

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## ESCUELA SUPERIOR DE FÍSICA Y MATEMÁTICA

### ÁLGEBRA MODERNA I

---

## Apuntes Álgebra Moderna I

---

**Profesor:**

Escobar Gracia Cé-  
sar Alberto

**Alumnos:**

Ramírez León Christian Yael  
Silva Sierra Joshua Joaquín

5FM1

---

27 de diciembre de 2025



# Índice general

<b>1. Conceptos Previos</b>	<b>1</b>
1.1. Divisibilidad . . . . .	1
1.2. Cardinalidad de conjuntos . . . . .	2
1.3. Enteros Módulo $n$ . . . . .	4
1.4. Función $\varphi$ de Euler . . . . .	4
<b>2. Grupos</b>	<b>7</b>
2.1. Grupos . . . . .	7
2.2. Subgrupos . . . . .	10
2.3. Grupo de permutaciones . . . . .	14
2.4. Grupo Cociente . . . . .	16
2.4.1. Producto de subgrupos . . . . .	16
2.4.2. Clases laterales . . . . .	16
2.4.3. Grupo cociente . . . . .	23
<b>3. Isomorfismos de Grupos</b>	<b>25</b>
3.1. Definición isomorfismo . . . . .	25
3.2. Teoremas de isomorfismo . . . . .	27
<b>4. Productos Directos</b>	<b>31</b>
4.1. Productos Directos . . . . .	31
4.2. El grupo Simétrico $S_n$ . . . . .	36
<b>5. Acciones de Grupos</b>	<b>51</b>
5.1. Acciones de Grupo . . . . .	51
5.2. Grupos Sylow . . . . .	62
<b>6. Automorfismos de Grupos</b>	<b>69</b>
6.1. Automorfismos de Grupos . . . . .	69



# 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:

$$S_1 = N(C_1) + \dots + N(C_n)$$

$$S_2 = N(C_1, C_2) + \dots + N(C_1, C_n) + N(C_2, C_3) + \dots + N(C_{n-1}, C_n)$$

$\vdots$

$$S_i = \sum_{1 \leq j_1 < \dots < j_i \leq n} N(C_{j_1}, \dots, C_{j_i})$$

$\vdots$

$$S_n = N(C_1, \dots, C_n)$$

Por el principio de inclusión exclusión generalizado:

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

### 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 $\varphi$ de Euler

**Definición 1.4.1** (Función  $\varphi$  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)  $\varphi(p^k) = p^{k-1}(p - 1)$ ,  $k \in \mathbb{N}$
- III)  $\varphi(p^k q^t) = \varphi(p^k) \cdot \varphi(q^t)$ ,  $k, t \in \mathbb{N}$



*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  $\bar{a} \cdot \bar{x} = 1$ .

□

**Definición 2.1.2** (Grupo abeliano). Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, si cumple que  $a \circ b = b \circ a \quad \forall a, b \in G$ , diremos que es un grupo abeliano.

**Ejemplo 2.9.**  $(\mathbb{Z}, +, 0)$  es abeliano.

**Ejemplo 2.10.**  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}, +, \bar{0})$  es abeliano.

**Ejemplo 2.11.**  $((\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*, \cdot, \bar{1})$  es abeliano.

**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 2.12.** 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:

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

□

## 2.2. Subgrupos

**Definición 2.2.1** (Subgrupo). Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sea  $H \subseteq G$  un subconjunto de  $G$ , diremos que  $H$  es un subgrupo de  $G$ , si con la misma operación  $\circ$ , definida en  $G$ , forma un grupo. Se denotará  $H \leq G$ .

**Ejemplo 2.13.** Sea  $(G = \mathbb{Z}, +, 0)$ , para algún  $a \in \mathbb{Z}$ , definamos:

$$H_a = \{t \in \mathbb{Z} : t = na, n \in \mathbb{Z}\}$$

entonces  $(H_a, +, 0)$  es un subgrupo de  $G$ .

*Demostración.*

Claramente  $H_a \subseteq G$ , además  $+$  es cerrada en  $H_a$ , pues si  $n_1a, n_2a \in H_a \implies n_1a + n_2a = (n_1 + n_2)a \in H_a$ .

1)  $+$  es asociativa, porque hereda la asociatividad de  $G$ .

II)  $0 \in H_a$ , ya que  $0 = 0 \cdot a \in H_a$ , además  $na + 0 = na \quad \forall na \in H_a$ .

III) Si  $na \in H_a$ , como  $n \in \mathbb{Z} \implies -n \in \mathbb{Z}$ , así  $\exists -na \in H_a \implies na + (-na) = 0$ .

□

**Ejemplo 2.14.** Sea  $SL_n(\mathbb{R}) = \{A \in GL_n(\mathbb{R}) : \det A = 1\}$ , entonces  $SL_n(\mathbb{R}) \leq GL_n(\mathbb{R})$ , este es llamado el grupo especial lineal.

**Observación 2.1.** Sea  $(G, \circ, e)$  grupo, sea  $H \leq G$ , entonces  $e \in H$ .

En efecto, como  $H \neq \emptyset$ ,  $\exists g \in H$ , además  $\exists g^{-1} \in H$  al ser un subgrupo, así:

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

□

**Proposición 2.2.1.** Si  $(G, \circ, e)$  es un grupo y  $\{H_\lambda\}_{\lambda \in I}$  es una colección arbitraria de subgrupos, entonces:

$$\bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda, \text{ es un subgrupo de } G.$$

*Demostración.*

Como  $H_\lambda \leq G \quad \forall \lambda \in I$ ,  $\bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda \neq \emptyset$  pues  $e \in H_\lambda \quad \forall \lambda \in I$ . Sean  $a, b \in \bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda$ , entonces  $a, b \in H_\lambda \quad \forall \lambda \in I$ , además  $\circ$  es cerrada en  $\bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda$ , ya que  $a \circ b \in H_\lambda \quad \forall \lambda \in I$ , así  $a \circ b \in \bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda$ . Luego:

I)  $\circ$  es asociativa en  $\bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda$ , ya que es asociativa en  $H_\lambda, \forall \lambda \in I$ .

II)  $e \in \bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda$ .

III) Dado que  $a \in \bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda$ , entonces  $a \in H_\lambda \forall \lambda \in I$ , así  $\exists a^{-1} \in H_\lambda \forall \lambda \in I$  tal que  $a \circ a^{-1} = e$ , luego  $a^{-1} \in \bigcap_{\lambda \in I} H_\lambda$ .

□

**Proposición 2.2.2.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sean  $H, K \leq G$ , entonces  $H \cup K$  es un subgrupo de  $G$  si y sólo si  $H \subseteq K \vee K \subseteq H$ .

*Demostración.*

Será demostrada primero la reciprocidad.

( $\Leftarrow$ ) Basta notar que si  $H \subseteq K$ ,  $H \cup K = K$  y  $K \leq G$ , así  $H \cup K \leq G$ . Análogo si  $K \subseteq H$ .

( $\Rightarrow$ ) Sea  $H \cup K \leq G$ . Supongamos que  $H \not\subseteq K \wedge K \not\subseteq H$ , sean  $a \in H \setminus K$  y  $b \in K \setminus H$ . Sea  $c = a \circ b$ . Como  $H \cup K \leq G$ , entonces  $c \in H \cup K$ , así  $c \in H \vee c \in K$ .

Si  $c \in H \implies a^{-1} \circ c = b \in H$ , lo cual no puede ser (pues  $b \in K \setminus H$ ). Si  $c \in K \implies c \circ b^{-1} = a \in K$ , lo cual no puede ser (pues  $a \in H \setminus K$ ).

Por lo cual  $H \subseteq K \vee K \subseteq H$ .

□

**Definición 2.2.2** (Orden de un grupo). Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, el orden del grupo será la cardinalidad de  $G$  y se denota  $|G|$ .

**Definición 2.2.3.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, diremos que es un grupo finito si  $G$  es un conjunto finito. En caso contrario se le dice infinito.

**Definición 2.2.4.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sea  $S \subseteq G$ , con  $S \neq \emptyset$ , el grupo generado por  $S$  en  $G$  denotado por  $\langle S \rangle$  es el menor de los subgrupos que lo contiene, i.e.:

$$\langle S \rangle = \bigcap_{\substack{S \subseteq H \\ H \leq G}} H$$

Si  $S$  es finito, y sea  $H = \langle S \rangle$ , diremos que  $H$  es finitamente generado.

**Ejemplo 2.15.** Todo subgrupo finito de  $G$  es finitamente generado, más aún, si  $H \leq G$  y es finito  $\langle H \rangle = H$ .

*Demostración.*

Dado que:

$$\langle H \rangle = \bigcap_{\substack{H' \leq G \\ H \subseteq H'}} H' \subseteq H' \quad \forall H' \leq G \text{ tales que } H \subseteq H',$$

además como  $H \leq G$  y  $H \subseteq H$ , entonces  $H$  es uno de los términos de la intersección, así:

$$\langle H \rangle \subseteq H \wedge H \subseteq \bigcap_{\substack{H' \leq G \\ H \subseteq H'}} H' = \langle H \rangle$$

Por lo tanto  $\langle H \rangle = H$ . □

**Ejemplo 2.16.**  $(\mathbb{Z}, +, 1)$  es finitamente generado, basta notar que:

$$\mathbb{Z} = \langle \{1\} \rangle$$

**Ejemplo 2.17.**  $(\mathbb{Q}, +, 1)$ ,  $\mathbb{Q}$  no es finito ni es finitamente generado.

**Proposición 2.2.3.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo,  $H \subseteq G$  no vacío, entonces las cond. son equivalentes:

- I)  $H \leq G$
- II)  $\forall x, y \in H$  se tiene que  $x \circ y \in H \wedge x^{-1} \in H$ .
- III)  $\forall x, y \in H$  se tiene que  $x \circ y^{-1} \in H$ .

*Demostración.*

Se probarán las implicaciones en ciclo.



- I  $\Rightarrow$  II) Se sigue de la definición ya que la operación en  $G$  debe ser una operación en  $H$ , además de que si  $H$  es un subgrupo  $\forall x \in H \Rightarrow \exists x^{-1} \in H$ .
- II  $\Rightarrow$  III) Si  $x, y \in H$  por ii)  $y^{-1} \in H$ , luego  $x \circ y^{-1} \in H$  (por ii).
- III  $\Rightarrow$  I) Sea  $x \in H$ , entonces  $x \circ x^{-1} = e$ , luego, note que si  $x \in H$  entonces  $x^{-1} = e \circ x^{-1} \in H$ .

Ahora probemos que la operación es cerrada: sea  $x, y \in H$ , entonces  $y^{-1} \in H$ , más aún  $(y^{-1})^{-1} = y$ , ya que  $y^{-1} \circ y = y^{-1} \circ (y^{-1})^{-1} = e$  y por la unicidad del inverso  $(y^{-1})^{-1} = y$ . Por lo cual  $x \circ y = x \circ (y^{-1})^{-1} \in H$ , por lo tanto la operación es cerrada en  $H$ .

□

**Observación 2.2.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sean  $a, b \in G$  entonces:

$$(a \circ b)^{-1} = b^{-1} \circ a^{-1}$$

En efecto,

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

Por la unicidad del inverso se sigue  $b^{-1} \circ a^{-1} = (a \circ b)^{-1}$ .

□

Cuando no haya pérdida de generalidad para facilitar la escritura de la operación  $\circ$  en un grupo  $G$ , se denotará expresará como el producto, es decir:  $a \circ b := ab$ . Además, se podrá expresar la potencia de un elemento  $a \in G$  como:

$$a^n = \underbrace{a \cdot \dots \cdot a}_{n-\text{veces}}$$

para  $n \in \mathbb{Z}^+$ . Si  $n = 0$ ,  $a^0 = e$  y podemos observar que  $a^{-n} = (a^n)^{-1}$  para  $n \in \mathbb{N}$ .

**Observación 2.3.** Si  $S \neq \emptyset$ , es un subconjunto de un grupo  $G$ , entonces:

$$\langle S \rangle = \{s_1^{i_1} \dots s_n^{i_n} : s_j \in S, i_j = \pm 1, j = 1, \dots, n, n \in \mathbb{N}\}$$

*Demostración.*

Sea  $H = \{s_1^{i_1} \dots s_n^{i_n} : s_i \in S, i_j = \pm 1, j = 1, \dots, n, n \in \mathbb{N}\}$ . Sean  $s, t \in H$ , tales que  $s = s_1^{i_1} \dots s_n^{i_n}$ ,  $t = t_1^{j_1} \dots t_m^{j_m}$ , con  $s_1, \dots, s_n, t_1, \dots, t_m \in S$ ,  $i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_m \in \{1, -1\}$ . Notemos que:

$$st^{-1} = s_1^{i_1} \dots s_n^{i_n} (t_1^{j_1} \dots t_m^{j_m})^{-1} = s_1^{i_1} \dots s_n^{i_n} t_m^{-j_m} \dots t_1^{-j_1} \in H$$

Así por la proposición 2.2.3  $H \leq G$ , así  $\langle S \rangle \subseteq H$ . Ahora sea  $N \leq G$ , tal que  $S \subseteq N$ , es claro que  $s \in N$  (cualquier elemento de esa forma está en  $N$ ), así  $H \subseteq N$ , así  $H = \langle S \rangle$ . □

**Definición 2.2.5** (Grupo cíclico). Sea  $G$  un grupo, si  $\exists g \in G$ , tal que  $\langle g \rangle = G$  diremos que  $G$  es cíclico.

**Ejemplo 2.18.**  $(\mathbb{Z}, +, 0)$  es cíclico, pues:

$$\langle 1 \rangle = \mathbb{Z}$$

**Ejemplo 2.19.**  $S_3$  no es cíclico.

**Ejemplo 2.20.**  $(\mathbb{Q}, +, 0)$  no es cíclico.

**Observación 2.4** (Nota). Note que si  $G$  es cíclico:

$$\langle g \rangle = \{g^t : t \in \mathbb{Z}\}$$

**Proposición 2.2.4.** Si  $(G, \circ, e)$  es cíclico, entonces  $G$  es abeliano.

*Demostración.*

Sea  $(G, \circ, e)$  cíclico, entonces  $\exists g \in G$ , tal que  $\langle g \rangle = G$ . Sean  $a, b \in G$ , tal que  $a = g^n$ ,  $b = g^m$ , con  $n, m \in \mathbb{Z}$ . Es fácil probar que  $g^p g^q = g^{p+q} \quad \forall p, q \in \mathbb{Z}$ , así:

$$ab = g^n g^m = g^{n+m} = g^{m+n} = g^m g^n = ba$$

□

**Observación 2.5** (Observación). El recíproco del teorema anterior es falso. En efecto, tome los contraejemplos:

1. Sea  $n \in \mathbb{Z}^+$ , no primo (por ejemplo  $n = 8$ ),  $((\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*, \cdot)$  es abeliano, pero no cíclico.
2.  $(\mathbb{R}^+, \cdot)$  es abeliano pero no cíclico.

## 2.3. Grupo de permutaciones

**Definición 2.3.1** (Grupo de Permutaciones). Sea  $X$  un conjunto no vacío, sea  $\mathcal{H} = \{f : X \rightarrow X : f \text{ es biyectiva}\}$ , consideremos la composición de funciones, entonces  $\mathcal{H}$  forma un grupo llamado el grupo de permutaciones del conjunto  $X$  denotado por  $S_X$ .

En caso de que  $X$  sea finito, podemos enlistar los elementos de  $X$  por  $a_1, \dots, a_n$ , podemos representar con un arreglo bidimensional de renglones colocando:

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_n \\ a_{\sigma(1)} & a_{\sigma(2)} & \dots & a_{\sigma(n)} \end{pmatrix}$$

Donde  $\sigma : \{1, \dots, n\} \rightarrow \{1, \dots, n\}$ , tal que  $\sigma(i) = j$ , si  $f(a_i) = a_j$ , de este modo podemos prescindir de los elementos de  $X$  y fijarnos solo en los subíndices e identificar a  $f$  con:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \dots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

En este caso se escribirá como  $S_n$  con  $n = |X|$ .

**Ejemplo 2.21.**  $S_3$  es el grupo formado por los elementos:

$$\{e, \sigma, \theta, \sigma \cdot \theta, \theta \cdot \sigma, \theta^2\}$$

Donde:

$$\begin{aligned} e &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 \end{pmatrix} & \theta &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} & \sigma &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix} \\ \theta^2 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix} & \sigma \cdot \theta &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1 & 3 & 2 \end{pmatrix} & \theta \cdot \sigma &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$\circ$	$e$	$\theta$	$\sigma$	$\theta^2$	$\sigma \cdot \theta$	$\theta \cdot \sigma$
$e$	$e$	$\theta$	$\sigma$	$\theta^2$	$\sigma \cdot \theta$	$\theta \cdot \sigma$
$\theta$	$\theta$	$\theta^2$	$\theta \cdot \sigma$	$e$	$\sigma$	$\sigma \cdot \theta$
$\sigma$	$\sigma$	$\sigma \cdot \theta$	$e$	$\theta \cdot \sigma$	$\theta$	$\theta^2$
$\theta^2$	$\theta^2$	$e$	$\sigma \cdot \theta$	$\theta$	$\theta \cdot \sigma$	$\sigma$
$\sigma \cdot \theta$	$\sigma \cdot \theta$	$\theta \cdot \sigma$	$\theta^2$	$\sigma$	$e$	$\theta$
$\theta \cdot \sigma$	$\theta \cdot \sigma$	$\sigma$	$\theta$	$\sigma \cdot \theta$	$\theta^2$	$e$

Es evidente que  $S_3$  no es abeliano, basta notar  $\theta \circ \sigma \neq \sigma \circ \theta$ . Además observe que si el orden de  $X$  es  $n$ ,  $|S_n| = n!$ .

**Observación 2.6.** Si  $n \geq 3$ , entonces  $S_n$  no es abeliano.

En efecto, Basta tomar:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & \dots & i & i+1 & \dots & n \\ 1 & \dots & i+1 & i & \dots & n \end{pmatrix}, \quad \theta = \begin{pmatrix} 1 & \dots & j & j+1 & \dots & n \\ 1 & \dots & j & j+1 & \dots & n \end{pmatrix} \quad \text{con } i \neq j$$

y notar que  $\sigma \circ \theta \neq \theta \circ \sigma$ .

Además podemos notar que trivialmente  $S_1$  y  $S_2$  son un grupo abeliano. □

## 2.4. Grupo Cociente

### 2.4.1. Producto de subgrupos

**Definición 2.4.1** (Producto de subgrupos). Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sean  $S, T \leq G$ , definimos el producto de  $S$  y  $T$  como:

$$ST = \{st : s \in S, t \in T\}$$

**Observación 2.7.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo,  $S, T \subseteq G$ ,  $ST$ , no es necesariamente un subgrupo.

**Proposición 2.4.1.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sean  $H, K \leq G$  entonces  $HK$  es un subgrupo si y sólo si  $HK = KH$ .

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Suponga que  $HK \leq G$ , sean  $hk \in HK$ , entonces  $h \in H$  y  $k \in K$ , entonces:  $k^{-1}h^{-1} = (hk)^{-1} \in HK$ , por otro lado, como  $k^{-1}h^{-1} \in KH$ , así:  $HK = (k^{-1}h^{-1})^{-1} \in KH$ , luego  $HK \subseteq KH$ , análogamente  $KH \subseteq HK$ , por lo tanto  $HK = KH$ .

$\Leftarrow$ ) Supongamos que  $HK = KH$ , notemos que  $HK \neq \emptyset$ , ya que  $e \circ e \in HK$ . Sean  $x, y \in HK$ , entonces existe  $h_1, h_2 \in H, k_1, k_2 \in K$ , tal que  $x = h_1k_1, y = h_2k_2$ , es claro que  $y^{-1} \in HK$ , pues  $y^{-1} = k_2^{-1}h_2^{-1} \in KH = HK$ , así que probemos que  $xy^{-1} \in HK$ . En efecto,  $xy^{-1} = h_1k_1(h_2k_2)^{-1} = h_1k_1k_2^{-1}h_2^{-1}$ . Note que  $k_1k_2^{-1}h_2^{-1} \in KH = HK$ , entonces digamos  $h_3k_3 = k_1k_2^{-1}h_2^{-1}$  con  $h_3 \in H, k_3 \in K$ . Luego:  $h_1(k_1k_2^{-1}h_2^{-1}) = h_1(h_3k_3) \in HK$ , por lo tanto  $xy^{-1} \in HK$ , y por una proposición anterior  $HK$  es un subgrupo de  $G$ .  $\square$

**Definición 2.4.2.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sean  $H, K \leq G$ ,  $HK$  se llama el producto de  $H$  con  $K$ .

**Corolario 2.4.1.** Si  $(G, \circ, e)$  es un grupo abeliano el producto finito de subgrupos es un subgrupo.

En efecto, es inmediato usando inducción y el hecho que el producto de subgrupos es asociativo.  $\square$

### 2.4.2. Clases laterales

**Observación 2.8.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sea  $H \leq G$ , entonces  $Hg = H$  si y sólo si  $g \in H$ .

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Supongamos que  $Hg = H$ , entonces  $\forall hg \in Hg, hg \in H$ , en particular tome  $h = e$ , así  $eg = g \in H$ .

