



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE FÍSICA Y MATEMÁTICA

ÁLGEBRA MODERNA I

Apuntes Álgebra Moderna I

Profesor:

Escobar García

César Alberto

Alumnos:

Ramírez León Christian Yael

Silva Sierra Joshua Joaquín

5FM1

22 de diciembre de 2025

Índice general

1. Conceptos Previos	1
1.1. Divisibilidad	1
1.2. Cardinalidad de conjuntos	2
1.3. Enteros Módulo n	4
1.4. Función φ de Euler	5
2. Grupos	7
2.1. Grupos	7

CAPÍTULO 1

Conceptos Previos

1.1. Divisibilidad

Definición 1.1.1 (Divisibilidad). Sean $a, b \in \mathbb{Z}$, con $a \neq 0$, se dice que $a|b$ si $\exists k \in \mathbb{Z}$ tal que $b = ak$.

Definición 1.1.2 (Máximo Común Divisor). Sea $a, b \in \mathbb{Z}$, al menos uno distinto de cero, definimos a $d \in \mathbb{Z}$ un máximo común divisor de a y b , denotado por (a, b) , si cumple:

- I) $d > 0$.
- II) $d|a$ y $d|b$.
- III) Si $c|a$ y $c|b$, entonces $c|d$.

Proposición 1.1.1 (Propiedades de la Divisibilidad). Sean $a, b, c \in \mathbb{Z}$, con $a, b \neq 0$, entonces:

- I) Si $a|b$ y $b|c$, entonces $a|c$.
- II) Si $a|b$ y $a|c$, entonces $a|(b + c)$.
- III) Si $a|b$, entonces $a|bk$ para todo $k \in \mathbb{Z}$.
- IV) Si $a|b$ y $b \neq 0$, entonces $|a| \leq |b|$.
- V) Si $a|b$ y $b|a$, entonces $a = \pm b$.
- VI) Si $a|b$, entonces $(a, b) = |a|$.
- VII) Si $c|a$ y $c|b$, entonces $c = ax + by$ para algunos $x, y \in \mathbb{Z}$.

Proposición 1.1.2. Sea $a, b \in \mathbb{Z}$, al menos uno distinto de cero, entonces existe un único máximo común divisor de a y b .

Teorema 1.1.1 (Algoritmo de la división). Sean $a, b \in \mathbb{Z}$, con $b > 0$, entonces existen únicos $q, r \in \mathbb{Z}$ tales que:

$$a = bq + r, \quad 0 \leq r < |b|.$$

1.2. Cardinalidad de conjuntos

Dado un conjunto A , se denotará su cardinalidad (número de elementos) como $|A|$. Si A es un conjunto finito, entonces $|A|$ es un número natural. Si A es infinito, entonces $|A| = \infty$.

Observación 1.1. Sean A, B , conjuntos finitos, con $B \subseteq A$. Entonces:

$$|A \setminus B| = |A| - |B|$$

En efecto, basta notar que $B \cup (A \setminus B) = A$ y que $B \cap (A \setminus B) = \emptyset$, luego $|A| = |B \cup (A \setminus B)| = |B| + |A \setminus B|$, así $|A \setminus B| = |A| - |B|$. \square

Observación 1.2. Sean A y B dos conjuntos finitos, entonces:

$$|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B|$$

En efecto, Sean A y B conjuntos finitos, note que:

$$A \cup B = (A \setminus (A \cap B)) \cup (B \setminus (A \cap B)) \cup (A \cap B)$$

Además: $(A \setminus (A \cap B))$, $(B \setminus (A \cap B))$, $(A \cap B)$, son disjuntos, más aún:

$$\begin{aligned} |A \setminus (A \cap B)| &= |A| - |A \cap B| \\ |B \setminus (A \cap B)| &= |B| - |A \cap B| \end{aligned}$$

Así:

$$\begin{aligned} |A \cup B| &= |A \setminus (A \cap B)| + |B \setminus (A \cap B)| + |A \cap B| \\ &= |A| - |A \cap B| + |B| - |A \cap B| + |A \cap B| \\ &= |A| + |B| - |A \cap B| \end{aligned}$$

