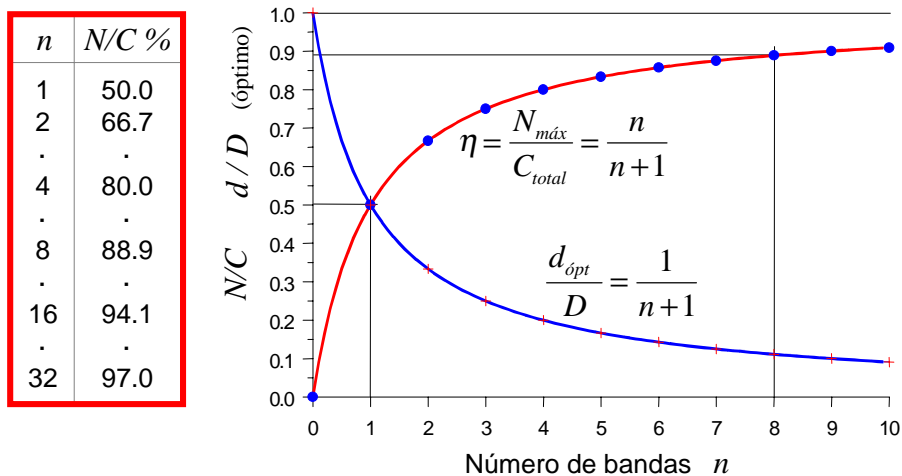


Fig. 2.13 Evolución de la mejora del aprovechamiento en función del número de bandas.

## 2.12 FORMATO DE GRABACIÓN

El término 'formato' describe el conjunto de reglas o procedimientos que deciden, cómo se representan y almacenan los datos en la superficie del disco. Podemos distinguir tres niveles.

En un primer nivel los bits de datos individuales se representan por cambios de magnetismo. El siguiente nivel, lo forman las cabezas que identifican los bloques representados en el disco con códigos usados para la detección y corrección de errores, y permiten etiquetar las distintas zonas del disco dividiendo en sectores, pistas, etc. El más alto de los niveles está relacionado con los archivos, los directorios y tablas de localización de ficheros, las cuales almacenan la localización de los bloques de ficheros de datos. El formato de este último nivel es realizado por el sistema

operativo y depende por tanto de las características que tenga este último. Nosotros veremos por el momento los dos primeros de estos niveles, es decir, los más bajos.

La información en la superficie del disco es grabada como una secuencia de inversiones de direcciones de magnetización en la superficie o flujos inversos; y es la posición de estos cambios de orientación magnética la que almacena la información. Existen varios modos de codificar la grabación de los datos, o lo que es lo mismo, existen múltiples formas de almacenar una misma secuencia de datos (bits) mediante patrones magnéticos. En la mayoría de estos modos podemos considerar la longitud de cada una de las pistas dividida en una secuencia de celdas de igual tamaño, cada una de las cuales almacena un bit de información. En este nivel no nos preocuparemos de si estos bits representan datos de usuario o alguna otra información como patrones de sincronización, encabezados de bloques, sector, pistas, códigos de detección de errores, etc. Este tipo de información que denominamos de control es utilizado por la unidad de disco para acceder a las distintas partes del mismo.

Ya se ha comentado que la celda de almacenamiento queda definida por el espacio necesario para que una transición pueda producir un pulso detectable. Si garantizamos que las transiciones tienen una separación mínima que reduzca el solapamiento, las celdas de almacenamiento podrán hacerse más pequeñas. Esto se consigue con una codificación adecuada. Por el contrario, si espaciarnos demasiado las transiciones puede suceder que se pierda la sincronía de lectura. Los códigos RLL (Run Length Limited) acotan el espacio entre transiciones tanto por arriba (separación máxima) como por abajo (separación mínima).

La forma más obvia para almacenar un dato es magnetizar la superficie en una dirección para representar un '1', y en la dirección contraria para representar un '0'. Hay un flujo inverso para cada uno de los bits sólo si es diferente del bit precedente. A esto se llama código sin retorno a cero, o NRZ (Non Return to Zero). Su mayor inconveniente es que no define implícitamente la localización de cada celda de datos a lo largo de una cadena de bits con la misma polaridad magnética, lo cual es bastante frecuente. En estos casos aparece una amplia zona con una magnetización continua en una misma dirección. Esto significa que el número de bits en la cadena no puede ser determinado a partir de la información grabada, a menos que haya una señal de disparo externa o un reloj para definir la posición de cada una de las celdas bit. Esto estaba disponible en los primeros tambores. Algunas veces el reloj era grabado en una pista adicional y otras veces fue definido mecánicamente por unos dientes agregados a la rueda del tambor. Esto funcionó bien mientras la densidad de grabación fue baja; pero cuando la densidad de grabación fue incrementándose se hizo difícil evitar situaciones en las que el reloj y los canales de datos no tenían exactamente la misma longitud de paso debido a las finas imperfecciones eléctricas o mecánicas. El uso de los relojes separados de la pista es ahora inusual. Por lo tanto la grabación NRZ ha quedado en desuso para almacenamiento aunque se sigue utilizando en comunicaciones serie.

La variación de NRZ es la Inversión de No Retorno a Cero' (Non Return to Zero Invert) o NRZI. Aquí la variación del flujo ocurre cuando la celda representa un '1', pero no ocurre cuando esta representa un '0'. Esto se conoce como NRZI-Marca y alternativamente podemos definir NRZI-Espacio si las transiciones se producen en los ceros. Utilizado de forma aislada tiene el mismo problema que NRZ respecto a que no hay forma de contar cuantos ceros seguidos hay en una zona de magnetización constante. Obsérvese que las secuencias de unos no plantean problemas puesto que éstos introducen siempre una inversión de la magnetización. No obstante NRZI puede ser usado convenientemente cuando varios bits (normalmente un byte) son grabados en paralelo en pistas separadas, de tal forma que si añadimos un bit de paridad IMPAR en cada byte y lo almacenamos en una novena pista que se graba con una novena cabeza, entonces habrá por lo menos una pista con transición en cada localización de byte. Este modo de 'auto reloj', donde un grupo de pistas son tomadas de forma conjunta, se utiliza en las cintas magnéticas y algunos tambores de cabeza por pista, aunque de nuevo los problemas de sincronismo suelen aflorar con la

alta densidad de datos. En la mayoría de los discos cada pista es independiente, por lo que NRZI no es conveniente. En cualquier caso, esta solución no es aplicable a discos duros porque la alta densidad de grabación es muy superior a lo que permiten las tolerancias mecánicas entre las cabezas.

Las pistas individuales se vuelven 'auto relojes' si codificamos los datos de tal forma que haya al menos una inversión de flujo en un punto conocido de cada celda. El problema que plantea esta situación es que algunas celdas contendrán dos inversiones de flujo. Hay varios modos de grabación basados en este principio, pero todos ellos tienen una desventaja: que hay una mínima distancia entre flujos inversos en relación con el tamaño de la celda bit; es solo la mitad de como podría ser en el modo NRZ. Como las propiedades físicas del disco y la cabeza limitan el mínimo espaciado entre las inversiones de flujo este grupo de modos pueden grabar la mitad de bits que pueden grabar los modos NRZ. Por este motivo no se utilizan habitualmente, aunque si son utilizados en cintas.

Entre los modos de este último tipo, que garantizan una transición en una posición concreta de la celda, tenemos el de codificación en fase o modulación de fase (PE) y el de modulación en frecuencia (FM). El de modulación de fase consiste en garantizar que todas las celdas tienen una transición en el centro: ascendente si almacenan un uno o descendente si almacenan un cero o a la inversa. Si aparecen dos ceros seguidos o dos unos seguidos, se hace necesario añadir una transición extra al principio de la celda, para que las transiciones del centro de la celda se puedan llevar a cabo en el sentido correcto. La figura (2.14) muestra un ejemplo con distintos códigos.

Otra forma de codificación que también garantiza transiciones en todas las celdas es el de modulación en frecuencia (FM). Según este modo, todas las celdas tienen una transición al principio y añaden una segunda transición en el centro de la celda si almacenan un uno y no hacen nada si almacenan un cero o a la inversa. Este código se denomina de modulación o codificación en frecuencia porque la información de '1' o '0' se representa por la frecuencia de las transiciones. De esta forma las celdas con '1' tienen una frecuencia doble que las celdas con '0'.

Estos dos últimos métodos garantizan transiciones en todas las celdas, añadiendo una transición extra en algún punto conocido de la celda (el principio o el centro), y por lo tanto a la hora de la lectura se puede saber fácilmente cuantas celdas han pasado por delante de la cabeza en un intervalo de tiempo determinado. Esto puede realizarse con lógica secuencial sencilla, y el circuito que realiza esta función se denomina separador de datos. Su nombre proviene de la función que realiza: a la entrada se le proporciona la secuencia de impulsos magnéticos leídos por la cabeza debidamente acondicionados y tiene dos salidas, por una proporciona la secuencia de datos y por la otra la señal de reloj que ha extraído de la información de entrada. El problema que tienen estos códigos es que donde los códigos de tipo NRZ incluían una sola transición ahora se requieren dos, por lo que la capacidad se ve reducida a la mitad. Esto es consecuencia de que la distancia mínima entre transiciones viene fijada por el medio, la cabeza y otros parámetros de diseño y fabricación y es un límite físico que no se puede superar. En la figura (2.14) aparece un ejemplo con distintos códigos, donde se ve que para la misma información, los códigos PE y FM emplean el doble de transiciones que NRZ o NRZI.

El modo de grabación más utilizado en discos flexibles es el conocido como Modulación de Frecuencia Modificada (MFM) o Código Miller. Este código es una variación del código de frecuencia modulada. Como puede verse en la figura (2.14) el código FM incorpora una transición al principio de la celda, lo que provoca que las celdas que contienen un uno tengan dos transiciones o lo que es lo mismo la separación entre transiciones sea la mitad. El código MFM elimina esta transición al principio de la celda. Si se quedase así, tendríamos la misma situación que en NRZI donde no es posible saber cuantos ceros seguidos aparecen en una determinada secuencia. Para corregir esto, añade una transición al principio de las celdas de cero pero sólo si la celda anterior no incluyó transición en el centro. Es decir una celda de cero incluirá una transición

al principio sólo si va detrás de otra celda de cero. Por el contrario, las celdas de cero que van detrás de un uno no incluyen transición al principio, ya que si lo hicieran nuevamente tendríamos dos transiciones separadas por tan solo media celda. Como puede verse en la figura (2.14), la separación mínima entre transiciones vuelve a ser nuevamente de una celda completa al igual que en el caso de los códigos NRZ. Sin embargo y contrariamente a lo que sucedía con estos, nunca aparecerán largas secuencias de celdas sin transiciones. De esta forma, mediante una decodificación un poco más elaborada que la necesaria para FM se puede conseguir distinguir celdas individuales.

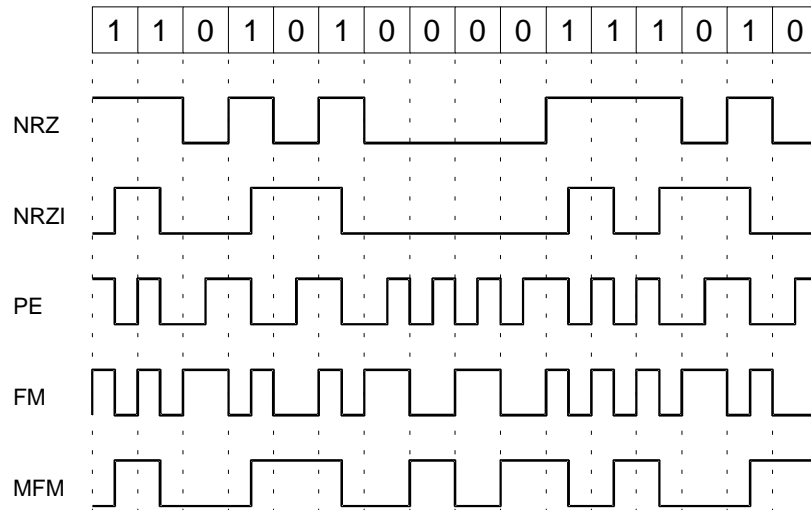


Fig. 2.14 Ejemplo de codificación de la información según distintos códigos

Podemos conseguir mayores densidades lineales con las mismas cabezas y medio si hacemos que el mínimo intervalo entre flujos inversos sea mayor que el ancho de una celda de bit. Haciendo esto permitimos que el máximo intervalo se vuelva mayor que el ancho de dos celdas. El tipo de codificación que usamos es llamado código limitado en longitud de recorrido o RLL (Run Length Limited coding). El nombre insinúa que nosotros diseñamos el código específicamente y emplazamos los límites inferiores y superiores de la longitud de cada carrera o secuencia de celdas de almacenamiento, las cuales no contienen transiciones de flujo. Como consecuencia la relación de los bits y celdas de almacenamiento se vuelve más compleja.

Para hacer uso de los códigos RLL hemos adoptado la técnica llamada grabación de código de grupo o GCR (Group Code Recording). Esto significa que en lugar de que cada uno de los bits de información corresponda a una celda de bit determinada, tomaremos un grupo de bits de datos juntos y los representaremos por un número de celdas de almacenamiento adyacentes. Es decir a cada grupo de la secuencia de datos de entrada, le asignamos un grupo de patrones de magnetización. Estos nuevos grupos asignados, tendrán algunas propiedades deseables que no tenían los grupos de datos originales. Una propiedad interesante es que las transiciones estarán separadas en un cierto número de celdas acotado tanto por arriba como por abajo. En los datos de partida no podemos imponer esto, puesto que los datos pueden contener cualquier secuencia arbitraria. Otra propiedad importante y complementaria de la anterior es que los nuevos grupos garanticen la presencia de alguna transición antes de un determinado espacio. Nuevamente es una circunstancia que tampoco podemos imponer a los datos de partida. Por este motivo grupos de datos son intercambiados por otros grupos con unas propiedades deseables. Mediante la primera de estas propiedades garantizamos que nunca aparecerán transiciones muy juntas con lo que podremos hacer las celdas de bit más pequeñas. Mediante la segunda, garantizamos que el circuito de lectura no perderá el sincronismo, ya que al limitar el número de celdas sin transición, se garantiza que aparecerá una transición en un determinado intervalo de tiempo.

Para que los grupos asignados, tengan esas propiedades, es necesario descartar aquellas combinaciones de bits que no las tengan. Como estamos descartando algunas combinaciones, los grupos asignados deberán tener una longitud mayor que los grupos de datos de partida.

El código de este tipo de más amplia difusión es el conocido como RLL-2,7 que garantiza que habrá un mínimo de 2 y un máximo de 7 celdas sin transición. En otras palabras, el mínimo espaciado entre inversiones es tres veces la longitud de la celda de almacenamiento y el máximo ocho veces. Este tipo de códigos son los que se emplean de forma prácticamente universal en los discos duros actuales aunque con distintos valores en sus parámetros.

