

carbón.

2.2 Recubrimientos

2.2.1 Pintado

Recubrimiento con polímeros plásticos líquidos por la acción de un disolvente que se evapora al secado, dejando la pieza original uniformemente cubierta con una fina capa de unas decenas de micras (μm) de espesor.

2.2.2 Electrodeposición

Proceso de recubrimiento de una pieza sumergida en un electrolito líquido, que normalmente es una solución acuosa de las sales de algún metal.

Mediante corriente continua se disocia la sal, liberando el metal (*electrolisis*) que se depositará uniformemente alrededor de la pieza que hace de electrodo de la polaridad adecuada (los cationes⁺ irán al cátodo o polo negativo, los aniones⁻ al ánodo o polo positivo).

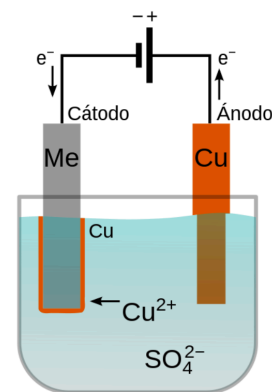


Fig. 45 Electrolysis de sulfato cúprico para recubrir de cobre al cátodo.

2.2.3 Recubrimiento por lecho fluidificado

Proceso muy útil para cubrir una gran variedad de artículos con una capa o envoltura de plástico de grosor considerablemente uniforme. Normalmente son elementos metálicos que se quieren proteger contra la oxidación por el paso del tiempo o la intemperie. El acabado es generalmente de mayor espesor y más perfecto y duradero que el logrado mediante pintado.

El proceso consiste en:

- La pieza a recubrir se precalienta y sumerge en un recipiente lleno de partículas de polímero en polvo que se mantienen fluidas insuflando aire muy caliente..
- El polímero se va adhiriendo al metal. El espesor del recubrimiento depende del tiempo durante el que la pieza se mantenga dentro de la masa esponjosa de polvo.
- Cuando se ha obtenido el grosor que se desea, la pieza se retira y luego se hace pasar por un horno para la fusión final del polímero.

2.2.4 Impresión

Se trata de un procedimiento de pintado en el que la deposición de la pintura está controlada para definir figuras o formas, como texto o imágenes.

Las técnicas de deposición controlada de la pintura son variadas:



- En una *impresora de chorro de tinta* se trata de inyección controlada sobre materiales absorbentes.
- En una *impresora láser* es deposición electrostáticamente controlada de polvos poliméricos, que se adhieren momentáneamente sobre un rodillo no conductor justo donde acaba de tocar levemente un rayo láser. El rodillo queda 'manchado' por el polímero pero luego un papel lo absorbe y queda imprimido por el polvo. Un par de rodillos más funden el polvo que moja y se solidifica sobre el papel y el resultado es ya estable.

3 PROCESADO MEDIANTE MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO

3.1 CNC (*Computer Numerical Control*)

Sistema de automatización de operaciones usando máquinas en el que las acciones de las herramientas están programadas con antelación. El movimiento es de total precisión y se consigue modernamente gracias a una combinación de motores eléctricos y controladores (*drivers* en inglés) específicos.

Todo sistema de motor + controlador para CNC debe ofrecer las siguientes prestaciones:

- Acelerar su carga nominal desde la posición de reposo hasta su velocidad nominal (es decir, proporcionar el necesario *par de arranque*).
- Mover su carga nominal a la velocidad nominal (es decir, proporcionar su *par nominal*) sin problemas de agotamiento o sobrecalentamiento.
- Permitir conocer con gran precisión la distancia angular θ (rad) girada por el rotor en cualquier momento, lo que puede permitir también conocer su posición con gran exactitud.
- Detenerse con la mayor velocidad posible una vez llegado a la posición solicitada por su controlador (es decir, ofrecer un elevado *par de freno*).
- Mantener su posición una vez detenido en ella, ofreciendo una elevada resistencia al arrastre por parte de la carga (es decir, ofrecer gran *par resistente*).

Los sistemas más habituales que cumplen las cinco condiciones anteriores son:

- *Servomotores*: combinación de un motor eléctrico genérico con un encóder de posición angular solidario con su eje.

El *encóder*:

- Puede ser óptico o tratarse de un simple potenciómetro (resistencia variable según la posición de su mando giratorio, que se fija al eje del servomotor). En cualquier caso se requiere un complemento electrónico para obtener la información.
- Puede ser digital porque informa de los pasos que va dando el motor con una resolución de, por ejemplo, 200 pasos por vuelta, o analógico, en caso del potenciómetro, que proporciona una señal variable.
- Puede ser absoluto, cuando informa de los pasos desde un tope o punto de partida (*home*) o incremental, cuando simplemente dice cuántos

pasos lleva desde la última vez que se le consultó.

- *Motores paso a paso*: rotor de imán permanente y estátor bobinado conforme a lo esquematizado en la Fig. 46. Funciona alimentando las bobinas con corriente continua, en el orden y con la polaridad adecuada, como corresponda en cada momento. El rotor se alinea con alguna de las cuatro posiciones posibles cada vez. Si se excitan dos bobinas contiguas se consiguen posiciones de rotor intermedias. El controlador regula todo esto.

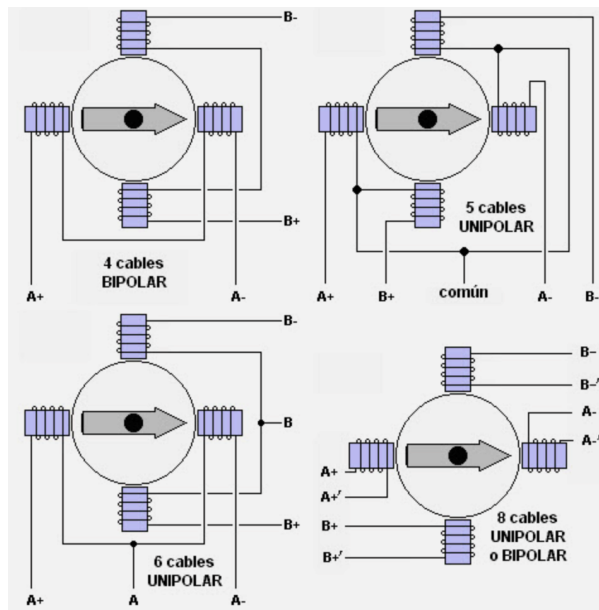


Fig. 46 Diferentes formas de excitar las bobinas del estátor de un motor paso a paso.

Normalmente se dice que el motor es *unipolar* cuando existe la posibilidad de excitar sólo una de las cuatro bobinas cada vez. Y el motor es *bipolar* cuando esta posibilidad no existe o no se utiliza.

A gran velocidad el motor puede perder pasos: aunque el controlador le excita para que pase a la siguiente posición, el motor no consigue hacerlo. Lo prudente es asociarle, entonces, un encóder rotatorio, para verificar que el motor consigue dar cada paso que se le ordena. Esta realimentación para mejorar el control se conoce como motor paso a paso funcionando en bucle cerrado (*closed loop stepper motor*).