\square

Proposición 1.2.1 (Principio de inclusión exclusión). Sean A_1, \dots, A_n conjuntos finitos, se tiene:

$$\left| \bigcup_{i=1}^n A_i \right| = \sum_{i=1}^n |A_i| - \sum_{1 \leq i_1 < i_2 \leq n} |A_{i_1} \cap A_{i_2}| + \dots + (-1)^{n-1} |A_1 \cap \dots \cap A_n|$$

Observación 1.3. Suponga que C_1 es la condición que cumplen los elementos A y C_2 los de B , i.e.:

$$A = \{x \in \Omega : x \text{ cumple } C_1\}$$

$$B = \{x \in \Omega : x \text{ cumple } C_2\}$$

Denotemos $N(C_i)$ a la cantidad de elementos que cumplen C_i , $N(C_1, C_2)$ a los que cumplen ambas, $N(\bar{C}_i)$ a los que no cumplen y $N(\bar{C}_1, \bar{C}_2)$ los que no cumplen C_1 ni C_2 , entonces:

$$N(\bar{C}_1, \bar{C}_2) = |\Omega| - (N(C_1) + N(C_2) - N(C_1, C_2))$$

En efecto, Note que:

$$\begin{aligned} N(\bar{C}_1, \bar{C}_2) &= |A^c \cap B^c| = |(A \cup B)^c| = |\Omega \setminus (A \cup B)| = |\Omega| - |A \cup B| \\ &= |\Omega| - (|A| + |B| - |A \cap B|) \\ &= |\Omega| - (N(C_1) + N(C_2) - N(C_1, C_2)) \end{aligned}$$

□

Ejemplo 1.1. Sea $\Omega = \{x \in \mathbb{Z} : 1 \leq x \leq 1000\}$ ¿Cuántos enteros de estos no son divisibles por 3 o 5?

Sol. Consideremos:

$C_1 : x$ sea divisible por 3

$C_2 : x$ sea divisible por 5

Así $N(C_1) = 333$, $N(C_2) = 200$, $N(C_1, C_2) = 66$.

Luego:

$$\begin{aligned} N(\bar{C}_1, \bar{C}_2) &= |\Omega| - (N(C_1) + N(C_2) - N(C_1, C_2)) \\ &= 1000 - (333 + 200 - 66) \\ &= 533 \end{aligned}$$

Sea A_1, \dots, A_n una colección finita de conjuntos finitos, definidos:

$$A_i = \{x \in \Omega : x \text{ cumpla } C_i\}, \quad C_i \text{ condición.}$$

Definamos de este modo:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= N(C_1) + \cdots + N(C_n) \\
 S_2 &= N(C_1, C_2) + \cdots + N(C_1, C_n) + N(C_2, C_3) + \cdots + N(C_{n-1}, C_n) \\
 &\vdots \\
 S_i &= \sum_{1 \leq j_1 < \cdots < j_i \leq n} N(C_{j_1}, \dots, C_{j_i}) \\
 &\vdots \\
 S_n &= N(C_1, \dots, C_n)
 \end{aligned}$$

Por el principio de inclusión exclusión generalizado:

$$N(\bar{C}_1, \dots, \bar{C}_n) = |\Omega| - (S_1 - S_2 + \cdots + (-1)^{n-1} S_n)$$

1.3. Enteros Módulo n

Definición 1.3.1. Sea $n \in \mathbb{Z}$, $n > 1$, se define la relación de $a \sim b$ si y sólo si $n \mid (a - b)$, es decir, a es congruente con b módulo n .

Es fácil ver que esta es una relación de equivalencia en \mathbb{Z} . Ahora, definamos en el conjunto cociente (\mathbb{Z}/\sim) las siguientes operaciones:

$$\begin{aligned}
 \bar{a} + \bar{b} &= \overline{a + b} \\
 \bar{a} \cdot \bar{b} &= \overline{a \cdot b}
 \end{aligned}$$

Con $a, b \in \mathbb{Z}$. Entonces las operaciones están bien definidas, i.e., no dependen del representante de clase.

En efecto, sea $\bar{a} = \bar{a}_1$, $\bar{b} = \bar{b}_1 \iff a \sim a_1$ y $b \sim b_1 \iff n \mid (a - a_1) \wedge n \mid (b - b_1)$.

Esto implica:

$$n \mid (a - a_1) + (b - b_1) = (a + b) - (a_1 + b_1) \iff (a + b) \sim (a_1 + b_1) \iff \overline{a + b} = \overline{a_1 + b_1}$$

Análogamente para el producto.