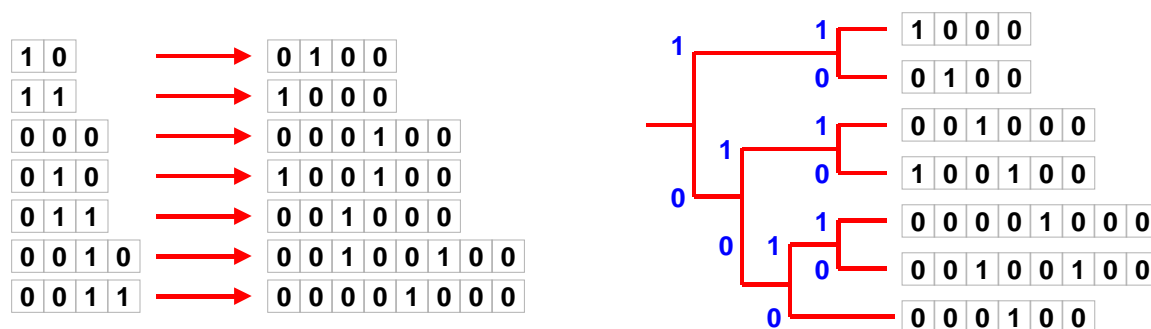


Fig. 2.15 Libro de códigos correspondiente al código RLL-2,7 junto con el árbol de codificación asociado, que ayuda en el diseño de un circuito codificador

El número de celdas de almacenamiento por grupo de datos es constante en algunas formas de código RLL y variable en otras como por ejemplo en el RLL-2,7 que como se ve en la figura (2.15) toma grupos de 2, 3 o 4 bits y les asigna grupos de 4, 6 y 8 celdas de código. Pero en cualquier caso el número de bits que representa será en promedio mayor. El libro de códigos no es único y puede elegirse de múltiples formas y en base a múltiples criterios. El presentado en la figura (2.15) es el propuesto por IBM para sus primeros discos 'Winchester' y está optimizado para reducir la propagación de un posible error de de/codificación. Sin embargo, la densidad que podemos conseguir en un disco particular está limitada por el espaciado entre flujos inversos, y en el código RLL este es varias veces el tamaño de la celda almacenada. Por ello, en realidad nosotros podemos almacenar más bits en la misma longitud de pista. En este código los bits de datos son grabados en cuatro celdas de almacenamiento. El código es más complejo puesto que tenemos que ver más de dos bits de datos a la vez, como tuvimos que ver dos bits juntos en MFM. El código MFM podemos considerarlo en realidad como un código RLL-1,3. Con la codificación RLL-2,7 podemos almacenar 1,5 bits de datos entre cada par de inversiones de flujo magnético. La ventaja se ve clara si tenemos en cuenta que para los códigos MFM teníamos un bit por transición y tan sólo medio bit para el PE o FM. El RLL-2,7 permite por tanto almacenar un 50% más de datos en el mismo espacio que el MFM. La densidad lineal de bit en los discos disponibles actualmente oscila entre 10000 y 40000 o más bits por pulgada y aún se incrementará más probablemente.

A la hora de escoger un determinado código de tipo GCR, hay numerosos factores a considerar. Por ejemplo la relación entre la frecuencia mínima y la máxima, que imponen restricciones al circuito codificador y decodificador respecto a su ancho de banda. También hay que tener en cuenta si los patrones magnéticos escogidos pueden introducir violaciones de código. Esto se produce cuando las condiciones de mínimo o máximo espaciado entre transiciones deja de cumplirse al poner un patrón a continuación de otro. Puede observarse en la figura (2.15) que cualquier concatenación de patrones sigue garantizando las propiedades del código. Esto no siempre es así, y por ejemplo, la codificación empleada en los discos ópticos (CD) no cumple esta propiedad y por lo tanto deben introducirse bits conectores.

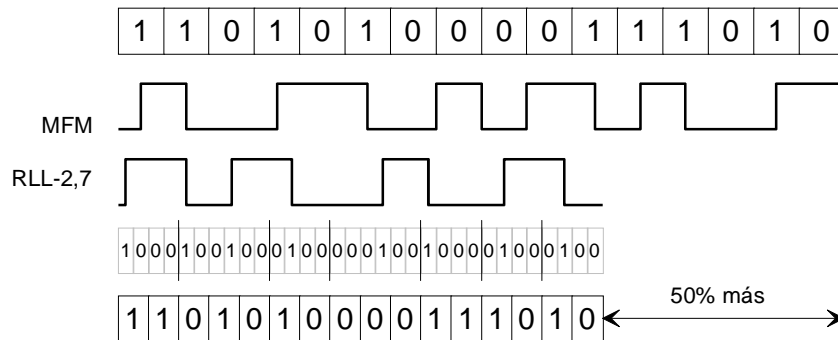


Fig. 2.16 Comparativa entre MFM y RLL-2,7

La figura (2.16) muestra claramente las ventajas de la codificación RLL-2,7. La misma secuencia de bits de datos ha sido almacenada en un espacio más reducido obteniéndose un aumento de capacidad de un 50% respecto a la codificación MFM. Esto se ha conseguido imponiendo una separación mínima entre las transiciones, lo que nos ha permitido juntarlas más. Como puede comprobarse en la figura, la distancia mínima entre transiciones es la misma que en el caso MFM. Aunque en la figura (2.16) no se aprecia, se puede comprobar, viendo los códigos asignados que aparecen en la figura (2.15), que se garantiza la existencia de al menos una transición en cada grupo, puesto que todos los grupos asignados incluyen al menos una. También se puede comprobar que la separación mínima entre dos transiciones es de dos celdas y la separación máxima de celdas sin transición es de siete. El precio que hay que pagar por este incremento de capacidad es la complejidad. La codificación y decodificación es considerablemente más compleja. Por otra parte este código no puede considerarse como un código con autorreloj y por lo tanto no puede emplearse un circuito separador de datos para obtener la secuencia de datos y la señal de reloj. Para obtener la señal de reloj se precisa de un circuito especial que sea capaz de generar la señal de reloj en sincronía con las transiciones y mantener la frecuencia sin derivas en los intervalos entre transiciones. Un circuito capaz de realizar estas acciones se conoce como PLL (Phase Latched Loop) bucle de enganche de fase o circuito de fase sincronizada, que permite mantener una oscilación en fase con otra. El funcionamiento de un circuito de este tipo puede encontrarse en cualquier texto de electrónica.

## 2.13 SERVOPISTAS

Como ya se comentó antes, muchos discos usan servo control para situar la cabeza y asegurar que la cabeza está posicionada en la pista requerida. Esto se vuelve más necesario cuando el espaciado entre las pistas decrece, y no es tan fácil reducir la tolerancia de los mecanismos en la misma proporción. Los servomecanismos necesitan una señal de entrada para determinar cuanto debe desplazarse el brazo para situar la cabeza sobre la pista de datos. Hay dos métodos por los que usualmente se proporciona al servo esta información. Uno de ellos consiste en reservar una superficie del disco para esta información y esto se hace incluyendo una servopista separada en cada cilindro. A este método se le llama método de la superficie servo-dedicada. Con esta disposición se consigue que el canal de lectura y la cabeza del servo estén completamente separados de la cabeza de datos y canal de lectura/escritura, obteniéndose un diseño más simple del mismo, pues no precisa de un separador de datos. Sin embargo, significa que una superficie que podría ser utilizada completamente para datos no lo sea, lo cual es un inconveniente, en especial en los dispositivos que utilizan un número reducido de platos. En un disco de un solo plato se pierde un 50% de la superficie total que podría dedicarse a datos ya que la superficie servodedicada corresponde a una de las dos caras del disco. En discos con múltiples platos, sin embargo, este inconveniente no es tan fuerte puesto que existen muchas más caras (dos por cada plato) pero sólo una cara de un solo plato se reserva como superficie servodedicada por lo que el porcentaje de superficie que puede utilizarse para datos es considerablemente mayor que en el caso

de un disco simple y será mayor cuanto mayor sea el número de platos. Este método supone también que todas las cabezas del cilindro permanecen muy cerca de la misma posición relativa de uno a otro, y esta presunción puede tener poco éxito en los dispositivos con muchos platos y espaciado de pista reducido (principalmente controladores de disco con medios intercambiables). La alternativa es incluir la información de servo en cada una de las pistas de datos y leerlo con la misma cabeza que se lea o escriba en la pista. A estas técnicas se les llama servotécnicas embebidas ('embed servo techniques').

Existen varias maneras de proporcionar la información necesaria al servo. La más simple, a menudo llamada servocuña, consiste en que la información aparece sólo en un punto de la pista (en el área de índice, entre el final del último bloque en la pista y el comienzo del primero). El servo sistema usa esto para determinar la posición correcta, y entonces retiene esta información para el resto de la revolución. Esto es bastante bueno para modelar el espaciado de pistas, pero incrementa los tiempos de acceso porque la cabeza debe esperar a que el servo vuelva a encontrarse en la pista, y entonces esperar de nuevo al sector requerido con lo que el tiempo de latencia se duplica. Esto se puede reducir si al comienzo de todos los sectores se introduce una servocuña, pero en este caso se reduce la capacidad nominal del dispositivo en beneficio de una mayor velocidad.

## 2.14 FORMATO DE LA PISTA

Hemos descrito el menor nivel de definición del formato, el cual determina cómo cada uno de los bits de información está representado con un patrón de inversiones de flujo magnético a lo largo de la pista. A este nivel no hay distinción entre bits que representan datos del usuario y aquellos que son agregados por la unidad de disco y su controlador (encabezamientos de sectores y caracteres de sincronismo por ejemplo). Podemos considerar ahora el siguiente nivel de formateo, donde la pista es dividida en un número de sectores o bloques separados.

Hemos visto que los discos y tambores son dispositivos de transferencia por bloques; transferencia desde y hacia la unidad básica de un bloque de datos a la vez, a diferencia de las impresoras, por ejemplo, que manejan la información carácter a carácter. En la mayoría de los discos y tambores el tamaño del bloque es constante y se determina cuando se diseña la unidad de disco. Pocos fabricantes, usan formatos con bloques de longitud variable, y cada bloque incluye una zona de pista para definir su longitud. Nosotros supondremos que la longitud del bloque es fija en la descripción que viene a continuación.

Varios bloques son escritos, uno detrás de otro, en cada una de las pistas del disco; por lo tanto, cada uno ocupa un sector de la pista. En el contexto del disco, se usará el término sector en lugar de bloque. Por razones que explicaremos luego, el número de sectores por pista es habitualmente un número primo; en discos duros de moderada capacidad es a menudo 17. La capacidad del sector puede variar, pero en pequeños discos duros es de 512 bytes. La velocidad de rotación habitual para tales discos es 3600 r.p.m., lo cual da un promedio de datos de 520 Kbytes o 4.16 Megabits por segundo. Como cada pista lleva alguna información adicional junto a los datos de usuario, este valor se incrementa hasta unos 5 Megabits por segundo. Algunas de las interfaces más usadas en estos discos especifican el rango de bits, y de ahí (a menos que la velocidad de rotación cambie) el número de bits por pista. Por lo tanto, la capacidad del dispositivo puede variar sólo cambiando el número de pistas por superficie del disco y el número de superficies usadas.

La posición de cada sector está definida por el encabezamiento, que es escrito antes de que el disco sea usado por primera vez. El proceso se denomina formateado de bajo nivel, que puede ser reescrito después si es necesario (en el caso de dispositivos que utilicen servo técnicas embebidas; esto requerirá un equipamiento especial, aunque también puede realizarse con un programa de utilidad). Pero este formateo físico o de bajo nivel no es normalmente alterado y cada

uno de los sectores permanece en la misma posición a través de toda la vida del disco. Este formateo a bajo nivel se reescribe a veces porque los niveles de señal tienden a fallar ligeramente a lo largo del tiempo y esto puede reducir la fiabilidad. Sin embargo, la posición del sector no se altera cuando se realiza un formateo a alto nivel y que discutiremos más adelante.

Algunos discos modernos utilizan geometrías complejas en las que el número de sectores por pista no es único. Piénsese por ejemplo en los discos que emplean 'banding'. En estos casos debe evitarse el formateo a bajo nivel o debe hacerse con precaución, ya que unos parámetros incorrectos podrían destruir la estructura o geometría original, a menos que se disponga de un programa de utilidad que contemple las características específicas del modelo de disco. Sin embargo, la velocidad con la que los fabricantes modifican los diseños y la baja disponibilidad a proporcionar esta información hacen imposible realizar un formateo adecuado.

Cada una de las pistas comienza con una marca de orden. Hay solo una marca de orden por cada pista y las marcas para todas las pistas están en la misma línea radial. Estas marcas pueden ser escritas en cada pista o donde hay dedicada una servo superficie. Los discos flexibles tienen insertadas las marcas de orden físicamente. Hay alguna marca física de alguna clase, normalmente un agujero en el disco.

El primer sector comienza poco después de la marca de orden y los restantes sectores están espaciados igualmente a lo largo de la pista. Cada sector está dividido en cabeceras y bloques de datos. Las cabeceras son escritas como parte del formato de bajo nivel, y de ahí en adelante tratados como permanentes y los bloques de datos, los cuales son escritos durante el uso normal del disco pueden ser reescritos cuando se desee. Cabecera y datos están precedidos por unos pocos caracteres de sincronismo y seguidos por dos o más bytes de chequeo. Los bytes de chequeo son usados en el manejo de errores (que describiremos brevemente).

Entre cabeceras y datos, entre sectores y entre marcas de orden y sectores adyacentes están los 'gaps', cuya longitud puede variar dentro de ciertos límites. Estos gaps separan secciones escritas en la pista en diferentes operaciones. Ellos son necesarios porque la velocidad del disco puede no ser la misma en cada ocasión, y por lo tanto, la longitud de cada sección puede variar ligeramente. Su longitud puede no ser un múltiplo exacto del espaciamiento de caracteres, ya que son necesarios los caracteres de sincronismo. Cada gap es equivalente a unos pocos caracteres, excepto el gap 4, que es considerablemente mayor porque rellena el valor completo del sector.

El contenido de la cabecera del sector varía ligeramente de un diseño a otro, pero siempre incluirá el número de cabeza y número de cilindro (y por tanto de pista), y también el número de sector dentro de la pista; estos también estarán espaciados por un bit de estado para identificar los sectores defectuosos, si es necesario. En aquellos formatos donde la longitud del sector es variable, la cabecera contendrá un espacio para el número de bytes de datos en el bloque. Cuando el disco es formateado (sólo a bajo nivel, excepto los discos flexibles) frecuentemente, el área de datos es llenada con caracteres falsos o blancos.

