

Apuntes Discretas

Oskar Denis Siodmok

14 de noviembre de 2020

Parte I

Aritmética modular

1. Conceptos básicos

Definición 1.1.

$$a \equiv b \pmod{n} \iff a - b = n \wedge a \pmod{n} = b \pmod{n}, n > 1$$

Teorema 1.1.

$$\forall a \in \mathbb{Z} \exists b \in \{0, 1, \dots, n-1\} \subseteq \mathbb{Z} / a \equiv b \pmod{n}, n \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$$

Definición 1.2.

$$[a]_n = \{b \in \mathbb{Z} : a \equiv b \pmod{n}\}$$

Observación 1.1. Se cumple, debido a la propiedad transitiva:

$$a \equiv b \pmod{n} \iff [a]_n = [b]_n$$

Definición 1.3.

$$\mathbb{Z}_n = \{[0]_n, [1]_n, [2]_n, \dots, [n-1]_n\}$$

Observación 1.2.

$$[a]_n \longrightarrow a \equiv a + n \equiv a + 2n \equiv \dots \pmod{n} \implies$$

Se puede aplicar la propiedad transitiva para transformar congruencias en otras equivalentes más sencillas

Por ejemplo:

$$x \equiv 17 \pmod{11} \iff x \equiv 17 - 11 \pmod{11} \iff x \equiv 17 \pmod{11} \iff x \equiv 6 \pmod{11}$$

Siendo ésta última ecuación la solución para x .

Observación 1.3.

$$a + c \equiv b + d \pmod{n} \iff \left\{ \begin{array}{l} a \equiv b \pmod{n} \\ c \equiv d \pmod{n} \end{array} \right\} \implies ac \equiv bd \pmod{n}$$

Demostración:

$$\left. \begin{array}{l} a - b = kn \\ c - d = ln \end{array} \right\} a + c - b - d = kn + ln = n(k + l) \implies a + c \equiv b + d \pmod{n}$$

$$\left. \begin{array}{l} a - b = kn; ac - bc = kn \\ c - d = ln; cb - db = ln \end{array} \right\} ac + cb - bc - db = kn + ln = n(k + l) = ac - db \implies ac \equiv bd \pmod{n}$$

Definición 1.4. Debido a estas observaciones, se define la suma y producto de clases módulo n como:

$$\begin{aligned} [a]_n + [b]_n &= [a + b]_n \\ [a]_n [b]_n &= [ab]_n \end{aligned}$$

2. Congruencias lineales

Definición 2.1. Se define una congruencia lineal como:

$$ax + b \equiv c \pmod{n}; a, b, c \in \mathbb{Z}$$

Teorema 2.1.

$$\text{mcd}(a, n) = 1 \iff \exists b / ab \equiv 1 \pmod{n}$$

Se dice que $\exists [a]_n^{-1}$ para el producto en \mathbb{Z}_n

Definición 2.2.

$$\begin{aligned} \phi : \mathbb{Z}^+ &\longrightarrow \mathbb{Z}^+ \\ n &\longmapsto \phi(n) = \#\{m \in \mathbb{N} : \text{mcd}(m, n) = 1, m \leq n\} \\ &= \#\{m \in \mathbb{N} : m \text{ coprimo con } n, m \leq n\} \end{aligned}$$

Teorema 2.2.

$$\begin{aligned} \phi(p) &= p - 1 \iff p \in \text{primos} \\ \phi(p^\alpha) &= p^\alpha - p^{\alpha-1} \forall \alpha \in \mathbb{N} \iff p \in \text{primos} \\ \phi(mn) &= \phi(m)\phi(n) \forall m, n \in \mathbb{Z}^+ \iff \text{mcd}(m, n) = 1 \\ n &= p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_k^{\alpha_k}, n \in \mathbb{Z}^+ \implies \phi(n) = \prod_{i=1}^k (p_i^{\alpha_i} - p_i^{\alpha_i-1}) \end{aligned}$$

Donde $p_i^{\alpha_i}$ hace referencia a la descomposición en primos de $n \in \mathbb{Z}^+$

Teorema 2.3 (Euler-Fermat).

$$\text{mcd}(a, n) = 1, a, n \in \mathbb{Z}, n > 1 \longrightarrow a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n} \longrightarrow [a]_n^{-1} = [a^{\phi(n)-1}]_n$$

3. Sistemas de congruencias

Teorema 3.1 (Teorema chino del resto).

$$\begin{aligned} \forall n_1, n_2, \dots, n_k \in \mathbb{Z}^+ \setminus \{1\} \\ \forall a_1, a_2, \dots, a_k \in \mathbb{Z} \end{aligned} :$$

$$\exists x / \left\{ \begin{array}{l} x \equiv a_1 \pmod{n_1} \\ x \equiv a_2 \pmod{n_2} \\ \vdots \\ x \equiv a_k \pmod{n_k} \end{array} \right\} \iff \text{mcd}(n_i, n_j) = 1, \forall i, j \in \{1, \dots, k\} \subseteq \mathbb{N}, i \neq j$$

Además:

$$x, x' \text{ son soluciones} \implies x \equiv x' \pmod{\prod_{i=1}^k n_i}$$

Teorema 3.2.