□

Al conjunto de clases de equivalencia módulo n junto con las operaciones definidas se les denotará por $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ o \mathbb{Z}_n .

1.4. Función φ de Euler

Definición 1.4.1 (Función φ de Euler). *Definimos la función $\varphi : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ como:*

$$n \mapsto |\{a \in \mathbb{N} : (a, n) = 1 \wedge a \leq n\}|$$

Proposición 1.4.1. *Sean $p, q \in \mathbb{Z}^+$ primos distintos:*

- I) $\varphi(p) = p - 1$
- II) $\varphi(p^k) = p^{k-1}(p - 1), \quad k \in \mathbb{N}$
- III) $\varphi(p^k q^t) = \varphi(p^k) \cdot \varphi(q^t), \quad k, t \in \mathbb{N}$

Demostración. .

I) Es evidente.

II) Sea $\Omega = \{x \in \mathbb{N} : x \leq p^k\}$, sea $a \in \Omega$ tal que $(a, p^k) \neq 1$.

Así $(a, p) \neq 1$, más aún $a = pl$ para algún $l \in \mathbb{N}$. Luego, como $a \in \Omega$, $a = pl \leq p^k$, por lo cual $l \leq p^{k-1}$. De este modo:

$$|\{a \in \Omega : p \mid a\}| = |\{a \in \Omega : a = pl, l \in \mathbb{N}\}| = |\{l \in \mathbb{N} : l \leq p^{k-1}\}| = p^{k-1}$$

Ahora:

$$\begin{aligned} \varphi(p^k) &= |\{a \in \Omega : (a, p^k) = 1\}| \\ &= |\Omega| - |\{a \in \Omega : p \mid a\}| \\ &= p^k - p^{k-1} = p^{k-1}(p - 1) \end{aligned}$$

III) Consideremos $\Omega = \{x \in \mathbb{N} : x \leq p^k q^t, k, t \in \mathbb{N}\}$, $A = \{a \in \Omega : p \mid a\}$ y $B = \{b \in \Omega : q \mid b\}$.

Ahora $A \cap B = \{a \in \Omega : p \mid a \wedge q \mid a\}$. Note que de manera análoga a ii), tenemos:

$$|A| = p^{k-1} q^t, \quad |B| = p^k q^{t-1}$$

Por otro lado si $a \in A \cap B$, tenemos $p \mid a \wedge q \mid a \implies \exists l \in \mathbb{N}$ tal que $a = pql$. Además como $pql = a \leq p^k q^t$, se sigue que $l \leq p^{k-1} q^{t-1}$, por lo cual:

$$|A \cap B| = p^{k-1} q^{t-1}$$

Por último, sabemos que $\varphi(p^k q^t) = |\{a \in \Omega : (a, p^k q^t) = 1\}|$. Por la proposición 1.2.1 tenemos:

$$\begin{aligned}\varphi(p^k q^t) &= |\Omega| - (|A| + |B| - |A \cap B|) \\ &= p^k q^t - p^{k-1} q^t - p^k q^{t-1} + p^{k-1} q^{t-1} \\ &= q^t (p^k - p^{k-1}) - q^{t-1} (p^k - p^{k-1}) \\ &= (p^k - p^{k-1})(q^t - q^{t-1}) \\ &= [p^{k-1}(p - 1)][q^{t-1}(q - 1)] \\ &= \varphi(p^k) \cdot \varphi(q^t)\end{aligned}$$

□

Proposición 1.4.2. Sean $p_1, \dots, p_n \in \mathbb{N}$ primos distintos, sean $k_1, \dots, k_n \in \mathbb{N} \cup \{0\}$:

$$\begin{aligned}\varphi(p_1^{k_1} \dots p_n^{k_n}) &= p_1^{k_1} \dots p_n^{k_n} \left(1 - \frac{1}{p_1}\right) \dots \left(1 - \frac{1}{p_n}\right) \\ &= \varphi(p_1^{k_1}) \dots \varphi(p_n^{k_n})\end{aligned}$$

Demostración. Falta demostrar.