Cuando el formateo a bajo nivel ha sido realizado (Fig. 2.17), el disco es leído para chequear que todas las cabeceras y caracteres de datos puedan ser leídos correctamente. Las condiciones de lectura son más estrictas que en su uso normal. Por lo tanto, cualquier sector que se encuentra satisfactorio en este momento, es improbable que dé problemas en el uso posterior. Si el sector es encontrado no satisfactorio, su cabecera es reescrita con un bit de estado apropiado. El controlador del disco reconocerá entonces que el sector está inutilizado cuando él lea la cabecera y lo sustituirá en otro sector reservado para este propósito. Los fabricantes de discos usualmente suministran una lista con sectores en mal estado en la unidad de disco, y puede ser introducida en la controladora; los programas que realizan un formateo a bajo nivel, o simplemente un test del disco, producirán una lista actualizada de sectores defectuosos. Interfaces inteligentes, tales como el SCSI, pueden ocultar la existencia de sectores en mal estado al usuario.

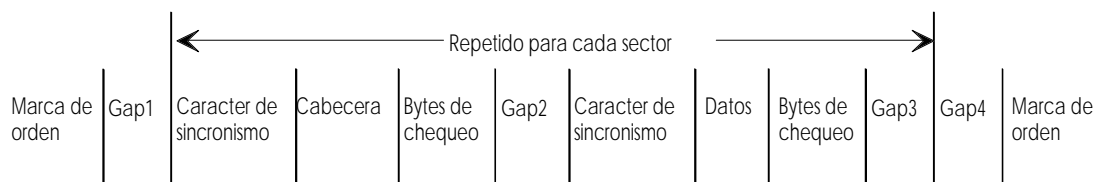


Fig. 2.17 Formateo a bajo nivel de una pista

## 2.15 ENTRELAZADO

Algunas controladoras de disco, o sus procesadores principales, son incapaces de leer o escribir dos sectores en una rápida sucesión. Si el procesador principal quiere leer dos sectores sucesivos, el segundo será enfrentado a la cabeza antes de que la controladora esté preparada para ello, y por lo tanto no puede ser leído hasta que el sector se enfrente a la cabeza en la siguiente revolución. Esto reduce drásticamente la velocidad de transferencia del disco. Por ejemplo, si hay 17 sectores por pista, la velocidad de transferencia de datos será reducido por un factor de 18.

La solución a este problema se resuelve en el formateo a bajo nivel, donde los sectores son entrelazados. En lugar de que los sectores estén numerados consecutivamente desde la 'marca de orden', el sector 2 es el tercer sector a lo largo de la pista, el sector 3 es el quinto y así sucesivamente (ver figura 2.18). Esto da un factor de entrelazado de 2, y la velocidad de transferencia de datos es ahora reducida por un factor de dos respecto del valor nominal. Nosotros podríamos usar un mayor factor de entrelazado para dar más tiempo a que el controlador se prepare. Por ejemplo si el entrelazado es 3, los sectores serán renumerados: 1-7-13-2-8-14-3-9-15-4-10-16-5-11-17-6-12. Esto permite que la CPU almacene los datos para el sector 1 mientras que los sectores 7 y 13 están enfrentados con la cabeza y continuar con el 2 cuando ya está preparado. En una revolución se habrán leído y almacenado aproximadamente 6 sectores por la CPU; y en tres revoluciones se habrán leído y almacenado todos los sectores. Si el número de sectores por pista es un número primo, podemos usar un factor de entrelazado más pequeño que el número de sectores sin llegar al mismo sector físico antes de que hayamos localizado todos los sectores.

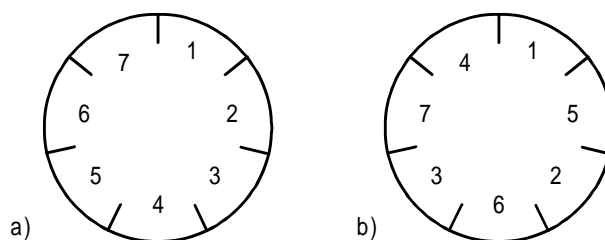


Fig. 2.18 Entrelazado de sectores

Para todas las configuraciones, hay un factor óptimo de entrelazado. Los valores más pequeños reducirán drásticamente la velocidad de transferencia, mientras que los valores mayores provocarán transferencias más lentas ya que contribuyen a aumentar el tiempo de latencia efectivo. De este modo, el factor óptimo puede depender de la configuración del procesador principal, tanto como de la controladora del disco; un entrelazado inadecuado del disco duro al reformatearlo puede producir unas prestaciones inferiores a las óptimas. Algunos discos incluyen una memoria FIFO capaz de almacenar varios sectores, normalmente una o dos pistas completas, de tal forma que puede trabajar sin entrelazado (entrelazado de 1) aunque estén conectados a interfaces lentas.

## 2.16 TRATAMIENTO DE ERRORES

La integridad de los datos almacenados es de gran importancia para el usuario. Un simple dígito erróneo podría tener resultados catastróficos en ordenadores usados en defensa o en empresas financieras. Sin embargo en los sistemas que manejan datos muy redundantemente como textos y especialmente sonido o imágenes codificadas como mapas de bits, el resultado de un dígito erróneo sería menos crítico e incluso podría pasar desapercibido. Desafortunadamente, ni los medios de almacenamiento ni los dispositivos son perfectos. Las unidades de disco y sus controladoras pueden ser diseñados para detectar y reconvertir la mayoría de los errores de datos, pero en la mayoría de los casos, esto incrementa excesivamente el coste. El diseñador del sistema debe llegar a un compromiso entre la integridad de los datos y el coste del sistema. Para la mayoría de los sistemas, la cantidad gastada en el dispositivo de almacenamiento no conseguirá la integridad requerida, por lo que el software debe proporcionar el mayor nivel de detección de errores. Existen varios métodos para hacer esto -el uso de 'checksums' es uno de los más conocidos, pero el más habitual es el código de redundancia cíclica o CRC que se describirá más adelante.

Lo más importante y esencial en el manejo de errores es conocer la magnitud del problema. La desviación de la unidad de disco (u otro dispositivo de almacenamiento) de la perfección es medida en términos de la magnitud del error, que es la razón entre el número de bits leídos o escritos por el dispositivo y el número de errores ocurridos a lo largo de estos bits. La magnitud es normalmente expresada como 1 en  $10^n$  significando eso que no más de un error ocurrirá para  $10^n$  bits procesados. En este contexto, 'un error' no significa necesariamente un error en un bit sino que se toma usualmente para cubrir un grupo de bits adyacentes afectados, por ejemplo, un simple error en el medio o más generalmente, algún grupo de errores que puede ser reconvertido con una operación simple -tal como la relectura de un sector del disco-. La definición exacta del error rara vez se da en las especificaciones; por lo que las tasas de errores son una anotación poco precisa.

Existen varias formas de evaluar los errores, pero de cara al usuario, los más importantes son dos: 'undetected error rate' que mide errores no detectados por la unidad de disco o su controladora (estos errores pueden ser detectados por supuesto en cualquier otro sitio del sistema), y los 'irrecoverable o permanent o uncorrected error rate' (usualmente llamados 'hard error rate'), que mide errores que el dispositivo detecta pero no puede corregir. Otros tipos de errores que el usuario puede conocer son los 'recoverable or transient or corrected error rate' (o 'soft error rate'), refiriéndose a los errores que el propio dispositivo puede corregir, con o sin ayuda del sistema operativo, y el 'seek error rate'. El último se expresa como 1 en  $10^n$  búsquedas; se refiere a las ocasiones en las que el dispositivo busca una pista (por ejemplo, mueve la cabeza a la posición de lectura de la pista), y durante la lectura de las cabeceras encuentra que está en una pista equivocada. Los 'soft errors' y los 'seek errors' no conciernen realmente al usuario, puesto que se corrigen automáticamente, aunque si hay muchos errores, repercutirán en las prestaciones del sistema. Sofisticados sistemas almacenan el número de estos errores como una medida del buen funcionamiento del dispositivo.

El 'hard error rate' se da normalmente en las especificaciones del dispositivo, y para discos magnéticos (discos duros y discos flexibles) es usualmente de 1 en  $10^{12}$ , aunque algunos fabricantes den un valor de 1 en  $10^{13}$  para sus discos duros. Para discos rápidos que transfieren datos a razón de un megabyte por segundo, 1 en  $10^{13}$  representa un error cada 350 horas de transferencia de datos. El 'undetected error rate' se especifica muy raramente, particularmente por su dificultad a ser medido o predicho, pero se asume usualmente como 100 veces mejor que el valor de 'hard error'. El 'soft error rate' es usualmente fijado a 1 en  $10^9$  para los discos flexibles y 1 en  $10^{10}$  (y ocasionalmente 1 en  $10^{11}$ ) para los discos duros. Los 'seek errors' usualmente rondan el 1 en  $10^6$  búsquedas, y ocasionalmente el 1 en  $10^7$  búsquedas.

Hemos estado considerando implícitamente los errores de lectura, suponiendo que los datos se escribieron correctamente en el disco en el primer sitio y que no ocurre ningún fallo almacenando o escribiendo. Se producen también fallos de escritura, donde el dispositivo falla almacenando los datos incorrectamente. Sin embargo, todas las unidades de disco tienen previsto un chequeo por si se producen errores durante la escritura, verificando el bloque o pista en la próxima revolución del disco. Por lo tanto, los errores de escritura no perjudican la integridad del dato, aunque pueden disminuir las prestaciones. Un gran número de errores de escritura significa normalmente que el medio está llegando al final de su vida útil. El rango de errores de escritura se especifica algunas veces, pero no muy a menudo.

La evaluación de errores se realiza en dos etapas. Primeramente el error debe ser detectado, y sólo entonces puede ser posible arreglarlo. Este proceso se entiende mejor si consideramos por separado estas dos etapas.

La detección del error depende de la existencia de algún grado de redundancia en el dato según se graba en el disco; en otras palabras, almacenamos un mayor número de bits respecto al mínimo necesario para almacenar un dato. Hay muchas formas de hacer esto. La más simple y quizá la más vieja de éstas es la paridad impar. Esto conlleva añadir un bit extra a cada una de las unidades de datos (usualmente a cada byte). El bit es escogido de tal forma que el número de veces que aparece '1' sea siempre impar. Cuando leemos el dato, chequeamos cada byte y si hay un número par de '1' sabremos que ha ocurrido un error. No podemos saber qué bits dan error, ni tampoco podemos estar seguros de que la paridad nos detecte todos los errores en el byte, por lo que la paridad impar proporciona sólo una detección simple de errores (SEC). La paridad es muy útil donde el byte es grabado como una unidad discreta o estructura con cada uno de los bits en pistas separadas, como es el caso de las cintas magnéticas; siendo menos útil en los discos, donde cada dato se graba como un conjunto de bits en serie en cada pista. En algunos de los primeros tambores, que grababan los datos en conjuntos de bits en paralelo, también se utilizó la paridad.

Como hemos visto, los datos son grabados en el disco en bloques de un Kbyte más o menos, con cada byte separado serialmente a lo largo de la pista. El bloque es por tanto grabado como una cadena simple de bits. Aunque podríamos chequear la paridad de la cadena como un todo, podría ser de escaso valor, porque el espaciado entre bits es pequeño, y por lo tanto la probabilidad de que el fallo afecte a más de un bit es alto. Entonces podríamos aplicar una paridad de bits adicional basada en subsecuencias de bits de datos. Por ejemplo, la segunda paridad podría ser calculada usando solo los bits primero, tercero, quinto, y así a lo largo de la cadena de datos. Podemos continuar este proceso con los bits de datos seleccionados por otros caminos, de este modo los bits de paridad extra disminuyen el número de errores en el bloque que estamos chequeando. Sin embargo, esto es un proceso caro, debido al número de cálculos separados que estamos obligados a hacer. Podemos conseguir un efecto similar haciendo un cálculo más simple, y éste es el método de detección de errores que más ampliamente se utiliza en las controladoras de disco.

Este método se conoce como chequeo de redundancia cíclica o CRC (Cyclic Redundancy Check). Ahora, al número de bits de paridad, agregamos un número binario llamado CRC al final de cada bloque de datos; un CRC de 2 bytes es suficiente para todas las longitudes de bloque normales. El CRC se calcula en principio como una función de la cadena de datos del bloque, visto como un número binario simple y también a partir de una potente serie conocida como 'polinomio generador'. Pueden utilizarse muchos polinomios; uno de los más populares es escrito como  $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ ; la función es tal que si aplicamos la misma función a la cadena de bits (incluyendo el CRC) leída del disco, el resultado debería ser cero. Si no lo es, entenderemos que existe un error en el bloque; y si es cero, no podemos estar absolutamente seguros de que no haya errores, puesto que existe aún la posibilidad de que el conjunto de errores ocurridos en total, tenga

efectos tales que unos cancelen a otros. Sin embargo, puede calcularse la probabilidad de que tal conjunto de errores ocurra, y es muy baja si el polinomio generador es adecuado.

La operación a realizar es en principio una división y podría ser implementada de esa forma, pero de hecho, esto puede conseguirse mucho más fácilmente con un hardware dedicado en forma de registro de desplazamiento. El registro sólo necesita tantas etapas como bits CRC, usualmente 16. Cuando escribimos, la cadena de bits que forma el bloque se introduce dentro del registro al mismo tiempo que se escribe en el disco. Cuando toda la cadena ha sido introducida, el contenido del registro es utilizado como CRC. Durante la lectura, se usa el mismo hardware; el dato y el CRC agregado se pasan a través del registro y su contenido final debe ser comparado con cero.

En el caso de los errores de escritura de hecho, sólo podemos saber si los datos se han escrito correctamente leyéndolos, y por supuesto, el error puede ocurrir cuando hacemos la lectura de chequeo de los datos (en la lectura de chequeo no comparamos los datos leídos con los datos originales; usamos simplemente el CRC para comprobar si existen o no errores en los datos leídos del disco). Por lo tanto, la detección de errores de escritura usa exactamente el mismo proceso en la detección de errores. Sólo podemos distinguir entre los dos primeros suponiendo que el error se produce en la lectura; si falla en respuesta a las técnicas de recuperación que usamos para los errores de lectura, entonces comenzamos a tratar el error como de escritura.

Hemos visto cómo detectar errores; ahora vamos a considerar cómo podemos tratarlos en el proceso conocido como recuperación del error. Hay básicamente dos métodos. El primero consiste simplemente en tratar de leer o escribir el bloque completo y lo llamamos reintento ('retry'). El otro método usa un código redundante de datos para identificar en qué bit particular ocurre el fallo y entonces corregirlo: esto es la corrección del error. Todas las controladoras de disco magnético utilizan el primer método, y muchas también usan el segundo variando el nivel de corrección. Aunque la corrección de errores esté disponible, es más rápida y eficaz la relectura y por lo tanto, se intenta primero. Las unidades de discos con interfaces inteligentes, realizarán la relectura de forma automática y el procesador central no será consciente de que ocurre el error, excepto en una cierta oscilación en el flujo de datos. Otras unidades de disco, necesitarán de la ayuda del sistema operativo. Si el dispositivo detecta un error en el bloque que ha leído, no lo pasa al procesador principal, pero sí señala el error, y el procesador principal da el comando necesario para que se realice una nueva lectura del bloque. Esto se repite si es necesario una serie de veces, a menudo hasta 10 intentos. En el caso de que el bloque aún no se haya leído correctamente el procesador central activa un 'hard-error'.

