

DIVISIBILIDAD

ALAN REYES-FIGUEROA
TEORÍA DE NÚMEROS

(AULA 02) 07.JULIO.2025

Definición

Dados dos enteros $d, m \in \mathbb{Z}$ diremos que d **divide** a m o que m es **divisible** entre d , si existe $q \in \mathbb{Z}$ tal que $m = qd$, esto es $\frac{m}{d} \in \mathbb{Z}$ es un entero.

En ese caso, escribimos $d \mid m$, y diremos que m es un **múltiplo** de d , y que d es un **divisor** o **factor** de m .

Cuando d no divide a m escribimos $d \nmid m$.

Ejemplos: $5 \mid 10$, pero $10 \nmid 5$.

Como $0 = 0 \cdot n$ se sigue que $n \mid 0, \forall n \in \mathbb{Z}$. Por otro lado, si $0 \mid n$, entonces existe $q \in \mathbb{Z}$ tal que $n = q \cdot 0 = 0$, de modo que $0 \nmid n$ para $n \neq 0$. Para un entero fijo n , los múltiplos de n son $0, \pm n, \pm 2n, \dots$. Luego, no es difícil ver que entre n enteros consecutivos, siempre hay uno divisible entre n .

Propiedades Para todo $x, y, z, w \in \mathbb{Z}$, valen

- a) $x \mid 0, 1 \mid x, 0 \nmid x$ para $x \neq 0$; $x \mid x$ (reflexividad).
- b) $x \mid 1$, si y sólo si, $x = \pm 1$.
- c) $x \mid y, y \mid z \Rightarrow x \mid z$ (transitividad).
- d) $x \mid y, x \mid z \Rightarrow x \mid ay + bz$, para todo $a, b \in \mathbb{Z}$ (linealidad).
- e) Si $x \mid y$, entonces $y = 0$ ó $|x| \leq |y|$ (limitación).
- f) $x \mid y, x \mid y \pm z \Rightarrow x \mid z$.
- g) $x \mid y, y \mid x \Rightarrow |x| = |y|$ (antisimetría, a menos de signo).
- h) Si $x \mid y$ y $y \neq 0$, entonces $\frac{y}{x} \mid y$ (divisores vienen en pares).
- i) $x \mid y, z \mid w \Rightarrow xz \mid yw$.
- j) Si $z \neq 0$, entonces $x \mid y \Leftrightarrow xz \mid yz$.

Divisibilidad

Prueba: (a) Observe que $x = 1 \cdot x$, $0 = x \cdot 0$, $0 \mid x \Rightarrow x = q \cdot 0 = 0$; $x = x1$.

Para (b) $x \mid 1 \Leftrightarrow 1 = qx$, $x \in \mathbb{Z} \Leftrightarrow q = \pm 1$, y portanto $x = \pm 1$.

En los ítems (c) a (h), la condición $x \mid y$ se da, de modo que $y = kx$, para algún $k \in \mathbb{Z}$.

En (c) $y \mid z \Rightarrow z = ly \Rightarrow z = ly = l(kx) = (kl)x$, con $kl \in \mathbb{Z} \Rightarrow x \mid z$.

En (d) $x \mid z \Rightarrow z = lx \Rightarrow ay + bz = a(kx) + b(lx) = (ak + bl)x \Rightarrow x \mid ay + bz$.

En (e), suponga $y \neq 0$. Entonces $k \neq 0 \Rightarrow |k| \geq 1 \Rightarrow |y| = |kx| = |k| \cdot |x| \geq |x|$.

En (f), por (d) tenemos que $x \mid y$, $x \mid y \pm z \Rightarrow x \mid y - (y \pm z) = \pm z$.

En (g), de (e) se tiene que $x \mid y$, $y \mid x \Rightarrow |y| \geq |x| \geq |y| \Rightarrow |y| = |x|$.

En (h), si $y \neq 0$, entonces $x \mid y \Rightarrow y = kx = (\frac{y}{x})x$. Como $\frac{y}{x} \in \mathbb{Z} \Rightarrow \frac{y}{x} \mid y$.

En (i), $y = kx$, $w = lz \Rightarrow yw = (kx)(lz) = (kl)xz \Rightarrow xz \mid yw$.

Finalmente (j), (\Rightarrow) de (i) con $w = z$, se tiene que $x \mid y$, $z \mid z \Rightarrow xz \mid yz$. Para la recíproca (\Leftarrow) $xz \mid yz$, $z \neq 0 \Rightarrow yz = k(xz) = kxz$, $k \in \mathbb{Z} \Rightarrow y = kx \Rightarrow x \mid y$. \square

Comentarios:

- Las propiedades (a), (c) y (g), corresponden a la reflexividad, transitividad y antisimetría (a menos de signo) de la relación $|$.
Restricta a los naturales \mathbb{N} , la relación $|$ es un **orden parcial**.
- La propiedad (d) de linealidad sólo funciona para coeficientes en \mathbb{Z} .
- La propiedad (j) indica que en una relación de divisibilidad, podemos “cancelar” factores comunes (excepto 0).
- La (e), limitación, nos dice que el conjunto de divisores de un número entero n es finito. El número de divisores positivos de n es $\leq n$.
- La propiedad (h) nos indica que los divisores de n vienen en pares $(d, \frac{n}{d})$. **Obs!** No dice que los divisores d y $\frac{n}{d}$ son distintos.