- *Motores híbridos*: gracias a la electrónica es posible considerar un servomotor como un motor paso a paso en bucle cerrado, es decir, que es posible pedirle a un servomotor que avance un determinado número de pasos, y el controlador hace el resto.

Es frecuente, incluso, que el controlador permita exactamente el mismo tipo de cableado que para un auténtico motor paso a paso. Los terminales serían estos:

- Dir+*: giro a derechas, avance o adelante
- Dir-*: giro a izquierdas, retroceso o atrás
- Pulse*: cada flanco en esta señal implica el movimiento equivalente a un paso
- Enable*: terminal que libera o bloquea el motor

En muchas ocasiones el motor estará desmultiplicado, lo que significa que se le añade una cascada de engranajes para reducir su velocidad y aumentar su par (Fig. 48) o, incluso, lograr bloquear mecánicamente la carga si se incluye un sistema piñón-tornillo sinfín (Fig. 47).

Utilizar una caja reductora obliga a tener en cuenta el juego (*backlash*) debido a la holgura de los engranajes.



Fig. 47 El sistema piñón-tornillo sinfín es autobloqueante.

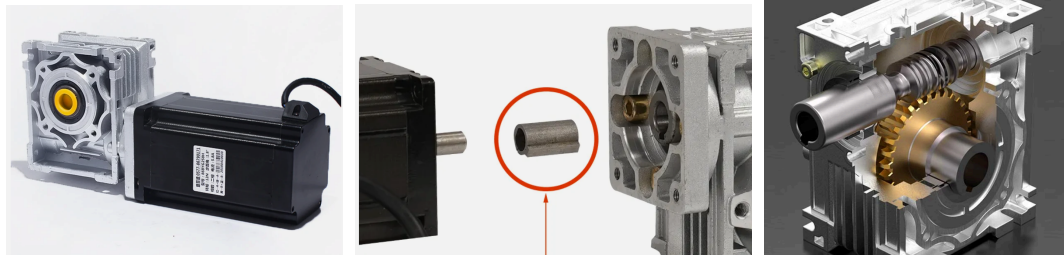


Fig. 48 Motor paso a paso más caja reductora autoblocante.

3.2 Geometric Code

El G-code es un lenguaje de programación para máquinas CNC (Control Numérico por Computadora). El G-code significa "Código Geométrico". Se utiliza este lenguaje para indicarle a una máquina qué hacer o cómo hacer algo. Los comandos del G-code instruyen a la máquina sobre dónde moverse, a qué velocidad moverse, qué ruta seguir y, opcionalmente, qué hacer con sus herramientas y accesorios, como ventiladores por ejemplo.

En el caso de una máquina herramienta como un torno o una fresadora, la herramienta de corte se controla mediante estos comandos para seguir una trayectoria específica, eliminando material para obtener la forma deseada.

En el caso de la fabricación aditiva o impresoras 3D, los comandos del G-code indican a la máquina que deposite material capa tras capa, formando una forma geométrica precisa.

3.2.1 Estructura básica de un archivo G-code

Se trata de un archivo de texto, sin formato, con extensión '.gcode' y no '.txt'.

Conocer su estructura y el significado de los comandos permite retocar archivos complicados con gran sencillez.

INICIO DE UN ARCHIVO G-CODE

```
; G-Code generated by xxxxxx Version 4.0.1
; Jun 28, 2023 at 6:56:01 PM
; Settings Summary
;   processName,Process1
;   applyToModels,NOR_IK_01
;   profileName,JAVI_ABS (modified)

G90
G20                ; Unidades en mm
M82
M106 S0            ; fan speed
M140 S90           ; bed temp
M104 S255 T0       ; nozzle temp
M190 S90           ; wait for bed temp
M109 S255 T0       ; wait for nozzle temp
G28                ; home all axes
G29               ; AutoLevel Bed
G1 X200 Y201 Z0 F3600 ; Purga del extrusor
G92 E0             ; Reset the extruder's origin
G92 E0
G1 E-2.0000 F1800
G1 Z0.130 F1200
; process Process1
M117 Capa 1
T0
; tool H0.200 W0.420
```

```
; skirt  
G1 X74.471 Y59.569 F6000  
G1 E-0.1000 F540  
G92 E0  
G1 X77.569 Y56.471 E0.1530 F2400  
G1 X77.790 Y56.380 E0.1613  
G1 X142.210 Y56.380 E2.4111  
G1 X142.431 Y56.471 E2.4194  
G1 X145.529 Y59.569 E2.5724  
...
```

Cualquier archivo de G-code se compone de:

- *Comentarios*: entre el signo ';' y el final de línea. Se incluyen para ayudar al usuario a depurar el código, pero son totalmente prescindibles y la máquina los ignorará. Algunas veces los comentarios simplemente van entre paréntesis como en el ejemplo de la Fig. 49.
- Líneas de *código*: tienen una estructura similar a esta

G## X## Y## Z## F##

Ejemplo: G01 X247.951560 Y11.817060 Z-1.000000 F400

- **G##**: comando del G-code. En este caso es G01 significa "mover mecanizando en línea recta hacia una posición específica".
- **X## Y## Z##**: coordenadas en unidades de la máquina, con decimales y signo positivo (se omite) o negativo.
- **F##**: velocidad de avance, o velocidad a la que se ejecutará el movimiento, en unidades de velocidad de la máquina (mm/minuto por ejemplo).
- Retorno de carro o código fin de línea (invisibles): para marcar el final de un comando y el inicio del siguiente.

El comando G21 establece las unidades en milímetros. El comando G20 en pulgadas.

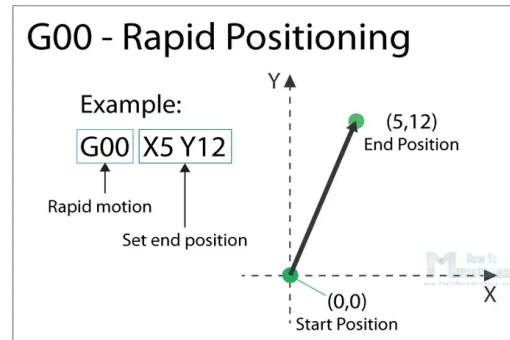
```
Horse_0002 - WordPad  
File Home View  
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16  
%  
(Header)  
(Generated by gcodetools from Inkscape.)  
(Using default header. To add your own header create file  
"header" in the output dir.)  
M3  
(Header end.)  
G21 (All units in mm)  
  
(Start cutting path id: path29632)  
(Change tool to Cylindrical cutter)  
  
G00 Z5.000000  
G00 X33.655106 Y11.817060  
  
G01 Z-1.000000 F100.0(Penetrare)  
G01 X247.951560 Y11.817060 Z-1.000000 F400.000000  
G01 X247.951560 Y30.935930 Z-1.000000  
G01 X106.963450 Y30.935930 Z-1.000000  
G03 X106.587404 Y32.243414 Z-1.000000 I-7.576860 J-1.471361  
G03 X105.974610 Y33.458890 Z-1.000000 I-6.445333 J-2.487300  
G03 X104.697090 Y35.083261 Z-1.000000 I-7.601246 J-4.663564  
G03 X103.141830 Y36.435630 Z-1.000000 I-10.087550 J-10.030472  
G03 X102.969400 Y38.107779 Z-1.000000 I-20.252028 J-1.243405  
G03 X102.369430 Y39.685740 Z-1.000000 I-3.842423 J-0.557919  
G03 X100.419761 Y41.664361 Z-1.000000 I-6.181245 J-4.140917  
G02 X98.333794 Y43.482560 Z-1.000000 I7.045018 J10.188229  
G02 X95.783544 Y47.017541 Z-1.000000 I9.647185 J9.647199  
G02 X94.101654 Y51.024620 Z-1.000000 I28.957871 J14.510988  
G03 X92.872672 Y54.561719 Z-1.000000 I-340.631289 J-116.371936  
G02 X91.674043 Y58.106100 Z-1.000000 I130.634230 J46.145281  
120%
```