$\Leftarrow$ ) Suponga que  $g \in H$ , entonces  $Hg = \{hg : h \in H\} \subseteq H$ , ahora dado  $h \in H$ , note que  $hg^{-1} \in H$ , luego  $h = (hg^{-1})g \in Hg$ , por lo cual  $H \subseteq Hg$ .  $\therefore Hg = H$ .  $\square$

**Proposición 2.4.2.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo,  $H \leq G$ , entonces  $Hg = Hg_1$  si y sólo si  $gg_1^{-1} \in H$ .

En efecto,  $gg_1^{-1} \in H \iff H = Hgg_1^{-1} \iff Hg_1 = (Hgg_1^{-1})g_1 = Hg$ .  $\square$

**Definición 2.4.3.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sea  $H \leq G$ , sea  $g \in G$ , a  $Hg$  se le llama clase derecha, análogamente  $gH$  se le llama clase izquierda.

**Definición 2.4.4.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sea  $H \leq G$ , sea  $\mathcal{L} = \{gH : g \in G\}$  se le llama conjunto de clases izquierdas y  $\mathcal{R} = \{Hg : g \in G\}$  se le llama conjunto de clases derechas.

**Proposición 2.4.3.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sea  $H \leq G$ , entonces  $\mathcal{L}$  y  $\mathcal{R}$  forman una partición de  $G$ .

*Demostración.*

Basta probar que  $\mathcal{R}$  induce una relación de equivalencia, i.e. la relación  $\sim$  definida por  $a \sim b \iff a, b \in Hg$  es de equivalencia.

- I) REFLEXIVIDAD:  $a \sim a \iff a, a \in Hg$ . (Esto se cumple pues  $a \in Ha$ ).
- II) SIMÉTRICA:  $a \sim b \implies a, b \in Hg \implies b, a \in Hg \implies b \sim a$ .
- III) TRANSITIVIDAD: Si  $a \sim b \wedge b \sim c \implies a, b \in Hg_1 \wedge b, c \in Hg_2$ . Sea  $a = h_1g_1$ ,  $b = h_2g_1$ ,  $b = h_3g_2$ ,  $c = h_4g_2$ , así note que  $g_1 = (h_2^{-1}h_3)g_2$ . Luego podemos expresar  $a = h_1(h_2^{-1}h_3)g_2$ , como  $(h_1h_2^{-1}h_3) \in H$ ,  $a \in Hg_2$ , así  $a, c \in Hg_2 \implies a \sim c$ .

$\therefore$  Las clases derechas forman una partición de  $G$ .

Análogamente las clases izquierdas forman una partición de  $G$ .  $\square$

**Observación 2.9.** Si  $(G, \circ, e)$  es abeliano cada clase izquierda es la misma clase derecha.

En efecto, Sea  $H \leq G$ , sea  $\mathcal{L} = \{gH : g \in G\}$ , sea  $\mathcal{R} = \{Hg : g \in G\}$ , sea  $Hg \in \mathcal{R}$ , sea  $hg \in Hg$ ,  $hg = gh \in gH \in \mathcal{L}$ , así  $\mathcal{R} \subseteq \mathcal{L}$ , análogamente  $\mathcal{L} \subseteq \mathcal{R}$ , por lo cual  $\mathcal{L} = \mathcal{R}$ .  $\square$

**Observación 2.10.** El recíproco es no necesariamente cierto.

**Ejemplo 2.22.** En  $S_3$ , sea  $H = \left\{ \sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 3 \end{pmatrix}, e \right\} = \langle \sigma \rangle \leq G$ .

Veamos cuáles son las clases derechas de  $H$ :

$$\mathcal{R} = \{H, H\theta = \{\theta, \sigma \circ \theta\}, H\theta^2 = \{\theta^2, \sigma \circ \theta^2 = \theta \circ \sigma\}\}$$

Ahora las clases izquierdas:

$$\mathcal{L} = \{H, \theta H = \{\theta, \theta \circ \sigma\}, \theta^2 H = \{\theta^2, \theta^2 \circ \sigma\}\}$$

**Proposición 2.4.4.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, entonces la cardinalidad de cada clase izquierda o derecha es la misma e igual a  $|H|$ .

*Demostración.*

Sea  $Hg \in \mathcal{R}$ , definamos  $\varphi : H \rightarrow Hg$ ,  $h \mapsto hg$ , probemos que es una función biyectiva.

En efecto, sean  $h_1, h_2 \in H$ , tal que  $\varphi(h_1) = \varphi(h_2)$ , entonces  $h_1g = h_2g \iff h_1 = h_2$ , por lo tanto es inyectiva.

Sea  $hg \in Hg \implies \exists h \in H$  tal que  $\varphi(h) = hg$ , por lo tanto es suprayectiva.

$\therefore \varphi$  es biyectiva, así  $|H| = |Hg|$ . Análogamente se prueba que  $|H| = |gH|$ .  $\square$

**Teorema 2.4.1** (Índice de Lagrange). Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo sea  $H \leq G$ , entonces  $|H| \mid |G|$  y además:

$$|G| = |H| \cdot [G : H]$$

Donde  $[G : H] := |\mathcal{L}| = |\mathcal{R}|$  se llama índice de Lagrange de  $H$  en  $G$ .

*Demostración.*

Primero veamos que  $|\mathcal{L}| = |\mathcal{R}|$ . Sea  $\varphi : \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{L}$ ,  $Ha \mapsto a^{-1}H$ , probemos que es un isomorfismo (biyección entre conjuntos).

Sean  $g_1H, g_2H \in \mathcal{R}$ , tal que  $\varphi(Hg_1) = \varphi(Hg_2)$ , entonces:

$$g_1^{-1}H = g_2^{-1}H \iff g_1(g_2^{-1})^{-1} \in H \iff g_1g_2^{-1} \in H \iff Hg_1 = Hg_2$$

Por lo tanto es inyectiva. (Nota: en la imagen la cadena de equivalencias usa propiedades de clases laterales).

Ahora sea  $g^{-1}H \in \mathcal{L}$ , como existe  $g = (g^{-1})^{-1} \in G$ , se sigue que  $\exists Hg \in \mathcal{R}$ , tal que  $\varphi(Hg) = g^{-1}H$ , por lo cual es biyectiva.

$\therefore \varphi$  es biyectiva y así es un isomorfismo (de conjuntos).  $\therefore |\mathcal{R}| = |\mathcal{L}|$ .

Ahora como las clases son una partición de  $G$ , entonces:

$$\begin{aligned} |G| &= \left| \bigcup_{a \in G} Ha \right| \\ &= \sum_{a \in G} |Ha| = \sum_{a \in G} |H| \\ &= |\mathcal{R}| |H| = |H| [G : H] \end{aligned}$$

Así:  $|H| \mid |G|$  y  $[G : H] \mid |G|$ .  $\square$

En particular si  $G$  es finito, se cumple que:

$$\frac{|G|}{|H|} = [G : H]$$

**Definición 2.4.5.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sea  $g \in G$ , se denota por  $o(g)$  como el menor entero no negativo tal que  $g^{o(g)} = e$ , si existe ese entero, en caso contrario, diremos  $o(g) = +\infty$ .

**Ejemplo 2.23.** En  $(\mathbb{Z}, +, 0)$ ,  $\forall a \in \mathbb{Z}$ ,  $o(a) = 0$  (o infinito según la convención).

**Ejemplo 2.24.** En  $(S_3, \circ, e)$   $o(\sigma) = 2$ ,  $o(\theta) = 3$ .

**Ejemplo 2.25.** En  $(\mathbb{Z}/8\mathbb{Z}, +, 0)$ ,  $o(2) = 4$ ,  $o(3) = 8$ ,  $o(4) = 2$ .

**Observación 2.11.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo finito  $\forall g \in G, \exists m \in \mathbb{Z}^+$ , tal que  $o(g) \leq m$ .

*Demostración.*

Sea  $|G| = n$ , tome el conjunto  $\{g^{i_1}, \dots, g^{i_{n+1}}\}$ , con  $i_1, \dots, i_{n+1} \in \mathbb{Z}^+$  con  $i_1 < i_2 < \dots < i_{n+1}$ . Entonces al menos 2 son iguales, i.e.  $g^{i_j} = g^{i_k}$ , para  $1 \leq j < k \leq n+1$ . Luego:

$$g^{i_k - i_j} = g^{i_k} \cdot g^{-i_j} = g^{i_j} g^{-i_j} = e, \quad \text{tomemos } m = i_k - i_j > 0.$$

$\therefore \exists m \in \mathbb{Z}^+$  tal que  $g^m = e$ , luego como  $o(g)$  es el mínimo entero positivo tal que  $g^{o(g)} = e$ , entonces  $o(g) \leq m$ .  $\square$

**Observación 2.12.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo finito, sea  $g \in G$ ,  $o(g) = |\langle g \rangle|$ , más aún  $o(g) \mid |G|$ .

*Demostración.*

Sea  $H = \{e, g, g^2, \dots, g^{o(g)-1}\}$ , claramente  $H \subseteq \langle g \rangle$ , además notemos que es un subgrupo.

En efecto: sean  $g^i, g^j \in H$ ,  $0 \leq i < j \leq o(g) - 1$ , entonces  $g^i g^j = g^{i+j}$ , se tiene que  $0 \leq i+j \leq o(g) - 1 \vee o(g) \leq i+j$ . Si se cumple la primera condición es evidente que  $g^{i+j} \in H$ . Por lo cual tomemos el caso  $o(g) \leq i+j$ , por el algoritmo de Euclides  $\exists k, r \in \mathbb{Z}^+$  tal que:  $i+j = k \cdot o(g) + r$ , con  $0 \leq r < o(g)$ , así:

$$g^{i+j} = g^{k \cdot o(g) + r} = (g^{o(g)})^k g^r = (e)^k g^r = g^r \in H,$$

por lo tanto es cerrada, además se hereda de  $G$  las propiedades del grupo.

Ahora sea  $a \in \langle g \rangle$ , podemos expresar  $a = g^i, i \in \mathbb{Z}$ , así por Euclides  $\exists k, r \in \mathbb{Z}$ , con  $0 \leq r < o(g)$  tal que  $g^i = o(g)k + r$ , de este modo podemos expresar  $a = g^i = g^r \in H$ .

$\therefore \langle g \rangle \subseteq H$ , así  $|\langle g \rangle| = |H| = o(g)$ , más aún como  $H$  es subgrupo de  $G$ ,  $|H| \mid |G|$ , así  $o(g) \mid |G|$ .  $\square$

**Corolario 2.4.2.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo finito entonces  $g^{|G|} = e \quad \forall g \in G$ .

*Demostración.*

Dado que  $o(g) \mid |G|$ , entonces  $\exists s$  tal que  $o(g)s = |G|$  y

$$g^{|G|} = g^{o(g)s} = (g^{o(g)})^s = (e)^s = e$$

$\square$

**Corolario 2.4.3** (Teorema de Euler). *Sea  $a \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$  entonces  $a^{\varphi(n)} = 1 \pmod{n}$ .*

*Demostración.*

$|(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*| = \varphi(n)$  y por el corolario anterior

$$a^{\varphi(n)} = 1 \pmod{n}$$

□

**Corolario 2.4.4** (Teorema Pequeño de Fermat). *Si  $a \in (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$  con  $p$  primo, entonces:  $a^p \equiv a \pmod{p}$  y  $a^{p-1} = 1$ .*

En efecto, Por el corolario anterior dado  $a \in (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ ,  $a^{\varphi(p)} = 1 \pmod{p}$ , como  $\varphi(p) = p-1$ , se sigue  $a^{p-1} = 1 \pmod{p}$ , luego  $a^p = a$ . □

**Definición 2.4.6.** *Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo sea  $N \leq G$ , diremos que  $N$  es un subgrupo normal en  $G$  denotado por  $N \trianglelefteq G$ , si  $gNg^{-1} = N, \forall g \in G$ .*

**Observación 2.13.** *Si  $(G, \circ, e)$  es un grupo, sea  $N \subseteq G$ , arbitrario entonces  $gNg^{-1} \subseteq G$ . En este caso diremos que  $gNg^{-1}$  es subgrupo conjugado de  $N$ .*

En efecto, Es claro que  $gNg^{-1} \neq \emptyset$  pues  $N \neq \emptyset$ . Además para  $h_1, h_2 \in gNg^{-1}$ ,  $\exists n_1, n_2 \in N$  tal que  $h_1 = gn_1g^{-1}$ ,  $h_2 = gn_2g^{-1}$ , luego:

$$h_1h_2^{-1} = gn_1g^{-1}(gn_2g^{-1})^{-1} = gn_1g^{-1}(g^{-1})^{-1}n_2^{-1}g^{-1} = gn_1n_2^{-1}g^{-1} \in gNg^{-1}$$

$\therefore$  es un subgrupo de  $G$ . □

**Teorema 2.4.2.** *Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo,  $N \leq G$ , entonces las siguientes condiciones son equivalentes:*

- i)  $N \trianglelefteq G$ .
- ii)  $gNg^{-1} \subseteq N \quad \forall g \in G$ .
- iii)  $gNg^{-1} = N \quad \forall g \in G$ . (Nota: en la imagen dice  $gN \subseteq Ng$ , pero el punto iii suele referirse a la igualdad de conjugación o conmutación de clases. Transcribo lo que dice la imagen literalmente en la demostración:  $gNg^{-1} \subseteq N \implies gN \subseteq Ng$ ).
- iv)  $gN = Ng \quad \forall g \in G$ .
- v) El único subgrupo conjugado de  $N$  es  $N$ .



*Demostración.*

- I  $\Rightarrow$  II) De la definición  $gNg^{-1} = N \quad \forall g \in G$ , en particular  $gNg^{-1} \subseteq N \quad \forall g \in G$ .
- II  $\Rightarrow$  III)  $gNg^{-1} \subseteq N \implies (gNg^{-1})g \subseteq Ng$  y  $g(gNg^{-1}) = gN$ , así  $gN \subseteq Ng \quad \forall g \in G$ .  
(Nota: Aquí la transcripción se ajusta a la lógica del manuscrito que parece deducir la igualdad de clases o contención).
- III  $\Rightarrow$  IV) Resta ver que  $Ng \subseteq gN$ . Tenemos que  $gN \subseteq Ng \quad \forall g \in G$ , se sigue:  $g^{-1}N \subseteq Ng^{-1} \quad \forall g \in G \implies g(g^{-1}N) \subseteq gNg^{-1} \implies N \subseteq gNg^{-1} \quad \forall g \in G$ , así:  $Ng \subseteq (gNg^{-1})g = gN \quad \forall g \in G$ .
- IV  $\Rightarrow$  V) Sea  $H$  el conjugado de  $N$  entonces  $H = gNg^{-1}$  para algún  $g \in G$ , entonces:

$$Hg = (gNg^{-1})g = gN = Ng$$

de donde

$$H = (Hg)g^{-1} = (Ng)g^{-1} = N$$

- V  $\Rightarrow$  I) Se sigue de la definición.

□

**Observación 2.14.** Si  $N \trianglelefteq G$  y  $H \leq G$  entonces  $HN = NH$  y por tanto  $NH \leq G$ .

En efecto,  $HN = \bigcup_{h \in H} hN = \bigcup_{h \in H} Nh = NH$ .

□

**Ejemplo 2.26.** Dado el grupo  $S_3$ , calcule los subgrupos:  $S_3 = \{e, \sigma, \theta, \theta^2, \sigma\theta, \theta\sigma\}$

*Sol.*

$$\begin{aligned} H_0 &= \langle e \rangle = \{e\} \\ H_1 &= \langle \sigma \rangle = \{e, \sigma\} \\ H_2 &= \langle \theta \rangle = \{e, \theta, \theta^2\} = \{e, \theta^2, \theta\} \\ H_3 &= \langle \sigma \circ \theta \rangle = \{e, \sigma \circ \theta\} \\ H_4 &= \langle \theta \circ \sigma \rangle = \{e, \theta \circ \sigma\} \\ H_5 &= \langle \{\sigma, \theta\} \rangle = S_3 \end{aligned}$$

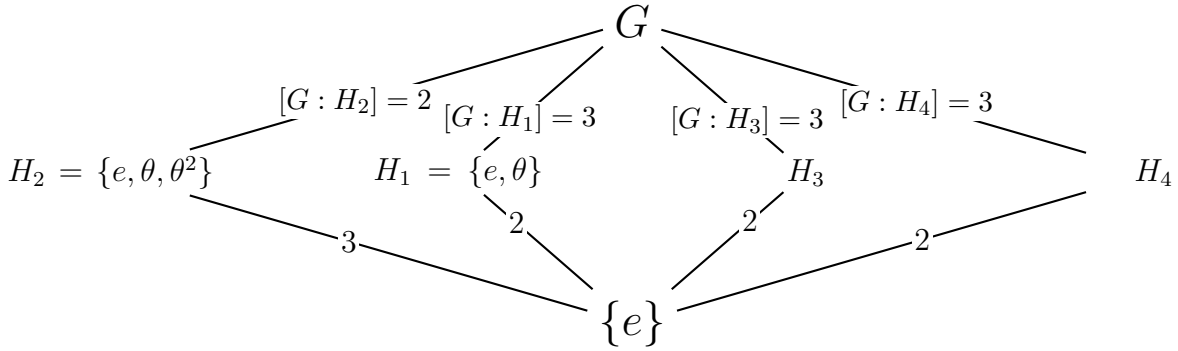
Además podemos notar:

- $H_0 \trianglelefteq G$ , de manera trivial.
- $H_1 \not\trianglelefteq G$ , ya que  $H_1\theta \neq \theta H_1$ .
- $H_2 \trianglelefteq G$ ,  $H_2\sigma = \{\sigma, \theta \circ \sigma, \theta^2 \circ \sigma\} = \{\sigma, \theta \circ \sigma, \sigma \circ \theta\} = \sigma H_2$ .

- $H_3 \not\trianglelefteq G$ ,  $H_3\theta \neq \theta H_3$ .
- $H_4 \not\trianglelefteq G$ ,  $H_4\theta \neq \theta H_4$ .
- $H_5 \trianglelefteq G$ , ya que  $H_5 = S_3$ .

Por otro lado note:

$$\begin{aligned}\theta H_1 \theta^{-1} &= \theta H_1 \theta^2 = \{e, \theta \circ \sigma \circ \theta^2\} = \{e, \theta \circ \theta \circ \sigma\} = \{e, \theta^2 \circ \sigma\} = \{e, \sigma \circ \theta\} = H_3. \\ \theta H_3 \theta^{-1} &= \theta H_3 \theta^2 = \{e, \theta \circ (\sigma \circ \theta) \circ \theta^2\} = \{e, \theta \circ \sigma\} = H_4\end{aligned}$$



**Observación 2.15** (Observación). Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, ser conjugado es una relación de equivalencia.

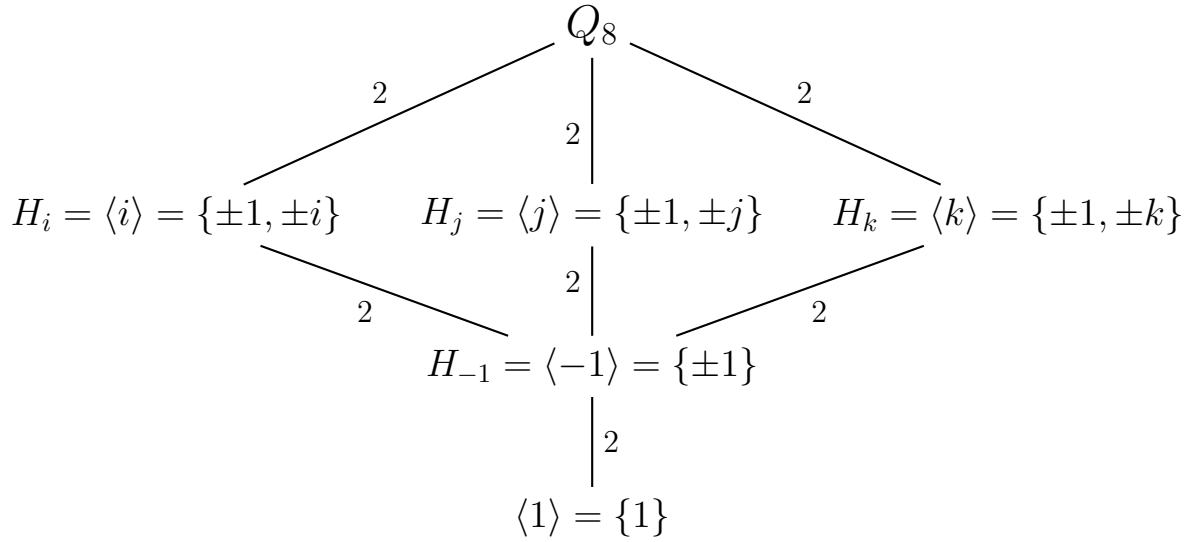
*Demostración.*

- REFLEXIVIDAD:  $H \sim H$  pues  $eHe^{-1} = H \quad \forall H \leq G$ .
- SIMETRÍA: Sean  $H_1, H_2$ , tal que  $H_1 \sim H_2$ , entonces  $H_1 = gH_2g^{-1}$ , luego:  $g^{-1}H_1g = H_2$ , así  $H_2 \sim H_1$ .
- TRANSITIVA: Sean  $H_1, H_2, H_3 \leq G$  tal que  $H_1 \sim H_2, H_2 \sim H_3$ , entonces existen  $g_1, g_2 \in G$  tal que  $H_2 = g_1H_1g_1^{-1}$ ,  $H_3 = g_2H_2g_2^{-1} = g_2(g_1H_1g_1^{-1})g_2^{-1} = (g_2g_1)H_1(g_2g_1)^{-1}$ . Dado que  $g_2g_1 \in G$ ,  $H_1 \sim H_3$ .