□

Observación 1.4. Observe que dados $n, m \in \mathbb{N}$, tales que $(m, n) = 1$, entonces:

$$\varphi(n \cdot m) = \varphi(n) \cdot \varphi(m)$$

En efecto, Por el teorema fundamental de la aritmética, podemos expresar $n = p_1^{k_1} \dots p_l^{k_l}$, $m = q_1^{t_1} \dots q_r^{t_r}$, con $p_1, \dots, p_l, q_1, \dots, q_r \in \mathbb{N}$ primos distintos y $k_1, \dots, k_l, t_1, \dots, t_r \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, así:

$$\begin{aligned}\varphi(n \cdot m) &= \varphi(p_1^{k_1} \dots p_l^{k_l} q_1^{t_1} \dots q_r^{t_r}) \\ &= \varphi(p_1^{k_1} \dots p_l^{k_l}) \cdot \varphi(q_1^{t_1} \dots q_r^{t_r}) \\ &= \varphi(n) \cdot \varphi(m)\end{aligned}$$

□

CAPÍTULO 2

Grupos

2.1. Grupos

Definición 2.1.1 (Grupo). *Un grupo es un conjunto no vacío G junto con una operación $\circ : G \times G \rightarrow G$, que satisface:*

- I) *font Asociatividad:* $a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c \quad \forall a, b, c \in G$
- II) *font Elemento neutro:* $\exists e \in G : a \circ e = a \quad \forall a \in G$
- III) *font Inverso:* $\forall a \in G \quad \exists b \in G : a \circ b = e$

Se denota a esta estructura: (G, \circ, e) , en caso de no conocer la identidad (G, \circ) . Además, para facilitar la notación el inverso de a elemento de un grupo se denota como a^{-1} .

Ejemplo 2.1. *Sea \mathbb{Z} , y la suma usual en los números enteros, es claro que es un grupo.*

Ejemplo 2.2. $(\mathbb{R}, +), (\mathbb{Q}, +), (\mathbb{C}, +)$ son grupos.

Ejemplo 2.3. $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +)$ es un grupo.

En efecto, Anteriormente se había probado que $+$ es cerrado y está bien definida $\bar{a} + \bar{b} = \overline{a + b}$.

- I) $+$ es asociativa, pues:

$$\bar{a} + \overline{(b + c)} = \overline{a + (b + c)} = \overline{(a + b) + c} = \overline{(a + b)} + \bar{c}$$

- II) Note que la identidad es $\bar{0}$, ya que:

$$\bar{a} + \bar{0} = \overline{a + 0} = \bar{a} \quad \forall \bar{a} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$$

III) Ahora dado $\bar{a} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, note que $a + (-a) = 0$, luego:

$$\begin{aligned}\overline{a + (-a)} &= \bar{0} \\ \bar{a} + \overline{(-a)} &= \bar{0}\end{aligned}$$

$$\text{Así } \forall \bar{a} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \quad \exists \overline{(-a)} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} : \bar{a} + \overline{(-a)} = \bar{0}.$$

□

Ejemplo 2.4. Sean A un conjunto no vacío, sea V un espacio vectorial, sea \mathcal{H} el conjunto de funciones $f : A \rightarrow V$, definamos la operación suma sobre \mathcal{H} como:

$$\begin{aligned}+ : \mathcal{H} \times \mathcal{H} &\rightarrow \mathcal{H} \\ (f + g)(a) &\mapsto f(a) + g(a) \quad \forall a \in A\end{aligned}$$

En efecto, note:

I) Sean $f, g, h \in \mathcal{H}$, sea $a \in A$:

$$\begin{aligned}[(f + g) + h](a) &= (f + g)(a) + h(a) \\ &= (f(a) + g(a)) + h(a) \\ &= f(a) + (g(a) + h(a)) \\ &= f(a) + (g + h)(a) \\ &= [f + (g + h)](a)\end{aligned}$$

$$\therefore (f + g) + h = f + (g + h)$$

II) Tenemos $\underline{0} \in \mathcal{H}$, definida por: $\underline{0}(a) = 0 \quad \forall a \in A$, sea $f \in \mathcal{H}$, sea $a \in A$,

$$(f + \underline{0})(a) = f(a) + \underline{0}(a) = f(a) + 0 = f(a)$$

Así $f + \underline{0} = f$, i.e. $\underline{0}$ es el elemento neutro.

III) Sea $f \in \mathcal{H}$, sea $a \in A$, note que existe $-f(a)$, tal que:

$$f(a) + (-f(a)) = 0 \quad \forall a \in A,$$

entonces $-f$ es inverso de f .