Fig. 49 Otro ejemplo de archivo G-code de <https://howtomechatronics.com/tutorials>

3.2.2 Los comandos G-code más comunes

G00 - POSICIONAMIENTO RÁPIDO

El comando G00 mueve la máquina a la velocidad máxima de desplazamiento desde una posición actual hacia las coordenadas especificadas por el comando. La máquina moverá todos los ejes al mismo tiempo para completar el desplazamiento de manera simultánea. Esto resulta en un movimiento en línea recta hacia el nuevo punto de posición.

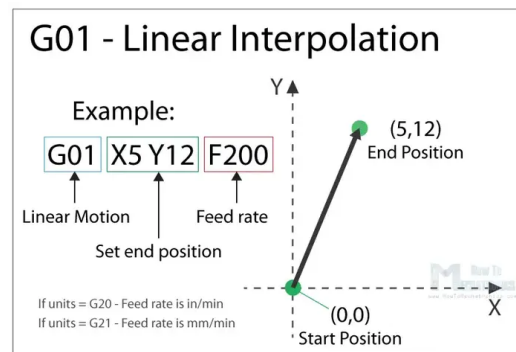


El G00 es un simple movimiento y su propósito es mover rápidamente la máquina a la posición deseada para comenzar algún tipo de trabajo, como corte o impresión.

G01 - INTERPOLACIÓN LINEAL

Hace que la máquina se mueva en línea recta a una velocidad dada.

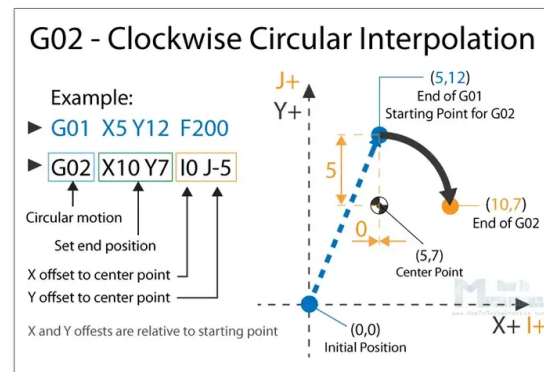
A diferencia del comando G00 que se utiliza solo para posicionamiento, el comando G01 se utiliza cuando la máquina está realizando su tarea principal: cortando material en línea recta o extruyendo material en línea recta.



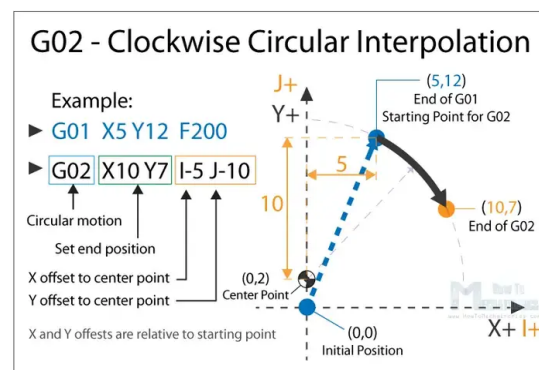
G02 - INTERPOLACIÓN CIRCULAR SENTIDO HORARIO

Se debe definir la posición final a alcanzar y la distancia del centro del arco desde la posición actual.

Se utiliza cuando la herramienta está mecanizando (cortando, extruyendo). Se puede fijar la velocidad añadiendo un comando F## a la línea.

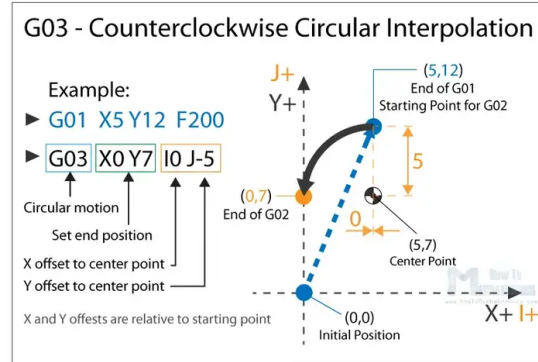


Variando la posición del centro se obtiene un arco distinto, aunque los puntos inicial y final puedan ser los mismos.



G03 - INTERPOLACIÓN CIRCULAR SENTIDO ANTIHORARIO

Como en el G02, aquí también se debe definir la posición final a alcanzar y la distancia del centro del arco desde la posición actual. Pero el arco se traza ahora en sentido antihorario.

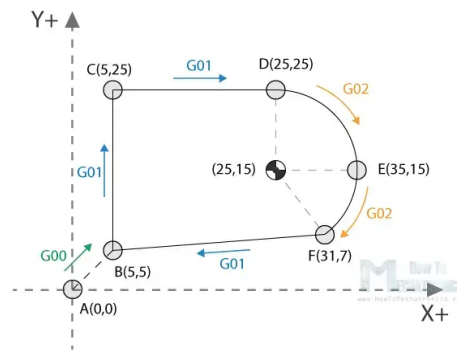


Con los comandos G01, G02 y G03 se puede crear ya cualquier forma plana que se desee, pero puede resultar laborioso. Un programa de fabricación asistida CAM (*Computer Aided Manufacturing*) simplifica enormemente el problema.