Además note que son conjugados  $|H_1| = |H_3|$ . Si son conjugados  $\exists g \in G$  tal que  $H_3 = gH_1g^{-1}$ , sea  $\varphi : H_1 \rightarrow H_3$ , dada por  $\varphi(h_1) = gh_1g^{-1}$ , podemos probar que es biyectiva.

□

**Ejemplo 2.27.** Sea  $Q_8 = \{\pm 1, \pm i, \pm j, \pm k\}$ , con  $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ ,  $ij = k$ ,  $jk = i$ ,  $ki = j$ ,  $-k = ji$ ,  $-i = kj$ ,  $-j = ki$ . Calcule los subgrupos normales y calcule los conjugados.



### 2.4.3. Grupo cociente

Es fácil observar que dado un grupo  $(G, \circ, e)$  y  $N \leq G$ , tal que sea normal, cada clase derecha es una clase izquierda, de este modo se tiene la siguiente proposición.

**Proposición 2.4.5.** *Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sea  $N \trianglelefteq G$ , sea  $G/N = \mathcal{L} = \mathcal{R}$ ,  $*$  definida por  $(aN) * (bN) = ab$  en  $G/N$  está bien definida, i.e. no depende del representante de clase, más aún  $G/N$  es un grupo.*

*Demostración.*

Veamos que  $*$  está bien definida:

En efecto, sean  $aN, a_1N, bN, b_1N \in G/N$ , tales que  $aN = a_1N, bN = b_1N$ , entonces  $Nb = Nb_1$ , así  $a^{-1}a_1 \in N, b^{-1}b_1 \in N$ . Como  $N \trianglelefteq G \implies g(a^{-1}a_1)g^{-1} \in N, \forall g \in G$ . En particular, tome  $g = b^{-1}$ :

$$b^{-1}(a^{-1}a_1)b_1 = b^{-1}a^{-1}a_1b_1$$

Luego:

$$(ab)^{-1}a_1b_1 = b^{-1}a^{-1}a_1b_1 \in N$$

Es decir  $(ab)N = (a_1b_1)N$ . Por lo tanto la función está bien definida.

Ahora probemos que  $G/N$  es un grupo:

En efecto, es asociativa, sean  $aN, bN, cN \in G/N$ :

$$(aN * bN) * cN = abN * cN = (ab)cN = a(bc)N = aN * (bc)N = aN * (bN * cN)$$

Note que existe la identidad, tome  $N = eN = Ne \in G/N$ ,

$$aN * N = aN * eN = (ae)N = aN$$

Además existe el inverso, dado  $aN \in G/N$ , existe  $a^{-1}N \in G/N$ :

$$aN * a^{-1}N = (aa^{-1})N = eN = N, \quad \text{entonces } a^{-1}N \text{ es inverso de } aN.$$

$\therefore G/N$  es un grupo. □

**Definición 2.4.7** (Grupo Cociente). *Sea  $(G, \circ, e)$ , sea  $N \trianglelefteq G$  normal, definimos al grupo cociente:  $G/N := \mathcal{R} = \mathcal{L}$ , con la siguiente operación:*

$$(aN) * (bN) = abN, \quad \text{para } aN, bN \in G/N.$$

# CAPÍTULO 3

## Isomorfismos de Grupos

---

### 3.1. Definición isomorfismo

**Definición 3.1.1.** Sean  $(G_1, \circ, e_1)$ ,  $(G_2, \odot, e_2)$  grupos. Un homomorfismo de grupos es una función  $\varphi : G_1 \rightarrow G_2$  que satisface:

$$\varphi(a \circ b) = \varphi(a) \odot \varphi(b) \quad \forall a, b \in G_1$$

En caso que no haya confusión, se podrá omitir escribir las operaciones  $\circ, \odot$  y se escribirá:

$$\varphi(ab) = \varphi(a)\varphi(b)$$

**Ejemplo 3.1.** Sea  $G_1 = \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3 = \{([a]_2, [b]_3) : a, b \in \mathbb{Z}\}$ , con la operación

$$([a]_2, [b]_3) \circ ([c]_2, [d]_3) = ([a]_2 + [c]_2, [b]_3 + [d]_3)$$

Es fácil notar que  $(G_1, \circ)$  es un grupo abeliano.

Sea  $G_2 = \mathbb{Z}_6$  con la op. de suma de clases, observe que  $G_2$  es cíclico, pues  $G_2 = \langle [1]_6 \rangle$ .

Definamos  $\varphi : G_2 \rightarrow G_1$ ,  $\varphi$  es un homomorfismo.

$$[a]_6 \mapsto ([a]_2, [a]_3)$$

En efecto, sean  $[a]_6, [b]_6 \in G_2$ :

$$\begin{aligned} \varphi([a]_6 + [b]_6) &= \varphi([a + b]_6) = ([a + b]_2, [a + b]_3) \\ &= ([a]_2, [a]_3) + ([b]_2, [b]_3) \\ &= \varphi([a]_6) + \varphi([b]_6) \end{aligned}$$

Además es inyectiva, suponga que  $\varphi([a]_6) = \varphi([b]_6)$ :

$$([a]_2, [a]_3) = ([b]_2, [b]_3) \iff [a]_2 = [b]_2 \wedge [a]_3 = [b]_3 \iff 2 \mid b-a, 3 \mid b-a \iff 6 \mid b-a \iff [a]_6 = [b]_6$$

Note que  $|G_1| = |G_2| = 6$  y como es inyectiva, necesariamente es suprayectiva.

$\therefore \varphi$  es un isomorfismo.  $\therefore G_2 \cong G_1$ .

**Definición 3.1.2.** Sean  $(G_1, \circ, e)$ ,  $(G_2, \odot, e)$  grupos, sea  $\varphi : G_1 \rightarrow G_2$  un homomorfismo, se dice monomorfismo si es inyectiva, se dice epimorfismo si es suprayectiva, si  $\varphi$  es biyectiva se dice isomorfismo. Además si existe el isomorfismo entre  $G_1$  y  $G_2$ , diremos que los grupos son isomorfos y se escribirá  $G_1 \cong G_2$ .

Se clasificarán todos los grupos finitos salvo isomorfismo entre los grupos de orden finito.

**Ejemplo 3.2.** Sea  $G_1$  del ejemplo anterior note que  $S_3 \not\cong G_1$ , pues  $S_3$  no es abeliano, suponga que  $\varphi : S_3 \rightarrow G_1$  con  $\varphi(\sigma) = ([a]_2, [a]_3)$ ,  $\varphi(\theta) = ([b]_2, [b]_3)$  es isomorfismo, entonces  $\varphi(\sigma \circ \theta) = \varphi(\sigma) + \varphi(\theta) = \varphi(\theta) + \varphi(\sigma) = \varphi(\theta \circ \sigma)$ , lo cual es una contradicción.

**Ejemplo 3.3.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo de orden  $p$  con  $p$  primo, entonces:

$$G \cong \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$$

En efecto, definamos:  $\varphi : G \rightarrow \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ , con  $g$  generador de  $G$ .

$$a = g^i \mapsto \underbrace{\bar{1} + \cdots + \bar{1}}_{i\text{-veces}}$$

Note que es homomorfismo, sean  $a, b \in G$ ,  $a = g^i, b = g^j$ , con  $1 \leq i, j < p$ .

$$\varphi(ab) = \varphi(g^i g^j) = \varphi(g^{i+j}) = \underbrace{\bar{1} + \cdots + \bar{1}}_{i+j \text{ veces}} = \underbrace{\bar{1} + \cdots + \bar{1}}_{i \text{ veces}} + \underbrace{\bar{1} + \cdots + \bar{1}}_{j \text{ veces}} = \varphi(g^i) + \varphi(g^j) = \varphi(a) + \varphi(b)$$

Además es inyectiva, suponga que  $\varphi(a) = \varphi(b) \iff \varphi(g^i) = \varphi(g^j) \iff \varphi(g^i g^{-j}) = \bar{1} - \varphi(e) \iff p \mid i - j \iff p \mid |i - j|$ , note además que  $|i - j| < p$  se sigue que  $0 = |i - j| \iff i = j$ , así  $a = g^i = g^j = b$ .

Y es suprayectiva al ser inyectiva y  $|G| = |\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}| = p$ .

**Observación 3.1.** Si  $(G, \circ, e)$  es de orden  $p$ , con  $p$  primo, entonces es cíclico.

En efecto, Sea  $(G, \circ, e)$  de orden  $p$  primo, sea  $a \in G \setminus \{e\}$ ,  $o(a) > 1$ , y  $o(a) \mid |G|$  entonces  $o(a) = p$ , por otro lado como  $o(a) = |\langle a \rangle|$ ,  $|\langle a \rangle| = p$ , luego  $\langle a \rangle = G$ .  $\square$

Con el ejemplo 3.3 se concluye que todos los grupos de orden primo son isomorfos a  $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ , es decir salvo isomorfismo existe un único grupo de orden  $p$  primo.

**Observación 3.2.**  $\ker \varphi \leq G$ ,  $\text{Im } \varphi \leq G_1$ .

En efecto, Observe que:  $\varphi(e) = \varphi(e \circ e) = \varphi(e) \odot \varphi(e)$ , donde  $\varphi(e) = e_1$ , además  $\forall a \in G$ ,

$$e_1 = \varphi(e) = \varphi(a \circ a^{-1}) = \varphi(a) \odot \varphi(a^{-1}), \text{ luego: } \varphi(a)^{-1} = \varphi(a^{-1}).$$

Ahora para  $a, b \in \ker \varphi$ :

$$\varphi(a \circ b^{-1}) = \varphi(a) \odot \varphi(b^{-1}) = \varphi(a) \odot \varphi(b)^{-1} = e_1 \odot e_1^{-1} = e_1$$

Así  $ab^{-1} \in \ker \varphi$ , luego  $\ker \varphi \leq G$ .

Sea  $h, g \in \text{Im } \varphi$ , entonces  $\exists a, b \in G$  tal que  $\varphi(a) = h, \varphi(b) = g$ , luego note:

$$\varphi(a \circ b^{-1}) = \varphi(a) \odot \varphi(b^{-1}) = \varphi(a) \odot \varphi(b)^{-1} = h \odot g^{-1}, \text{ así } h \odot g^{-1} \in \text{Im } \varphi$$

$\therefore \text{Im } \varphi \leq G_1$ . □

## 3.2. Teoremas de isomorfismo

**Teorema 3.2.1** (1er Teorema de isomorfismo). Sean  $(G, \circ, e), (G_1, *, e_1)$ , sea  $\varphi : G \rightarrow G_1$  un homomorfismo, entonces  $(\ker \varphi) \trianglelefteq G$  y:

$$G / \ker \varphi \cong \text{Im } \varphi$$

*Demostración.*

Sea  $a \in \ker \varphi$ , sea  $g \in G$ .

$$\varphi(gag^{-1}) = \varphi(g) * \varphi(a) * \varphi(g^{-1}) = \varphi(g) * e_1 * \varphi(g^{-1}) = \varphi(g) * \varphi(g)^{-1} = e_1$$

Así  $gag^{-1} \in \ker \varphi, \forall g \in G$ , entonces  $(\ker \varphi) \trianglelefteq G$ .

Notemos que  $G / \ker \varphi$  es un grupo con la operación de clases:

$$(g \ker \varphi) \cdot (g_1 \ker \varphi) = (gg_1) \ker \varphi$$

Definamos  $f : G / \ker \varphi \rightarrow \text{Im } \varphi$ , probemos que está bien definida.

$$g \ker \varphi \mapsto \varphi(g)$$

i.e. no depende del representante de clase. Sean  $(g \ker \varphi), (g_1 \ker \varphi) \in G / \ker \varphi$ , suponga que  $g \ker \varphi = g_1 \ker \varphi \implies g^{-1}g_1 \in \ker \varphi$ , entonces:

$$\begin{aligned} f(g \ker \varphi) &= f(g_1 \ker \varphi) \\ \varphi(g^{-1}g_1) &= \varphi(e) \\ \varphi(g)^{-1} * \varphi(g_1) &= e_1 \\ \implies \varphi(g_1) &= \varphi(g) \\ \implies f(g_1 \ker \varphi) &= f(g \ker \varphi) \end{aligned}$$

**Probemos que es inyectiva:** sean  $g \ker \varphi, g_1 \ker \varphi \in G / \ker \varphi$ , tal que:

$$f(g \ker \varphi) = f(g_1 \ker \varphi) \implies \varphi(g) = \varphi(g_1) \implies g^{-1}g \in \ker \varphi,$$

así  $g^{-1}g \ker \varphi = g \ker \varphi$  (Nota: aquí el manuscrito implica igualdad de clases).

**Probemos que es sobreyectiva:** sea  $a \in \text{Im } \varphi \implies \exists g \in G$ , tal que  $\varphi(g) = a$ , así  $f(g \ker \varphi) = \varphi(g) = a$ .

$\therefore f$  es un isomorfismo, y  $G / \ker \varphi \cong \text{Im } \varphi$ . □

**Corolario 3.2.1.** Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo,  $H \leq G$ , entonces  $H \trianglelefteq G$  si y sólo si existe un homomorfismo  $\varphi$  de  $G$  en otro grupo tal que  $H = \ker \varphi$ .

*Demostración.*

$(\Leftarrow)$  Evidente (por la primera parte del teorema anterior).

$(\Rightarrow)$  Sea  $\varphi : G \rightarrow G/H$  con  $\varphi(g) = gH$ , sean  $g_1, g_2 \in G$ , entonces:

$$\varphi(g_1 g_2) = g_1 g_2 H = g_1 H g_2 H = \varphi(g_1) \varphi(g_2). \quad \therefore \varphi \text{ es un homomorfismo.}$$

Además  $g \in \ker \varphi \iff gH = H \iff g \in H. \therefore \ker \varphi = H.$  □

**Ejemplo 3.4.** Sea  $G = GL_n(\mathbb{C})$ , sea  $N = SL_n(\mathbb{C})$ , claramente  $SL_n(\mathbb{C}) \leq GL_n(\mathbb{C})$  con el producto de matrices. Ahora note que  $SL_n(\mathbb{C}) \trianglelefteq GL_n(\mathbb{C})$ , en efecto, sea  $X \in GL_n(\mathbb{C})$ , sea  $Y \in SL_n(\mathbb{C})$ , note:

$$\det(XYX^{-1}) = \det(X) \det(Y) \det(X^{-1}) = \det(X) \cdot 1 \cdot \det(X)^{-1} = 1.$$

$$\implies XYX^{-1} \in SL_n(\mathbb{C}) \quad \forall X \in GL_n(\mathbb{C}).$$

Tomando:  $\varphi : GL_n(\mathbb{C}) \rightarrow \mathbb{C}^*$ , claramente es homomorfismo, ya que dadas  $A, B \in GL_n(\mathbb{C})$ ,  $\varphi(AB) = \det(AB) = \det(A) \det(B) = \varphi(A) \varphi(B)$ , además note que  $A \in \ker \varphi \iff \varphi(A) = 1$ , por lo cual  $\ker \varphi = SL_n(\mathbb{C})$ .

Así:

$$\frac{GL_n(\mathbb{C})}{SL_n(\mathbb{C})} \cong \mathbb{C}^* = \mathbb{C} \setminus \{0\}, \text{ por el 1}^{\text{er}} \text{ teorema de isomorfismos.}$$

**Teorema 3.2.2** (2do teorema de isomorfismo). Sea  $(G, \circ, e)$  un grupo, sean  $H, K \leq G$ , con  $K \trianglelefteq G$  entonces  $K \cap H \trianglelefteq H$  y

$$\frac{H}{H \cap K} \cong \frac{KH}{K}$$

*Demostración.*

Como  $K \trianglelefteq G$ , entonces  $KH = HK$ , así  $KH \leq G$ , más aún  $\forall kh \in KH, k \in K, h \in H$ , se tiene:

$$(kh)K(kh)^{-1} = k(hKh^{-1})k^{-1} = k(K)k^{-1} = K,$$

entonces  $K \trianglelefteq KH$ , así  $\frac{KH}{K}$  es un grupo.

Definamos  $\varphi : H \rightarrow \frac{KH}{K}$ , sean  $h_1, h_2 \in H$ ,

$$h \mapsto hK$$

entonces:  $\varphi(h_1 h_2) = (h_1 h_2)K = h_1 K h_2 K = \varphi(h_1) \varphi(h_2)$ , por lo cual es un homomorfismo.

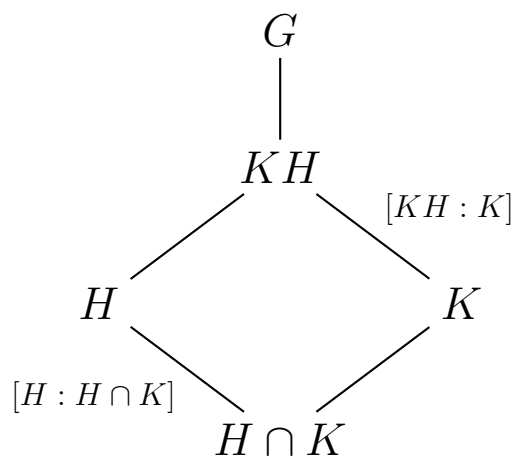
Note que  $h \in \ker \varphi \iff hK = K \iff h \in K \implies h \in H \wedge h \in K \implies h \in H \cap K$ , i.e.  $H \cap K = \ker \varphi$ .



Por el primer teorema de isomorfismo:

$$\frac{H}{H \cap K} \cong \frac{KH}{K}$$

□



$$\left| \frac{KH}{K} \right| = [KH : K]$$

$$\left| \frac{H}{H \cap K} \right| = [H : H \cap K]$$



# CAPÍTULO 4

## Productos Directos

---

### 4.1. Productos Directos

**Definición 4.1.1.** Sea  $(H, \circ), (K, *)$  dos grupos, definamos en  $G = H \times K$ , la función  $\odot : G \times G \rightarrow G$ , dada por:

$$(h_1, k_1) \odot (h_2, k_2) = (h_1 \circ h_2, k_1 * k_2)$$

Claramente  $\odot$  es una operación en  $G$  y se verifica que con esta operación,  $G$  forma un grupo con identidad  $(e_H, e_K)$ .

También se tiene que  $\bar{H} = H \times \{e_K\}$  y  $\{e_H\} \times K = \bar{K}$  son subgrupos normales de  $G$  tales que  $\bar{H} \cap \bar{K} = e_G = (e_H, e_K)$  y  $G = \bar{H}\bar{K}$  en este caso a  $G$  se le llama el producto directo externo de  $H$  con  $K$

**Definición 4.1.2.** Si  $G$  es un grupo tal que existen  $H, K \leq G$  con  $H \triangleleft G$ ,  $K \triangleleft G$ ,  $G = HK$ ,  $H \cap K = \{e\}$ , diremos que  $G$  es el producto directo interno de  $H$  y  $K$ .

**Observación 4.1.** El producto directo de una cantidad finita de grupos es asociativo (la igualdad se da salvo isomorfismo); es decir,

$$(H_1 \times H_2) \times H_3 \cong H_1 \times (H_2 \times H_3) \quad (\text{Se escribe } H_1 \times H_2 \times H_3)$$

Verificarlo.

**Teorema 4.1.1** (Teorema chino del residuo). Sea  $n \in \mathbb{N} \setminus \{1\}$ . Entonces  $\mathbb{Z}_n \cong \mathbb{Z}_{p_1^{e_1}} \times \cdots \times \mathbb{Z}_{p_k^{e_k}}$  en donde  $n = p_1^{e_1} \cdots p_k^{e_k}$  es la factorización en primos de  $n$ .

*Demostración.*

Sea  $\varphi : \mathbb{Z}_n \rightarrow \mathbb{Z}_{p_1^{e_1}} \times \cdots \times \mathbb{Z}_{p_k^{e_k}}$  la función definida por:

$$[a]_n \mapsto ([a]_{p_1^{e_1}}, \dots, [a]_{p_k^{e_k}})$$

La función  $\varphi$  está bien definida. Supongamos que  $[a]_n = [b]_n$ , entonces  $n \mid a - b$ . Dado que  $p_i^{e_i} \mid n$ , por transitividad se tiene que  $p_i^{e_i} \mid a - b$ , es decir  $[a]_{p_i^{e_i}} = [b]_{p_i^{e_i}}$ , de donde se concluye que  $\varphi([a]_n) = \varphi([b]_n)$ .

- $\varphi$  es inyectiva:  $\varphi([a]_n) = \varphi([b]_n)$  si y solo si  $[a]_{p_i^{e_i}} = [b]_{p_i^{e_i}}$  para todo  $1 \leq i \leq k$ . Esto implica que  $p_i^{e_i} \mid a - b$  para todo  $1 \leq i \leq k$ . Como los  $p_i$  son primos distintos, tenemos que  $(p_i^{e_i}, p_j^{e_j}) = 1$  para todo  $i \neq j$ . En consecuencia, el producto  $n = p_1^{e_1} \dots p_k^{e_k}$  divide a  $a - b$ , de donde  $[a]_n = [b]_n$ .

Nótese además que las cardinalidades coinciden:  $n = |\mathbb{Z}_n| = |\mathbb{Z}_{p_1^{e_1}} \times \dots \times \mathbb{Z}_{p_k^{e_k}}| = p_1^{e_1} \dots p_k^{e_k}$ . Al ser una función inyectiva entre conjuntos finitos del mismo tamaño,  $\varphi$  es biyectiva.

