

Teoría de Números

Jaime Sebastian Chavarria Fuertes

September 30, 2025

1 Aritmética Modular

1.1 Teoría de Congruencias

Una congruencia es una relación de equivalencia entre enteros que se basa en sus restos al dividirse por un número dado.

Definición 1.1 (Congruencia). *Decimos que dos números enteros a y b son congruentes módulo n , y escribimos $a \equiv b \pmod{n}$, que significa que:*

$$a \% n == b \% n$$

Tambien podemos decir que si $a \equiv b \pmod{n}$ entonces se puede decir que:

$$n | (a - b)$$

Es decir que n divide a: $(a - b)$

Ejemplo 1.2. $17 \equiv 2 \pmod{5}$, ya que $17 - 2 = 15$ es divisible por 5.

Propiedades:

- Si $a \equiv b \pmod{n}$, entonces $a + x \equiv b + x \pmod{n}$.
- Si $a \equiv b \pmod{n}$, entonces $a \cdot x \equiv b \cdot x \pmod{n}$.
- Si $a \equiv b \pmod{n}$ y $x \equiv y \pmod{n}$, entonces $a + x \equiv b + y \pmod{n}$.
- $a^n \equiv b^n \pmod{m} \forall n \in \mathbb{N}$
- Dispuesto a completar y/o agregar cosas

2 Fibonacci

La secuencia tiene un monton de propiedades interesantes. Algunas de ellas son:

Teorema 2.1 (Identidad de Cassini).

$$F_{n-1}F_{n+1} - F_n^2 = (-1)^n$$

Teorema 2.2 (Regla de adición).

$$F_{n+k} = F_k F_{n+1} + F_{k-1} F_n$$

Teorema 2.3 (Aplicando la regla previa a $k = n$ conseguimos:).

$$F_{2n} = F_n(F_{n+1} + F_{n-1})$$

Teorema 2.4. *Con la definicion anterior se puede probar que para cualquier entero positivo k , F_{nk} es multiplo de F_n*

Teorema 2.5. *El inverso del anterior tambien es verdad, si F_m es multiplo de F_n entonces m es multiplo de n*

Teorema 2.6 (Identidad del GCD).

$$GCD(F_m, F_n) = F_{GCD(m,n)}$$

- Solo para saber, los numeros de Fibonacci son el peor caso en la entrada del gcd extendido

2.1 Formula de Binet

$$F_n = \frac{\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n - \left(\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right)^n}{\sqrt{5}}$$

Podemos deducir la formula siguiente, redondeando hacia el entero mas proximo:

$$F_n = \frac{\left(\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right)^n}{\sqrt{5}}$$

Como estas dos formulas requieren alta precision casi no tienen uso practico.

2.2 Calculando el F en $O(\log n)$

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^n = \begin{pmatrix} F_{n+1} & F_n \\ F_n & F_{n-1} \end{pmatrix}$$

El codigo que lo implementa esta en la pagina xxx

Expandiendo la matriz para $n = 2k$

$$\begin{pmatrix} F_{2k+1} & F_{2k} \\ F_{2k} & F_{2k-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}^{2k} = \begin{pmatrix} F_{k+1} & F_k \\ F_k & F_{k-1} \end{pmatrix}^2$$

Encontramos estas ecuaciones simples:

$$F_{2k+1} = F_{k+1}^2 + F_k^2 \tag{1}$$

$$F_{2k} = F_k(F_{k+1} + F_{k-1}) = F_k(2F_{k+1} - F_k) \tag{2}$$

Gracias a estas ecuaciones tenemos el codigo en la pagina xx para calcular el fibonacci en tiempo logaritmico

2.3 Suma de $F_0 + F_1 + \dots + F_n$

La suma resulta en $F_{n+2} - 1$

2.4 Es Fibonacci?

Un número x pertenece a la secuencia de fibonacci si y solo si alguna (o ambas) expresiones siguientes son cuadrado(s) perfecto(s):

$$5x^2 + 4$$

$$5x^2 - 4$$

3 Funciones Aritméticas

Las funciones aritméticas son aquellas que se definen en los números enteros y tienen aplicaciones importantes en teoría de números.