EJEMPLO 1:

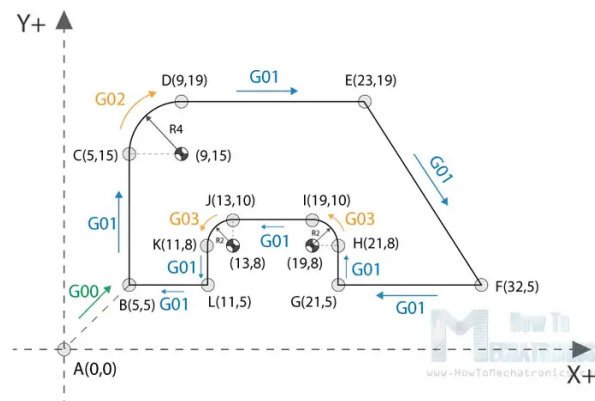
El código siguiente llevará la herramienta por la ruta de la imagen de la derecha:

```
G00 X5 Y5 ; punto B
G01 X0 Y20 F200 ; punto C
G01 X20 Y0 ; punto D
G02 X10 Y-10 I0 J-10 ; punto E
G02 X-4 Y-8 I-10 J0 ; punto F
G01 X-26 Y-2 ; punto B
```



EJEMPLO 2

```
G21 G17 G90 F100
M03 S1000
G00 X5 Y5 ; point B
G01 X5 Y5 Z-1 ; point B
G01 X5 Y15 Z-1 ; point C
G02 X9 Y19 Z-1 I4 J0 ; point D
G01 X23 Y19 Z-1 ; point E
G01 X32 Y5 Z-1 ; point F
G01 X21 Y5 Z-1 ; point G
G01 X21 Y8 Z-1 ; point H
G03 X19 Y10 Z-1 I-2 J0 ; point I
G01 X13 Y10 Z-1 ; point J
G03 X11 Y8 Z-1 I0 J-2 ; point K
G01 X11 Y5 Z-1 ; point L
G01 X5 Y5 Z-1 ; point B
G28 X0 Y0
M05
M30
```



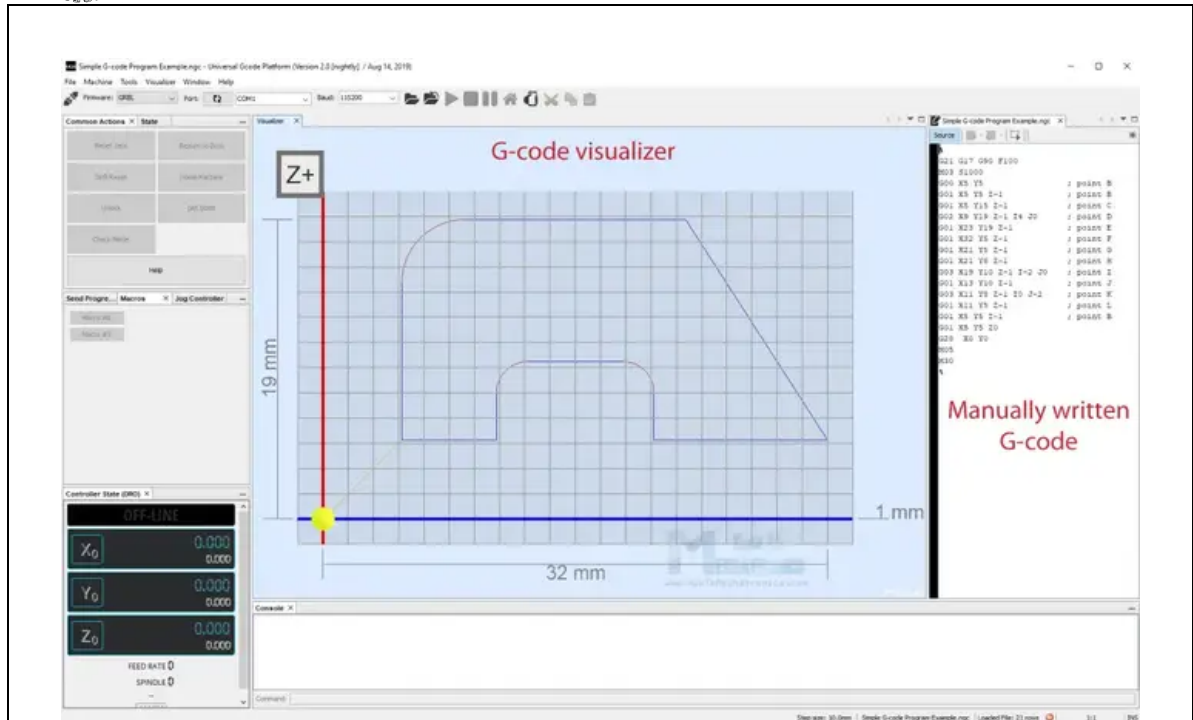


Fig. 50 Función visualizadora de G-code de un software CAM
[<https://howtomechatronics.com/tutorials>]

Además de los comandos del G-code para definir la geometría del proceso, hay también comandos M-code que permiten manejar mejor la fresa de corte:

- M03 - Fresa activada, giro horario. Sxxx fija la velocidad de giro (rpm)
- M04 - Fresa activada, giro antihorario. Sxxx fija la velocidad de giro (rpm)
- M05 - Fresa detenida
- M06 - Cambio de fresa
- M09 - Detener flujo de refrigerante
- M30 - Final del programa

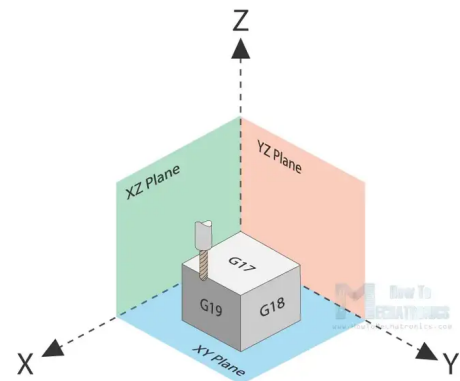
Y si se trata de una impresora 3D por extrusión:

- M104 – Encender calefactor del extrusor
- M109 – Esperar hasta que el extrusor alcanza la temperatura T0
- M140 – Encender calefactor de la cama
- M190 – Esperar hasta que la cama alcanza la temperatura T0
- M106 – Asignar velocidad al ventilador

OTROS COMANDOS G-CODE

Para trabajar en el espacio se puede seleccionar como plano de trabajo uno de los tres principales:

- G17 – plano XY (por defecto)
- G18 – plano XZ
- G19 – plano YZ

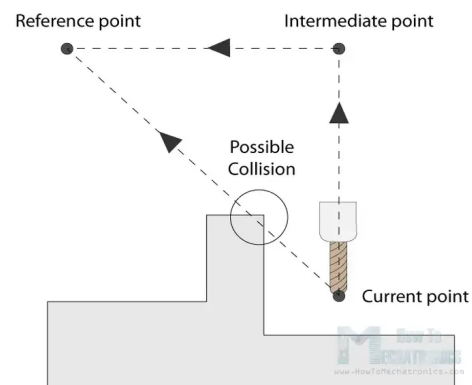


- G28 – Home

El comando de volver al punto de referencia (*home*) admite coordenadas X## Y## Z## de un punto de obligado paso, de manera que se puedan evitar colisiones.

- G90 – Modo absoluto
- G91 – Modo relativo (defecto)

Estos comandos determinan la forma de interpretar las coordenadas. El relativo es por incrementos.



Así, si la herramienta está en el punto (20.15):

- El comando G90 (absoluto) seguido por G01 X10 Y5 la llevaría al punto (10.5).
- El comando G91 (relativo, incrementos) seguido por G01 X10 Y5 la llevaría al punto (20+10, 15+5) es decir, al punto (30.20).