- $\varphi$  es un homomorfismo:

$$\begin{aligned} \varphi([a]_n + [b]_n) &= \varphi([a + b]_n) = ([a + b]_{p_1^{e_1}}, \dots, [a + b]_{p_k^{e_k}}) \\ &= ([a]_{p_1^{e_1}} + [b]_{p_1^{e_1}}, \dots, [a]_{p_k^{e_k}} + [b]_{p_k^{e_k}}) \\ &= ([a]_{p_1^{e_1}}, \dots, [a]_{p_k^{e_k}}) + ([b]_{p_1^{e_1}}, \dots, [b]_{p_k^{e_k}}) \\ &= \varphi([a]_n) + \varphi([b]_n) \end{aligned}$$

Finalmente,  $\varphi$  es un isomorfismo y por lo tanto  $\mathbb{Z}_n \cong \mathbb{Z}_{p_1^{e_1}} \times \dots \times \mathbb{Z}_{p_k^{e_k}}$ . □

**Ejemplo 4.1.** Sea  $G$  un grupo de orden  $pq$  con  $p, q$  primos distintos. Si  $H, K$  son subgrupos normales de  $G$  con  $|H| = p$  y  $|K| = q$ , entonces  $G \cong H \times K$ .

*Demostración.*

Como  $H, K \trianglelefteq G$ , si tomamos  $g \in H \cap K$  entonces  $o(g) \mid |H| = p$  y  $o(g) \mid |K| = q$ . Dado que  $p$  y  $q$  son distintos,  $o(g) = 1$ , lo que implica que  $H \cap K = \{e\}$ .

Más aún, el orden del producto es  $|HK| = \frac{|H||K|}{|H \cap K|} = \frac{pq}{1} = |G|$ , luego  $G = HK$ . Además, si  $g \in HK$  tuviera dos representaciones  $g = h_1 k_1 = h_2 k_2$  con  $h_1, h_2 \in H$  y  $k_1, k_2 \in K$ , entonces  $h_1^{-1} h_2 = k_1 k_2^{-1}$ . Este elemento pertenecería a la intersección  $H \cap K = \{e\}$ , lo que implica  $h_1 = h_2$  y  $k_1 = k_2$ . Es decir, la representación de  $g \in G$  como producto de un elemento de  $H$  y uno de  $K$  es única.

Definimos la función  $\varphi : G \rightarrow H \times K$  mediante:

$$g = hk \mapsto (h, k)$$

Note que si  $h \in H$  y  $k \in K$ , tenemos que  $hkh^{-1}k^{-1}$  pertenece a  $H \cap K$  (pues  $H$  y  $K$  son normales), y como la intersección es trivial,  $hkh^{-1}k^{-1} = e$ , luego  $hk = kh$ .

- $\varphi$  es un homomorfismo: Sean  $g = hk$  y  $g_1 = h_1 k_1$  en  $G$  con  $h, h_1 \in H$  y  $k, k_1 \in K$ . Usando que los elementos de  $H$  y  $K$  conmutan:

$$\begin{aligned} \varphi(gg_1) &= \varphi(hkh_1 k_1) = \varphi(hh_1 k k_1) = (hh_1, k k_1) \\ &= (h, k)(h_1, k_1) = \varphi(g)\varphi(g_1) \end{aligned}$$

- $\varphi$  es inyectiva: Si  $g = hk$ ,  $g_1 = h_1k_1$  y  $\varphi(g) = \varphi(g_1)$ , entonces  $(h, k) = (h_1, k_1)$ , luego  $h = h_1$  y  $k = k_1$ , de donde  $g = g_1$ .
- $\varphi$  es sobreyectiva: Dado un par  $(h, k) \in H \times K$ , existe el elemento  $g = hk \in G$  tal que  $\varphi(g) = (h, k)$ .

Por lo tanto  $G \cong H \times K$ ; de hecho,  $G$  es el producto directo interno de  $H$  y  $K$ .  $\square$

**Corolario 4.1.1.** *Sea  $G$  un grupo abeliano de orden  $pq$  con  $p, q$  primos distintos, entonces:*

$$G \cong \mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_q$$

*Demostración.*

Basta ver que existe un elemento de orden  $p$  y un elemento de orden  $q$ , lo cual nos lo dará el teorema de Cauchy (Ver más adelante).  $\square$

**Teorema 4.1.2** (Teorema de Cayley). *Todo grupo  $G$  es isomorfo a un subgrupo de permutaciones.*

*Demostración.*

Sea  $S_G$  el grupo de todas las permutaciones del conjunto  $G$  (biyecciones de  $G$  en sí mismo). Definimos la función  $\varphi : G \rightarrow S_G$  dada por  $\varphi(g) = f_g$ , donde  $f_g : G \rightarrow G$  es la función de multiplicación por la izquierda:

$$f_g(h) = gh \quad \forall h \in G$$

Veamos que  $\varphi$  es un isomorfismo sobre su imagen, en efecto:

- $\varphi$  está bien definida (es decir,  $f_g \in S_G$ ): Para cualquier  $g \in G$ , la función  $f_g$  es biyectiva. En efecto, tiene inversa, la cual es  $f_{g^{-1}}$ , ya que para todo  $h \in G$ :

$$(f_g \circ f_{g^{-1}})(h) = f_g(g^{-1}h) = g(g^{-1}h) = h = \text{id}(h)$$

De manera análoga,  $f_{g^{-1}} \circ f_g = \text{id}$ . Al ser biyectiva,  $f_g$  es una permutación de  $G$ , por lo que  $f_g \in S_G$ .

- $\varphi$  es un homomorfismo: Sean  $g, k \in G$ . Queremos ver que  $\varphi(gk) = \varphi(g) \circ \varphi(k)$ . Evaluamos ambas funciones en un elemento arbitrario  $h \in G$ :

$$\begin{aligned} \varphi(gk)(h) &= f_{gk}(h) = (gk)h \\ (\varphi(g) \circ \varphi(k))(h) &= f_g(f_k(h)) = f_g(kh) = g(kh) \end{aligned}$$

Por asociatividad,  $(gk)h = g(kh)$ , por lo tanto  $f_{gk} = f_g \circ f_k$ , lo que implica que  $\varphi$  preserva la operación.

- $\varphi$  es inyectiva: Supongamos que  $\varphi(g) = \varphi(k)$ . Esto significa que las funciones son idénticas, es decir,  $f_g = f_k$ .

$$f_g(h) = f_k(h) \quad \forall h \in G \implies gh = kh \quad \forall h \in G$$

En particular, tomando  $h = e$  (neutro de  $G$ ), obtenemos  $ge = ke$ , lo que implica  $g = k$ .

Concluimos que  $\varphi$  es un isomorfismo entre  $G$  e  $\text{Im}(\varphi)$ . Dado que  $\text{Im}(\varphi)$  es un subgrupo de  $S_G$ , hemos demostrado que  $G$  es isomorfo a un subgrupo de permutaciones.  $\square$

**Ejemplo 4.2.** Para ilustrar el teorema anterior, consideremos el grupo  $S_3 = \{id, \theta, \sigma, \theta\sigma, \sigma\theta, \theta^2\}$ . La función  $\varphi : S_3 \rightarrow S_{S_3}$  asocia a cada  $g \in S_3$  una permutación de los elementos de  $S_3$ .

Por ejemplo, si tomamos  $g = \theta$ , la función asociada  $f_\theta : S_3 \rightarrow S_3$  definida por  $h \mapsto \theta h$  permuta los elementos de  $S_3$  de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} id &\mapsto \theta \\ \theta &\mapsto \theta^2 \\ \sigma &\mapsto \theta\sigma \\ \theta\sigma &\mapsto \theta^2\sigma \\ \sigma\theta &\mapsto \sigma \\ \theta^2 &\mapsto id \end{aligned}$$

**Corolario 4.1.2.** Sea  $G$  un grupo de orden finito  $n$ , entonces  $G \hookrightarrow S_n$ .

*Demostración.*

Sabemos que  $G \hookrightarrow S_X$  y  $S_X \cong S_n$ . En efecto, si  $G = \{a_1, \dots, a_n\}$ , definimos  $\psi : S_X \rightarrow S_n$  dada por  $f \mapsto \bar{f}$ , en donde si  $f(a_i) = a_j$ , entonces  $\bar{f}(i) = j$ , con  $X = \{a_1, \dots, a_n\}$  y  $\{1, \dots, n\}$ .

- $\psi$  está bien definida: Pues si  $f : X \rightarrow X$  es biyectiva, en efecto:
  - $\bar{f}$  inyectiva:  $\bar{f}(i) = \bar{f}(j) \implies f(a_i) = f(a_j) \implies a_i = a_j \implies i = j$  (pues  $f$  es inyectiva).
  - $\bar{f}$  es sobre: Dado  $j \in \{1, \dots, n\}$ , tenemos  $a_j \in G$ . Como  $f$  es biyectiva,  $\exists a_i \in \{1, \dots, n\}$  tal que  $f(a_i) = a_j$ , luego  $\bar{f}(i) = j$ .
- $\psi$  es homomorfismo:  $\psi(g \circ f) = \psi(g) \circ \psi(f)$ . En efecto,  $\overline{g \circ f}(i) = j$  si  $(g \circ f)(a_i) = a_j$ . Suponga que  $f(a_i) = a_k$  y  $g(a_k) = a_j$ , entonces  $\bar{f}(i) = k$  y  $\bar{g}(k) = j$ . Más aún,  $(g \circ f)(a_i) = g(f(a_i)) = g(a_k) = a_j$ , así que  $\overline{g \circ f}(i) = j$ . Luego  $(\bar{g} \circ \bar{f})(i) = \bar{g}(\bar{f}(i)) = \bar{g}(k) = j$ . Así que  $\overline{g \circ f} = \bar{g} \circ \bar{f}$ , de donde  $\psi(g \circ f) = \overline{g \circ f} = \bar{g} \circ \bar{f} = \psi(g) \circ \psi(f)$ .
- $\psi$  es inyectiva:  $\psi(f) = \psi(g) \implies \bar{f} = \bar{g} \implies \bar{f}(i) = \bar{g}(i) \quad \forall 1 \leq i \leq n \implies f(a_i) = g(a_i) \quad \forall 1 \leq i \leq n \implies f = g$ .

- $\psi$  es sobre: Sea  $h \in S_n$ , entonces  $\exists f : S_X \rightarrow S_X$  dada por  $f(a_i) = a_{h(i)}$  tal que  $(\psi(f))(i) = \bar{f}(i) = h(i) \forall 1 \leq i \leq n$ . Por lo tanto  $h = \bar{f} = \psi(f)$ .

Luego  $S_X \cong S_n$  y  $G \hookrightarrow S_n$ . □

**Teorema 4.1.3.** Sea  $G$  un grupo finito,  $H \leq G$ .  $X = \{Hg \mid g \in G\} = (G/H)$  entonces existe  $\varphi : G \rightarrow S_X$  un homomorfismo tal que  $N = \text{Ker } \varphi$  es el mayor subgrupo normal en  $G$  contenido en  $H$ .

*Demostración.*

Sea  $\varphi : G \rightarrow S_X$  definida por  $\varphi(g) = f_g$  con  $f_g : X \rightarrow X$  dada por:

$$f_g(Hk) = Hkg^{-1}$$

Veamos que  $f_g$  no depende del representante de clase ( $f_g$  es función). En efecto, Si  $Hk = Hk_1$ , entonces  $kk_1^{-1} \in H$ , luego  $kgg^{-1}k_1^{-1} \in H$  o  $Hkg^{-1} = Hk_1g^{-1}$ , así que  $f(Hk) = Hkg^{-1} = f(Hk_1)$ , por lo cual,  $f_g$  es función.

Note que  $f_g \in S_X$  pues,

- $f_g$  es inyectiva:  $f_g(Hk) = f_g(Hk_1)$  si y solo si  $Hkg^{-1} = Hk_1g^{-1}$  si y solo si  $Hk = Hk_1$ .
- $f_g$  es sobreyectiva: Dado  $Hk \in X$  se tiene  $f_g(Hkg) = Hkgg^{-1} = Hk$ .

Veamos que  $\varphi$  es homomorfismo:

$$\varphi(gg_1) = f_{gg_1} \stackrel{?}{=} f_g \circ f_{g_1} = \varphi(g)\varphi(g_1)$$

pues

$$f_{gg_1}(Hk) = Hk(gg_1)^{-1} = H(kg_1^{-1})g^{-1} = f_g(Hkg_1^{-1}) = f_g(f_{g_1}(Hk)) = (f_g \circ f_{g_1})(Hk)$$

Sea  $N = \text{Ker } \varphi$ , claramente  $N \trianglelefteq G$ , además para  $n \in N$  tenemos:

$$\text{Id} = \varphi(n) = f_n \quad \text{con } f_n(Hk) = Hkn^{-1}$$

Así que  $Hkn^{-1} = Hk \quad \forall Hk \in X$  o  $Hkn^{-1} = Hk \quad \forall k \in G$ , en particular para  $k \in H$ ,  $H = Hk$  y  $Hn^{-1} = Hkn^{-1} = Hk = H$  de donde  $n \in H$ . Luego  $N \subseteq H$ .

Sea  $N_1 \trianglelefteq G$  con  $N_1 \subseteq H$ , veamos que  $N_1 \subseteq N$ . Sea  $n_1 \in N_1$ ,  $\varphi(n_1) = f_{n_1}$  con  $f_{n_1}(Hk) = Hkn_1^{-1} = Hkn_1^{-1}k^{-1}k \quad \forall k \in G$ . Como  $N_1 \trianglelefteq G$ ,  $kn_1^{-1}k^{-1} \in N_1 \subseteq H$  así que  $H(kn_1^{-1}k^{-1})k = Hk$ , es decir  $f_{n_1}(Hk) = Hk$  de donde  $f_{n_1} = \text{Id}$ , es decir  $n_1 \in \text{Ker } \varphi$  y  $N_1 \subseteq N$ . □

**Corolario 4.1.3.** Sea  $G$  finito  $H \leq G$ ,  $H \neq G$  tal que  $|G| \nmid [G : H]!$  entonces  $H$  contiene un subgrupo normal en  $G$  no trivial.

*Demostración.*

Si  $\varphi$  fuera inyectiva entonces  $G \cong \varphi(G) \leq S_X$  así que  $|G| \mid |S_X| = [G : H]!$  lo cual por hipótesis no se cumple. Luego  $\{e\} \neq \text{Ker } \varphi \subseteq H$ , y como  $\text{Ker } \varphi \trianglelefteq G$ , concluimos que  $H$  contiene un subgrupo normal no trivial (y  $\text{Ker } \varphi \neq G$  pues  $H \neq G$ ).  $\square$

**Corolario 4.1.4.** *Sea  $p$  primo,  $G$  un grupo finito tal que  $p$  es el menor primo que divide a  $|G|$  y  $H \leq G$ ,  $H \neq G$  con  $[G : H] = p$ , entonces  $H \trianglelefteq G$ .*

*Demostración.*

Sea  $|G| = pm$ .

Si  $m = 1$ , como  $[G : H] = p$ , entonces  $|H| = \frac{|G|}{[G:H]} = \frac{p}{p} = 1$ , luego  $H = \{e\}$ , el cual es normal en  $G$ .

Si  $m \neq 1$ , los factores primos de  $m$  son mayores o iguales a  $p$ . Veamos que esto implica que  $|G| \nmid [G : H]!$ , es decir,  $pm \nmid p!$ . Procedemos por reducción al absurdo para justificar esta afirmación: Supongamos que  $|G| \mid p!$ , entonces  $pm \mid p!$ , lo que implica que  $m \mid (p-1)!$ . Si  $q$  es un factor primo de  $m$ , entonces  $q \mid (p-1)!$ , lo cual implica que  $q \leq p-1$ . Sin embargo,  $q$  es un factor de  $|G|$  (a través de  $m$ ), y por hipótesis  $p$  es el menor primo que divide a  $|G|$ , por lo que  $q \geq p$ . Tenemos así que  $q \leq p-1$  y  $q \geq p$ , lo cual es una contradicción.

Por lo tanto,  $|G| \nmid p!$ . (La demostración concluye aplicando el corolario anterior).  $\square$

## 4.2. El grupo Simétrico $S_n$

Recordemos que  $S_n$  con la composición de funciones es un grupo. Cada elemento de  $S_n$  se llama una permutación (la cual es una función biyectiva de  $\{1, \dots, n\}$  en sí mismo). En este caso si  $\sigma \in S_n$  se denotará:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ \sigma(1) & \sigma(2) & \cdots & \sigma(n) \end{pmatrix}$$

**Definición 4.2.1.** *Un ciclo de longitud  $1 \leq k \leq n$  en  $S_n$  es un elemento de  $S_n$  tal que existen  $\{i_1, \dots, i_k\} \subseteq \{1, \dots, n\}$  con  $\sigma(i_1) = i_2, \sigma(i_2) = i_3, \dots, \sigma(i_{k-1}) = i_k, \sigma(i_k) = i_1$  y  $\sigma(j) = j \ \forall j \notin \{i_1, \dots, i_k\}$ .*

Note que en este caso:

$$\begin{aligned} \sigma^2(i_1) &= \sigma(\sigma(i_1)) = \sigma(i_2) = i_3 & \text{y} & \quad \sigma^k(i_1) = i_1 \\ \sigma^3(i_1) &= \sigma(\sigma^2(i_1)) = \sigma(i_3) = i_4 \\ &\vdots \\ \sigma^l(i_1) &= i_{1+l} & \text{si } 1 \leq l+1 \leq k, \ l \leq k-1, & \quad \sigma^k(i_j) = i_{j+k-k} = i_j \end{aligned}$$

Más aún:

$$\sigma^l(i_j) = i_{j+l} \quad 1 \leq j+l \leq k$$



$$\sigma^l(i_j) = i_{j+l-k} \quad j+l > k \quad (1 \leq l \leq k-j)$$

En este caso, en lugar de escribir

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & i_1 & i_2 & \cdots & i_k & \cdots & n \\ 1 & \cdots & i_2 & i_3 & \cdots & i_1 & \cdots & n \end{pmatrix}$$

Escribiremos  $\sigma = (i_1 \ i_2 \ i_3 \ \dots \ i_k)$  y se tiene que  $\sigma$  se puede denotar de  $k$  diferentes formas, a saber:

$$\sigma = (i_1, \dots, i_k) = (i_2, i_3, \dots, i_k, i_1) = \cdots = (i_k, i_1, i_2, \dots, i_{k-1})$$

Si  $k = 1$ ,  $\sigma(i) = i \ \forall i$ , es decir,  $\sigma = id$  y se denota por  $\sigma = (1) = (2) = \cdots = (k) = (n)$ .

Si  $k = 2$ ,  $\sigma(i_1, i_2)$  y se llama una transposición. En este caso:

$$\begin{aligned} \sigma^2(i_1) &= \sigma(i_2) = i_1 \\ \sigma^2(i_2) &= \sigma(i_1) = i_2 \end{aligned}$$

Así,  $\sigma^2 = id$ , es decir,  $\sigma = \sigma^{-1}$ .

Si  $\sigma$  es un ciclo de longitud  $k$  también se le llama un  $k$ -ciclo. Observe que si  $\sigma$  es un  $k$ -ciclo,  $\sigma^k = id$ , de hecho  $|\sigma| = k$ .

$$\sigma^l(i_j) = \begin{cases} i_{j+l} & \text{si } 1 \leq l \leq k-j \\ i_{l-k+j} & \text{si } k-j < l \leq k \end{cases}$$

En particular si  $k = l$ ,  $\sigma^k(i_j) = i_{k-k+j} = i_j$ . Así  $|\sigma| \mid k$ . Además  $\sigma^l(i_1) \neq i_1, \forall 1 \leq l < k$  así que  $|\sigma| \geq k$ , de donde  $|\sigma| = k$ .

**Definición 4.2.2.** Diremos que dos ciclos  $\sigma, \tau \in S_n$  son disjuntos si:

i) Cuando  $\sigma(i_1) = i_2$  con  $i_1 \neq i_2$  se tiene que  $\tau(i_1) = i_1$ .

ii) Cuando  $\tau(i_1) = i_2$  con  $i_1 \neq i_2$  se tiene que  $\sigma(i_1) = i_1$ .

(Parafraseando, los elementos que mueve  $\sigma$ ,  $\tau$  los fija y recíprocamente).

**Ejemplo 4.3.** Consideremos  $S_5$ , entonces  $\sigma = (1 \ 2)$  y  $\tau = (3 \ 4 \ 5)$  son disjuntos.

**Nota 4.2.1.** Si  $\sigma = (i_1, \dots, i_k)$  y  $\tau = (j_1, \dots, j_l)$ , entonces  $\sigma$  y  $\tau$  son disjuntos si y sólo si

$$\{i_1, \dots, i_k\} \cap \{j_1, \dots, j_l\} = \emptyset$$

**Observación 4.2.** Si  $\sigma, \tau$  son ciclos disjuntos, entonces  $\sigma \circ \tau = \tau \circ \sigma$ , es decir, conmutan.