La corrección de errores, en contraste con 'retry', no involucra al sistema operativo y depende de si existe bastante redundancia en el código de datos, para permitir al dispositivo encontrar qué bit particular es el erróneo, y entonces, corregirlo. Cualquier esquema de corrección de errores particular puede corregir sólo cierto número de bits; si hay más errores en este bloque, la unidad tiene que recurrir a 'retry'. En definitiva, el número de bits que se pueden detectar es proporcional al grado de redundancia en la cadena de datos, aunque algunos métodos de codificación son mejores que otros a este respecto.

El CRC discutido antes proporciona un cierto grado en la corrección de errores si el contenido del registro de desplazamiento no es cero después de la lectura del bloque y su CRC. En ese caso se demuestra la existencia de un error; y el contenido es, de hecho, un indicativo de la dirección del bit erróneo, con tal de que sea uno sólo. Sin embargo, sólo podemos aprovechar esta información si podemos demostrar que sólo ha habido un error. Para ello realizamos un segundo CRC (de hecho, uno de ellos se describe como Error Correcting Code o ECC), calculado de otra manera. El ECC se usa para corregir el bloque en el que se supone que sólo ha ocurrido un error; el CRC chequea si el bloque corregido es realmente correcto.



- 3.- Si el bit que salió del resto era TRUE, se sustrae el polinomio divisor completo (XOR) del resto.
- 4.- El byte de datos se desplaza a la izquierda un lugar. El bit que se expulsa no se utiliza.
- 5.- Se repiten los pasos 1-4 hasta haber aplicado todos los bits al registro resto.
- 6.- El registro contiene ahora el resto de la división polinómica.

### 2.17.2 Aritmética en módulo 2

En primer lugar, hemos de establecer que el punto de arranque para diseñar cualquier sistema CRC es el número de bits deseado en el valor de comprobación (normalmente 16).

Vamos a ver en un ejemplo el funcionamiento del CRC. Para ello, supongamos un mensaje de cuatro bytes (CFYU):

C=11000011    F=01100110    Y=11111001    U=01010101

Supongamos también que queremos transmitir un valor de comprobación de 16 bits. Consideremos el mensaje como un sólo número:

11000011011001101111100101010101 = 3.278.305.621

El número de comprobación se obtiene dividiendo este número por otro que en este ejemplo es 525:

$3.278.305.621 / 525 = 624.439$  y cuyo resto vale: 346

El problema que surge ahora es el siguiente: este cociente de 23 bits es un valor de comprobación perfectamente aceptable, pero tendremos que truncarlo a 16 bits para poder enviarlo, por lo que su precisión queda en entredicho. Ya que no podemos asegurar la longitud del cociente, podemos probar con el resto ya que con este si podemos asegurar cual será su longitud máxima: si el divisor es de 17 bits, el resto no tendrá más de 16 bits:

$3.278.305.621 / 65.540 = 50019$  con resto = 60361

que puede expresarse en 16 bits:    60361=EBC9=1110 1011 1100 1001

### 2.17.3 División larga en módulo 2

El resto del valor de comprobación no se obtiene en aritmética binaria usual, sino en módulo 2, lo cual simplifica considerablemente el hardware, ya que esta aritmética carece de acarreo y se realiza de igual manera que la operación OR-Exclusiva. Así tenemos que la suma es igual a la resta.

La única diferencia mecánica entre la división módulo 2 y la división binaria ordinaria es que los resultados intermedios se obtienen mediante operaciones OR-Exclusivo en lugar de sustracciones. Se trata de forzar una división binaria en la que el bit situado a la izquierda en el resto anterior se hace 0. A continuación se puede observar cómo los bits de mensaje van añadiéndose uno a uno por la derecha, obteniéndose resultados intermedios. Si el bit de mayor orden del resto intermedio es 1, se envía 1 al cociente y se resta el divisor (XOR) del resto. Por el contrario, si el primer bit es 0, se envía el 0 y se le resta 0 (de 16 bits).

11000011011001101111100101010101	10001000000100001
<u>10001000000100001</u>	1100111110000111
x10010110111011001	cociente
<u>1000100000010000</u>	
x00111101111110001	
<u>0000000000000000</u>	
x0111011111100011	La x no indica
<u>0000000000000000</u>	multiplicación sino
x11110111111000111	cada uno de los
<u>10001000000100001</u>	ceros que se
x11111111111001100	cancelan en cada
<u>10001000000100001</u>	etapa. (Salen del
x11101111111011010	registro de
<u>10001000000100001</u>	desplazamiento)
x1100111111110111	
<u>10001000000100001</u>	
x10001111110101100	
<u>10001000000100001</u>	
x00001111100011011	
<u>0000000000000000</u>	
x00011111000110110	
<u>0000000000000000</u>	
x00111110001101101	
<u>0000000000000000</u>	
x01111100011011010	
<u>0000000000000000</u>	
x11111000110110101	
<u>10001000000100001</u>	
x11100001100101000	
<u>10001000000100001</u>	
x11010011000010011	
<u>10001000000100001</u>	
x1011011000110010	← Resto final

Fig. 2.20 Ejemplo de división módulo 2 empleando el mensaje de datos como dividendo y el polinomio CCITT como divisor

## 2.18 FORMATO DE ALTO NIVEL

El tercer y mayor nivel de formateo del disco (el formato lógico), está relacionado con la utilización de los sectores para elementos específicos de los datos. En este nivel, el formato está determinado por el sistema operativo (S.O.) del procesador principal, más que por el controlador y la unidad de disco. Lo habitual es reservar los primeros sectores de cada disco para usarlos por el sistema operativo. De estos sectores, uno o más se usarán como directorio, y también para las tablas y estructuras que permiten la ubicación de ficheros.

El usuario esperará que este sistema maneje los ficheros de datos, que pueden ser de cualquier longitud, mediante nombres identificadores (aunque cuando los escribimos en el disco, ocuparán sectores completos), y parte de la tarea del S.O. es decidir dónde guardar este archivo en el disco. El directorio es una lista que contiene el nombre y longitud de cada uno de los ficheros que se han escrito en el disco, y también la dirección de su primer bloque (número de cabeza, número de cilindro, y número de sector). Inicialmente el primer fichero comenzará inmediatamente después del área reservada, y usará cuantos sectores en secuencia necesite. El siguiente seguirá inmediatamente, y así sucesivamente; sin embargo, una vez que el disco se ha usado y numerosos ficheros han sido añadidos y borrados, el espacio libre en el disco no tendrá trozos tan grandes como para escribir los ficheros completos que siguen, por lo que éstos se fragmentarán. Por tanto será preciso una lista para mostrar qué sectores están libres, y esto lo proporciona la tabla de localización. Esta consiste en una tabla con una entrada correspondiente a cada sector del disco. Cuando el sector está libre, la correspondiente entrada en la tabla de ubicación de ficheros (FAT) se pone a cero. Cuando se escribe un fichero en disco, la entrada correspondiente al sector, usa un conjunto de otros valores que veremos a continuación.

El S.O. ahora ya puede encontrar el número de sectores o 'clusters' libres que sean necesarios, pero no puede obtenerlos todos consecutivos. Necesitamos un método de listado de todos los sectores usados para un fichero y el orden en que se encadenan. De nuevo, la solución es la FAT; cada vez que se escribe el sector, seleccionamos su entrada en la FAT para dar la dirección del sector donde vamos a escribir la siguiente parte del fichero. De este modo, todos los sectores que usamos están encadenados por la FAT, marcamos el último sector del fichero con una entrada especial, en lugar de la dirección del sector en la FAT. Los sectores empleados se mantienen como una lista enlazada.

Esta es una descripción simplificada de como un S.O. típico usa el formato lógico del disco. En la práctica existen varios procedimientos ya que las entradas de la FAT pueden referirse a 'clusters', o sea, a varios sectores en lugar de a un único sector; por otra parte el disco puede dividirse en varias particiones, lo que se muestra al usuario como discos separados, y finalmente, el directorio puede almacenar información adicional sobre cada fichero y puede haber una jerarquía de directorios y subdirectorios.

## 2.19 ORGANIZACIÓN DEL DISCO EN EL S.O. DOS

Formato de los discos (512 bytes por sector):

- 360 Kb (5 y 1/4 pulgadas): Baja densidad: 40 pistas y 9 sectores por pista
- 720 Kb (3 y 1/2 pulgadas): Baja densidad: 80 pistas y 9 sectores por pista
- 1.2 Mb (5 y 1/4 pulgadas): Alta densidad: 80 pistas y 15 sectores por pista
- 1.44 Mb (3 y 1/2 pulgadas): Alta densidad: 80 pistas y 18 sectores por pista
- Discos duros: normalmente 17 sectores por pista y número de pistas según capacidad

En los disquetes, el primer sector (pista 0, sector 1) contiene el nombre de registro de arranque que es un pequeño programa que permite al ordenador manejar unidades de disco, al menos lo suficiente como para leer otras partes del DOS. Seguidamente aparecen dos copias de la tabla de ubicación de ficheros, que es una especie de índice sobre la distribución de espacios dentro del disco (la segunda copia existe por razones de seguridad). A continuación, se incluye una copia del directorio raíz, que es una lista de los ficheros y referencias a subdirectorios, con indicación del lugar del disco donde comienzan. Por último, aparecen dos pequeños programas DOS, que se leen al comienzo, y que otorgan al ordenador la capacidad necesaria para buscar y cargar el COMMAND.COM, que es el intérprete de comandos del sistema operativo en disco (DOS).

Los discos fijos poseen un registro de arranque principal que contiene una tabla de partición, que permite dividir el disco entre varios sistemas operativos. La tabla de partición contiene información sobre la partición DOS al comienzo del disco, y el primer registro de dicha partición que contiene el registro de arranque DOS. Por lo demás, la partición se organiza igual que en los disquetes.

### 2.19.1 Estructura lógica del disco

Sea cual sea el disco que se utilice, los discos del DOS están todos formateados lógicamente de la misma forma: las caras, las pistas y los sectores están identificados utilizando la misma notación, y ciertos sectores están siempre reservados a programas e índices especiales que utilizan el DOS para gestionar las operaciones del disco. Las pistas están numeradas del 0 (la exterior) hasta n (la interior).

El BIOS ('Basic Input Output System') localiza los sectores en un disco mediante un sistema de coordenadas en tres dimensiones, compuesto por un número de pista, un número de cara

(número de cabeza) y un número de sector. La secuencia comienza con el primer sector del disco: sector 1 pista 0 cara 0.

Se puede apuntar a un sector determinado, bien por sus coordenadas en tres dimensiones, bien por su orden secuencial. Todas las operaciones de la ROM-BIOS utilizan las coordenadas en tres dimensiones para localizar un sector. Todas las operaciones del DOS y herramientas tales como el debug, utiliza la notación secuencial del DOS.

### **2.19.2 Organización de los discos**

Además de dividir el disco en sectores, el DOS realiza otras operaciones cuando formatea un disco. A continuación veremos la distribución del espacio del disquete:

El proceso de formateo divide los sectores de un disco en cuatro secciones para cuatro usos diferentes. Las secciones, en el orden en que están almacenadas, son: el registro de puesta en marcha, la tabla de localización de ficheros (FAT), el directorio y el espacio de datos. A continuación se hace una breve descripción de cada una de ellas.

#### **- El registro de puesta en marcha:**

Es siempre un sector único situado en el sector 1, pista 0, cara 0. El registro de puesta en marcha contiene, entre otras cosas, un cierto programa para comenzar el proceso de carga del sistema operativo. Todos los disquetes contienen el registro de puesta en marcha, aunque no tengan el sistema operativo. Aparte del programa de puesta en marcha o autoarranque, el contenido exacto del registro varía de un formato a otro.

#### **- Tabla de localización de ficheros (FAT):**

Está situada a continuación del registro de puesta en marcha, comenzando normalmente en el sector 2, pista 0, cara 0. La FAT contiene el registro oficial del formato del disco y los mapas de localización de los sectores utilizados por los ficheros. El DOS utiliza la FAT para guardar un registro de la utilización del espacio de datos. Cada entrada de la tabla contiene un código específico para indicar el espacio que está siendo utilizado, el que está disponible y el espacio que está defectuoso. Al utilizarse la FAT para controlar todo el área utilizable de almacenamiento de datos, se conservan dos copias idénticas de ella, en previsión de que alguna se dañe. Ambas copias de la FAT pueden ocupar tantos sectores como necesiten: 2 ó 4 en discos flexibles y más de 80 en discos duros. En todos los discos duros, el tamaño de la FAT varía con el tamaño de la partición.

#### **- El directorio de ficheros:**

Es el siguiente elemento del disco. Se utiliza como tabla de contenidos, identificando cada fichero del disco como un elemento de directorio que contiene cierta cantidad de información, como el nombre y tamaño de los ficheros. Una parte de la entrada es un número que apunta al primer grupo de sectores utilizados por el fichero (este número es también la primera entrada de este fichero en la FAT). El tamaño del directorio varía según el formato del disco.

#### **- El espacio de datos:**

Ocupa la mayor parte del disquete (desde el directorio al último sector), se utiliza para almacenar datos realmente, mientras que las otras tres secciones se utilizan para organizar el espacio de datos. Los sectores del espacio de datos están organizados en unidades conocidas como 'clusters'. El tamaño de un "cluster" varía según el formato. Pueden aparecer 'clusters' que contengan varios sectores.

### **2.19.3 El registro de arranque (BOOT)**

El programa de autoarranque consiste principalmente en un corto programa, en lenguaje máquina, que activa el proceso de carga de DOS en memoria. Para realizar esta tarea, el programa comprueba primero si el disco está formateado por el sistema (si contiene los ficheros IBMBIO.COM y IBMDOS.COM en las versiones de IBM ó MSBIO.COM y MSDOS.COM en la

versión de Microsoft) y entonces procede en secuencia. Normalmente, en la mayoría de los formatos de disco se encontrarán en el registro de arranque algunos parámetros claves que comienzan en el cuarto byte. Estos parámetros son parte del bloque de parámetros del BIOS utilizados por el DOS para controlar cualquier dispositivo tipo disco. El resto del programa de arranque empieza en los primeros tres bytes (0, 1 y 2) y continua en los bytes siguientes al bloque de parámetros de BIOS (Tabla 2.1).