3.1 Función ϕ de Euler

La función $\phi(n)$ cuenta el número de enteros positivos menores o iguales que n que son coprimos con n .

Dos números son "coprimos" cuando el $\gcd(a, b) = 1$

La función ϕ hasta 21:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$\phi(n)$	1	1	2	2	4	2	6	4	6	4	10	4	12	6	8	8	16	6	18	8	12

3.1.1 Propiedades

- Si p_1, p_2, \dots, p_k son los factores primos distintos de n , entonces:

$$\phi(n) = n \left(1 - \frac{1}{p_1}\right) \left(1 - \frac{1}{p_2}\right) \dots \left(1 - \frac{1}{p_k}\right)$$

- Si p es un número primo, entonces el $\gcd(p, q) = 1$ para todo $1 \leq q < p$. Entonces tenemos:

$$\phi(p) = p - 1.$$

- Si p es un número primo y $k \geq 1$ entonces hay exactamente $\frac{p^k}{p}$ entre 1 y p^k que son divisibles por p . Lo que nos da:

$$\phi(p^k) = p^k - p^{k-1}.$$

- Si a y b son coprimos, entonces:

$$\phi(ab) = \phi(a) \cdot \phi(b).$$

- De la propiedad de arriba se extiende que, si a es un número con una factorización prima:

$$a = p_1^{e_1} \cdot p_2^{e_2} \cdot \dots \cdot p_k^{e_k}$$

donde p_1, p_2, \dots, p_k son primos distintos y e_1, e_2, \dots, e_k son exponentes enteros positivos, entonces la función $\phi(a)$ se calcula como:

$$\phi(a) = \phi(p_1)^{e_1} \cdot \phi(p_2)^{e_2} \cdot \dots \cdot \phi(p_k)^{e_k}$$

Ojo, si ya tienes la criba con los primos, facil puedes precalcular la funcion phi de un numero, entonces con la factorizacion del numero en $\log(n)$ podemos facil tener el resultado del la funcion ϕ

- Esta propiedad interesante fue obtenida por Gauss:

$$\sum_{d|n} \phi(d) = n$$

Es decir la suma de todos los divisores de n .

Por ejemplo, los divisores de 10 son 1, 2, 5, 10. Entonces: $\phi(1) + \phi(2) + \phi(5) + \phi(10) = 1 + 1 + 4 + 4 = 10$

- Para $x \geq 3$ el valor de $\phi(x)$ siempre sera par, para $x = 1$ y $x = 2$ el valor de $\phi(x)$ es 1
- Por consecuencia para $x \geq 3$ el valor de $\phi(x)$ no sera primo. **(Comprobado solo hasta $x \leq 10^9$)**

3.1.2 Aplicacion

La propiedad mas famosa e importante es expresada en **el teorema de Euler**:

$$a^{\phi(m)} \equiv 1 \pmod{m} \quad \text{Si } a \text{ y } m \text{ son coprimos.}$$

Cuando m es primo, el teorema de Euler se convierte en el **pequeno teorema de Fermat**

$$a^{m-1} \equiv 1 \pmod{m}$$

El teorema de euler tiene aplicaciones practicas como **calcular el inverso multiplicativo modular**

Como inmediata consecuencia de esto sabemos que:

$$a^n \equiv a^{n \bmod \phi(m)} \pmod{m}$$

3.1.3 Exponenciacion x^y para un y demasaido grande

$$x^n \equiv x^{\phi(m) + [n \bmod \phi(m)]} \pmod{m}$$

3.1.4 Teoría de Grupos

$\phi(n)$ es el orden del grupo multiplicativo módulo n , denotado como $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^\times$. Este es el grupo de unidades (elementos con inversos multiplicativos). Los elementos con inversos multiplicativos son precisamente aquellos coprimos con n .