*Demostración.*

Sea  $\sigma = (i_1, \dots, i_k)$  y  $\tau = (j_1, \dots, j_l)$ . Claramente  $\sigma \circ \tau$  y  $\tau \circ \sigma$  tienen el mismo dominio. Ahora si  $s \notin \{i_1, \dots, i_k, j_1, \dots, j_l\}$ :

$$\begin{aligned}(\sigma \circ \tau)(s) &= \sigma(\tau(s)) = \sigma(s) = s \\ (\tau \circ \sigma)(s) &= \tau(\sigma(s)) = \tau(s) = s\end{aligned}$$

Si  $s \in \{i_1, \dots, i_k\}$  entonces  $s \notin \{j_1, \dots, j_l\}$ , así que:

$$(\sigma \circ \tau)(s) = \sigma(\tau(s)) = \sigma(s)$$

Más aún  $\sigma(s) \in \{i_1, \dots, i_k\}$ , luego  $\sigma(s) \notin \{j_1, \dots, j_l\}$  y  $\tau(\sigma(s)) = \sigma(s)$ , por lo tanto  $(\tau \circ \sigma)(s) = (\sigma \circ \tau)(s)$ .

Por simetría si  $s \in \{j_1, \dots, j_l\}$ ,  $(\tau \circ \sigma)(s) = (\sigma \circ \tau)(s)$  en cualquier caso se tiene la igualdad y por lo tanto  $\sigma \circ \tau = \tau \circ \sigma$ .  $\square$

**Teorema 4.2.1.** *Sea  $\theta \in S_n$ , entonces  $\theta$  se puede representar de manera única como producto de ciclos ajenos (disjuntos) salvo orden.*

*Demostración.*

Sea  $\{i_1, \dots, i_k\}$  los elementos que mueve  $\theta$  y procedamos por inducción sobre  $k$ .

Para  $k = 1$ ,  $\theta = id$  no hay nada que ver  $id = (1)$ .

Para  $k = 2$ ,  $\theta = (i_1, i_2)$  y ya se tiene.

Suponga el resultado para todo  $1 \leq l \leq k$  y considere que  $\theta$  mueve a los elementos  $\{i_1, \dots, i_k, i_{k+1}\}$ . Considere que  $\theta$  mueve a los elementos  $\{i_1, \dots, i_k, i_{k+1}\}$ . Observe que  $i_1, \theta(i_1), \theta^2(i_1), \dots, \theta^{k+1}(i_1) \in \{i_1, \dots, i_{k+1}\}$ , por lo tanto  $\{i_1, \theta(i_1), \dots, \theta^{k+1}(i_1)\} \subseteq \{i_1, \dots, i_{k+1}\}$ , luego existen  $1 \leq l, l' \leq k+2$  y  $\theta^l(i_1) = \theta^{l'}(i_1)$  y podemos suponer  $l > l'$ , en este caso  $\theta^{l-l'}(i_1) = i_1$ , y  $1 \leq l - l' \leq k+2 - l' \leq k+1$ , es decir existe  $p$  tal que  $\theta^p(i_1) = i_1$ ,  $1 \leq p \leq k+1$ .

Sea  $p$  el mínimo entero para el cual pasa esto.

Sea  $\sigma = (i_1, \theta(i_1), \dots, \theta^{p-1}(i_1))$ .  $\{i_1, \theta(i_1), \dots, \theta^{p-1}(i_1)\} \subseteq \{i_1, \dots, i_{k+1}\}$  y definamos

$$\tau(i_j) = \begin{cases} \sigma(i_j) & \text{si } \sigma(i_j) = \theta^l(i_1) \text{ para algún } 1 \leq l \leq p-1 \\ \theta(i_j) & \text{si } i_j \neq \theta^l(i_1) \forall 1 \leq l \leq p-1 \end{cases}$$

Entonces  $\sigma \circ \tau = \theta$ . Si  $j \notin \{i_1, \dots, i_{k+1}\}$  entonces  $j \neq \theta^l(i_1) \forall 1 \leq l \leq p-1$  y entonces

$$(\sigma \circ \tau)(j) = \sigma(\tau(j)) = \sigma(\theta(j)) = \sigma(j) = j = \theta(j)$$

Si  $j \in \{i_1, \dots, i_{k+1}\} \cap \{i_1, \theta(i_1), \dots, \theta^{p-1}(i_1)\}$ , entonces  $j = \theta^l(i_1)$  con  $0 \leq l \leq p-1$ .

$$\theta(j) = \theta^{l+1}(i_1) \quad \text{y} \quad \sigma \circ \tau(j) = \sigma(\tau(j)) = \sigma(\theta^l(i_1)) = \theta^{l+1}(i_1) = \theta(j)$$

(Definición: Como  $j$  está en el soporte de  $\sigma$ ,  $\tau(j) = \theta(j)$ , luego  $\sigma(\theta(j)) = \theta(j)$ . Y como  $\sigma$  es el ciclo  $(i_1, \dots, \theta^{p-1}(i_1))$ ,  $\sigma(j) = \theta(j)$ ). En cualquier caso  $\theta(j) = (\sigma \circ \tau)(j)$  por lo tanto  $\theta = \sigma \circ \tau$ .

Ahora  $\tau$  mueve a los elementos  $\{i_1, \dots, i_{k+1}\} \setminus \{i_1, \sigma(i_1), \dots, \sigma^{p-1}(i_1)\}$  cuya cardinalidad es menor o igual a  $k$ . Por hipótesis de inducción  $\tau$  es producto de ciclos disjuntos y por lo tanto  $\theta$  lo es.

Unicidad: Suponga ahora que

$$\theta = \sigma_1 \dots \sigma_k = \tau_1 \dots \tau_l$$

Con los  $\sigma_i$ 's ciclos disjuntos a pares y los  $\tau_i$ 's ciclos disjuntos a pares.

Si  $\theta = id$  no hay nada que ver, si no, sea  $i_1$  un elemento que mueve  $\theta$ , entonces existen  $1 \leq i \leq k$  y  $1 \leq j \leq l$  tales que  $\sigma_i, \tau_j$  mueven a  $i_1$ , de hecho  $i, j$  son únicos pues los  $\sigma_i$ 's y los  $\tau_i$ 's son disjuntos o más aún como son disjuntos conmutan, por lo que podemos pensar que  $i = 1 = j$ , en este caso  $\sigma_2, \dots, \sigma_k, \tau_2, \dots, \tau_l$  no mueven a  $i_1$ .

Además  $\sigma_1 = (i_1, \sigma_1(i_1), \dots, \sigma_1^{s-1}(i_1))$ ,  $\tau_1 = (i_1, \tau_1(i_1), \dots, \tau_1^{r-1}(i_1))$  con  $s$  y  $r$  los órdenes de  $\sigma_1$  y  $\tau_1$  respectivamente. Como los  $\sigma_i$ 's son disjuntos  $\sigma_j$  no mueve a ninguno de  $\{i_1, \sigma(i_1), \dots, \sigma^{k-1}(i_1)\} \forall 1 < j \leq k$ . Análogamente  $\tau_j$  no mueve a ninguno de  $\{i_1, \tau(i_1), \dots, \tau^{l-1}(i_1)\} \forall 1 < j \leq l$ . Por tanto para  $m \in \mathbb{N}$

$$\begin{aligned} \theta^m(i_1) &= (\sigma_1 \dots \sigma_k)^m(i_1) = (\sigma_1 \dots \sigma_k)^{m-1}((\sigma_1 \dots \sigma_k)(i_1)) \\ &= (\sigma_1 \dots \sigma_k)^{m-1}(\sigma_1(i_1)) = \dots = \sigma_1^m(i_1) \end{aligned}$$

Análogamente

$$\begin{aligned} \theta^m(i_1) &= \tau_1^m(i_1) \\ \sigma_1^m(i_1) &= \tau_1^m(i_1) \end{aligned}$$

Ahora podemos suponer que  $s \leq r$ , entonces

$$i_1 = \sigma_1^s(i_1) = \tau_1^s(i_1)$$

$s > r - 1$  o  $s \geq r$ , de donde  $s = r$ .

Más aún, como  $\sigma_1^m(i_1) = \tau_1^m(i_1) \forall m \in \mathbb{N}$  se tiene que  $\sigma_1 = \tau_1$ . Ahora de la igualdad  $\theta = \sigma_1 \dots \sigma_k = \tau_1 \dots \tau_l$  se obtiene  $\sigma_2 \dots \sigma_k = \tau_2 \dots \tau_l$ . Podemos suponer  $k \leq l$ . En cuyo caso realizando el mismo proceso obtenemos  $\sigma_k = \tau_k$  y  $Id = \tau_{k+1} \dots \tau_l$ . Como los  $\tau_j$  son disjuntos a pares necesariamente  $\tau_{k+1} \dots \tau_l$  tienen longitud uno. Por lo tanto  $l = k$ .  $\square$

**Corolario 4.2.1.** Sea  $\theta \in S_n$ , entonces el orden de  $\theta$  es el mínimo común múltiplo de los órdenes de los ciclos que aparecen en su factorización.

*Demostración.*

Sea  $\theta = \sigma_1 \dots \sigma_k$  con los  $\sigma_i$ 's ciclos disjuntos a pares y  $n_i = o(\sigma_i)$ ,  $m = [n_1, \dots, n_k]$  entonces

$$\theta^m = (\sigma_1 \dots \sigma_k)^m = \sigma_1^m \dots \sigma_k^m = id$$

De donde  $o(\theta) \mid m$ . Si  $o(\theta) < m$ ,  $Id = \theta^{o(\theta)} = \sigma_1^{o(\theta)} \dots \sigma_k^{o(\theta)}$ , por lo cual  $n_i \mid o(\theta) \forall i$ , de donde  $m = [n_1, \dots, n_k] \mid o(\theta)$  de donde  $m = o(\theta)$ .  $\square$

**Observación 4.3.** 1. Sea  $(i\ j)$  una transposición de  $S_n$ , entonces  $(i\ j) = (1\ i)(1\ j)(1\ i)$ .

2. Sean  $x_1, \dots, x_n$  variables. Definimos

$$P_n = P_n(x_1, \dots, x_n) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_i - x_j) \quad \forall n \geq 2$$

y hagamos actuar el grupo de permutaciones sobre  $P_n$  de la siguiente forma.  
Para  $\theta \in S_n$ :

$$\theta(P_n) = P_n^\theta = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_{\theta(i)} - x_{\theta(j)})$$

3. Si  $1 < k \leq n$  y  $\theta = (1, k)$ , entonces  $\theta(P_n) = -P_n$ .

4. Si  $\theta = (i\ j)$  es una transposición,  $\theta(P_n) = -P_n$ .

5. Sea  $\theta \in S_n$  un  $r$ -ciclo, entonces  $\theta$  es producto de transposiciones (se puede representar como un producto de transposiciones, no necesariamente única).

*Demostración de 1).*

Queremos demostrar que la transposición  $(i\ j)$  es igual al producto  $(1\ i)(1\ j)(1\ i)$ . Llamemos  $\sigma = (1\ i)(1\ j)(1\ i)$  y evaluemos su acción sobre los elementos de  $\{1, \dots, n\}$  actuando de derecha a izquierda (orden de composición de funciones). Asumimos  $1, i, j$  distintos (si alguno es igual, la igualdad es trivial).

- Para el elemento 1:

$$1 \xrightarrow{(1\ i)} i \xrightarrow{(1\ j)} i \xrightarrow{(1\ i)} 1$$

Luego  $\sigma(1) = 1$ . (El 1 queda fijo, lo cual es correcto pues  $(i\ j)$  no mueve al 1).

- Para el elemento  $i$ :

$$i \xrightarrow{(1\ i)} 1 \xrightarrow{(1\ j)} j \xrightarrow{(1\ i)} j$$

Luego  $\sigma(i) = j$ .

- Para el elemento  $j$ :

$$j \xrightarrow{(1\ i)} j \xrightarrow{(1\ j)} 1 \xrightarrow{(1\ i)} i$$

Luego  $\sigma(j) = i$ .

- Para cualquier otro elemento  $k \notin \{1, i, j\}$ : Todas las transposiciones en el producto fijan a  $k$ , por lo tanto  $\sigma(k) = k$ .

Como  $\sigma$  intercambia  $i$  con  $j$  y deja fijos a los demás elementos (incluido el 1), concluimos que  $\sigma = (i\ j)$ .  $\square$

*Demostración de 2).*

Queremos verificar que la acción definida cumple con la propiedad de grupo  $(\tau \circ \theta)(P_n) = \tau(\theta(P_n))$ .

Recordemos que la acción de una permutación  $\sigma$  sobre un polinomio en variables  $x_1, \dots, x_n$  consiste en reemplazar cada subíndice  $k$  por  $\sigma(k)$ . Es decir,  $\sigma$  actúa sobre las posiciones de las variables.

Sea  $P_n = \prod (x_i - x_j)$ . Primero aplicamos  $\theta$ :

$$\theta(P_n) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_{\theta(i)} - x_{\theta(j)})$$

Llamemos  $Q(x_1, \dots, x_n)$  a este nuevo polinomio. Notemos que el término que ocupaba la posición asociada al índice  $k$  ahora tiene el índice  $\theta(k)$ .

Ahora aplicamos  $\tau$  al polinomio  $Q$ . La regla dice que  $\tau$  reemplaza cualquier variable con índice  $m$  por la variable con índice  $\tau(m)$ . En  $Q$ , tenemos variables de la forma  $x_{\theta(i)}$ . Aquí el índice es  $m = \theta(i)$ . Al aplicar  $\tau$ , reemplazamos  $x_{\theta(i)}$  por  $x_{\tau(\theta(i))}$ .

$$\tau(\theta(P_n)) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_{\tau(\theta(i))} - x_{\tau(\theta(j))})$$

Por otro lado, consideremos la permutación compuesta  $\rho = \tau \circ \theta$ . Si aplicamos  $\rho$  directamente a  $P_n$ , reemplazamos cada índice  $k$  por  $\rho(k) = \tau(\theta(k))$ .

$$(\tau \circ \theta)(P_n) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_{(\tau \circ \theta)(i)} - x_{(\tau \circ \theta)(j)}) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_{\tau(\theta(i))} - x_{\tau(\theta(j))})$$

Comparando ambas expresiones, tenemos que  $(\tau \circ \theta)(P_n) = \tau(\theta(P_n))$ . □

*Demostración de 3).*

Procedamos por inducción sobre  $n$ .

Para  $n = 2$ , tenemos  $1 < k \leq 2 \implies k = 2$ , luego  $\theta = (1, 2)$ .

$$\theta(P_2) = \theta(x_1 - x_2) = x_{\theta(1)} - x_{\theta(2)} = x_2 - x_1 = -(x_1 - x_2) = -P_2$$

Suponga el resultado cierto para  $n$ , es decir, para  $1 < k \leq n$ . Note que:

$$\begin{aligned} P_{n+1} &= \prod_{1 \leq i < j \leq n+1} (x_i - x_j) = \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_i - x_j) \cdot \prod_{1 \leq i \leq n} (x_i - x_{n+1}) \\ &= P_n \cdot \prod_{1 \leq i \leq n} (x_i - x_{n+1}) \end{aligned}$$

Caso A: Si  $1 < k \leq n$ , entonces  $\theta = (1, k) \in S_n \subseteq S_{n+1}$  (fija a  $n+1$ ).

$$\begin{aligned} \theta(P_{n+1}) &= \theta \left( P_n \cdot \prod_{1 \leq i \leq n} (x_i - x_{n+1}) \right) \\ &= \theta(P_n) \cdot \theta \left( \prod_{1 \leq i \leq n} (x_i - x_{n+1}) \right) \\ &\stackrel{\text{H.I.}}{=} (-P_n) \cdot \prod_{1 \leq i \leq n} (x_{\theta(i)} - x_{n+1}) \end{aligned}$$

Como  $\theta$  solo permuta los elementos  $\{1, \dots, n\}$ , el conjunto de factores en la productoria es el mismo (solo cambia el orden), por lo tanto el producto permanece invariante.

$$= -P_n \cdot \prod_{1 \leq i \leq n} (x_i - x_{n+1}) = -P_{n+1}$$

Caso B: Si  $k = n + 1$ , entonces  $\theta = (1, n + 1)$ . Descomponemos  $P_{n+1}$  cuidadosamente:

$$\begin{aligned} \theta(P_{n+1}) &= \theta \left[ \prod_{1 < i < j \leq n} (x_i - x_j) \cdot \prod_{1 < j \leq n} (x_1 - x_j) \cdot \prod_{1 < i < n+1} (x_i - x_{n+1}) \cdot (x_1 - x_{n+1}) \right] \\ &= \prod_{1 < i < j \leq n} (x_i - x_j) \cdot \prod_{1 < j \leq n} (x_{n+1} - x_j) \cdot \prod_{1 < i < n+1} (x_i - x_1) \cdot (x_{n+1} - x_1) \\ &= \prod_{1 < i < j \leq n} (x_i - x_j) \cdot \prod_{1 < j \leq n} [-(x_j - x_{n+1})] \cdot \prod_{1 < i < n+1} [-(x_1 - x_i)] \cdot [-(x_1 - x_{n+1})] \\ &\quad - \left[ \prod_{1 < i < j \leq n} (x_i - x_j) \cdot \prod_{1 < j \leq n} (x_j - x_{n+1}) \cdot \prod_{1 < i < n+1} (x_1 - x_i) \cdot (x_1 - x_{n+1}) \right] \\ &= - \left( \prod_{1 \leq i < j \leq n} (x_i - x_j) \cdot \prod_{1 \leq j \leq n} (x_j - x_{n+1}) \right) \\ &= P_n \cdot \prod_{1 \leq i \leq n} (x_i - x_{n+1}) = -P_{n+1} \end{aligned}$$

□

*Demostración de 4).*

Si  $\theta = (i \ j)$  es una transposición, por la observación 1 sabemos que  $(i \ j) = (1 \ i)(1 \ j)(1 \ i)$ . Usando la propiedad 3 repetidamente:

$$\begin{aligned} \theta(P_n) &= [(1 \ j)(1 \ i)(1 \ j)]P_n \\ &= (1 \ j)((1 \ i)((1 \ j)P_n)) \\ &= (1 \ j)((1 \ i)(-P_n)) \\ &= (1 \ j)(-(-P_n)) \\ &= (1 \ j)(P_n) = -P_n \end{aligned}$$

□

*Demostración de 5).*

Sea  $\theta = (i_1, \dots, i_k)$  un  $k$ -ciclo. Podemos descomponerlo verificando la acción sobre los elementos:

$$(i_1, \dots, i_k) = (i_1, i_2)(i_2, i_3) \dots (i_{k-2}, i_{k-1})(i_{k-1}, i_k)$$

□

**Ejemplo 4.4.**  $(1 \ 2 \ 3) = (1 \ 2)(2 \ 3)$ . También se puede escribir de forma no única, por ejemplo:  $(1 \ 2 \ 3) = (4 \ 5)(1 \ 2)(2 \ 3)(4 \ 5) = (1 \ 2)(1 \ 2)(1 \ 2)(2 \ 3)(3 \ 2)(3 \ 2)$ .

**Teorema 4.2.2.** *Sea  $\theta \in S_n$ , entonces  $\theta$  se representa siempre como un producto de una cantidad par de transposiciones ó siempre como un producto de una cantidad impar de transposiciones.*

*Demostración.*

Por un teorema anterior  $\theta$  es producto de ciclos disjuntos y cada ciclo es producto de transposiciones, luego  $\theta$  es producto de transposiciones. Suponga que:

$$\theta = \sigma_1 \dots \sigma_k = \tau_1 \dots \tau_s \quad \text{con}$$

$\sigma_i$ 's y  $\tau_j$ 's transposiciones, entonces para  $P_n$  el polinomio definido anteriormente

$$\theta(P_n) = (\sigma_1 \dots \sigma_k)(P_n) = (-1)^k P_n = (\tau_1 \dots \tau_s)P_n = (-1)^s P_n$$

De donde  $(-1)^k = (-1)^s$  o  $(-1)^{k-s} = 1$ , es decir,  $k - s$  siempre es par, luego ambos son pares o ambos son impares.  $\square$

**Definición 4.2.3.** *Sea  $\theta \in S_n$  diremos que  $\theta$  es par si al representarla como producto de transposiciones consta de un número par de ellas. Es impar en caso contrario.*

**Observación 4.4.** *Sea  $A_n = \{\theta \in S_n \mid \theta \text{ es par}\} \forall n \geq 2$ , entonces  $A_n \leq S_n$ , con  $[S_n : A_n] = 2$  y por lo tanto  $A_n \trianglelefteq S_n$ .*

*Demostración.*

Primero probemos que es un subgrupo ( $A_n \leq S_n$ ). Si  $\theta \in A_n$ , entonces  $\theta = \tau_1 \dots \tau_s$  con  $s = 2k$  y los  $\tau_i$ 's son transposiciones. Luego, el inverso es  $\theta^{-1} = (\tau_1 \dots \tau_s)^{-1} = \tau_s^{-1} \dots \tau_1^{-1}$ . Como la inversa de una transposición es ella misma ( $\tau_i^{-1} = \tau_i$ ), tenemos  $\theta^{-1} = \tau_s \dots \tau_1$ , que sigue teniendo  $s = 2k$  transposiciones. Así,  $\theta^{-1} \in A_n$ .

Si además  $\theta_1 \in A_n$ , digamos  $\theta_1 = \rho_1 \dots \rho_r$  con  $r = 2l$  y  $\rho_j$ 's transposiciones. Entonces el producto  $\theta \circ \theta_1 = \tau_1 \dots \tau_s \rho_1 \dots \rho_r$  consta de  $s + r = 2k + 2l = 2(k + l)$  transposiciones. Como  $2(k + l)$  es par,  $\theta \circ \theta_1 \in A_n$ . Por lo tanto  $A_n \leq S_n$ .