□

Ejemplo 2.5. Sea V un espacio vectorial real, entonces $(V, +)$ es un grupo.

Ejemplo 2.6. $(\mathcal{M}_{m \times n}(\mathbb{R}), +)$ es un grupo.

Ejemplo 2.7. Sea $GL_n(\mathbb{R}) = \{A \in \mathcal{M}_n(\mathbb{R}) : \det(A) \neq 0\}$, con el producto de matrices forma un grupo.

Ejemplo 2.8. Considere $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, sea $G \subseteq \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, el conjunto

$$G = \{\bar{a} : (a, n) = 1\}$$

entonces (G, \cdot) con la op. definida por el producto de clases es un grupo.

En efecto, Note:

$$\text{I) } \forall \bar{a}, \bar{b}, \bar{c} \in G, \quad \bar{a}(\bar{b} \cdot \bar{c}) = \bar{a}(\overline{b \cdot c}) = \overline{a(b \cdot c)} = \overline{(ab)c} = \overline{(ab)} \cdot \bar{c} = (\bar{a}\bar{b})\bar{c}.$$

$$\text{II) } \bar{1} \in G, \text{ pues } (1, n) = 1, \text{ además } \forall \bar{a} \in G \quad \bar{a} \cdot \bar{1} = \bar{a}.$$

III) Sea $\bar{a} \in G$, entonces $(a, n) = 1$, por tanto $\exists x, y \in \mathbb{Z}$, tal que:

$$ax + ny = 1$$

Tomando la clase:

$$\bar{1} = \overline{ax + ny} = \overline{ax} + \overline{ny} = \bar{a}\bar{x} + \bar{n}\bar{y} = \bar{a}\bar{x} + \bar{0}\bar{y} = \bar{a}\bar{x} + \bar{0} = \bar{a}\bar{x}$$

i.e. existe $\bar{x} \in G$, tal que $\bar{a} \cdot \bar{x} = 1$.

□

Proposición 2.1.1. Sea (G, \circ) un grupo, sea $g \in G$ tal que $g \circ g = g$ entonces $g = e$.

Demostración. Como $g \in G \implies \exists g' \in G$ tal que $g \circ g' = e$, luego:

$$g = g \circ e = g \circ (g \circ g') = (g \circ g) \circ g' = g \circ g' = e$$

□

Proposición 2.1.2. Sea (G, \circ) grupo, $g \in G$, entonces:

$$g^{-1} \circ g = g \circ g^{-1} = e$$

Demostración.

$$(g^{-1} \circ g) \circ (g^{-1} \circ g) = (g^{-1} \circ (g \circ g^{-1})) \circ g = (g^{-1} \circ e) \circ g = g^{-1} \circ g$$

Luego por la prop. anterior:

$$g^{-1} \circ g = e, \quad \text{i.e. } g \circ g^{-1} = g^{-1} \circ g = e$$

□

Proposición 2.1.3. Si (G, \circ) es un grupo y $g \in G$, entonces:

$$e \circ g = g \circ e = g$$

Demostración.

$$e \circ g = (g \circ g^{-1}) \circ g = g \circ (g^{-1} \circ g) = g \circ e = g = g \circ e$$

□

Proposición 2.1.4. *Sea (G, \circ) un grupo, el elemento neutro e , es único.*

Demostración. Supongamos que existe $e' \in G$ tal que $g \circ e' = g$, $\forall g \in G$, en particular:

$$e = e \circ e' = e' \circ e = e', \quad \text{i.e. } e \text{ es único.}$$

□

Ejemplo 2.9. *Sea $G_1 = \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, sea $G_2 = \{\bar{a} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} : (a, n) = 1\}$, entonces se tienen los grupos: $(G_1, +, \bar{0})$, $(G_2, \cdot, \bar{1})$, es claro que no son iguales ya que: $|G_1| = n$, $|G_2| = \varphi(n)$.*

Proposición 2.1.5. *Si (G, \circ) es un grupo y $g \in G$, entonces g^{-1} es único.*

Demostración. Suponga $g' \in G$ tal que $g \circ g' = e$, entonces:

$$g^{-1} = g^{-1} \circ e = g^{-1} \circ (g \circ g') = (g^{-1} \circ g) \circ g' = e \circ g' = g'$$

□