$$\begin{aligned} \forall n_1, n_2 \in \mathbb{Z}^+ \setminus \{1\} \\ \forall a_1, a_2 \in \mathbb{Z} \end{aligned} : \exists x / \left\{ \begin{array}{l} x \equiv a_1 \pmod{n_1} \\ x \equiv a_2 \pmod{n_2} \end{array} \right\} \iff a_1 \equiv a_2 \pmod{\text{mcd}(n_1, n_2)}$$

Parte II

Combinatoria

4. Conteo de conjuntos

Observación 4.1. $|A| < \infty > |B| :$

1. $|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B|.$
2. $B \subseteq A \implies |B| \leq |A|, |A \setminus B| = |A| - |B|.$
3. $|A \times B| = |A||B|.$
4. Principio de Palomar: $|A| > |B| \implies \nexists f : B \rightarrow A / f \text{ es inyectiva}.$

Observación 4.2. Las observaciones 4.1.2 y 4.2.4 se pueden generalizar a:

1. $|A \cup B \cup C| = |A| + |B| + |C| - |A \cap B| - |A \cap C| - |B \cap C| + |A \cap B \cap C|$ (imposible de generalizar).
2. $|\prod_{i=1}^{|A|} A_i| = \prod_{i=1}^{|A|} |A_i|$

5. Variaciones

Definición 5.1. $V_{m,n}$: Variación ordinaria sin repetición de m elementos tomados de n en n ($m \geq n$).

$$V_{m,n} = \frac{m!}{(m-n)!} = \prod_{i=0}^{n-1} (m-i)$$

- No entran todos los elementos.
- Importa el orden.
- No se repiten los elementos.

Definición 5.2. $VR_{m,n}$: Variación ordinaria con repetición de m elementos tomados de n en n .

$$VR_{m,n} = m^n$$

- Pueden entrar todos los elementos si $m \leq n$.
- Importa el orden.
- Se repiten los elementos.

6. Permutaciones

Definición 6.1. Las permutaciones son un caso particular de variaciones donde $m = n$.

Definición 6.2. P_n : Permutación de n elementos.

$$P_n = n!$$

- Entran todos los elementos.
- Importa el orden.
- No se repiten los elementos.

Definición 6.3. PC_n : Permutación circular. Los elementos se repetirán de forma cíclica, por lo cual, por ejemplo, la ordenación 1234 sería equivalente a 3412.

$$PC_n = (n-1)!$$

Definición 6.4. $PR_n^{n_1, n_2, \dots, n_s}$: Permutaciones con repeticiones de n elementos, donde hay s elementos que se repiten con $n_i > 1 \forall i$.

$$PR_n^{n_1, n_2, \dots, n_s} = \frac{n!}{\prod_{i=1}^s n_i!}$$

7. Combinaciones

Definición 7.1. Las combinaciones son variaciones donde el orden no importa.

Definición 7.2. $C_{m,n}$: Combinación de m elementos tomados de n en n ($m \geq n$).

$$C_{m,n} = \binom{m}{n} = \frac{m!}{n!(m-n)!}$$

- No entran todos los elementos.
- No importa el orden.
- No se repiten los elementos.

Definición 7.3. $CR_{m,n}$: Combinación con repetición de m elementos tomados de n en n ($m \geq n$).

$$CR_{m,n} = \binom{m+n-1}{n}$$

Parte III

Teoría de grafos

8. Grafos, digrafos y multigrafos

Definición 8.1. Un grafo simple se denota como un par $G = (E, V)$ donde E se refiere a las aristas y V a los vértices. Las aristas se definen como:

$$E \subseteq \{\{u, v\} : u, v \in V, u \neq v\}$$

Definición 8.2. Un multigrafo o grafo no dirigido $G = (V, E)$ tiene $E = \{e_i\}_{i \in I}$, que denota una familia, no un conjunto. Además, $e_i = \{u_i, v_i\}$, $(u_i, v_i) \in V \times V \forall i \in I$.

Definición 8.3. Un digrafo $G = (V, E)$ tiene $E \subseteq \{(a, b) \in V \times V : a \neq b\}$, o sea, las aristas son ordenadas y los pares indican la dirección de estas.

Definición 8.4. Un multigrafo o grafo dirigido $G = (V, E)$ tiene $E = \{e_i\}_{i \in I}$ donde $e_i \in V \times V$.

Definición 8.5. u adyacente a $v \iff \{u, v\} \in E$, donde $G = (V, E)$. Entonces, $e = \{u, v\}$ conecta u y v quiere decir que e incidente con u y v y que u y v son los extremos de la arista e .

Definición 8.6. $gr(u)$ donde $u \in V$ se refiere al número de aristas a las que pertenece u . $gr(u) = 0 \implies u$ es un vértice aislado.

Teorema 8.1. Para $G = (V, E)$ no dirigido:

$$\sum_{v \in V} gr(v) = 2|E|$$

Definición 8.7. En un $G = (V, E)$ dirigido, para $(u, v) \in E$: u es el vértice inicial de (u, v) y v el final. Sabiendo esto, se define el grado de entrada $gr^+(u)$ como el número de aristas con vértice final u . $gr^-(u)$ será el grado de salida y se referirá al número de aristas con u como vértice inicial.