Ahora analicemos el índice. Si  $\theta \in S_n$ , entonces: Si  $\theta$  es par,  $\theta \in A_n$ . Si  $\theta$  es impar, entonces  $\theta \notin A_n$ , es decir,  $\theta A_n \neq A_n$ .

Más aún, para cualquier otra permutación impar  $\theta_1 \in S_n$ , veamos que definen la misma clase lateral, es decir  $\theta A_n = \theta_1 A_n$ . Esto ocurre si y solo si  $\theta_1^{-1} \theta \in A_n$ . Como  $\theta$  y  $\theta_1$  son impares, podemos escribirlas como:

$$\theta = \tau_1 \dots \tau_{2k+1} \quad \text{y} \quad \theta_1 = \rho_1 \dots \rho_{2m+1}$$

con los  $\tau_i$  y  $\rho_j$  transposiciones. Entonces:

$$\theta_1^{-1} \theta = (\rho_1 \dots \rho_{2m+1})^{-1} (\tau_1 \dots \tau_{2k+1}) = \rho_{2m+1} \dots \rho_1 \tau_1 \dots \tau_{2k+1}$$

El número total de transposiciones es  $(2m + 1) + (2k + 1) = 2m + 2k + 2 = 2(m + k + 1)$ , que es un número par. Por lo tanto  $\theta_1^{-1} \theta \in A_n$ , lo que implica  $\theta A_n = \theta_1 A_n$ .

Así que las clases laterales izquierdas son exactamente dos:  $A_n$  (las pares) y  $\theta A_n$  (las impares, donde  $\theta$  es cualquier permutación impar fija). Luego,  $[S_n : A_n] = 2$ .

En particular, como 2 es el menor primo que divide a  $|S_n| = n!$  (para  $n \geq 2$ ), sabemos por un resultado anterior que cualquier subgrupo de índice igual al menor primo divisor del orden del grupo es normal. Así que  $A_n \trianglelefteq S_n$ .  $\square$

**Teorema 4.2.3.**  $A_n = \langle \{\theta \in S_n \mid \theta \text{ es un 3-ciclo}\} \rangle$ ,  $n \geq 3$ .

*Demostración.*

Sea  $H = \langle \{\theta \in S_n \mid \theta \text{ es 3-ciclo}\} \rangle$ . Sea  $\theta$  un 3-ciclo, es decir,  $\theta = (a_1, a_2, a_3)$ , entonces

$$\theta = (a_1, a_2, a_3) = (a_1, a_2)(a_2, a_3) \in A_n$$

luego

$$\langle \{\theta \in S_n \mid \theta \text{ es 3-ciclo}\} \rangle \subseteq A_n$$

Para la contención inversa basta ver que cada producto de 2 transposiciones es un producto de 3-ciclos. Consideremos  $(a_1, a_2)$  y  $(b_1, b_2)$  2 transposiciones.

Si  $\{a_1, a_2\} = \{b_1, b_2\}$ , entonces:

$$(a_1, a_2)(b_1, b_2) = (a_1, a_2)(a_1, a_2) = id = (a_1, a_2, a_3)(a_1, a_3, a_2)$$

Si tiene un solo elemento distinto podemos suponer que son  $(a_1, a_2), (a_2, b_2)$  con  $a_1 \neq b_2$  y:

$$(a_1, a_2)(a_2, b_2) = (a_1, a_2, b_2)$$

Si no tienen elementos en común, es decir  $(a_1, a_2)(b_1, b_2)$ :

$$(a_1, a_2)(b_1, b_2) = (a_1, a_2, b_1)(a_2, b_1, b_2)$$

En cualquier caso cada par de transposiciones es el producto de 3-ciclos, luego, cada permutación par es producto de 3-ciclos, así

$$A_n \subseteq \langle \{\theta \in S_n \mid \theta \text{ es 3-ciclo}\} \rangle \quad \text{y} \quad A_n = H$$

$\square$

**Teorema 4.2.4.** Sea  $n \geq 2$ , entonces  $A_n$  es el único subgrupo de índice 2 de  $S_n$ .

*Demostración.*

Si  $n = 2$ ,  $A_2 = \{e\}$  y es claro el resultado. Suponga  $n \geq 3$  y sea  $H \leq S_n$  tal que  $[S_n : H] = 2$ .

Probemos que  $H$  contiene a todos los 3-ciclos. Sea  $\sigma$  un 3-ciclo. Como  $[S_n : H] = 2$ , sabemos que  $H$  es un subgrupo normal de  $S_n$  ( $H \trianglelefteq S_n$ ). Consideremos el grupo cociente  $S_n/H$ , el cual tiene orden 2. Por lo tanto, el cuadrado de cualquier elemento en el cociente es la identidad del cociente ( $H$ ). Es decir:

$$(\sigma H)^2 = \sigma^2 H = H \implies \sigma^2 \in H$$



Ahora, dado que  $\sigma$  es un 3-ciclo, su orden es 3, por lo que  $\sigma^3 = id$ . Esto implica que  $\sigma^4 = \sigma$ . Podemos escribir  $\sigma$  como:

$$\sigma = \sigma^4 = (\sigma^2)^2$$

Como ya demostramos que  $\sigma^2 \in H$  y  $H$  es un subgrupo (cerrado bajo la operación), entonces el cuadrado de  $\sigma^2$  también debe estar en  $H$ . Por lo tanto,  $\sigma \in H$ .

Esto demuestra que  $H$  contiene a todos los 3-ciclos. Como sabemos por un teorema anterior que  $A_n$  está generado por los 3-ciclos, concluimos que  $A_n \subseteq H$ .

Finalmente, utilizamos la multiplicidad del índice:

$$[S_n : A_n] = [S_n : H][H : A_n]$$

Sustituyendo los valores conocidos:

$$2 = 2 \cdot [H : A_n] \implies [H : A_n] = 1$$

Lo cual implica que  $H = A_n$ . □

**Observación 4.5.** Consideremos el grupo multiplicativo  $\{1, -1\}$  con la operación definida por:

$$1 \cdot 1 = 1, \quad 1(-1) = -1, \quad (-1)(-1) = 1$$

Definamos la función  $\varphi : S_n \rightarrow \{1, -1\}$  como:

$$\varphi(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta \text{ es par} \\ -1 & \text{si } \theta \text{ es impar} \end{cases}$$

*Demostración.*

$\varphi$  es homomorfismo. a) Si  $\theta, \theta_1$  son pares,  $\theta \cdot \theta_1$  es par y  $\varphi(\theta \cdot \theta_1) = 1 = \varphi(\theta)\varphi(\theta_1)$ . Si  $\theta$  es par y  $\theta_1$  impar o viceversa,  $\theta \cdot \theta_1$  es impar, luego  $\varphi(\theta\theta_1) = -1 = \varphi(\theta)\varphi(\theta_1)$ . Si  $\theta$  y  $\theta_1$  son impares  $\varphi(\theta) = -1 = \varphi(\theta_1)$  y  $\theta\theta_1$  es par y

$$\varphi(\theta\theta_1) = 1 = (-1)(-1) = \varphi(\theta)\varphi(\theta_1)$$

En cualquier caso  $\varphi(\theta\theta_1) = \varphi(\theta)\varphi(\theta_1)$ . Más aún  $\theta \in \text{Ker } \varphi$  si y solo si  $\varphi(\theta) = 1$  si y solo si  $\theta$  es par si y solo si  $\theta \in A_n$  si y solo si  $\text{Ker } \varphi = A_n$ . □

**Nota 4.2.2.**  $\varphi$  es sobreyectiva.

$$\frac{S_n}{A_n} \cong \{1, -1\} \implies [S_n : A_n] = 2 \quad \text{y} \quad A_n \trianglelefteq S_n$$

**Definición 4.2.4.** Sea  $\theta, \theta_1 \in G$ ,  $G$  grupo diremos que  $\theta$  y  $\theta_1$  son conjugados si existe  $\sigma \in G$  tal que  $\theta = \sigma\theta_1\sigma^{-1}$  (conjugación).

**Observación 4.6.** Ser conjugado determina una relación de equivalencia, es decir, la relación  $\theta \sim \theta_1$  si y solo si  $\theta$  y  $\theta_1$  son conjugados es de equivalencia.

- i) Reflexiva:  $\theta \sim \theta$  pues  $\theta = e\theta e^{-1}$ .
- ii) Simétrica:  $\theta \sim \theta_1$  si y solo si existe  $\sigma \in G$  tal que  $\theta = \sigma\theta_1\sigma^{-1}$  si y solo si existe  $\sigma \in G$  tal que  $\theta_1 = \sigma^{-1}\theta\sigma$  si y solo si existe  $\sigma^{-1} \in G$  tal que  $\theta_1 = \sigma^{-1}\theta(\sigma^{-1})^{-1}$  si y solo si  $\theta_1 \sim \theta$ .
- iii) Transitiva:  $\theta \sim \theta_1$  y  $\theta_1 \sim \theta_2$  entonces existen  $\sigma_1, \sigma_2 \in G$  tales que  $\theta = \sigma_1\theta_1\sigma_1^{-1}$ ,  $\theta_1 = \sigma_2\theta_2\sigma_2^{-1}$ , entonces

$$\theta = \sigma_1(\sigma_2\theta_2\sigma_2^{-1})\sigma_1^{-1} = (\sigma_1\sigma_2)(\theta_2)(\sigma_2^{-1}\sigma_1^{-1}) = (\sigma_1\sigma_2)(\theta_2)(\sigma_1\sigma_2)^{-1}$$

y  $\sigma_1\sigma_2 \in G$ , luego  $\theta \sim \theta_2$ .

A las clases de equivalencia correspondientes las llamaremos clases de conjugación. Denotemos a la clase de conjugación de  $\theta$  por  $[\theta]$ . Entonces para  $\theta \in G$ ,  $[\theta] = \{\theta\}$  si y solo si  $\theta \in Z(G)$ ,  $[\theta] = \{\sigma\theta\sigma^{-1} \mid \sigma \in G\} = \{\theta\}$  si y solo si  $\sigma\theta\sigma^{-1} = \theta \forall \sigma \in G$  si y solo si  $\sigma\theta = \theta\sigma \forall \sigma \in G$  si y solo si  $\theta \in Z(G)$ .

**Definición 4.2.5.** Sean  $\theta_1, \theta_2 \in S_n$ , diremos que  $\theta_1$  y  $\theta_2$  tienen la misma estructura en ciclos cuando  $\theta_1 = \sigma_1 \dots \sigma_s$ ,  $\theta_2 = \tau_1 \dots \tau_k$  son las respectivas factorizaciones de  $\theta_1$  y  $\theta_2$  como producto de ciclos disjuntos, entonces  $s = k$  y salvo el orden  $\sigma_i$  y  $\tau_i$  son conjugados (tienen la misma longitud)  $\forall 1 \leq i \leq s = k$ .

**Ejemplo 4.5.** 1. Considere  $S_6$ .  $\theta_1 = (1 \ 3)(4 \ 5 \ 6)$ ,  $\theta_2 = (2 \ 4)(1 \ 3 \ 5)$ .  $\theta_1$  y  $\theta_2$  tienen la misma estructura en ciclos.

2. Considere  $S_{10}$ .  $\theta_1 = (1 \ 2)(3 \ 4)(5 \ 6 \ 7)$ ,  $\theta_2 = (3 \ 4)(5 \ 6 \ 7)(8 \ 9 \ 10)$ .  $\theta_1$  y  $\theta_2$  tienen la misma estructura en ciclos.

**Observación 4.7.** Si  $\theta = (a_1, \dots, a_r)$  es un  $r$ -ciclo y  $\gamma \in S_n$ , entonces:

$$\gamma\theta\gamma^{-1} = (\gamma(a_1), \dots, \gamma(a_r))$$

Es decir, conjugar un ciclo  $\theta$  por  $\gamma$  resulta en un ciclo de la misma longitud obtenido aplicando  $\gamma$  a los elementos de  $\theta$ .

*Demostración.*

En efecto. Si  $a = \gamma(a_i)$  para algún  $1 \leq i \leq r$ , entonces  $\gamma^{-1}(a) = a_i$ .

$$(\gamma\theta\gamma^{-1})(a) = (\gamma \circ \theta)(\gamma^{-1}(a)) = \gamma(\theta(a_i)) = \gamma(a_{i+1})$$

(Con la convención  $a_{r+1} = a_1$ ). Esto coincide con la acción del ciclo  $(\gamma(a_1), \dots, \gamma(a_r))$  sobre el elemento  $a = \gamma(a_i)$ .

Si  $a \notin \{\gamma(a_1), \dots, \gamma(a_r)\}$ , entonces  $\gamma^{-1}(a) \notin \{a_1, \dots, a_r\}$ . Como  $\theta$  fija los elementos fuera de su soporte:

$$\theta(\gamma^{-1}(a)) = \gamma^{-1}(a)$$

Así:

$$(\gamma \circ \theta \circ \gamma^{-1})(a) = \gamma(\theta(\gamma^{-1}(a))) = \gamma(\gamma^{-1}(a)) = a$$

Por lo tanto,  $\gamma\theta\gamma^{-1}$  fija a todo elemento fuera de  $\{\gamma(a_1), \dots, \gamma(a_r)\}$ .

En conclusión:

$$\gamma\theta\gamma^{-1} = (\gamma(a_1) \dots \gamma(a_r))$$

□

**Teorema 4.2.5.** Sean  $\theta_1, \theta_2 \in S_n$ , entonces  $\theta_1$  y  $\theta_2$  tienen la misma estructura en ciclos si y solo si  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son conjugados.

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Supongamos que  $\theta_1$  y  $\theta_2$  tienen la misma estructura en ciclos. Sean  $\theta_1 = \sigma_1 \dots \sigma_k$  y  $\theta_2 = \tau_1 \dots \tau_k$  sus respectivas descomposiciones en ciclos disjuntos (incluyendo los ciclos de longitud 1 para cubrir todo el conjunto  $\{1, \dots, n\}$ ). Podemos ordenar los ciclos de tal manera que  $\sigma_i$  y  $\tau_i$  tengan la misma longitud para todo  $1 \leq i \leq k$ .

Denotemos los elementos de cada ciclo como:

$$\sigma_i = (a_{i,1}, a_{i,2}, \dots, a_{i,r_i}) \quad \text{y} \quad \tau_i = (b_{i,1}, b_{i,2}, \dots, b_{i,r_i})$$

donde  $r_i$  es la longitud del ciclo  $i$ .

Definamos la permutación  $\gamma \in S_n$  tal que aplique cada elemento de  $\sigma_i$  en el elemento correspondiente de  $\tau_i$ . Es decir:

$$\gamma(a_{i,j}) = b_{i,j} \quad \forall 1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq r_i$$

Como los ciclos son disjuntos y cubren todo el conjunto,  $\gamma$  es una biyección bien definida.

Ahora verifiquemos la conjugación para cada ciclo. Por la observación anterior:

$$\gamma\sigma_i\gamma^{-1} = (\gamma(a_{i,1}), \dots, \gamma(a_{i,r_i})) = (b_{i,1}, \dots, b_{i,r_i}) = \tau_i$$

Entonces:

$$\gamma\theta_1\gamma^{-1} = \gamma(\sigma_1 \dots \sigma_k)\gamma^{-1} = (\gamma\sigma_1\gamma^{-1}) \dots (\gamma\sigma_k\gamma^{-1}) = \tau_1 \dots \tau_k = \theta_2$$

Por lo tanto,  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son conjugados.

$\Leftarrow$ ) Supongamos ahora que  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son conjugados. Es decir, existe  $\gamma \in S_n$  tal que  $\theta_2 = \gamma\theta_1\gamma^{-1}$ . Sea  $\theta_1 = \sigma_1 \dots \sigma_k$  la descomposición de  $\theta_1$  en ciclos disjuntos. Entonces:

$$\theta_2 = \gamma(\sigma_1 \dots \sigma_k)\gamma^{-1} = (\gamma\sigma_1\gamma^{-1}) \dots (\gamma\sigma_k\gamma^{-1})$$

Por la observación anterior, cada término  $(\gamma\sigma_i\gamma^{-1})$  es un ciclo de la misma longitud que  $\sigma_i$ . Además, como los  $\sigma_i$  son disjuntos a pares, sus conjugados también lo son (si  $\sigma_i$  y  $\sigma_j$  no mueven elementos en común, sus conjugados tampoco).

Por la unicidad de la descomposición en ciclos disjuntos (salvo el orden), concluimos que la estructura de ciclos de  $\theta_2$  es exactamente la misma que la de  $\theta_1$  (los mismos ciclos transformados, conservando sus longitudes).  $\square$

**Corolario 4.2.2.** *Sea  $n \geq 3$ .*

- a) *Si  $N \trianglelefteq A_n$  y  $N$  contiene un 3-ciclo, entonces  $N = A_n$ .*
- b) *Si  $N \trianglelefteq S_n$  y  $N$  contiene una transposición (2-ciclo), entonces  $N = S_n$ .*

*Demostración.*

a) Supongamos que  $N \trianglelefteq A_n$  contiene un 3-ciclo  $\theta_1 = (a_1 a_2 a_3)$ . Queremos ver que  $N$  contiene a cualquier otro 3-ciclo  $\theta_2 = (b_1 b_2 b_3)$ , y dado que los 3-ciclos generan  $A_n$ , esto implicará  $N = A_n$ .

Sabemos que en  $S_n$  todos los 3-ciclos son conjugados. Es decir, existe  $\gamma \in S_n$  tal que:

$$\theta_2 = \gamma\theta_1\gamma^{-1}$$

Analicemos si podemos garantizar que el conjugador esté en  $A_n$  (es decir, que sea par):

*Caso  $n \geq 5$ :* Si  $\gamma \in A_n$ , entonces  $\theta_2 \in N$  por la normalidad de  $N$  en  $A_n$ . Si  $\gamma \notin A_n$  (es impar), como  $n \geq 5$ , existen al menos dos elementos  $\{c_1, c_2\}$  en  $\{1, \dots, n\}$  que no están en el soporte de  $\theta_1$  (que tiene 3 elementos). Definimos  $\gamma' = \gamma(c_1 c_2)$ . Como  $(c_1 c_2)$  es una transposición disjunta de  $\theta_1$ , conmuta con  $\theta_1$ . Además,  $\gamma'$  es par (producto de impar por impar). Entonces:

$$\gamma'\theta_1(\gamma')^{-1} = \gamma(c_1 c_2)\theta_1(c_1 c_2)^{-1}\gamma^{-1} = \gamma\theta_1\gamma^{-1} = \theta_2$$

Como  $\gamma' \in A_n$  y  $N \trianglelefteq A_n$ , concluimos que  $\theta_2 \in N$ .

*Caso  $n = 3$ :*  $A_3 = \{(1), (1 2 3), (1 3 2)\}$ . Si  $N$  contiene un 3-ciclo, por ejemplo  $(1 2 3)$ , al ser subgrupo debe contener a su inverso  $(1 3 2)$  y a la identidad. Por lo tanto,  $N$  contiene a todos los elementos de  $A_3$ , así que  $N = A_3$ .

*Caso  $n = 4$ :* En  $A_4$ , los 3-ciclos se dividen en dos clases de conjugación (por ejemplo, la clase de  $(1 2 3)$  y la de  $(1 3 2)$ ). Supongamos que  $N$  contiene a  $\theta = (1 2 3)$ . Como  $N \trianglelefteq A_4$ ,  $N$  contiene a toda la clase de conjugación de  $\theta$  en  $A_4$  (que son 4 elementos:  $(1 2 3), (1 4 2), (1 3 4), (2 4 3)$ ). Además,  $N$  debe contener a los inversos de estos elementos (por ejemplo,  $(1 3 2)$ ). Al contener elementos de ambas clases de 3-ciclos y ser cerrado bajo productos,  $N$  contendrá a todos los 3-ciclos. Como los 3-ciclos generan  $A_4$ , entonces  $N = A_4$ .

En todos los casos,  $N = A_n$ .

b) Sea  $N \trianglelefteq S_n$  tal que contiene una transposición  $\tau = (a b)$ . Como  $N$  es normal en  $S_n$ , contiene a todos los conjugados de  $\tau$ . Sabemos que en  $S_n$  cualquier transposición es conjugada de  $\tau$  (tienen la misma estructura de ciclos). Por lo tanto,  $N$  contiene a todas las transposiciones. Como todo elemento de  $S_n$  se puede escribir como producto de transposiciones, concluimos que  $N = S_n$ .  $\square$

**Definición 4.2.6.** Sea  $G$  un grupo. Diremos que  $G$  es simple si sus únicos subgrupos normales son  $\{e\}$  y el mismo  $G$ .

**Teorema 4.2.6.** Sea  $n \geq 5$ , entonces el grupo alternante  $A_n$  es simple.

*Demostración.*

Sea  $H \trianglelefteq A_n$  con  $H \neq \{e\}$ . Probaremos que  $H$  contiene un 3-ciclo. Por el corolario anterior, esto implicará que  $H = A_n$ . Sea  $\alpha \in H$  con  $\alpha \neq e$ . Analicemos la descomposición de  $\alpha$  en ciclos disjuntos:

*Caso 1:*  $\alpha$  contiene un ciclo de longitud  $r \geq 4$ . Sea  $\alpha = (a_1 a_2 a_3 \dots a_r)\tau$ , donde  $\tau$  son los demás ciclos disjuntos. Sea  $\beta = (a_1 a_2 a_3) \in A_n$ . Consideremos el conmutador  $\rho = \alpha\beta\alpha^{-1}\beta^{-1} \in H$  (pues  $H \trianglelefteq A_n$ ).

$$\begin{aligned}\rho &= \alpha(a_1 a_2 a_3)\alpha^{-1}(a_1 a_3 a_2) \\ &= (\alpha(a_1) \alpha(a_2) \alpha(a_3))(a_1 a_3 a_2) \\ &= (a_2 a_3 a_4)(a_1 a_3 a_2) \\ &= (a_1 a_4 a_2)\end{aligned}$$

Así,  $\rho = (a_1 a_4 a_2)$  es un 3-ciclo que pertenece a  $H$ .