Offset	Longitud	Descripción
3	8 bytes	ID del sistema (ej. IBM 3.1)
11	1 palabra	Nº de bytes por sector (ej. 512=0200 hex)
13	1 byte	Nº de sectores por 'cluster' (ej. 01 ó 02)
14	1 palabra	Nº de sectores reservados al principio: 1 para disquete
16	1 byte	Nº de copias de la FAT: 2 para disquete
17	1 palabra	Nº de elementos del directorio raíz (ej. 64 ó 112)
19	1 palabra	Nº total de sectores del disco (ej. 720 para el D-9)
21	1 byte	de formato (ej. FF, FE, FD o FC)
22	1 palabra	Nº de sectores por FAT (ej. 1 ó 2)
24	1 palabra	Nº de sectores por pista (ej. 8 ó 9)
26	1 palabra	Nº de caras (cabezas) (ej. 1 ó 2)
28	1 palabra	Nº de sectores especiales reservados

Tabla 2.1 Parámetros del registro de arranque

#### 2.19.4 Tabla de localización de ficheros

Hay que distinguir entre como está organizada la FAT, que es relativamente simple e inmediato, y como está almacenada en el disco, lo cual es más complejo. Cada copia de la FAT ocupa dos sectores en los formateos de 9 sectores por pista y siete sectores en los formateos de 15 (Tabla 2.2).

Hay dos formatos para la FAT: uno de 12 bits y otro de 16 bits. El formato de 12 bits es el más extendido y el más complicado. La FAT está organizada como una tabla de hasta 4096 números, con un elemento para cada 'cluster' en el espacio de datos. El número que contiene cada elemento indica el estado y uso del 'cluster' correspondiente. Si el elemento de la FAT es 0, se indica que el 'cluster' está libre y disponible para su uso. Si el elemento de la FAT contiene 4087 (FF7 hex) el 'cluster' está declarado como inutilizable por un error de formateo. Los valores de la FAT del 4081 al 4086 (FF1 al FF6 hex) se reservan también para señalar la imposibilidad de utilizar un determinado 'cluster', pero no se utilizan.

Elemento de la FAT	Valor		Significado
	Dec.	Hex.	
0	253	FD	El disco es doble cara, doble densidad
1	4094	EFE	Entrada no utilizada, disponible
2	3	003	El siguiente 'cluster' del fichero es el 'cluster' 3
3	5	005	El siguiente 'cluster' del fichero es el 'cluster' 5
4	4087	FF7	El 'cluster' es no utilizable: pista mala
5	6	006	El siguiente 'cluster' del fichero es el 'cluster' 6
6	4095	FFF	Último 'cluster' del fichero y final de esta cadena de atribución de espacio
7	0	0	Entrada no utilizada

Tabla 2.2 Cadena de atribución de espacio de un fichero en la tabla de atribución de ficheros

Los 'clusters' están numerados por orden desde el 2 hasta un número que sea superior en una unidad al número de 'clusters' del disco. Una entrada en la FAT de 12 bits que contenga cualquier número entre 2 y 4010 (02 y FF0 en hex) indica que el 'cluster' correspondiente está siendo utilizado por un fichero. Un valor de la FAT de 4095 (FFF hex) indica que el correspondiente 'cluster' contiene la última parte de los datos de un fichero. Unos valores entre 4008 y 4094 (FF1 al FFE) tendrán el mismo significado, pero no se utilizan. El elemento del directorio del fichero contiene el número del 'cluster' de comienzo y las entradas de la FAT designan los demás 'clusters' utilizados y el final del fichero. Cuando un fichero es borrado, todos los elementos de la FAT que determinan su cadena de localización de espacio son marcados como disponibles (puestos a cero); pero los datos del fichero en el espacio de datos no sufren modificación alguna, y la mayor parte de la información del elemento se conserva. Aunque el valor de la FAT sea simple, la grabación se hace de una forma más compleja. El rango de números de 'cluster' está definido de forma que los elementos de la FAT sean 4095 (FFF hex) o menos. Esto hace posible cada elemento de tres dígitos hexadecimales en 12 bits o un byte y medio. Los elementos de la FAT se agrupan por pares, ocupando cada par tres bytes. Los tres bytes se codifican de la siguiente forma: si un par de elementos de la FAT está formado por 123 y 456 hex, los tres bytes que los contienen serían en hexadecimal 23-61-45. En sentido inverso, si los tres bytes son AB-CD-EF, los dos valores de la FAT son DAB y EFC. Dado cualquier número de "cluster" se puede encontrar el valor de la FAT multiplicando el número de 'cluster' por tres, dividiendo por dos y utilizando el número completo del resultado como un desplazamiento de la FAT. Cogiendo una palabra de esa ubicación, se tendrán los tres dígitos hexadecimales de elemento de la FAT, más un dígito hexadecimal extraño que se puede ignorar. Si el número de 'cluster' es impar, se desecha el dígito de mayor orden, si es par el dígito de menor orden. El valor obtenido de esta manera es el número del siguiente 'cluster' del fichero, a menos que sea FFF, que indica el último 'cluster' de un fichero. Los detalles reseñados hasta ahora son útiles para la FAT de 12, que pueden alojar hasta 4010 'clusters'. Si un formato de disco tiene un número superior de 'clusters', es necesario utilizar una FAT de 16 bits.

### **2.19.5 El directorio**

Los directorios de los discos se utilizan para almacenar la mayor parte de la información básica sobre los ficheros contenidos en el disco, incluyendo el nombre de los ficheros, su tamaño, el comienzo de elemento de la FAT, la hora y fecha en que fueron creados y unas pocas características especiales del disco. La única información que no contiene el directorio es la localización exacta de los 'clusters' individuales que componen el fichero (éstos están almacenados en la tabla de localización de ficheros).

Hay un elemento en el directorio para cada fichero del disco, incluyendo los ficheros de subdirectorio y la etiqueta de identificación de volumen del disco. Cada uno de los elementos tiene 32 bytes, por lo que un sector del directorio puede almacenar 16 elementos. Cada entrada de 32 bytes del directorio está dividida en ocho campos (tabla 2.3):

#### **- Campo 1: el nombre del fichero**

Los ocho primeros bytes de cada elemento del directorio contienen el nombre del fichero, almacenado en formato ASCII. Si el nombre del fichero tiene menos de ocho caracteres, se completa por la derecha con espacio en blanco. Las letras deberán ser mayúsculas ya que las minúsculas no son reconocidas correctamente. El primer byte de los directorios que no se usan es 00. Cuando se borra un fichero, solo quedan afectadas dos cosas del disco. Al primer byte se le asigna el valor E5 hex y la cadena de utilización de espacio en fichero se borra en la FAT. El resto de la información del directorio acerca del fichero se mantiene. La información perdida puede ser recuperada mediante métodos adecuados, siempre que el elemento del directorio no se haya utilizado por otro fichero. Se advierte que cuando es necesario crear un nuevo elemento de directorio, el DOS utiliza el primero disponible, reciclando rápidamente la entrada correspondiente a un fichero ya borrado, haciendo imposible la recuperación. El tercer código que se puede encontrar en el byte del nombre de fichero es el carácter punto, 2E hex, que se utiliza para

especificar un subdirectorio. Si el segundo byte es también 2E hex, indica que se trata del directorio padre del directorio en uso, en cuyo caso el campo 'cluster' de comienzo contiene el número de 'cluster' del directorio padre.

Campo	Offset	Descripción	Tamaño (bytes)	Formato
1	0	Nombre del fichero	8	Caracteres ASCII
2	8	Extensión del nombre de fichero	3	Caracteres ASCII
3	11	Atributo	1	Bit codificador
4	12	Reservado	10	No utilizados; ceros
5	22	Hora	2	Palabra, Codificada
6	24	Fecha	2	Palabra, Codificada
7	26	Comienzo de entrada a la FAT	2	Palabra
8	28	Tamaño del fichero	4	Entero

Tabla 2.3 Partes de un elemento directorio

**- Campo 2: extensión del nombre del fichero.**

Después del nombre de fichero se encuentra la extensión estándar del nombre de fichero, en formato ASCII. Son tres bytes y como el nombre del fichero, se completa con espacios en blanco si consta de menos de tres caracteres, hasta alcanzar su número.

**- Campo 3: atributos del fichero.**

El tercer campo de la entrada de directorio consta de un byte, y cada uno de sus bits se utiliza para caracterizar el elemento de directorio.

**bit 0:** caracteriza a un fichero como de solo lectura

**bits 1 y 2:** caracteriza a los ficheros como ocultos o del sistema.

**bit 3:** indica que el elemento de directorio es una etiqueta de identificación (ID de volumen del disco). Las etiquetas solo son reconocidas correctamente en directorio raíz, y solo utiliza unos pocos de los ocho campos disponibles en el elemento.

**bit 4:** el atributo de subdirectorio, sirve para identificar elementos de directorio que identifican los subdirectorios. Dado que los subdirectorios están almacenados en el disco como ficheros de datos ordinarios, necesitan un elemento de directorio propio. Estos elementos utilizan todos los campos del directorio, excepto el campo de tamaño del fichero, que toma el valor cero. El tamaño real de un subdirectorio se determina siguiendo su cadena de localización, que hay que buscar en la FAT.

**bit 5:** el atributo de archivo, fue creado para facilitar la realización de copias de seguridad de algunos ficheros que pueden estar almacenados en un disco duro. Este bit está a cero en todos los ficheros que no han cambiado desde la última copia de seguridad. Y el bit está normalmente a uno en todos los ficheros de un disquete. El atributo de archivo no resulta particularmente útil en los disquetes.

**- Campo 4: reservado.**

Diez bytes reservados para posibles usos futuros

**- Campo 5: la hora**

Contiene un valor de dos bytes que señala la hora en la que fue creado o sufrió su último cambio el fichero.

**- Campo 6: la fecha.**

Contiene un valor de dos bytes que indica la fecha en que se creó el fichero, o en que se modificó por última vez.

**- Campo 7: número de 'cluster' de comienzo.**

Este campo consta de dos bytes que indican el número de 'cluster' de comienzo del espacio de datos del fichero. Actúa como el punto de entrada en la cadena de localización del fichero en la FAT.

**- Campo 8: tamaño del fichero.**

Indica el tamaño del fichero en bytes. Está codificado como un entero sin signo de cuatro bytes. Normalmente este número indica el tamaño exacto del fichero. Pero en algunos ficheros, sobre todo los generados por procesadores de texto, los cuales trabajan con bloques de bits (128 generalmente), puede haber alguna diferencia. En cualquier caso, cuando el DOS está leyendo un fichero, establece el final del fichero cuando lee todo el fichero, según su tamaño, o cuando llega al final de la cadena de localización de la FAT (denotado por FFF hex), sea cual sea el que aparezca primero.

### *2.19.6 El espacio de datos*

El espacio se otorga a los ficheros a medida que lo necesitan, un 'cluster' cada vez. Las últimas versiones del DOS añaden siempre nuevos 'cluster' mediante reglas complicadas que no veremos. En la mayoría de las ocasiones, cada fichero se almacena en un bloque de espacio continuo. Sin embargo, un fichero puede dividirse en varios bloques no contiguos, especialmente cuando se añade información a uno ya existente, o cuando se almacena un nuevo fichero en el espacio dejado por un fichero borrado.

## **2.20 EL ALMACENAMIENTO ÓPTICO**

Podemos definir el almacenamiento de datos diciendo que ello significa alterar alguna propiedad del conjunto de elementos de almacenamiento de tal forma que dicha alteración representa el dato a ser almacenado; posteriormente en base a esa propiedad, reconstruiremos el dato original a partir de ella. El almacenamiento óptico es una clase de almacenamiento de datos en la que se detecta esta propiedad por medios ópticos. 'Alterar' y 'detectar' corresponden en términos de computación, a escribir y leer. Deliberadamente no hemos utilizado el escribir datos por medio ópticos. De hecho, un dispositivo de almacenamiento óptico actual no escribe datos por procesos puramente ópticos, aunque tal proceso exista. El proceso usado en la práctica utiliza un rayo de luz para escribir, pero el cambio de las propiedades ópticas del medio es causado por efectos de calentamiento de ese rayo. Esto, por supuesto, no es aplicable a medios de sólo lectura, que son copiados desde un disco maestro por medios puramente mecánicos (mediante prensado).

Hay varias propiedades ópticas que pueden utilizarse para almacenamiento de datos, de las cuales la más simple es la reflectividad de la superficie del medio. Es fácil detectar los cambios en la reflectividad por la brillantez de la luz en la superficie del medio detectando la luz reflejada con un fotodetector. Sin embargo, esto es un proceso activo, al contrario que en los medios magnéticos donde simplemente se detecta el voltaje inducido en la cabeza. En el caso que ahora nos ocupa, estamos utilizando rayos de luz tanto para escribir como para leer en el medio óptico, y queremos que la operación de lectura no sea destructiva. Para conseguir esto, leemos con un rayo menos potente que el usado para escribir, y el medio debe tener bien definido el umbral para que un rayo de menor potencia en la lectura no cambie la información almacenada. Sin embargo, al ser reescrito muchas veces, el material puede perder sus propiedades iniciales y por lo tanto, no es

sorprendente que el mayor inconveniente en la tarea de introducir los almacenamientos ópticos en el mercado haya sido el desarrollo de medios satisfactorios.

Para medios reescribibles, aunque no para WORM (Write Once, Read Many times), hay otra dificultad, y es la de poder asegurar que los efectos que produce el calentamiento del material, cuando escribimos, son completamente reversibles. El mayor problema en el desarrollo de medios ópticos reescribibles es la fatiga del medio que limita el número de modificaciones que admite. Muchos materiales que en principio parecían útiles tuvieron que ser descartados porque tenían un límite bajo en el número de veces que los datos podían ser borrados y reescritos. El límite, para alguno de los materiales, es ahora mucho más alto y puede utilizarse de forma aceptable para la mayoría de los propósitos. Este problema de la fatiga retrasó la llegada de los almacenamientos ópticos reescribibles al mercado hasta cuatro o cinco años después de que los dispositivos WORM estuvieran disponibles en laboratorio.

La mayoría de los medios WORM y reescribibles dependen de escrituras termo-ópticas y de cambios en la reflectividad, pero hay una importante excepción. Esta es la grabación magneto-óptica, usualmente abreviada como MO y que es el proceso usado en el primer dispositivo óptico reescribible que llegó al mercado. La escritura en medios MO no sólo requiere un efecto de calentamiento del rayo de luz, sino que además, como su propio nombre indica, se aplica un campo magnético al punto que es calentado. Mediante un laser se calienta una zona muy pequeña de la superficie por encima de una temperatura conocida como punto de Curie. Por encima de esta temperatura los dominios magnéticos del medio pueden ser orientados bajo la acción de un campo magnético externo. Cuando el material se enfría por debajo de esta temperatura de Curie, el material retiene la orientación de los dominios magnéticos y por lo tanto la magnetización y los datos inicialmente grabados, aunque se someta nuevamente al campo magnético. La lectura depende de la dirección de polarización del haz reflejado en lugar de la intensidad del rayo de luz reflejado. Sin embargo, este cambio de polarización es convertido por una óptica en un cambio de intensidad de la luz que llega al fotodetector, por lo que, eléctricamente, el método de lectura no es muy diferente. El fenómeno físico por el cual una superficie magnetizada refleja la luz con un eje distinto de polarización según la orientación del campo magnético se conoce como efecto Kerr magneto-óptico.