****El orden multiplicativo de un elemento a módulo n , denotado como $\text{ord}_n(a)$, es el menor entero positivo $k > 0$ tal que:****

$$a^k \equiv 1 \pmod{n}.$$

$\text{ord}_n(a)$ es el tamaño del subgrupo generado por a . Por el Teorema de Lagrange, el orden multiplicativo de cualquier a debe dividir a $\phi(n)$.

Si el orden multiplicativo de a es exactamente $\phi(n)$ (el máximo posible), entonces a es una raíz primitiva y el grupo es cíclico por definición.

3.2 Suma y cantidad de divisores

3.2.1 Cantidad de divisores

Si la factorización de un número n es $p_1^{e_1} \cdot p_2^{e_2} \cdots p_k^{e_k}$ donde p_i son primos distintos, entonces el número de divisores es:

$$d(n) = (e_1 + 1) \cdot (e_2 + 1) \cdots (e_k + 1)$$

4 Bitmasks

4.1 Bitwise Identities

- $x + y = (x \oplus y) + 2 \cdot (x \& y)$
- $x \oplus y = (x | y) - (x \& y)$
- $\sim x = -x - 1$ (complemento a dos)
- $(x \oplus y) \oplus y = x$
- $x \oplus x = 0$
- $x \& (x - 1)$ borra el bit más bajo prendido de x
- $x \& (-x)$ aísla el bit más bajo prendido
- x es potencia de 2 $\iff x \& (x - 1) = 0$
- `__builtin_popcount(x)` cuenta los bits prendidos en x
- $x \% 2^k = x \& (2^k - 1)$

4.2 Identidades básicas:

- $x + y = (x \oplus y) + 2 \cdot (x \& y)$
- $x \oplus y = (x \mid y) - (x \& y)$
- $\sim x = -x - 1$
- $(x \oplus y) \oplus y = x$
- $x \oplus x = 0$
- $x \oplus 0 = x$

4.3 Propiedades de XOR

- XOR es asociativo: $(a \oplus b) \oplus c = a \oplus (b \oplus c)$
- XOR es conmutativo: $a \oplus b = b \oplus a$
- $a \oplus a = 0$ y $a \oplus 0 = a$
- Si $a \oplus b = c$ entonces $a = b \oplus c$

4.4 Bits útiles para manipulación

- $x \& (x - 1)$: borra el bit más bajo prendido
- $x \& -x$: aísla el bit más bajo prendido
- $x \mid (x - 1)$: prende todos los bits a la derecha del más bajo prendido
- x es potencia de dos $\iff x \& (x - 1) = 0$
- $x \% 2^k = x \& (2^k - 1)$
- $x \uparrow 1$ (o $x \ll 1$): multiplica por 2
- $x \downarrow 1$ (o $x \gg 1$): divide por 2 (sin signo)

4.5 Conteo de bits y máscaras

- `__builtin_popcount(x)`: número de bits prendidos
- `__builtin_ctz(x)`: cantidad de ceros a la derecha (trailing zeros)
- `__builtin_clz(x)`: cantidad de ceros a la izquierda (leading zeros)
- Total de subconjuntos de una máscara x : $2^{\text{popcount}(x)}$
- Recorrer todos los subconjuntos de x :

```
for (int sub = x; sub; sub = (sub - 1) & x)
    // usar sub
```

4.6 Extra (interesante para DP o teoría de bits)

- $(x \oplus y) + 2 \cdot (x \& y) = x + y$
- Para todo x , $x \oplus (x - 1)$ tiene todos los bits a la derecha del más alto en 1