*Caso 2:*  $\alpha$  contiene 3-ciclos en su descomposición. Si  $\alpha$  es un 3-ciclo, ya terminamos. Si no,  $\alpha = (a_1 a_2 a_3)(a_4 a_5 a_6) \dots$ . Sea  $\beta = (a_1 a_2 a_4) \in A_n$ . Consideremos  $\rho = \alpha\beta\alpha^{-1}\beta^{-1} \in H$ :

$$\begin{aligned}\rho &= (\alpha(a_1) \alpha(a_2) \alpha(a_4))(a_1 a_4 a_2) \\ &= (a_2 a_3 a_5)(a_1 a_4 a_2) \\ &= (a_1 a_4 a_3 a_5 a_2)\end{aligned}$$

$\rho$  es un 5-ciclo. Aplicando el Caso 1 a  $\rho$ , concluimos que  $H$  contiene un 3-ciclo.

*Caso 3:*  $\alpha$  es producto de transposiciones disjuntas.

- i)  $\alpha = (a_1 a_2)(a_3 a_4)$ . (Solo dos transposiciones). Como  $n \geq 5$ , existe  $a_5 \notin \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ . Sea  $\beta = (a_1 a_2 a_5) \in A_n$ .

$$\rho = \alpha\beta\alpha^{-1}\beta^{-1} = (a_2 a_1 a_5)(a_1 a_5 a_2) = (a_1 a_5)(a_2 a_5) = (a_1 a_2 a_5)$$

Obtenemos directamente un 3-ciclo en  $H$ .

- ii)  $\alpha = (a_1 a_2)(a_3 a_4)(a_5 a_6) \dots$  (Más de dos transposiciones). Sea  $\beta = (a_1 a_2 a_3) \in A_n$ .

$$\rho = \alpha\beta\alpha^{-1}\beta^{-1} = (a_2 a_1 a_4)(a_1 a_3 a_2) = (a_1 a_4)(a_2 a_3)$$

Ahora  $\rho$  tiene la forma del subcaso (i) anterior. Aplicando el argumento de (i) a  $\rho$ , obtenemos un 3-ciclo.

En cualquier caso,  $H$  contiene un 3-ciclo. Por lo tanto,  $H = A_n$ . □

**Teorema 4.2.7.**  $A_4$  no tiene subgrupos de orden 6.

*Demostración.*

Sabemos que  $|A_4| = \frac{4!}{2} = 12$ . Supongamos que existe  $H \leq A_4$  tal que  $|H| = 6$ . Entonces el índice es  $[A_4 : H] = \frac{12}{6} = 2$ .

Sabemos que todo subgrupo de índice 2 es normal, por lo tanto  $H \trianglelefteq A_4$ . Además, en el grupo cociente  $A_4/H$  (que es de orden 2), el cuadrado de cualquier elemento es la identidad. Esto significa que para todo  $\sigma \in A_4$ ,  $\sigma^2 H = H$ , es decir,  $\sigma^2 \in H$ .

Consideremos los 3-ciclos de  $A_4$ . Sea  $\theta$  un 3-ciclo. Entonces  $\theta^3 = e$ , de donde  $\theta^4 = \theta$ . Podemos escribir  $\theta = (\theta^2)^2$ . Como  $\theta^2 \in H$  (por la propiedad del índice 2), y  $H$  es subgrupo, entonces  $(\theta^2)^2 \in H$ , luego  $\theta \in H$ .

Esto implica que  $H$  debe contener a **todos** los 3-ciclos de  $A_4$ . Los 3-ciclos en  $A_4$  son:  $(1\ 2\ 3), (1\ 3\ 2), (1\ 2\ 4), (1\ 4\ 2), (1\ 3\ 4), (1\ 4\ 3), (2\ 3\ 4), (2\ 4\ 3)$ . Hay 8 3-ciclos en total.

Por lo tanto,  $|H| \geq 8$ , lo cual contradice la hipótesis de que  $|H| = 6$ . Concluimos que no existe tal subgrupo.  $\square$

# CAPÍTULO 5

## Acciones de Grupos

---

### 5.1. Acciones de Grupo

**Definición 5.1.1.** Sea  $G$  un grupo y  $X$  un conjunto no vacío. Diremos que  $G$  actúa en  $X$  (o que  $X$  es un  $G$ -conjunto) si existe un homomorfismo  $\varphi : G \rightarrow S_X$ , donde  $S_X$  es el grupo de permutaciones de  $X$  (biyecciones de  $X$  en sí mismo).

**Ejemplo 5.1. Teorema de Cayley:** Todo grupo  $G$  actúa en sí mismo. Sea  $X = G$  y definamos  $\varphi : G \rightarrow S_G$  dada por  $\varphi(g) = f_g$ , donde  $f_g : G \rightarrow G$  se define como  $f_g(a) = ga$  para todo  $a \in G$  (traslación izquierda).

Veamos que  $f_g \in S_G$ :

1.  $f_g$  es inyectiva: Si  $f_g(a) = f_g(b)$ , entonces  $ga = gb$ . Multiplicando por  $g^{-1}$  a la izquierda, obtenemos  $a = b$ .
2.  $f_g$  es sobreyectiva: Sea  $b \in G$ . Queremos encontrar  $a$  tal que  $f_g(a) = b$ . Tomamos  $a = g^{-1}b$ , entonces  $f_g(g^{-1}b) = g(g^{-1}b) = (gg^{-1})b = b$ .

Además,  $\varphi$  es un homomorfismo de grupos: Para  $g, h \in G$ , queremos ver que  $\varphi(gh) = \varphi(g) \circ \varphi(h)$ . Evaluando en un elemento  $a \in G$ :

$$\varphi(gh)(a) = f_{gh}(a) = (gh)a = g(ha) = f_g(ha) = f_g(f_h(a)) = (\varphi(g) \circ \varphi(h))(a)$$

Por lo tanto,  $\varphi(gh) = \varphi(g) \circ \varphi(h)$ .

**Teorema 5.1.1.** *Sea  $G$  un grupo y  $X$  un conjunto no vacío. Las siguientes condiciones son equivalentes:*

1.  $G$  actúa en  $X$  (existe un homomorfismo  $\varphi : G \rightarrow S_X$ ).
2. Existe una función  $\cdot : G \times X \rightarrow X$ , denotada por  $(g, x) \mapsto g \cdot x$ , tal que:
  - a)  $e \cdot x = x$  para todo  $x \in X$ .
  - b)  $(gh) \cdot x = g \cdot (h \cdot x)$  para todo  $g, h \in G$  y  $x \in X$ .

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Supongamos que existe un homomorfismo  $\varphi : G \rightarrow S_X$ . Para cada  $g \in G$ ,  $\varphi(g)$  es una permutación de  $X$ , es decir, una función biyectiva  $\varphi(g) : X \rightarrow X$ . Definamos la función  $\cdot : G \times X \rightarrow X$  mediante:

$$g \cdot x = (\varphi(g))(x)$$

para todo  $g \in G$  y  $x \in X$ .

Verifiquemos las dos condiciones de la definición de acción:

- (i) Como  $\varphi$  es un homomorfismo de grupos, envía el neutro de  $G$  al neutro de  $S_X$ . Es decir,  $\varphi(e) = Id_X$  (la función identidad en  $X$ ). Entonces, para cualquier  $x \in X$ :

$$e \cdot x = (\varphi(e))(x) = Id_X(x) = x$$

- (ii) Sean  $g, h \in G$  y  $x \in X$ . Por la definición de la operación y la propiedad de homomorfismo de  $\varphi$ :

$$(gh) \cdot x = (\varphi(gh))(x)$$

Como  $\varphi$  es homomorfismo,  $\varphi(gh) = \varphi(g) \circ \varphi(h)$ . Así:

$$(\varphi(gh))(x) = (\varphi(g) \circ \varphi(h))(x)$$

Por la definición de composición de funciones:

$$(\varphi(g) \circ \varphi(h))(x) = \varphi(g)(\varphi(h)(x))$$

Usando nuevamente la definición de la acción ( $g \cdot y = \varphi(g)(y)$ ):

$$\varphi(g)(\varphi(h)(x)) = g \cdot (\varphi(h)(x)) = g \cdot (h \cdot x)$$

Por lo tanto,  $(gh) \cdot x = g \cdot (h \cdot x)$ .

$\Leftarrow$ ) Supongamos que existe una función  $\cdot : G \times X \rightarrow X$  que satisface las condiciones (a) y (b). Queremos construir un homomorfismo  $\varphi : G \rightarrow S_X$ . Para cada  $g \in G$ , definamos la función  $\sigma_g : X \rightarrow X$  dada por:

$$\sigma_g(x) = g \cdot x$$

Primero, debemos demostrar que  $\sigma_g$  es una biyección (es decir,  $\sigma_g \in S_X$ ).



1.  $\sigma_g$  es inyectiva: Supongamos que  $\sigma_g(x) = \sigma_g(y)$  para  $x, y \in X$ .

$$g \cdot x = g \cdot y$$

Operamos con  $g^{-1}$  por la izquierda (usando la propiedad (b)):

$$g^{-1} \cdot (g \cdot x) = g^{-1} \cdot (g \cdot y)$$

$$(g^{-1}g) \cdot x = (g^{-1}g) \cdot y$$

$$e \cdot x = e \cdot y$$

Usando la propiedad (a) ( $e \cdot x = x$ ):

$$x = y$$

2.  $\sigma_g$  es sobreyectiva: Sea  $y \in X$  arbitrario. Queremos encontrar  $x \in X$  tal que  $\sigma_g(x) = y$ . Proponemos  $x = g^{-1} \cdot y$ . Evaluamos  $\sigma_g(x)$ :

$$\sigma_g(g^{-1} \cdot y) = g \cdot (g^{-1} \cdot y)$$

Por la propiedad (b):

$$g \cdot (g^{-1} \cdot y) = (gg^{-1}) \cdot y = e \cdot y$$

Por la propiedad (a):

$$e \cdot y = y$$

Así,  $\sigma_g$  es sobreyectiva.

Al ser inyectiva y sobreyectiva,  $\sigma_g \in S_X$ .

Ahora definimos la función  $\varphi : G \rightarrow S_X$  como  $\varphi(g) = \sigma_g$ . Veamos que  $\varphi$  es un homomorfismo de grupos. Sean  $g, h \in G$ . Queremos ver que  $\varphi(gh) = \varphi(g) \circ \varphi(h)$ . Dos funciones son iguales si toman el mismo valor para todo elemento del dominio. Sea  $x \in X$ :

$$(\varphi(gh))(x) = \sigma_{gh}(x) = (gh) \cdot x$$

Por otro lado:

$$(\varphi(g) \circ \varphi(h))(x) = \varphi(g)(\varphi(h)(x)) = \sigma_g(\sigma_h(x))$$

$$\sigma_g(\sigma_h(x)) = \sigma_g(h \cdot x) = g \cdot (h \cdot x)$$

Como la propiedad (b) nos dice que  $(gh) \cdot x = g \cdot (h \cdot x)$ , concluimos que:

$$(\varphi(gh))(x) = (\varphi(g) \circ \varphi(h))(x) \quad \forall x \in X$$

Por lo tanto,  $\varphi(gh) = \varphi(g) \circ \varphi(h)$ , y  $\varphi$  es un homomorfismo. □

**Ejemplo 5.2.** 1.  $G$  actúa en sí mismo por multiplicación izquierda (o simplemente por la operación del grupo). La acción está dada por  $\varphi : G \rightarrow S_G$  o equivalentemente  $\tilde{\varphi} : G \times G \rightarrow G$  definida por:

$$(g, h) \mapsto gh$$

2. Sea  $G$  un grupo,  $H \leq G$  y  $X = \{aH \mid a \in G\}$  el conjunto de clases laterales izquierdas.  $G$  actúa en  $X$  por traslación izquierda. La acción está definida por  $\varphi : G \rightarrow S_X$ , donde para cada  $g \in G$ , la función  $f_g : X \rightarrow X$  es:

$$f_g(aH) = (ga)H$$

Equivalentemente,  $\tilde{\varphi}(g, aH) = gaH$ .

3. Sea  $G$  un grupo y  $X = \{H \mid H \leq G\}$  el conjunto de subgrupos de  $G$ .  $G$  actúa en  $X$  por conjugación. Definimos  $\varphi : G \rightarrow S_X$  tal que  $g \mapsto f_g$ , con  $f_g(H) = gHg^{-1}$ . Verifiquemos que es una acción:

- $e \cdot H = eHe^{-1} = H$ .
- $(gh) \cdot H = (gh)H(gh)^{-1} = g(hHh^{-1})g^{-1} = g(h \cdot H)g^{-1}$ .

4. Sea  $G$  un grupo y  $X = G$ .  $G$  actúa en sí mismo por conjugación. Definimos la acción  $\cdot : G \times G \rightarrow G$  como:

$$g \cdot h = ghg^{-1}$$

5. Sea  $G = SL(2, \mathbb{C}) = \{A \in M_{2 \times 2}(\mathbb{C}) \mid \det A = 1\}$  y sea  $X = \{z \in \mathbb{C} \mid \text{Im}(z) > 0\}$  el semiplano superior. Para  $A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in G$ , definimos la acción:

$$A \cdot z = \frac{az + b}{cz + d}$$

Se verifica que  $I \cdot z = z$  y  $A \cdot (B \cdot z) = (AB) \cdot z$ .

6. Sea  $X = \mathbb{R}^2$  y  $G$  el grupo de rotaciones del plano (isomorfo a  $SO(2)$ ):

$$G = \{T_\theta : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 \mid T_\theta(x, y) = (x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta)\}$$

Entonces, para un punto  $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ , su órbita es:

$$\mathcal{O}_{(x_0, y_0)} = \{T_\theta(x_0, y_0) \mid T_\theta \in G\} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 = x_0^2 + y_0^2\}$$

Es decir, las órbitas son circunferencias centradas en el origen.

**Definición 5.1.2.** Diremos que una acción de  $G$  en  $X$  es transitiva si existe  $x \in X$  tal que su órbita cubre todo el conjunto, es decir:

$$\mathcal{O}_x = G \cdot x = X$$

(Esto implica que solo existe una única órbita).

**Definición 5.1.3.** Sea  $X$  un  $G$ -conjunto. Diremos que  $x \in X$  es un punto fijo si  $g \cdot x = x$  para todo  $g \in G$ . Esto es equivalente a cualquiera de las siguientes condiciones:

- La órbita de  $x$  es trivial:  $\mathcal{O}_x = \{x\}$ .
- El estabilizador de  $x$  es todo el grupo:  $St_G(x) = G$ .

**Observación 5.1.** Si  $X$  es un  $G$ -conjunto y  $x \in X$ , entonces el estabilizador  $St_G(x)$  es un subgrupo de  $G$ .

*Demostración.*

Sean  $g, h \in St_G(x)$ . Entonces  $g \cdot x = x$  y  $h \cdot x = x$ . Esto implica que  $h^{-1} \cdot x = x$  (multiplicando por  $h^{-1}$ ). Luego:

$$(gh^{-1}) \cdot x = g \cdot (h^{-1} \cdot x) = g \cdot x = x$$

Por lo tanto  $gh^{-1} \in St_G(x)$ , lo que prueba que es un subgrupo.  $\square$

**Nota 5.1.1.** El conjunto de todos los puntos fijos de  $X$  bajo la acción de  $G$  se denota por  $X^G$ .

**Observación 5.2.** Sea  $X$  un  $G$ -conjunto, entonces las órbitas forman una partición de  $X$ . Para ver esto basta verificar que inducen una relación de equivalencia, es decir, la relación en  $X$  definida por  $x \sim y$  si y solo si  $y$  y  $x$  están en la misma órbita (si y solo si  $y = g \cdot x$  para algún  $g \in G$ ) es de equivalencia.

1. Reflexiva: Existe  $e \in G$  tal que  $e \cdot x = x$ , así  $x \sim x$ .
2. Simétrica:  $x \sim y$ , entonces existe  $g \in G$  tal que  $y = g \cdot x$ . Entonces  $g^{-1} \cdot y = g^{-1} \cdot (g \cdot x) = e \cdot x = x$ . Así,  $x = g^{-1} \cdot y$ , de donde  $y \sim x$ .
3. Transitiva:  $x \sim y$  y  $y \sim z$ , entonces existen  $g_1, g_2 \in G$  tales que  $y = g_1 \cdot x$ ,  $z = g_2 \cdot y$ . Entonces

$$z = g_2 \cdot (g_1 \cdot x) = (g_2 g_1) \cdot x$$

luego  $x \sim z$ .

En particular si  $\mathcal{O}_x = Orb(x) = G \cdot x$ , tenemos:

$$X = \bigcup_{x \in X} \mathcal{O}_x = \left( \bigcup_{x \in X^G} \mathcal{O}_x \right) \cup \left( \bigcup_{x \notin X^G} \mathcal{O}_x \right) = \left( \bigcup_{x \in X^G} \{x\} \right) \cup \left( \bigcup_{x \notin X^G} \mathcal{O}_x \right)$$

En particular, si  $X$  es finito:

$$|X| = |X^G| + \left| \bigcup_{x \notin X^G} \mathcal{O}_x \right|$$

**Ejemplo 5.3.** Consideremos la acción de  $G$  en sí mismo por conjugación, es decir, la acción definida por:

$$g \cdot h = ghg^{-1} \quad \forall g, h \in G$$

En este caso, un elemento  $h \in G$  es un punto fijo si y solo si su órbita tiene tamaño 1, es decir:

$$g \cdot h = h \quad \forall g \in G$$

Esto equivale a:

$$ghg^{-1} = h \iff gh = hg \quad \forall g \in G$$

Por lo tanto, el conjunto de puntos fijos de esta acción es exactamente el Centro de  $G$ :

$$G^G = Z(G) = \{h \in G \mid gh = hg, \forall g \in G\}$$

Aplicando la ecuación de las órbitas (vista anteriormente) a esta acción específica, obtenemos la *\*\*Ecuación de Clase\*\**:

$$|G| = |Z(G)| + \sum_{x_i \notin Z(G)} [G : C_G(x_i)]$$

donde  $C_G(x_i)$  es el centralizador de  $x_i$  (que corresponde al estabilizador bajo esta acción).

**Teorema 5.1.2** (Teorema). Sea  $X$  un  $G$ -conjunto,  $x \in X$ , entonces existe una biyección entre las clases laterales de  $S_t(x) \leq G$  y  $\mathcal{O}_x$ .

*Demostración.*

Definamos  $\varphi : \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{O}_x$  (donde  $\mathcal{L}$  es el conjunto de clases laterales izquierdas) dada por:

$$gS_t(x) \mapsto g \cdot x$$

Note que esta asignación no depende del representante de clase. Si  $gS_t(x) = g_1S_t(x)$ , entonces  $g^{-1}g_1 \in S_t(x)$ , si y solo si  $(g^{-1}g_1) \cdot x = x$ , si y solo si  $g_1 \cdot x = g \cdot x$ . Es decir,  $\varphi(gS_t(x)) = \varphi(g_1S_t(x))$ . Luego,  $\varphi$  está bien definida.

$\varphi$  es inyectiva:

$$\begin{aligned} \varphi(gS_t(x)) = \varphi(g_1S_t(x)) &\iff g \cdot x = g_1 \cdot x \iff g^{-1}g_1 \cdot x = x \\ &\iff g^{-1}g_1 \in S_t(x) \iff gS_t(x) = g_1S_t(x) \end{aligned}$$

$\varphi$  es sobreyectiva: Dado  $y \in \mathcal{O}_x$ , existe  $g \in G$  tal que  $y = g \cdot x$ , luego:

$$\varphi(gS_t(x)) = g \cdot x = y$$

Por lo tanto  $\varphi$  es biyectiva y en particular:

$$|\mathcal{O}_x| = |\mathcal{L}| = |\mathcal{G}| = [G : S_t(x)]$$

□

**Observación 5.3.** *Más aún, de la ecuación de las órbitas tenemos:*

$$|X| = |X^G| + \sum_{x \notin X^G} [G : St_G(x)]$$

*Todavía más, si  $G$  actúa en sí mismo por conjugación. En este caso  $X^G = Z(G)$  y al estabilizador  $St_G(x)$  se le denomina el Centralizador de  $x$  en  $G$  y se denota por  $C_G(x)$ . La ecuación se convierte en:*

$$|G| = |Z(G)| + \sum_{x \notin Z(G)} [G : C_G(x)]$$

*donde la suma corre sobre un sistema de representantes de las clases de conjugación no triviales.*

**Ejemplo 5.4.** *Sea  $G$  un grupo y  $X = \{H \mid H \leq G\}$  el conjunto de subgrupos de  $G$ . Hagamos actuar a  $G$  en  $X$  por conjugación, es decir, la acción dada por:*

$$g \cdot H = gHg^{-1}$$

*En este caso, al estabilizador de un elemento  $H \in X$  se le llama el Normalizador de  $H$  en  $G$  y se denota por  $N_G(H)$ .*

$$N_G(H) = \{g \in G \mid gHg^{-1} = H\}$$

**Observación 5.4.** *Si  $H \leq G$ , entonces se cumplen las siguientes propiedades del normalizador  $N_G(H) = \{g \in G \mid gHg^{-1} = H\}$ :*

1.  $H \trianglelefteq G$  si y solo si  $N_G(H) = G$ .
2.  $H \leq N_G(H)$  (es decir,  $H$  es un subgrupo del normalizador).
3. En general, no siempre ocurre que  $N_G(H) = G$ . (Ver ejemplo en  $S_3$ ).
4.  $H \trianglelefteq N_G(H)$  (es decir,  $H$  es un subgrupo normal de su propio normalizador).