EJEMPLO 3

Las coordenadas de la Fig. 51 deberían bastar para configurar correctamente un archivo G-Code que permitiera grabar mediante láser la palabra 'JUAN'.

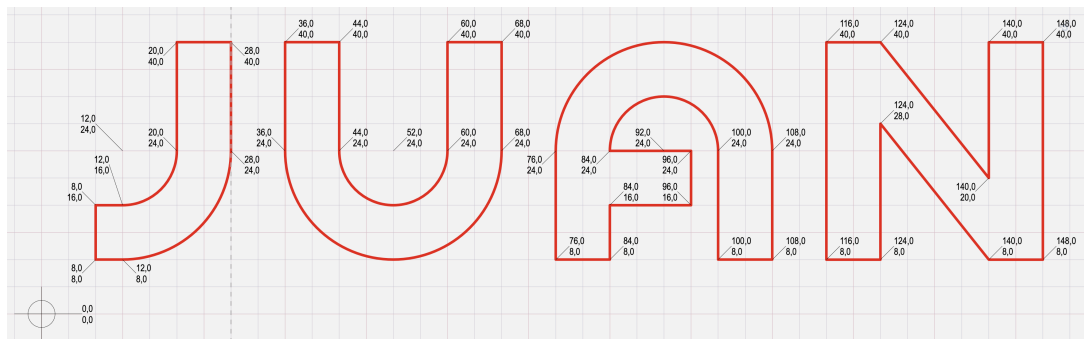


Fig. 51 El radio de las curvas se puede calcular restando las coordenadas del centro y un extremo.

4 MONTAJE

4.1 Uniones permanentes

Una unión permanente entre dos piezas puede lograrse por:

- *Adhesión*: se aporta un material específico a la junta de contacto, generalmente un polímero, que se unirá íntimamente con cada pieza y hará de nexo de unión.
- *Termofusión*: no se aporta material a la junta, sino que se plastifican o licúan las dos partes a unir para que alcancen un estado suficientemente fluido y se mezclen, confundándose en una sola pieza sólida al enfriar.
- *Soldadura*: una combinación entre los dos procedimientos anteriores, porque se aporta material externo a la junta pero se funde, igual que las dos piezas a unir, para que alcancen las tres un estado fluido en el que amalgamarse y solidificar como una sola pieza al enfriar.

4.1.1 Adhesivos

Hay una amplia gama de sustancias que se emplean en la industria como adhesivos. Pueden clasificarse por su tipo en adhesivos:

- De *base acuosa*: la unión queda hecha al evaporarse el agua disuelta. La cola de carpintero es un ejemplo.
- De *base solvente*: la unión queda hecha al evaporarse el disolvente. La cola de contacto a menudo lleva tolueno como disolvente, y por eso es inflamable.
- *Reactivos*: dos o más componentes que forman la unión al reaccionar entre sí. Las resinas epoxídicas son de este tipo.
- *Termofusibles*: adhesivos sólidos que se vuelven adherentes al fundir y recuperan la forma sólida al enfriar de nuevo. La cola caliente que se distribuye en barras y está compuesta de siliconas es así.

4.1.2 Termofusión

Técnica utilizada para la unión entre piezas de materiales plásticos apropiados. En la industria son frecuentes los siguientes:

- Policloruro de vinilo PVC
- Polietileno PE
- Polipropileno reticulado PPR

No dan resultado las uniones entre piezas de distintos materiales.

Las herramientas se ajustan a la forma de las piezas a unir (tubo, láminas) y buscan aportar calor a las proximidades de la junta de forma controlada para conseguir la fusión sin dañar irreversiblemente el material (sin quemarlo).



Fig. 52 Pistola de aire caliente y accesorios para soldar láminas de *liner* (PVC armado con una retícula de fibras de poliéster)



Fig. 53 Unión entre tubería y accesorio de PPR usando la herramienta apropiada.

4.1.3 Soldadura

El procedimiento consiste en concentrar una enorme cantidad de calor sobre la junta y conseguir fundirla mientras se aporta más material externo. La amalgama que se forma endurece al enfriar y la unión queda hecha.

Los tipos de soldadura pueden clasificarse así:

- Por *arco eléctrico*: se proporciona calor mediante una chispa eléctrica, mantenida desde la punta de un electrodo que es el material a aportar y las piezas metálicas a unir. Se emplea corriente continua de baja tensión pero elevada intensidad. Admite las siguientes variantes (Fig. 54):
 - MIG (*Metal Inert Gas*): el electrodo es el material de aporte y el arco se rodea de un gas inerte, normalmente argón, que se sopla alrededor continuamente para evitar que la soldadura que se forma se deteriore por oxidación mientras el metal está incandescente.
 - TIG (*Tungsten Inert Gas*): el electrodo es permanente, de tungsteno, y no se fundirá, por lo que hay que aportar metal externamente. Pero sigue siendo necesario soplar un gas inerte que proteja la soldadura de la oxidación del metal incandescente.
 - *Electrodo recubierto*: el metal de aportación a la soldadura es el electrodo que se va fundiendo. Para evitar la corrosión del metal recién fundido este electrodo viene revestido de un fundente que se convierte en escoria y que hay que eliminar por medios mecánicos cuando la soldadura enfría.

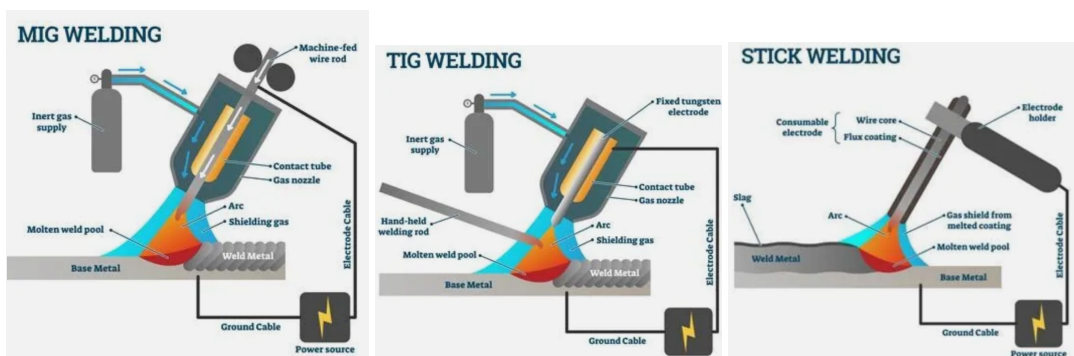


Fig. 54 Tres tipos de soldadura por arco eléctrico
[\[https://www.lincolntech.edu/\]](https://www.lincolntech.edu/)

- Por *gas* o *autógena*: el calor se produce por la combustión de un gas que sale por la fina punta de un soplete. El gas combustible suele ser acetileno y se le añade oxígeno puro como comburente. La llama de esta soldadura oxiacetilénica puede llegar a 3200°C, se puede concentrar sobre un punto muy pequeño, donde hay que colocar el metal de aporte. Con pericia se puede lograr soldar sin aportar material externo.