5 Grafos

5.1 Shortest paths

Un camino $s \rightarrow \dots \rightarrow u \rightarrow v$ es mínimo \iff

$$dist_u + w(u, v) = dist_v$$

6 Operaciones asociativas

Operación	Ejemplo	Asociativa	Idempotente
Suma $(a + b)$	$(1 + 2) + 3 = 1 + (2 + 3)$	Sí	No
Producto $(a \cdot b)$	$(2 \cdot 3) \cdot 4 = 2 \cdot (3 \cdot 4)$	Sí	No
Resta $(a - b)$	$(5 - 3) - 2 \neq 5 - (3 - 2)$	No	No
División (a/b)	$(12/6)/2 \neq 12/(6/2)$	No	No
Exponenciación (a^b)	$(2^3)^2 \neq 2^{(3^2)}$	No	No
Mínimo / Máximo	$\max(\max(a, b), c) = \max(a, \max(b, c))$	Sí	Sí
MCD $\gcd(a, b)$	$\gcd(\gcd(12, 18), 6) = 6$	Sí	Sí
MCM $\text{lcm}(a, b)$	$\text{lcm}(\text{lcm}(2, 3), 6)$	Sí	No
XOR $(a \oplus b)$	$(a \oplus b) \oplus c = a \oplus (b \oplus c)$	Sí	No
AND bit a bit $(a \& b)$	$(a \& b) \& c = a \& (b \& c)$	Sí	Sí
OR bit a bit $(a \mid b)$	$(a \mid b) \mid c = a \mid (b \mid c)$	Sí	Sí
Unión de conjuntos	$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$	Sí	Sí
Intersección de conjuntos	$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$	Sí	Sí
Diferencia de conjuntos $(A - B)$	$(A - B) - C \neq A - (B - C)$	No	No
Concatenación de strings	$(ab)c = a(bc)$	Sí	No
Promedio $\frac{a+b}{2}$	$\frac{(a+b)}{2}$ agrupado cambia	No	No
Multiplicación de matrices	$(AB)C = A(BC)$	Sí	No

7 trailing ceros

$$\text{ceros}(n!) = \left\lfloor \frac{n}{5} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{5^2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{5^3} \right\rfloor + \dots$$

La idea es que los ceros al final de un factorial provienen de los factores $10 = 2 \cdot 5$. Como los números pares aportan más factores de 2 que de 5, el número de ceros está determinado únicamente por la cantidad de veces que aparece el factor 5 en la factorización de $n!$. Por eso se suman todos los múltiplos de 5, de 25, de 125, etc.

$$e_p(n!) = \left\lfloor \frac{n}{p} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{p^2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{n}{p^3} \right\rfloor + \dots$$

Más generalmente, la cantidad de veces que un primo p aparece en la factorización de $n!$ se obtiene sumando los múltiplos de p , de p^2 , de p^3 , y así sucesivamente.

Ejemplo con un primo:

Si $n = 100$ y $p = 2$:

$$\left\lfloor \frac{100}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{100}{4} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{100}{8} \right\rfloor + \dots = 50 + 25 + 12 + 6 + 3 + 1 = 97$$

Por lo tanto:

$$e_2(100!) = 97$$

es decir, el número 2 aparece 97 veces en la factorización prima de $100!$.

Ejemplo con un número compuesto:

Si se quiere calcular cuántas veces aparece un número compuesto k en $n!$, primero se factoriza:

$$k = p_1^{a_1} \cdot p_2^{a_2} \cdot \dots \cdot p_m^{a_m}$$

Luego, para cada primo p_i , se calcula $e_{p_i}(n!)$. La cantidad de veces que aparece k como factor de $n!$ es:

$$\min_i \left\lfloor \frac{e_{p_i}(n!)}{a_i} \right\rfloor$$

Ejemplo con $k = 12$:

$$12 = 2^2 \cdot 3$$

Ya sabemos que:

$$e_2(100!) = 97, \quad e_3(100!) = 48$$

Entonces:

$$\left\lfloor \frac{97}{2} \right\rfloor = 48, \quad \left\lfloor \frac{48}{1} \right\rfloor = 48$$

Por lo tanto:

$$12^{48} \mid 100!, \quad 12^{49} \nmid 100!$$