### *2.20.1 El sistema óptico*

Los discos ópticos son similares a los discos magnéticos en que las pistas son leídas y escritas por una cabeza que se mueve aproximadamente de manera radial para dar acceso a varias pistas. Sin embargo, el diseño de la cabeza es totalmente diferente al de la cabeza magnética. La cabeza óptica es mucho más abultada y más cara; por lo tanto, los cilindros propuestos en los discos magnéticos y que suponen la existencia de múltiples superficies y por lo tanto múltiples cabezas de lectura son menos apropiados para los discos ópticos, que tienen una sola cabeza y por lo tanto acceden a una sola superficie de un disco a la vez. Estos pueden tener una única superficie activa, pero en algunos casos, como sucede con el DVD (Digital Versatile Disk), el disco es de doble cara. En este caso, debe ser retirado del dispositivo y se le da la vuelta manualmente para tener acceso a la segunda cara. Lectores con más de una cabeza aparecerán posiblemente en el futuro, pero por ahora son minoritarios.

El CD-ROM cuenta con una única pista en espiral que mide unos 5 km dividida en 270.000 sectores en los discos de 60 minutos, en 330.000 en los de 74' y en 360.000 en los de 80'. Los sectores son de 2352 bytes de los cuales los 12 primeros son de sincronización, los tres siguientes de cabecera, a continuación vienen los 2048 bytes de datos y el resto son para los códigos de detección y corrección de errores. La separación entre dos vueltas adyacentes, es decir el paso de vuelta, es de 1,6  $\mu\text{m}$ . Aunque este tipo de dispositivos tienen una única pista espiral, normalmente se denomina pista a cada una de las vueltas que incorpora, por analogía con las pistas en un disco magnético. Esta espiral continua está formada por abultamientos de la superficie denominados

"pits" que sobresalen por encima de la superficie que recibe el nombre de "land". El ancho de estos abultamientos es de  $0.5 \mu\text{m}$ . La altura de estos abultamientos es de  $1/4$  de la longitud de onda del láser empleado para la lectura. De esta forma, se producirá interferencia destructiva, ya que la diferencia entre los rayos de luz que se reflejan en un "pit" y en un "land" se diferenciarán justamente en media longitud de onda. La separación mínima entre un flanco y otro, es decir la longitud de un "pit" (o "land") o la separación entre "pits" (o "lands") es de  $0.833 \mu\text{m}$  y la separación máxima de  $3.054 \mu\text{m}$ . Esto corresponde a las distancias mínima y máxima sin transición. Estas separaciones máximas y mínimas vienen impuestas por el código, que es un tipo de código RLL-3,11 que se conoce como modulación de ocho a catorce (EFM= Eighth to Fourteen Modulation), ya que a grupos de ocho bits de datos se les asignan grupos de catorce bits, de forma análoga a como se hacía con el código RLL-2,7. Por último, el diámetro del punto luminoso sobre la superficie es de unos  $1.5-1.6 \mu\text{m}$  de diámetro. La figura (2.22 a) muestra estas dimensiones.

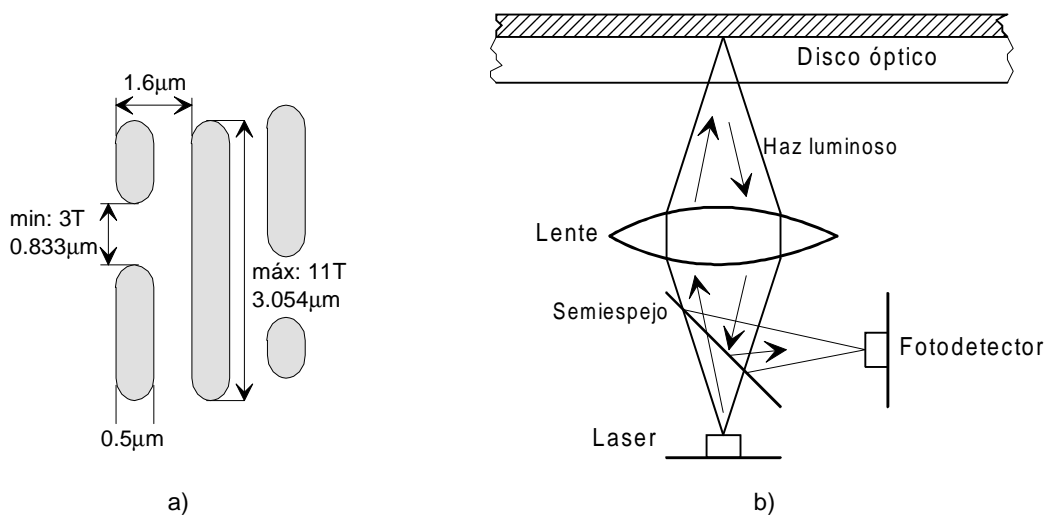


Fig. 2.22 a) Dimensiones típicas de un disco óptico  
b) Sistema óptico básico de un lector de disco óptico

El sistema óptico está compuesto por varios elementos, y en muchos dispositivos todos ellos son movidos de pista a pista. En otros casos, la mayoría de estos componentes están fijos y sólo partes del sistema se mueven. Aunque la terminología varía, será conveniente ver la cabeza únicamente como aquellos componentes que se mueven.

Los componentes básicos del sistema óptico se muestran en la figura (2.22 b). Dicho sistema consiste en un semiconductor láser para generar un rayo de luz, un fotodetector para detectar la luz reflejada de la superficie del disco, una lente objetivo para enfocar el rayo láser a un punto en la superficie activa del medio, y el semiespejo separador del haz que dirige la luz reflejada desde ese punto (a través de la lente objetivo) al fotodetector. En los sistemas prácticos hay componentes adicionales, aunque estos varían de un sistema a otro. Vamos a ver a continuación cada uno de los componentes básicos.

El almacenamiento óptico es descrito a veces como "almacenamiento láser"; la palabra "láser" se ve como una potente herramienta de venta. De hecho, el láser no es la única fuente de luz posible. Algunos de los primeros experimentos en almacenamiento óptico usaron otras fuentes de luz, y otras nuevas pueden usarse en el futuro. Por otra parte, unos pocos dispositivos experimentales dependerán de efectos ópticos que pueden ser producidos sólo por láser. En la práctica, todos los dispositivos de almacenamiento óptico que están en el mercado usan los láser como fuente de luz. El láser semiconductor, aunque en principio no es esencial, ha proporcionado una fuente de luz muy adecuada. Se ha vuelto muy fiable y razonablemente barato. Estas características se deben fundamentalmente a su amplio uso por la industria de los sistemas de discos compactos de audio. En realidad, muchos de los componentes usados en el almacenamiento

óptico son derivados de esta industria. Otro tipo de láser es el láser de gas, que fue usado en el video disco y en algunos de los primeros almacenamientos ópticos desarrollados. El láser de gas es más potente que el de semiconductor, pero es más grande, menos fiable, más caro y más difícil de modular por la electrónica de control.

El láser semiconductor tiene tres propiedades que lo hacen una fuente de luz adecuada para el almacenamiento óptico. En primer lugar, emite luz de una sola longitud de onda lo que simplifica el diseño de los otros componentes ópticos y del medio. Segundo, la luz emitida por él se concentra en un estrecho rayo (aunque no tan estrecho como el del láser de gas), lo que simplifica de nuevo el sistema óptico. Por último, la potencia del rayo puede modularse fácilmente por una señal eléctrica. Hay unas propiedades que son interesantes en otras aplicaciones, pero no es necesario discutir las aquí. Los láseres utilizados en almacenamiento óptico tienen una potencia de salida bastante baja, de 10 a 30 miliwatios. La luz emitida está en el infrarrojo cercano, porque los láseres con estas longitudes de onda son fáciles y económicos de fabricar. Los láseres azules podrían ser mejores: la densidad en la que los datos pueden ser almacenados depende, entre otras cosas, de la longitud de onda del láser, y los láseres que emiten luz azul tienen una longitud de onda de alrededor de la mitad del láser infrarrojo. Los láseres semiconductores azules han sido fabricados, pero aún no han sido desarrollados hasta el punto de poder ser usados en dispositivos prácticos. Al tener una longitud de onda casi la mitad que el láser rojo empleado en el DVD, un dispositivo que emplease un láser azul podría multiplicar por cuatro la capacidad de estos dispositivos, al igual que los DVD aumentan considerablemente su capacidad frente a los CD-ROM gracias a que emplean luz roja, en lugar de infrarroja, que tiene una longitud de onda menor y por lo tanto permite una mayor densidad de almacenamiento.

La necesidad del fotodetector es simplemente producir una señal eléctrica que se corresponda con la cantidad de luz que incide en él. Tales dispositivos están disponibles desde hace muchos años. En la práctica, este dispositivo es más complejo de lo que esta descripción implica.

Al igual que sucede con los láseres, no hay un único tipo de lentes objetivo. Estas tienen que trabajar sólo con luz monocromática, por lo que su diseño es muy fácil. Tienen una gran apertura (en otras palabras, su diámetro es grande con respecto a su distancia focal) para hacer el mejor uso de la cantidad de luz disponible. Es posible fabricar estas lentes con una distancia focal suficientemente grande como para que el punto más cercano de la lente a la superficie del disco sea amplio. Esta separación es típicamente alrededor de un par de milímetros, que es una distancia muy grande comparada con la altura de vuelo de la cabeza en los discos magnéticos. Esto tiene dos beneficios importantes. El primero es que es fácil de diseñar las unidades de disco para que el disco pueda ser quitado y reemplazado por otro, lo cual es imposible con los discos magnéticos de alta densidad. Segundo, tenemos una región para poner una fina capa sobre la cara activa del disco para protegerlo, por lo que cualquier partícula de polvo o arañazo menor en la superficie externa del disco, al estar fuera del foco, no tiene una influencia significativa en la lectura y escritura. Esto hace reducir el contraste de la imagen reflejada en el fotodetector y por tanto la relación señal-ruido del sistema. Por este motivo se necesita bastante polvo o arañazo para tener un efecto significativo en la integridad del dato. Esto hace al disco óptico un medio muy robusto en contraste con los discos magnéticos y por extensión las cintas magnéticas.

El último componente vital del sistema óptico es el separador del haz. Este dispositivo era bien conocido antes de que fuera aplicado al almacenamiento óptico. Su propósito es dividir la luz reflejada en su camino saliente para que llegue al fotodetector del láser. Hay varios dispositivos que pueden hacer esto. El más simple es un semiespejo, el cual tiene un revestimiento reflectante que lo hace parcialmente transparente. Este no es muy efectivo puesto que solo una parte del rayo retornado es desviada y algunos de los rayos que salen de la lente son dispersados y se pierden. Los dispositivos prácticos están normalmente basados en prismas, diseñados de tal forma que el rayo retornante sea reflejado hacia el detector con lo que se aprovecha toda la intensidad luminosa.

Por último, señalemos que pueden añadirse más componentes para soportar sistemas servo que mantiene el punto de foco en la pista de datos para mejorar el tiempo de acceso del dispositivo, o simplemente para permitir un formato más conveniente.

### 2.20.2 Seguimiento de la pista

La cabeza óptica, como la cabeza magnética, debe seguir la pista de datos escrita en el disco. Vimos que en algunos discos magnéticos este seguimiento puede hacerse por cómputo o cálculo estimado sin realimentación. Esto no es posible en unidades de discos ópticos porque las pistas están mucho más cercanas. Además, los discos son normalmente intercambiables; la localización precisa de la pista puede variar de un dispositivo a otro, y los discos pueden tener las pistas ligeramente excéntricas. Una complicación añadida es que la mayoría de los discos ópticos no usan pistas concéntricas separadas, sino que los datos están ordenados a lo largo de una espiral continua, aunque es normal considerar cada una de las vueltas de la espiral como una pista. Por todo esto las servopistas son siempre necesarias, y usan las servotécnicas embebidas (indicador de la pista en la misma pista) más que una superficie y cabeza separada, ya que además las cabezas ópticas son considerablemente más caras que las magnéticas y por lo tanto no resulta rentable.

La separación entre pistas, como ya se adelantó al comienzo de este apartado, es tan sólo de  $1.6 \mu\text{m}$ , que es mucho menor que la precisión con la que pueden fabricarse de forma rentable el plato del reproductor o el orificio central del disco. En un reproductor típico, si mantenemos fija la cabeza, debido a las excentricidades del sistema o del propio disco, durante una vuelta pasarán por delante de ella varias pistas. Es decir la excentricidad o irregularidad en el paso de pista es muy superior a la separación entre ambas por lo que se hace necesario un sistema de seguimiento con una dinámica mucho más rápida que la velocidad de giro del disco. Hay varios métodos para conseguir esto.

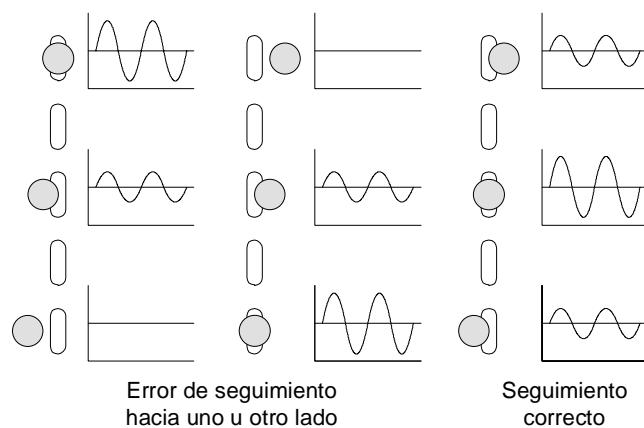


Fig. 2.23 El método de tres puntos para el seguimiento de pista

En el método de tres puntos, se enfocan tres haces de luz sobre la pista del disco, uno de los cuales es desplazado ligeramente a un lado de la pista y el otro al otro lado de la línea central de la misma, tal y como se muestra en la figura (2.23). Cuando el haz central, que es el que realmente recoge la información, está en el centro, los otros dos haces estarán parcialmente sobre la pista lo que producirá en sus respectivos fotodetectores (hay un fotodetector para cada haz) una pequeña señal oscilante. Si por el contrario la cabeza se aleja del centro de la pista, antes de que el haz principal la abandone lo habrá hecho alguno de los otros, según el lado hacia el que se produzca la salida. En ese momento, el fotodetector correspondiente no recibirá la señal ondulante y se podrá actuar para corregir esa deriva antes de que el haz principal se vea afectado. Los tres haces son generados a partir del haz proveniente del láser con la ayuda de una rejilla de difracción. De hecho,

el haz central es el lóbulo principal de la difracción y los otros dos se corresponden con los lóbulos laterales.