Este mismo equipo puede usarse para fundir simplemente una chapa, por lo que se utiliza para cortar metal, en un procedimiento que se llama *oxicorte*.

4.2 Uniones desmontables

El clásico método de unión no permanente es el basado en roscas, como las de los pernos, tornillos y tuercas. Las roscas se definen a partir de los siguientes conceptos:

- p Paso de rosca o distancia entre dos filetes contiguos
- H altura del triángulo generador
- D diámetro exterior del tornillo
- D_2 diámetro medio de la rosca

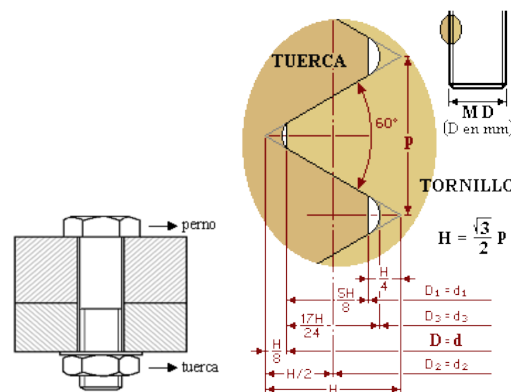


Fig. 55 Parámetros de una rosca de tipo métrico

Hay roscas métricas según el estándar ISO, de paso normal M y paso fino MF, pero también hay otros tipos de roscas como la WITHWORTH, trapezoidal, redonda y en dientes de sierra. Un tornillo con rosca de un tipo jamás será compatible con una tuerca de rosca de otro tipo, aunque los calibres coincidan.

4.2.1 Remaches

Un remache es un pequeño cilindro con una cabeza más ancha en un extremo, que se introduce en un orificio entre las dos piezas de unir, y al que se le deforma o machaca el otro extremo asegurando el apriete de la unión.

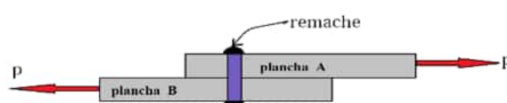


Fig. 56 Uniones remachadas

Si el material del remache es blando, la deformación se puede conseguir en frío. De lo contrario puede ser necesario utilizar un remache próximo a su punto de fusión. En este caso el remache apretará aún más la unión porque se contrae al enfriarse.

4.2.2 Encaje a presión

Esta técnica se basa en forzar un acoplamiento entre dos piezas deformando momentáneamente una o las dos pero sin llegar a sobrepasar su límite elástico, de manera que cuando llegan a su sitio recuperan su forma y la unión queda hecha.

Se aprovechan formas biseladas para facilitar el montaje e impedir el desmontaje, pero éste suele ser siempre posible a pesar de ello porque, de nuevo, no tiene por qué superarse el límite elástico del material al desmontar.

4.2.3 Otras uniones desmontables

En la industria hay otras muchas soluciones para uniones que pueden deshacerse con mayor o menor facilidad. Son de uso cotidiano y bien conocidas por todos, como por ejemplo las siguientes:

- Mediante pasadores
- Usando chavetas
- Con botones, cremalleras o velcros.
- Con pinzas, clips, grapas

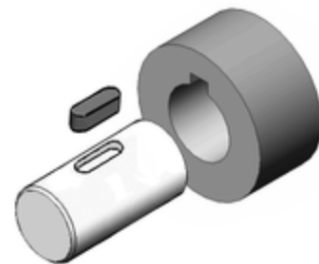


Fig. 57 Un eje transmite su momento torsor al acoplamiento gracias a una chaveta

5 METROTECNIA BÁSICA

La norma de referencia en Europa es la UNE-EN ISO 286 *Especificación geométrica de productos (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales*. La parte 1 reproduce la norma ISO 286-1 sobre *tolerancias, desviaciones y ajustes*.

5.1 **Definiciones usuales**

Magnitud: cualidad física que se pretende medir. Por ejemplo: peso, tamaño, iluminancia, color... y derivadas como densidad, saturación, brillo...

Dimensión: sinónimo de magnitud, excepto cuando se utiliza para distinguir dentro de la misma magnitud. Por ejemplo, la magnitud tamaño admite las dimensiones largo, ancho y alto.

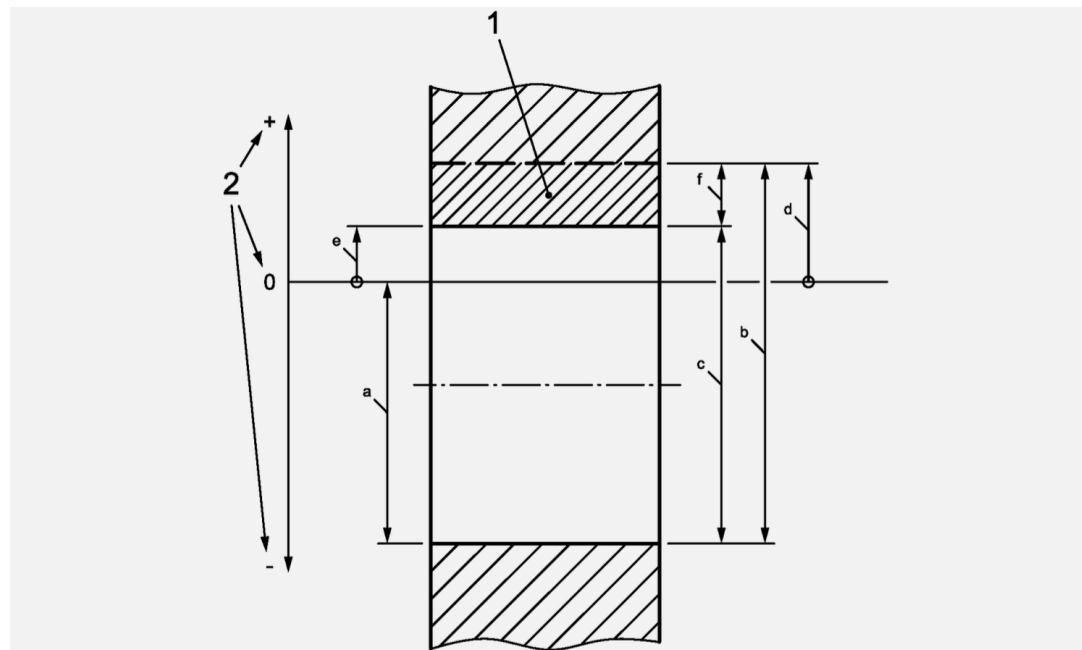
Medida: cifra asociada a una dimensión, expresada en las unidades características de su magnitud. Han de preferirse las del Sistema Internacional.

Nominal: valor característico de una asignado a una pieza que la debe distinguir de otras piezas similares. 'Nominal' deriva de 'nombre' y, por ello, debe considerarse inherente a la naturaleza de la pieza, no una mera asignación pasajera.