Ejemplo

Ejemplo: Hallar todos los enteros positivos n tales que $2n^2 + 1 \mid n^3 + 9n - 17$.

Solución: Usamos varias de las propiedades de divisibilidad anteriores. Primero, observe que $(2n^2 + 1)n$ es un múltiplo de $2n^2 + 1$, de modo que $2n^2 + 1 \mid (2n^2 + 1)n = 2n^3 + n$.

Por otro lado, la hipótesis implica que $2n^2 + 1 \mid n^3 + 9n - 17$.

Combinando ambas relaciones de divisibilidad, obtenemos

$$2n^2 + 1 \mid (2n^3 + n) - 2(n^3 + 9n - 17) = 34 - 17n = 17(2 - n). \quad (1)$$

Usando ahora la propiedad de que todo entero divide a 0: $n \mid 0, \forall n \in \mathbb{Z}$, podemos obligar a que el lado derecho de esta divisibilidad sea 0, haciendo $n = 2$.

En particular, si sustituimos $n = 2$ en la relación del enunciado, obtenemos $9 \mid 8 + 18 - 17 = 9$, la cual es verdadera. De ahí que $n = 2$ es una solución.

Ejemplo

Para hallar más soluciones, usamos ahora la ley de limitación en la relación de divisibilidad (1). Así

$$2n^2 + 1 \leq |34 - 17n|.$$

Tenemos dos casos, atendiendo al signo de la cantidad $34 - 17n$.

- Caso 1: $34 - 17n \geq 0$. En este caso, tendríamos $2 \geq n$, de modo que sólo debemos verificar los casos $n = 1$ y $n = 2$. Ya vimos que $n = 2$ es solución. Basta verificar la divisibilidad en el enunciado para $n = 1$. En este caso, $3 \nmid 1 + 9 - 17 = -7$, de modo que $n = 1$ no cumple.
- Caso 2: $34 - 17n \leq 0$. Este caso corresponde a $n \geq 2$. En este segundo caso, la ley de limitación arriba se reduce a

$$2n^2 + 1 \leq |34 - 17n| = 17n - 34.$$

Escribiendo todo de un lado de la desigualdad, obtenemos

$$2n^2 - 17n + 35 \leq 0.$$

Ejemplo

La ecuación asociada a la desigualdad anterior tiene raíces

$$2n^2 - 17n + 35 = 0 \quad n = \frac{17 \pm \sqrt{289 - 4(2)(35)}}{2(2)} = \frac{17 \pm \sqrt{289 - 280}}{4} = \frac{17 \pm 3}{4} = \frac{7}{2}, 5.$$

Para resolver la desigualdad, consideramos los intervalos entre estas raíces:

| Intervalo | Representante n | Signo de $2n^2 - 17n + 35$ | ¿Es $2n^2 - 17n + 35 \leq 0$? |
|--------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------------|
| $(2, \frac{7}{2})$ | 3 | + | no |
| $(\frac{7}{2}, 5)$ | 4 | - | sí |
| $[5, 5]$ | 5 | 0 | sí |
| $(5, \infty)$ | 6 | + | no |

De allí, sólo los enteros positivos $n = 4$ y $n = 5$ cumplen la ley de limitación, y son los únicos que podrían cumplir con la divisibilidad del enunciado. Verificando para cada uno, 4 no cumple, mientras que $n = 5$ satisface $51 \mid 153$. De allí que $n = 5$ también es solución.

Así, las únicas soluciones enteras positivas son $n = 2$ y $n = 5$. \square

Ejercicio:

100 estudiantes aburridos se turnan para caminar por un pasillo que contiene una fila de casilleros cerrados, numerados del 1 al 100. El primer estudiante abre todos los casilleros; el segundo alumno cierra todos los casilleros numerados 2, 4, 6, 8, \dots , 98, 100; el tercer alumno opera en los casilleros numerados 3, 6, 9, \dots , 99: si un casillero estaba cerrado, lo abre, y si un casillero estaba abierto, lo cierra. Para el k -ésimo alumno, éste trabaja en los casilleros numerados por múltiplos de k : si un el casillero estaba cerrado, lo abre, y si estaba abierto, lo cierra.

¿Cuál es el número de casilleros que permanecen abiertos después de que todos los estudiantes terminan sus caminatas?

Otros ejercicios.

Ejemplo: Pruebe que para todo entero positivo n , la fracción $\frac{21n+4}{14n+3}$ es irreducible.

Ejemplo: Mostrar que para todo entero n :

- a) $n^5 - 5n^3 + 4n$ es divisible entre 120.
- b) $n^2 + 3n + 5$ no es divisible por 121.

Ejemplo: Encontrar todos los enteros positivos n para los cuales el número obtenido de n al borrar el último dígito, es un divisor de n .

Ejemplo: ¿Cuál es el mayor entero positivo x tal que $23^x \mid 2021!$?