La señal oscilante que reciben los fotodetectores es debida al paso por las marcas propias de la superficie del disco. Estas señales se pasan por sendos filtros paso-bajo para eliminar esta información de canal y obtener el brillo medio. Si los dos haces secundarios producen en sus correspondientes fotodetectores la misma intensidad, el haz principal estará centrado. Si por el contrario hay una diferencia apreciable entre los niveles detectados, el sistema estará a punto de salirse de la pista. El signo de esta diferencia indica en que sentido debe actuarse para recolocar la cabeza en el centro de la pista de datos.

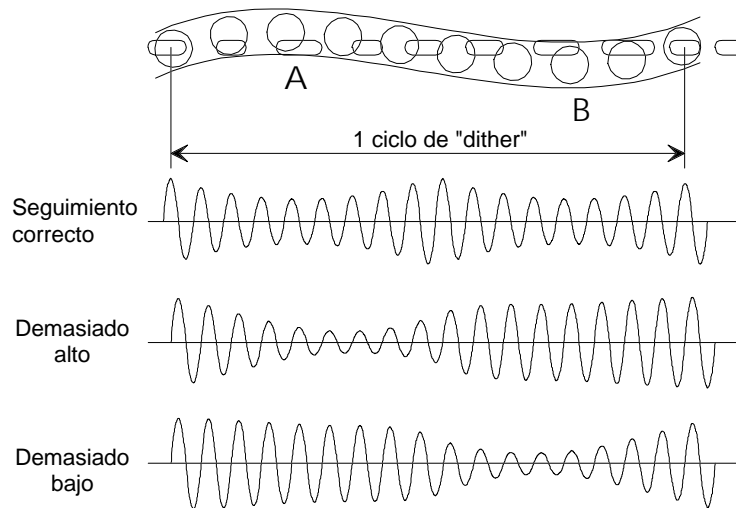


Fig. 2.24 La oscilación aplicada al haz de lectura modula la envolvente de lectura que puede utilizarse para determinar el error de seguimiento

Otro método consiste en superponer una pequeña oscilación al haz de forma que se produzca una modulación de la envolvente de la señal de lectura, que puede detectarse para obtener el sentido del error. Esta oscilación puede generarse mediante la vibración de un espejo en la trayectoria de luz, lo cual permite una alta frecuencia, o bien mediante la oscilación de todo el lector a una frecuencia menor. La figura (2.24) muestra el esquema de funcionamiento de este método. El seguimiento es correcto cuando el nivel de intensidad es similar en los momentos de máximo desplazamiento. Si por el contrario el nivel de señal en los momentos de máximo desplazamiento positivo (A) es muy distinto del nivel en los momentos de máximo nivel de desplazamiento negativo (B), la cabeza debe ser reposicionada.

En los controladores de bajas prestaciones, la cabeza completa puede moverse para seguir la pista por medio de un actuador similar al usado en los discos magnéticos. Pueden utilizarse voice-coil o un motor lineal. El brazo de la cabeza puede moverse en línea, o más comúnmente, en arco. El peso del dispositivo puede reducirse introduciendo un espejo en ángulo recto entre el separador del haz y la lente objetivo, con lo que la parte principal del sistema óptico puede ser puesta en su cara. Esto también hace posible reducir el peso de la cabeza óptica y así mejorar el tiempo de acceso, fijando la parte principal del sistema óptico y poniendo sólo el espejo y la lente objetivo en la cabeza. Es necesario añadir una lente de colimación a la parte fija del sistema de modo que el rayo de luz se mantenga sin dispersarse entre las secciones fijas y en movimiento (Figura 2.25). La desventaja de este diseño es que el alineamiento preciso entre las dos partes del sistema óptico puede ser difícil de mantener.

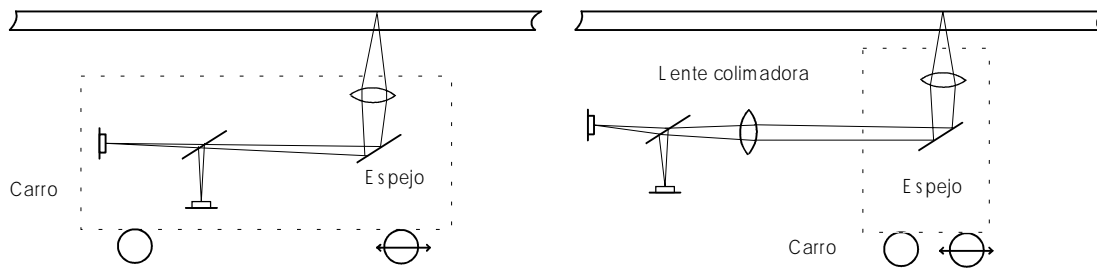


Fig. 2.25 Esquema de montajes alternativos para el sistema óptico.  
Izquierda: el láser se mueve con la cabeza. Derecha: el láser está fijo al sistema

Los sistemas de altas prestaciones usan un sistema de seguimiento de pista en dos etapas. El movimiento de la cabeza óptica es como acabamos de ver, pero se le añade un espejo en ángulo recto para habilitar la inclinación y de este modo deflecar el rayo a lo largo del radio del disco. La distancia que puede moverse el rayo de esta forma es muy limitada, porque debe mantener el paso a través de la lente objetivo, aunque en algunos dispositivos esta lente se mueve también o en lugar del espejo. Esto es suficiente para detectar cualquier pérdida de alineamiento o excentricidad, y también movimientos entre pistas adyacentes. Se usan dos mecanismos de servo separados: El primero, usa la información de servo desde el fotodetector, controlando el espejo para mantener el rayo de luz alineado con la pista. El segundo, toma la posición del espejo y mueve la cabeza completa, por lo que el espejo puede retornar a su posición media. La frecuencia de respuesta de este segundo servo es limitada, por lo que no puede seguir la excentricidad de la pista.

### 2.20.3 Control de enfoque

Al igual que sucede con la excentricidad del sistema plato-disco, el disco no mantiene siempre el mismo plano de giro. Debido nuevamente a imperfecciones del sistema o a deformaciones del disco en forma de alabeos, puede suceder que el haz no enfoque correctamente sobre la superficie de datos. Se hace necesario por tanto un control de enfoque. El posicionamiento de la lente para conseguir el enfoque adecuado, se obtiene con la ayuda de un actuador electrodinámico de bobina móvil, como en el caso de los motores "voice coil" para posicionar las cabezas de los discos duros. En este caso, la lente de enfoque va montada sobre una pequeña bobina suspendida en un campo magnético creado por un pequeño imán. La lente se acercará o alejará en función de la corriente que pase por la bobina (ver figura 2.26).

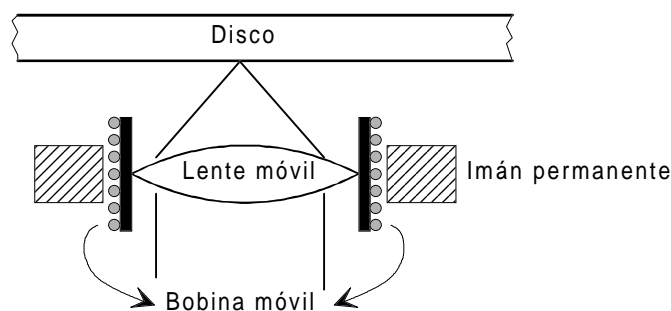
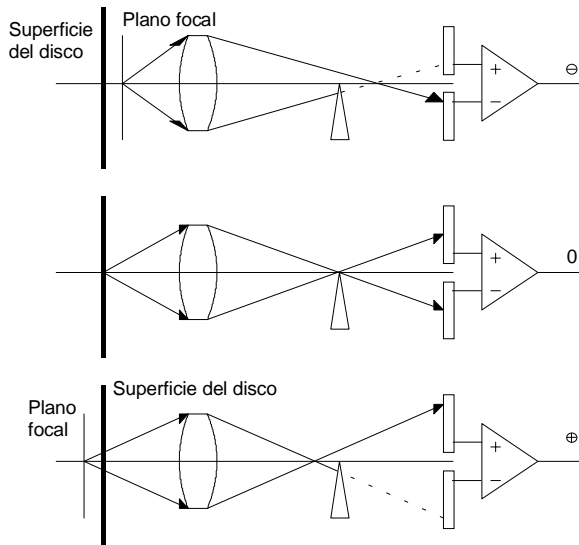


Fig. 2.26 Focalización moviendo la lente objetivo

La figura (2.27) muestra el esquema del control de enfoque conocido como filo de cuchillo. En este caso se requiere un sensor dividido en dos partes. Si el punto focal coincide con el filo del cuchillo, éste tiene poco efecto sobre el haz. Si por el contrario no coincide, apareciendo por delante o por detrás del plano del filo, uno de los dos sensores recibirá mayor cantidad de luz que el otro, porque el filo interrumpe el haz que debe llegar a uno de los dos fotosensores pero no afecta al otro. El error de enfoque se deduce comparando las salidas de las dos mitades del sensor. Esto se puede utilizar para corregir el enfoque. El principal inconveniente de este método es que la

posición lateral del filo es crítica y requiere un ajuste muy preciso. Para solventar esta dificultad se sustituye el filo por un prisma doble (figura 2.28). Las tolerancias en este caso, solo afectan a la sensibilidad, sin producir ningún desplazamiento de enfoque.



Cuando el plano de enfoque coincide con la superficie del disco, los dos fotodetectores reciben la misma intensidad de luz.

Si por el contrario el plano de enfoque está por encima o por debajo de la superficie del disco, uno de los dos fotodetectores no recibirá apenas luz.

Fig. 2.27 Esquema de funcionamiento del método de control de enfoque denominado de filo de cuchillo. Necesita tan sólo dos sensores pero depende de forma crítica de la correcta posición del filo.

Un método más preciso y que no requiere estos ajustes tan precisos está basado en una lente cilíndrica. Cuando el haz pasa por la lente cilíndrica, como en un eje no tiene curvatura, no afecta al haz en esa dirección, sin embargo en el otro eje tiene el efecto de acortar la longitud focal de todo el sistema. La imagen por tanto será una elipse. Esta elipse será alargada o achatada en este eje según que el punto focal se sitúe por delante o por detrás de esta lente cilíndrica. Si el punto focal coincide con la lente, la alteración será mínima y la imagen será casi completamente circular. En este momento la lente está enfocada. Para determinar la asimetría del punto luminoso se emplea un fotodetector dividido en cuatro cuadrantes (fig 2.29). Si todos los cuadrantes reciben la misma intensidad, la imagen es circular y el sistema está enfocado, si por el contrario dos cuadrantes diagonalmente opuestos reciben más luz que los otros dos el sistema estará enfocando demasiado cerca, y estará enfocando demasiado lejos cuando los que reciben más luz sean el otro par.

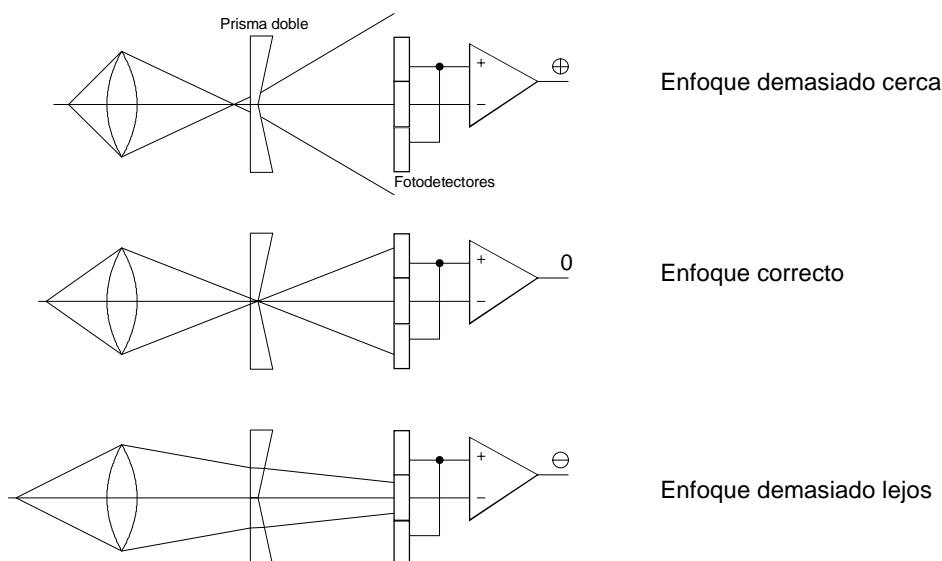


Fig. 2.28 Esquema de un sistema que emplea el método del prisma doble para detectar los errores de enfoque. Este método utiliza tres fotodetectores

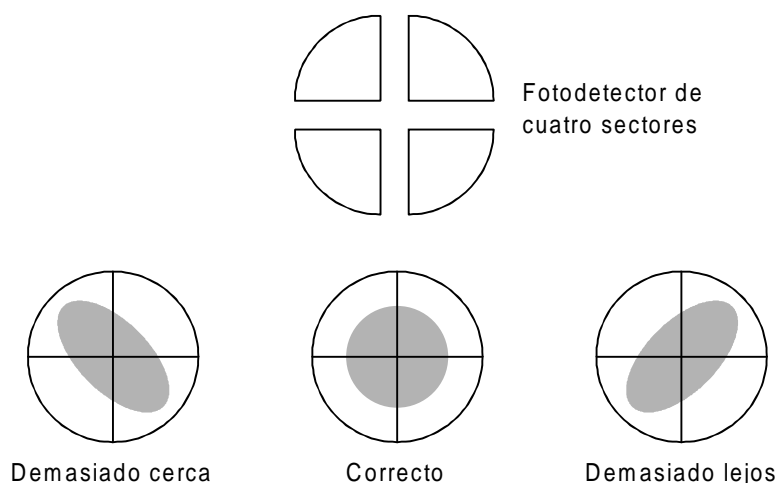


Fig. 2.29 Errores de focalización

#### 2.20.4 Rotación del disco

La mayoría de los discos reescribibles y escribibles una sola vez tienen una velocidad angular constante (Constant Angular Velocity o CAV); este es, por supuesto, el método usado en las controladoras de discos magnéticos, para las que los datos no están densamente empaquetados en las pistas más externas como ya se comentó y donde la velocidad de acceso es un factor crítico. Por otra parte, la potencia requerida para aplicar una cantidad de energía dada a un área del disco, varía con el radio de la pista. El segundo punto no es muy importante en los almacenamientos ópticos, puesto que la potencia del láser puede ser controlada fácilmente.