Efectiva o real: atributo de la dimensión medida en una pieza concreta. Puede coincidir con la nominal o no, en cuyo caso hay una *desviación* o *diferencia*.

Tolerancia: desviación o diferencia máximas que puede admitirse para determinada magnitud en una pieza concreta. La norma ISO 286-1 contiene un sistema (IT) de *normalización de tolerancias lineales* (Fig. 59).

La posición del intervalo de tolerancia admisible está también normalizada Ø .



Leyenda

- 1 Intervalo de tolerancia
- 2 Convención de signos para las desviaciones
- a Dimensión nominal.
- b Límite superior dimensional
- c Límite inferior dimensional
- d Desviación del límite superior
- e Desviación del límite inferior (en este caso también la desviación fundamental)
- f Tolerancia

NOTA La línea horizontal continua, que limita el intervalo de tolerancia, representa las desviaciones fundamentales para un agujero. La línea discontinua, que limita el intervalo de tolerancia, representa la otra desviación límite para un agujero.

Fig. 58 Significado de conceptos básicos de metrología en UNE-EN ISO 286-1.

Dimensión nominal mm		Grados de tolerancia normalizados																			
		IT01	IT0	IT1	IT2	IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT15	IT16	IT17	IT18
Desde	Hasta e incluido	Valores de tolerancia normalizados																			
		μm									mm										
—	3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
3	6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
6	10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
10	18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,8	2,7
18	30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
30	50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
50	80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
80	120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
120	180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
180	250	1,5	2,5	4	7	10	14	20	30	45	70	110	180	280	0,45	0,7	1,1	1,8	2,8	4,5	7,0

Fig. 59 Tolerancias normalizadas IT por la UNE-EN ISO 286-1.

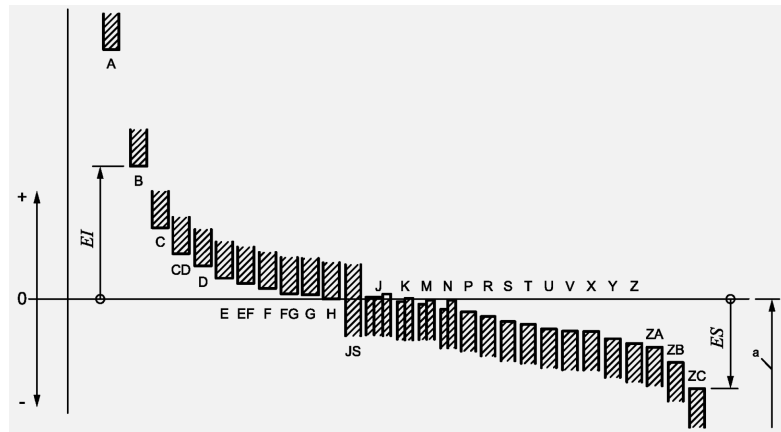


Fig. 60 Posiciones normalizadas de la tolerancia cuando se trata del diámetro interior de agujeros (letras mayúsculas), según la UNE-EN ISO 286-1.

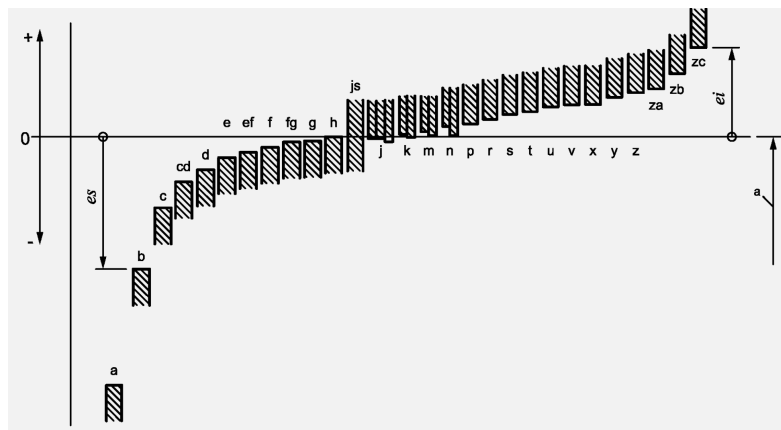


Fig. 61 Posiciones normalizadas de la tolerancia cuando se trata del diámetro exterior de ejes (letras minúsculas), según la UNE-EN ISO 286-1.

Las tolerancias pueden referirse a todas las cualidades geométricas descritas en la Fig. 62 referidas a la forma, la orientación, la situación y la oscilación (holgura eje-agujero).

SIMBOLOS DE LAS TOLERANCIAS			SIMBOLOS DE LAS TOLERANCIAS			
		TOLERANCIA	Simb			
TOLERANCIAS DE FORMA		RECTITUD	—	ORIENTACION	PARALELISMO	//
		PLANICIDAD	▭		PERPENDICULARIDAD	⊥
		REDONDEZ	○		INCLINACION	∠
		CILINDRICIDAD	⊘	SITUACION	POSICION	⊕
		FORMA DE UNA LINEA	⌒		COAXIALIDAD	⊙
		FORMA DE UNA SUPERFICIE	⊖		SIMETRIA	≡
OSCILACION				CIRCULAR	↻	
				TOTAL	↻↻	

Fig. 62 Tolerancias geométricas y sus símbolos normalizados.

5.2 Sistema Internacional de unidades (SI)

Está construido a partir de solo siete magnitudes básicas:

Magnitud	Unidad	Definición
Tiempo	s segundo	Se define al fijar el valor numérico de la frecuencia de la transición hiperfina del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, $\Delta\nu_{Cs}$, en 9 192 631 770, cuando se expresa en la unidad Hz, igual a s^{-1} .
Longitud	m metro	Se define al fijar el valor numérico de la velocidad de la luz en el vacío, c , en 299 792 458, cuando se expresa en la unidad $m \cdot s^{-1}$, donde el segundo se define en función de la frecuencia del Cesio $\Delta\nu_{Cs}$.
Masa	kg kilogramo	Se define al fijar el valor numérico de la constante de Planck, h , en $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$, cuando se expresa en la unidad $J \cdot s$, igual a $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$, donde el metro y el segundo se definen en función de c y $\Delta\nu_{Cs}$.
Intensidad de corriente eléctrica	A amperio	Se define al fijar el valor numérico de la carga elemental, e , en $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$, cuando se expresa en la unidad C, igual a $A \cdot s$, donde el segundo se define en función de $\Delta\nu_{Cs}$.
Temperatura	K kelvin	Se define al fijar el valor numérico de la constante de Boltzmann, k , en $1.380\ 649 \times 10^{-23}$, cuando se expresa en la unidad $J \cdot K^{-1}$, igual a $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c y $\Delta\nu_{Cs}$.
Sustancia	mol mol	Un mol contiene exactamente $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ entidades elementales. Esta cifra es el valor numérico fijo de la constante de Avogadro, N_A , cuando se expresa en la unidad mol^{-1} , y se denomina número de Avogadro.