Sin embargo, algunas controladoras incrementan la capacidad de almacenamiento de datos en cada uno de los discos grabando con velocidad lineal constante (Constant Linear Velocity o CLV). De este modo, la velocidad de rotación del disco se varía con el radio de la pista, por lo que la superficie del disco siempre pasa por la cabeza a la misma velocidad lineal. Así pueden grabarse todas las pistas con la misma densidad (espaciado de bit). Esto incrementa la capacidad del disco en alrededor del 50%.

Hay, sin embargo, un precio que pagar y este es el tiempo de acceso. Antes sólo teníamos que esperar a que la cabeza se moviera a la pista correcta; ahora debemos cambiar la velocidad del disco. La inercia del disco es considerable, y en la práctica, el cambio de velocidad se toma un tiempo considerablemente mayor que el movimiento de la cabeza. En el dispositivo típico CLV, el tiempo de acceso es alrededor de medio segundo. Este es un precio aceptable a pagar para mayores capacidades en algunas aplicaciones, pero no en otras. Muchas controladoras CLV son, por lo tanto, útiles para ambos modos y trabajarán tanto en modo CLV como en CAV, dependiendo de cómo el disco es preformateado. Hay también algunos compromisos entre CLV y CAV. Aquí, las pistas son agrupadas en grupos de 20 o así, y la velocidad de rotación cambia entre las bandas, pero no dentro de las bandas. En otros discos, la velocidad de rotación es constante, pero el rango de datos es incrementado con el radio de la pista, por lo que el espaciado de bit permanece constante.

Los discos de sólo lectura (CD-ROM) y su antecesor el Compact Disc de audio usan el modo CLV. El modo CLV incluye un servo adicional encargado de controlar la velocidad del motor del disco. En este caso, la entrada es obtenida de la secuencia de datos, puesto que el código es autorreloj. Se extrae la frecuencia de los datos y se compara con la de un oscilador local y se actúa sobre el motor para que estas dos frecuencias sean iguales. La frecuencia estándar y que se

utiliza como patrón es la empleada en los primeros discos digitales de audio y es de unos 150 Kbits por segundo. Esta velocidad la podemos obtener si tenemos en cuenta que el sonido se codifica con dos canales (derecho e izquierdo) a 44.1 Kmuestras/segundo y con 16 bits (2 bytes) de resolución con lo que se obtiene  $2 \times 44100 \times 16 = 1411200$ , a lo que hay que añadir los códigos de detección de errores, los valores de sincronización, etc. Esta velocidad de transferencia es la imprescindible para reproducir adecuadamente un disco de audio. No obstante, los datos no están sujetos a una velocidad concreta, sino que interesa la mayor posible en cada caso. Por este motivo, han aparecido en el mercado discos que emplean una frecuencia de oscilador local que es un múltiplo de la anterior, etiquetándose comercialmente como discos X2, X8, X40, etc. según el número de veces que su oscilador es mayor que el oscilador patrón de los discos de audio. Este factor multiplicativo debe ser un número entero, para que se puedan reproducir los discos de música convencionales con un simple contador que dividirá la frecuencia por el factor apropiado, para obtener nuevamente los 150 KHz que es la única velocidad a la que deben reproducirse los discos de audio.

En la práctica, algunos dispositivos con CAV también usan servo control de la velocidad del disco para permitir al dato estar sincronizado con la señal de reloj generada dentro del dispositivo. Otros usan un motor convencional y deriva del dispositivo el reloj de una señal de reloj en el disco. Por esta razón, el preformateo puede incluir señales de reloj en dispositivos CAV y no sólo en los discos CLV.

Por regla general, los dispositivos CLV permiten aprovechar mejor la superficie completa del disco y puede proporcionar buenas velocidades de transferencias en ficheros grandes colocados de forma consecutiva sobre la pista. Por el contrario, los discos con CAV tiene unas velocidades de acceso mucho más rápidas pues no necesitan ajustar la velocidad de giro del disco. CLV resulta ideal para aplicaciones donde se precise leer grandes cantidades de datos de forma secuencial (audio, video) ya que en este caso la velocidad de giro va variando lentamente y se puede adaptar fácilmente. Por el contrario, en aplicaciones de tipo general y especialmente en bases de datos, donde hay que acceder a distintos ficheros o a cantidades de datos relativamente pequeñas pero repartidas por todo el disco, será preferible utilizar dispositivos CAV. Por este motivo, los dispositivos CD-Digital Audio, el Video-CD o el DVD emplean CLV, y los discos duros emplean CAV de forma universal.

### ***2.20.5 Formatos de grabación***

Como en los discos magnéticos, en los discos ópticos se accede a una sola pista en cada momento. El dato se escribe secuencialmente a lo largo de cada una de las pistas. Sin embargo, el factor que domina en la elección del formato de grabación óptico es el manejo de errores. El área ocupada por cada una de las celdas en el medio óptico corresponde más o menos al tamaño del punto focal, y es más pequeño que el área correspondiente del disco magnético. Típicamente, una micra de diámetro. Las técnicas de fabricación son muy diferentes; no es práctico, económicamente hablando, hacer medios que estén completamente libres de defectos y además la mayor densidad del almacenamiento óptico significa que defectos más pequeños afectarán al almacenamiento de datos, y que cada uno de los defectos afectará a más bits de información. Hay dos consecuencias: La primera es que una relativamente alta proporción de los sectores en el disco se verán afectados por los defectos, y no es tan práctico descartar todos estos sectores como haríamos con los discos magnéticos. La segunda es que la mayoría de los bits dentro del sector estarán mal con cualquier defecto, con lo que los códigos relativamente simples usados en los medios magnéticos no resultan adecuados para corregir los errores, e incluso para detectarlos todos. Un rasgo dominante del almacenamiento óptico, es la necesidad de un potente sistema de corrección de errores. No obstante los métodos de corrección de errores en sí mismos no son exclusivos de los almacenamientos ópticos sino que se emplean también en cintas magnéticas.

Hemos descrito las técnicas de grabación ópticas como aquellas en las que cada bit de dato corresponde a una celda de bit específica en el disco. De hecho, esto no es así. Como en el almacenamiento magnético, podemos usar códigos RLL y grabar grupos de códigos para incrementar la densidad de bits en el medio. Podemos usar también caracteres adicionales, o de una forma más general, usar códigos redundantes, para proporcionar detección y corrección de errores. En la grabación óptica, sin embargo, existe el riesgo de que los defectos afecten a un número bastante grande de bits sucesivos. Los métodos de codificación usados para almacenamiento óptico toman un bloque completo (o sector) de datos como una unidad, y el código es de tal forma que celdas adyacentes a lo largo de la pista correspondiente están muy dispersas dentro del bloque. Esto hace que la detección y corrección de errores sea más exacta. Los actuales algoritmos de codificación son muy complejos.

La información grabada en los discos ópticos está dividida en sectores como en los discos magnéticos, y cada sector tiene una cabecera. Estas cabeceras se ponen normalmente en el disco como parte de la información preformateada, aunque algunas controladoras usan discos en los que el preformateo se escribe por métodos termo-ópticos. En discos CAV los sectores ocupan posiciones angulares estándar, y el formato puede verse a menudo como un patrón radial. Por ejemplo en los discos magneto-ópticos, se pueden ver a simple vista los sectores y las bandas en las que se divide. En este sentido, no hay diferencia entre discos con pistas separadas y aquellos donde las pistas forman una espiral. Sin embargo, en los discos CLV, los sectores no están alineados y no pueden ser vistos por el ojo.

Las unidades de discos ópticos tienen una cabeza de lectura única y por lo tanto, el concepto de cilindro no es aplicable y las pistas son identificadas por números individuales consecutivos.

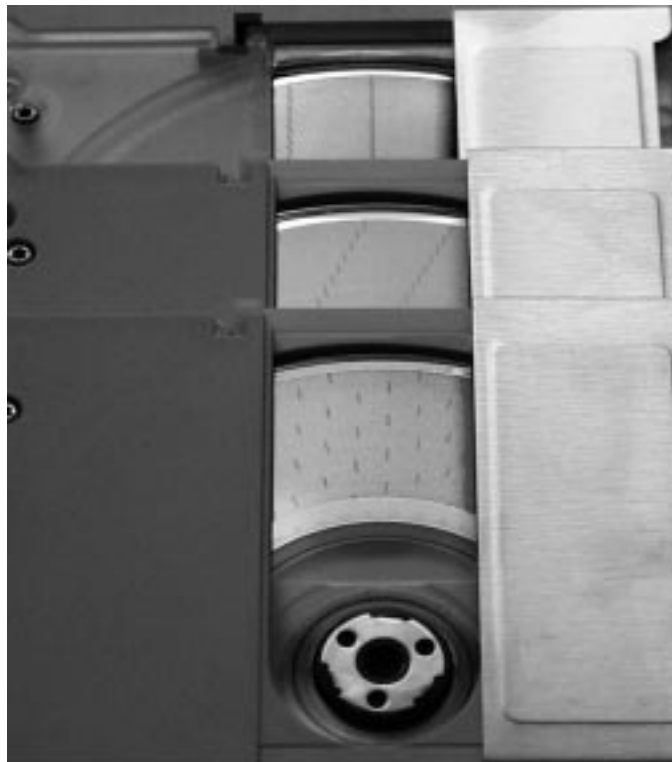


Fig. 2.29 Imagen de varios discos magneto-ópticos de 640 MB en los que se pueden apreciar los sectores y las bandas. Este último aspecto se comprueba porque las marcas de sectores no son continuas desde el centro

## 2.21 UN NUEVO FORMATO: EL DVD

Recientemente ha aparecido en el mercado un nuevo sistema de almacenamiento de gran capacidad basado en tecnología óptica: el 'Disco Versátil Digital' o DVD. Los principios de funcionamiento son básicamente idénticos a los de los bien conocidos discos digitales de audio (CD-DA) y CD-ROM. Sin embargo, se han introducido numerosas modificaciones que hacen que su capacidad sea sensiblemente superior.

Por una parte se emplea un láser de luz roja que tiene una longitud de onda menor (entre 635 y 650 nm) que la del CD-ROM convencional (780 nm). Esto unido a una mayor apertura focal (0.6 frente a 0.45) hace que se puedan conseguir puntos luminosos, sobre la superficie del disco, mucho más pequeños. Al disponer de una mayor focalización, con un punto de lectura ('spot') más pequeño, podemos aplicar un factor de escala a todas las dimensiones y de esta forma obtenemos una separación entre pistas de sólo 0.74 micras y una longitud mínima entre transiciones de 0.4 micras. Al tener una menor separación entre pistas, la longitud de la espiral alcanza ahora los 11 km aproximadamente, que es más del doble que en los CD's convencionales. Si ha esto se le añade que sobre esta pista los datos también están más juntos, el incremento en capacidad es considerable. La altura de los 'pits' y 'lands' también se reduce en la misma proporción por lo que en el mismo espesor (1.2 mm) de disco ahora el DVD puede contener dos capas superpuestas.

La evolución que ha sufrido la electrónica de control desde la aparición del CD de audio en 1981, permite mayores velocidades de transferencia. En el DVD, que como ya se ha anticipado emplea CLV, ésta es de 4.0 m/s frente a 1.2 m/s del CD convencional. Esto no impide que, al igual que sucedió con el CD-ROM, en el mercado haya también DVDs con velocidades x4, x6, etc. Esta evolución de la electrónica también permite la utilización de códigos de grabación y de detección y corrección de errores mucho más sofisticados que en el caso del CD-ROM. Estos códigos tienen una potencia extraordinaria y son capaces de corregir una salva de errores de hasta 2000 bytes, lo que equivale a unos 4 mm de pista. La información necesaria para la detección y corrección de errores ocupa aproximadamente un 13% de la capacidad total del disco.

La codificación EFM (Modulación de ocho a catorce) empleada en los CDs convencionales produce en algunos casos violaciones de código, para lo que se hace necesario añadir 3 bits de canal adicionales para corregirlo. Esto hace que realmente, ocho bits de datos se conviertan en la práctica en 17 bits de canal. El DVD por el contrario emplea una codificación de 8 a 16 sin violaciones de código y manteniendo o mejorando las prestaciones de la codificación empleada en los CDs a costa de una circuitería de codificación y decodificación más sofisticada. Esto proporciona un 6% de capacidad adicional.

Otra novedad que incluye el formato DVD es la utilización de ambas caras del disco e incluso permite dos capas por cada cara. Esto se consigue superponiendo una superficie semireflectante por encima de la superficie reflectante más interna. La lectura de una u otra capa se consigue focalizando el láser en distintos puntos. En base a esta característica podemos tener cuatro tipos de DVD's:

- Una cara y una capa con una capacidad de 4.7 GB
- Una cara y dos capas: 8.5 GB
- Dos caras y una capa en cada cara: 9.2 GB
- Dos caras y dos capas en cada cara: 17 GB

El diseño biestratificado de los DVDs ofrece además otra ventaja adicional: reduce los desequilibrios y el alabeo del disco. Un cambio brusco de temperatura o humedad puede alterar la planitud de un disco óptico, pero en el caso de los DVDs al tener una construcción simétrica atenúan algo este efecto que puede producir defectos de lectura.

La tabla muestra un resumen con las diferencias entre el CD convencional (CD-DA y CD-ROM) y el DVD. Las mejores características del DVD frente al CD-ROM lo hacen ideal para su utilización masiva como soporte de video, existiendo ya en el mercado un amplio catálogo de películas de cine almacenadas y disponibles en este formato. Si el CD-ROM supuso un salto considerable en cuanto al tipo de información a almacenar es de suponer que el DVD suponga una nueva revolución, permitiendo almacenar en un espacio reducido y de fácil acceso enormes cantidades de información. Aplicaciones como mapas, enciclopedias multimedia, bases de datos gráficas y sonoras, etc. pueden encontrar un aliado excelente en este tipo de soporte.

Característica	CD	DVD
Diámetro	120 mm	120 mm
Grosor	1,2 mm	1,2 mm
Estructura del disco	Sustrato único	Doble sustrato
Longitud de onda del láser	780 nm (infrarrojo)	635 - 650 nm (rojo)
Apertura numérica del sistema óptico	0,45	0,6
Separación entre pistas	1,6 $\mu\text{m}$	0,74 $\mu\text{m}$
Distancia mínima entre transiciones	0,83 $\mu\text{m}$	0,4 $\mu\text{m}$
Velocidad Lineal Constante	1,2 m/s	4,0 m/s
Número de capas	1	1 o 2
Número de caras	1	1 o 2
Capacidad	680 MB	1 capa: 4,7 GB 2 capas: 8,5 GB
Velocidad de transferencia	Modo 1: 153,6 kB/s Modo 2: 176,4 kB/s	1108 kB/s
Densidad lineal de bits	16930 bits/cm	37795 bits/cm
Densidad de almacenamiento	0,68 Gbits/cm <sup>2</sup>	3,28 Gbits/cm <sup>2</sup>

Tabla 2.4 Tabla comparativa entre los parámetros característicos de un CD y un DVD