Magnitud	Unidad	Definición
Intensidad luminosa en una dirección	cd candela	Se define al fijar el valor numérico de la eficacia luminosa de la radiación monocromática de frecuencia 540×10^{12} Hz, K_{cd} , en 683, cuando se expresa en la unidad $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$, igual a $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$, o a $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$, donde el kilogramo, el metro y el segundo se definen en función de h , c y $\Delta\nu_{Cs}$

Todas las demás magnitudes que maneja la Humanidad se consideran derivadas de las siete fundamentales mediante operaciones matemáticas basadas en relaciones físicas que se consideran bien conocidas. Y algunas de ellas han merecido un nombre propio y una unidad escrita en mayúsculas (Fig. 63), en honor de algún investigador destacado.

Magnitud	Unidad derivada coherente				
	Nombre	Símbolo	Expresada en otras unidades	Expresada en unidades básicas	Persona a quien hace referencia
Unidades de geometría, mecánica y tiempo					
frecuencia	hercio	Hz	—	s^{-1}	Heinrich Rudolf Hertz
fuerza	newton	N	—	m kg s^{-2}	Isaac Newton
presión	pascal	Pa	N/m^2	$\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2}$	Blaise Pascal
energía (incluyendo calor)	julio	J	N m	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$	James Prescott Joule
potencia y flujo radiante	vatio	W	J/s	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$	James Watt
Unidades electromagnéticas					
carga eléctrica	culombio	C	—	s A	Charles-Augustin de Coulomb
tensión eléctrica y potencial	voltio	V	W/A	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$	Alessandro Volta
capacitancia	faradio	F	C/V	$\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$	Michael Faraday
resistencia eléctrica	ohmio	Ω	V/A	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$	Georg Simon Ohm
conductancia eléctrica	siemens	S	A/V	$\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2$	Werner von Siemens
flujo magnético	weber	Wb	V s	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$	Wilhelm Eduard Weber
campo magnético/(densidad de flujo magnético)	tesla	T	Wb/m^2	$\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$	Nikola Tesla
inductancia	henrio	H	Wb/A	$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$	Joseph Henry
Unidades de termodinámica y química					
temperatura Celsius	grado Celsius	$^{\circ}\text{C}$	—	$\text{K}^{\text{nota 5}}$	Anders Celsius
actividad catalítica	katal	kat	—	$\text{s}^{-1} \text{mol}$	—
Unidades radiológicas					
actividad de un radionucleido	bequerelio	Bq	—	s^{-1}	Henri Becquerel
dosis absorbida	gray	Gy	J/kg	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	Louis Harold Gray
dosis equivalente	sievert	Sv	J/kg	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	Rolf Sievert
Unidades de fotometría					
flujo luminoso	lumen	lm	cd sr	$\text{cd } 4\pi^{\text{nota 7}}$	—
iluminancia	lux	lx	lm/m^2	$\text{m}^{-2} \text{cd } 4\pi$	—

Fig. 63 Unidades derivadas del SI con nombre dedicado.

El Centro Español de Metrología (CEM) ha publicado un breve documento (Fig. 64) que aclara las dudas acerca de la utilización correcta del Sistema Internacional, que no solo se refiere a las magnitudes y sus unidades, sino que también explica cómo deben escribirse estas y las variables a que a menudo se refieren.



Fig. 64 Uso del SI. Disponible en <https://www.cem.es/>

5.3 Medidas

Obtener una medida requiere:

- Conocer bien el objeto a medir o *mensurando*.
- Emplear un procedimiento, método o principio para obtener la *medida*.
- Disponer de un *patrón* con el que comparar la medida.

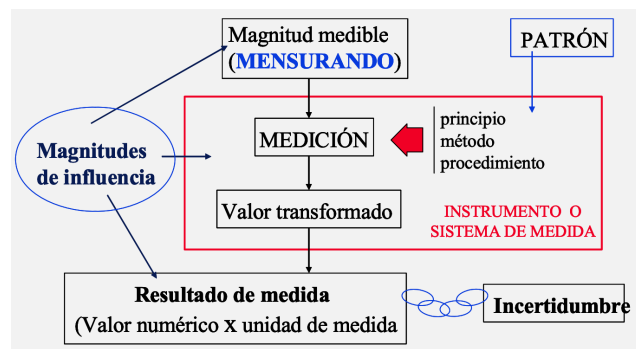


Fig. 65 Procedimiento de medida

- Establecer el valor a otorgar a la medida, pues todo el proceso puede resultar (Fig. 66) exacto y preciso, o solo exacto, o solo preciso, o ninguna de ambas.

Quando se utiliza un instrumento medidor, debe estar calibrado. Esto significa que se conoce qué *incertidumbre* introduce en la medida por comparación con el patrón del Sistema Internacional.

Además de la incertidumbre del aparato, el procedimiento de medida puede verse afectado por *errores de medida*, que pueden ser:

- Errores *aleatorios*: disminuyen la precisión, o proximidad de las medidas en mediciones repetidas. Las frecuencias de medidas repetidas afectadas por errores aleatorios están bien descritas por la *distribución normal* (campana de GAUSS).
- Errores *sistemáticos*: introducen un *sesgo* que reduce la *exactitud* de la medida, es decir, que alejan el valor medio de todas las medidas del valor que podría considerarse como 'verdadero'.

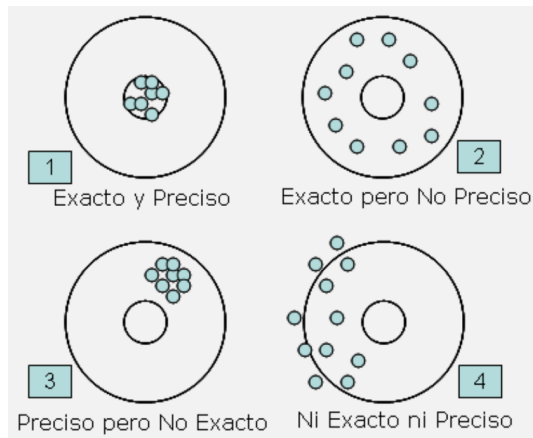


Fig. 66 Casos posibles de medidas de la misma magnitud y los mismos mensurandos, obtenidas con cuatro aparatos distintos.

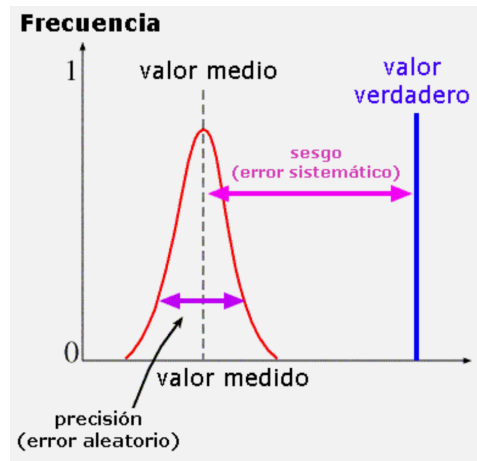


Fig. 67 Significado de *sesgo* y *precisión* al repetir la misma medida.