*Demostración de 1.*

Queremos probar que  $H \trianglelefteq G \iff N_G(H) = G$ .

$\Rightarrow$ ) Supongamos que  $H \trianglelefteq G$ . Por definición de subgrupo normal, para todo  $g \in G$  se cumple que  $gHg^{-1} = H$ . La definición del normalizador es  $N_G(H) = \{g \in G \mid gHg^{-1} = H\}$ . Como la condición se cumple para todo  $g \in G$ , entonces todo elemento de  $G$  pertenece a  $N_G(H)$ . Por lo tanto,  $G \subseteq N_G(H)$ . Como  $N_G(H) \subseteq G$  es siempre cierto, concluimos que  $N_G(H) = G$ .

$\Leftarrow$ ) Supongamos que  $N_G(H) = G$ . Esto significa que para todo  $g \in G$ ,  $g \in N_G(H)$ . Por la definición del conjunto  $N_G(H)$ , esto implica que para todo  $g \in G$ , se cumple  $gHg^{-1} = H$ . Esta es exactamente la definición de que  $H$  sea un subgrupo normal de  $G$ . Por lo tanto,  $H \trianglelefteq G$ .  $\square$

*Demostración de 2.*

Queremos probar que  $H \subseteq N_G(H)$ . Sea  $h \in H$  un elemento arbitrario. Queremos ver que  $h \in N_G(H)$ , es decir, que  $hHh^{-1} = H$ .

Como  $H$  es un subgrupo (cerrado bajo la operación):

- Para cualquier  $x \in H$ , el conjugado  $h x h^{-1}$  es producto de elementos de  $H$ , por lo que  $h x h^{-1} \in H$ . Esto muestra que  $hHh^{-1} \subseteq H$ .
- Para la contención inversa, dado  $y \in H$ , podemos escribir  $y = h(h^{-1}yh)h^{-1}$ . Como  $h^{-1}yh \in H$ , entonces  $y$  es un conjugado por  $h$  de un elemento de  $H$ .

(Más simplemente: conjugación por un elemento del mismo subgrupo es un automorfismo interno restringido que envía  $H$  en  $H$ ).

Por lo tanto,  $hHh^{-1} = H$  para todo  $h \in H$ . Así, todo elemento de  $H$  cumple la condición de estar en el normalizador. Conclusión:  $H \leq N_G(H)$ .  $\square$

*Demostración de 3 (Ejemplo en  $S_3$ ).*

Consideremos el grupo simétrico  $S_3$ . Sea  $N = \langle (1, 2, 3) \rangle = \{e, (1, 2, 3), (1, 3, 2)\}$ . Sabemos que  $|S_3| = 6$  y  $|N| = 3$ . El índice es  $[S_3 : N] = 2$ , por lo que  $N \trianglelefteq S_3$ . Usando la propiedad 1, como es normal, su normalizador es todo el grupo:  $N_{S_3}(N) = S_3$ .

Ahora consideremos  $H = \langle (1, 2) \rangle = \{e, (1, 2)\}$ . Calculemos su normalizador  $N_{S_3}(H)$ . Buscamos los  $g \in S_3$  tales que  $gHg^{-1} = H$ .

- Claramente  $H \subseteq N_{S_3}(H)$  (por la propiedad 2), así que  $e$  y  $(1, 2)$  están en el normalizador.
- Probemos con otro elemento, por ejemplo  $\sigma = (1, 3)$ . Conjugamos el generador de  $H$ :

$$(1, 3)(1, 2)(1, 3)^{-1} = (1, 3)(1, 2)(1, 3) = (2, 3)$$

Como  $(2, 3) \notin H$ , entonces  $(1, 3)H(1, 3)^{-1} \neq H$ . Por lo tanto,  $(1, 3) \notin N_{S_3}(H)$ .

De hecho, haciendo las cuentas para los demás elementos, vemos que el único subgrupo que normaliza a  $H$  es el mismo  $H$ . Así que  $N_{S_3}(H) = H \neq S_3$ . Esto demuestra que  $N_G(H)$  no siempre es todo  $G$ .  $\square$

*Demostración de 4.*

Queremos probar que  $H \trianglelefteq N_G(H)$ . Ya sabemos por la propiedad 2 que  $H$  es un subgrupo de  $N_G(H)$ . Solo falta probar la normalidad dentro de este grupo.

Sea  $g \in N_G(H)$  un elemento cualquiera del normalizador. Por la definición misma de  $N_G(H)$ , este  $g$  cumple la condición:

$$gHg^{-1} = H$$

Esta igualdad nos dice directamente que conjugando  $H$  por cualquier elemento de  $N_G(H)$ , obtenemos  $H$  nuevamente.

Esta es, textualmente, la definición de ser subgrupo normal. Por lo tanto,  $H$  es normal en  $N_G(H)$ .  $\square$

**Teorema 5.1.3** (de Cauchy). *Sea  $G$  un grupo finito y  $p$  un número primo tal que  $p$  divide al orden de  $G$  ( $p \mid |G|$ ). Entonces,  $G$  contiene al menos un elemento de orden  $p$ . Más precisamente, la cantidad de elementos de  $G$  de orden  $p$  es congruente con  $-1$  módulo  $p$ .*

*Demostración.*

Consideremos el conjunto  $X$  formado por las  $p$ -tuplas de elementos de  $G$  cuyo producto es la identidad:

$$X = \{(x_1, x_2, \dots, x_p) \in G^p \mid x_1 x_2 \dots x_p = e\}$$

*Paso 1: Calcular la cardinalidad de  $X$ .* Para formar una tupla en  $X$ , podemos elegir los primeros  $p - 1$  elementos  $(x_1, \dots, x_{p-1})$  arbitrariamente en  $G$ . Una vez elegidos, el último elemento  $x_p$  está forzado, pues debe cumplir:

$$x_1 \dots x_{p-1} x_p = e \implies x_p = (x_1 \dots x_{p-1})^{-1}$$

Dado que  $x_p$  es único para cada elección de los primeros  $p - 1$  términos, el tamaño de  $X$  es:

$$|X| = |G|^{p-1}$$

Como por hipótesis  $p$  divide a  $|G|$ , entonces  $p$  divide a  $|G|^{p-1}$  (para  $p - 1 \geq 1$ ), por lo que:

$$|X| \equiv 0 \pmod{p}$$

*Paso 2: Definir la acción de grupo.* Sea  $\mathbb{Z}_p = \langle \sigma \rangle$  el grupo cíclico de orden  $p$ . Hacemos actuar a  $\mathbb{Z}_p$  sobre el conjunto  $X$  mediante permutación cíclica de las componentes:

$$\sigma \cdot (x_1, x_2, \dots, x_p) = (x_2, x_3, \dots, x_p, x_1)$$

Verifiquemos que esta acción está bien definida, es decir, que si  $(x_1, \dots, x_p) \in X$ , entonces su permutación cíclica también está en  $X$ . Si  $x_1 x_2 \dots x_p = e$ , multiplicando por  $x_1^{-1}$  a la izquierda y por  $x_1$  a la derecha (conjugando por  $x_1$ ), obtenemos:

$$x_1^{-1}(x_1 x_2 \dots x_p)x_1 = x_1^{-1}e x_1 = e$$

Simplificando el lado izquierdo:

$$(x_1^{-1}x_1)x_2 \dots x_p x_1 = x_2 \dots x_p x_1 = e$$

Por lo tanto, la tupla rotada  $(x_2, \dots, x_p, x_1)$  cumple la condición de producto identidad y pertenece a  $X$ .

*Paso 3: Analizar las órbitas y los puntos fijos.* Por el Teorema Órbita-Estabilizador, el tamaño de cualquier órbita divide al orden del grupo que actúa. Aquí,  $|\mathbb{Z}_p| = p$  (primo). Por tanto, el tamaño de cualquier órbita  $|\mathcal{O}_x|$  solo puede ser 1 o  $p$ .

Las órbitas de tamaño 1 corresponden a los puntos fijos de la acción  $(X^{\mathbb{Z}_p})$ . Una tupla  $x = (x_1, \dots, x_p)$  es un punto fijo si:

$$(x_1, x_2, \dots, x_p) = (x_2, x_3, \dots, x_p, x_1)$$

Esto implica que  $x_1 = x_2 = \dots = x_p$ . Además, como la tupla está en  $X$ , el producto debe ser la identidad:

$$x_1 \cdot x_1 \dots x_1 = x_1^p = e$$

Así, los puntos fijos son precisamente las tuplas de la forma  $(g, g, \dots, g)$  donde  $g^p = e$ .

*Paso 4: Conclusión usando la Ecuación de Clase.* La ecuación de clase para esta acción es:

$$|X| = |X^{\mathbb{Z}_p}| + \sum |\mathcal{O}_{\text{tamaño } p}|$$

Tomando módulo  $p$ :

$$|X| \equiv |X^{\mathbb{Z}_p}| \pmod{p}$$

(Pues las órbitas de tamaño  $p$  son congruentes con 0 módulo  $p$ ).

Sabemos por el Paso 1 que  $|X| \equiv 0 \pmod{p}$ . Entonces:

$$|X^{\mathbb{Z}_p}| \equiv 0 \pmod{p}$$

Sabemos que existe al menos un punto fijo trivial: la tupla  $(e, e, \dots, e)$ , donde  $e^p = e$ . Por lo tanto,  $|X^{\mathbb{Z}_p}| \geq 1$ . Como  $|X^{\mathbb{Z}_p}|$  es un múltiplo de  $p$  y es al menos 1, debe ser al menos  $p$  (es decir,  $|X^{\mathbb{Z}_p}| \geq p$ ).

Esto significa que existen al menos  $p-1$  tuplas fijas distintas de la trivial. Sea  $(a, a, \dots, a)$  una de estas tuplas con  $a \neq e$ . Entonces  $a \in G$  satisface  $a^p = e$  y  $a \neq e$ . Por lo tanto,  $a$  es un elemento de orden  $p$ .  $\square$

**Definición 5.1.4.** Sea  $G$  un grupo y  $p$  un número primo. Diremos que  $G$  es un  $p$ -grupo si todo elemento de  $G$  tiene orden igual a una potencia de  $p$ . Es decir, para todo  $g \in G$ , existe  $k \geq 0$  tal que  $o(g) = p^k$ .

**Observación 5.5.** Si  $G$  es un  $p$ -grupo, no necesariamente es finito. (Existen  $p$ -grupos infinitos, como por ejemplo el grupo de Prüfer  $\mathbb{Z}_{p^\infty}$ ).

**Corolario 5.1.1.** Si  $G$  es un  $p$ -grupo finito, entonces  $|G| = p^n$  para algún  $n \in \mathbb{N}$ .

*Demostración.*

Supongamos que  $|G|$  no es una potencia de  $p$ . Entonces, por el Teorema Fundamental de la Aritmética, existe un primo  $q$  tal que  $q \mid |G|$  y  $q \neq p$ . Por el Teorema de Cauchy, como  $q$  divide al orden del grupo, existe un elemento  $g \in G$  tal que  $o(g) = q$ . Pero  $q$  no es una potencia de  $p$  (pues  $q \neq p$  son primos). Esto contradice la hipótesis de que  $G$  es un  $p$ -grupo (todos sus elementos deben tener orden potencia de  $p$ ). Por lo tanto, el único divisor primo de  $|G|$  es  $p$ , lo que implica que  $|G| = p^n$ .  $\square$



**Corolario 5.1.2.** *Sea  $G$  un grupo finito. Entonces  $G$  es un  $p$ -grupo si y solo si  $|G| = p^n$  para algún  $n \in \mathbb{N}$ .*

*Demostración.*

$\Rightarrow$ ) Ya fue probado en el corolario anterior.

$\Leftarrow$ ) Supongamos que  $|G| = p^n$ . Sea  $g \in G$  un elemento cualquiera. Por el Teorema de Lagrange, el orden del elemento divide al orden del grupo, es decir,  $o(g) \mid |G|$ . Como  $|G| = p^n$ , los únicos divisores son de la forma  $p^k$  con  $0 \leq k \leq n$ . Por lo tanto,  $o(g) = p^k$ . Como esto vale para todo  $g \in G$ , concluimos que  $G$  es un  $p$ -grupo.  $\square$

**Ejemplo 5.5.** *Sea  $G$  un grupo de orden  $pq$ , con  $p, q$  primos distintos. Sin pérdida de generalidad, supongamos  $p < q$ . Por el Teorema de Cauchy, existen elementos  $a, b \in G$  tales que  $o(a) = p$  y  $o(b) = q$ . Sean  $H = \langle a \rangle$  y  $K = \langle b \rangle$  los subgrupos generados.*

*Observamos que:*

- $[G : K] = p$ . Como  $p$  es el menor primo que divide al orden de  $G$  (pues  $p < q$ ), sabemos por un resultado anterior que  $K \trianglelefteq G$ .
- $H \cap K = \{e\}$ , pues los órdenes de sus elementos son coprimos (salvo la identidad).
- $|HK| = \frac{|H||K|}{|H \cap K|} = pq = |G|$ , por lo tanto  $G = HK$ .

*Ahora analizamos la normalidad de  $H$ :*

i) Si  $H \trianglelefteq G$ , como ya tenemos  $K \trianglelefteq G$  y intersección trivial, entonces  $G$  es el producto directo interno:

$$G \cong H \times K \cong \mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_q \cong \mathbb{Z}_{pq}$$

*En este caso,  $G$  es cíclico y abeliano.*

ii) Si  $H$  no es normal en  $G$ , entonces  $G$  no es abeliano (pues en un grupo abeliano todo subgrupo es normal). Sabemos que siempre existe el grupo cíclico  $\mathbb{Z}_{pq}$ . Si  $G$  no es abeliano, su estructura es un producto semidirecto no trivial.

**Corolario 5.1.3.** *Sea  $G$  un grupo de orden  $p^2$ , con  $p$  primo. Entonces  $G$  es abeliano.*

*Demostración.*

Por el Teorema de Cauchy, existe  $a \in G$  tal que  $o(a) = p$ . Sea  $H = \langle a \rangle$ . Como  $|H| = p$  y  $|G| = p^2$ , el índice es  $[G : H] = p$ . Como  $p$  es el menor primo que divide a  $|G|$ , entonces  $H \trianglelefteq G$ .

Consideremos un elemento  $b \in G \setminus H$ .

- **Caso 1:** Si  $o(b) = p^2$ , entonces  $G = \langle b \rangle \cong \mathbb{Z}_{p^2}$ , el cual es abeliano.

- **Caso 2:** Si todo elemento en  $G \setminus H$  tiene orden  $p$ . Sea  $K = \langle b \rangle$ . Como  $b \notin H$  y  $|H| = p$  (primo),  $H \cap K = \{e\}$ . Al ser  $H$  normal y  $H \cap K = \{e\}$ , el subgrupo  $HK$  es isomorfo al producto directo. Como  $|HK| = p^2 = |G|$ , entonces  $G \cong H \times K \cong \mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_p$ . El producto directo de grupos abelianos es abeliano.

En cualquier caso,  $G$  es abeliano. □

**Teorema 5.1.4.** *Sea  $G$  un  $p$ -grupo finito no trivial (es decir,  $|G| = p^n$  con  $n \geq 1$ ). Entonces su centro es no trivial:*

$$Z(G) \neq \{e\}$$

*Demostración.*

Hagamos actuar a  $G$  en sí mismo por conjugación:

$$g \cdot x = gxg^{-1}$$

La Ecuación de Clase para esta acción es:

$$|G| = |Z(G)| + \sum_{x_i \notin Z(G)} [G : C_G(x_i)]$$

donde la suma recorre un sistema de representantes de las clases de conjugación no triviales (aquellas con más de un elemento).

Analicemos la divisibilidad por  $p$ :

1.  $|G| = p^n$ , por lo que  $|G|$  es divisible por  $p$  (pues  $n \geq 1$ ).
2. Para cada  $x_i \notin Z(G)$ , su centralizador  $C_G(x_i)$  es un subgrupo propio de  $G$  (si fuera todo  $G$ ,  $x_i$  estaría en el centro). Por el Teorema de Lagrange,  $[G : C_G(x_i)] = \frac{|G|}{|C_G(x_i)|}$ . Como  $|G|$  es potencia de  $p$ , este índice también debe ser una potencia de  $p$ . Como  $x_i \notin Z(G)$ , el índice es mayor que 1. Por lo tanto,  $p$  divide a  $[G : C_G(x_i)]$ .

Entonces, en la ecuación de clase:

$$\underbrace{|G|}_{\text{divisible por } p} = |Z(G)| + \underbrace{\sum [G : C_G(x_i)]}_{\text{divisible por } p}$$

Esto implica que  $p$  debe dividir a  $|Z(G)|$ .

Como el neutro  $e$  siempre está en el centro,  $|Z(G)| \geq 1$ . Al ser múltiplo de  $p$ , concluimos que  $|Z(G)| \geq p$ , por lo que  $Z(G) \neq \{e\}$ . □

## 5.2. Grupos Sylow

**Definición 5.2.1.** *Sea  $G$  un grupo, diremos que  $H$  es un subgrupo maximal de  $G$  si cuando  $N$  es un subgrupo de  $G$  con  $H \subseteq N \subseteq G$ , entonces  $N = G$  o  $N = H$*

**Definición 5.2.2.** Sea  $G$  un grupo,  $p$  un primo que divide a  $|G|$ . Diremos que  $P$  es un  $p$ -subgrupo de Sylow de  $G$  si  $P$  es un  $p$ -grupo maximal (con respecto a la propiedad de ser  $p$ -grupo) es decir, si  $H$  es un  $p$ -grupo tal que  $P \subseteq H \subseteq G$  entonces  $H = G$  o  $H = P$

**Observación 5.6.** Si  $G$  es un grupo finito, y  $p$  es primo que divide a  $|G|$  entonces existe un  $p$ -subgrupo Sylow de  $G$

*Demostración.*

Sea  $\mathcal{A} = \{H \leq G \mid H \text{ es } p\text{-grupo}\}$ . Por el teorema de Cauchy  $G$  tiene elementos de orden  $p$ , si  $o(a) = p$ , entonces  $H = \langle a \rangle \in \mathcal{A}$ . Luego,  $\mathcal{A} \neq \emptyset$ .

Sea  $\{H_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$  una cadena en  $\mathcal{A}$ . Sea  $H = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda$ , entonces  $H \in \mathcal{A}$  y en efecto si  $a, b \in H$ , existe  $\lambda_1, \lambda_2 \in \Lambda$  tal que  $a \in H_{\lambda_1}$  y  $b \in H_{\lambda_2}$ , como los  $\{H_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$  forman una cadena. Podemos suponer  $H_{\lambda_1} \subseteq H_{\lambda_2}$  en cuyo caso  $a, b \in H_{\lambda_2}$  y como  $H_{\lambda_2} \leq G$ ,  $ab^{-1} \in H_{\lambda_2} \subseteq H$ , así  $H \leq G$ .

Más aún si  $a \in H$ ,  $a \in H_\lambda$  para algún  $\lambda \in \Lambda$  así que  $o(a) = p^n$  para algún  $n \in \mathbb{N}$ , luego  $H$  es  $p$ -grupo. Por lo tanto  $H \in \mathcal{A}$ , luego,  $\mathcal{A}$  tiene elementos maximales y por el lema de Zorn  $G$  los tiene.  $\square$

**Teorema 5.2.1** (Segundo y Tercer Teorema de Sylow). Sea  $G$  grupo finito,  $p$  primo que divide a  $|G|$ ,  $\ell_p$  la cantidad de  $p$ -grupos Sylow, entonces:

- i)  $\ell_p \mid |G|$  y  $\ell_p \equiv 1 \pmod{p}$ .
- ii) Los  $p$ -grupos Sylow son conjugados.

*Demostración.*

Sea  $P$  un  $p$ -grupo Sylow de  $G$  y  $X = \{gPg^{-1} \mid g \in G\}$  los subgrupos conjugados de  $P$ . (Note que  $|X| < +\infty$ ). Hagamos actuar  $G$  en  $X$  por conjugación como sigue:

$$\tilde{\varphi} : G \times X \rightarrow X$$

$$(g, aPa^{-1}) \mapsto g(aPa^{-1})g^{-1}$$

$\tilde{\varphi}$  es acción pues:

$$\text{i) } e(aPa^{-1})e = eaPa^{-1}e = aPa^{-1}.$$

$$\text{ii) } (gh)(aPa^{-1}) = (gh)(aPa^{-1})(gh)^{-1}$$

$$= g(haPa^{-1}h^{-1})g^{-1}$$

$$= g \cdot (haPa^{-1})$$

$$= g \cdot (h \cdot aPa^{-1})$$

Además cada elemento de  $X$  es un  $p$ -grupo Sylow. Si  $Q$  es un  $p$ -subgrupo de  $G$  con  $aPa^{-1} \subseteq Q \subsetneq G$  entonces  $P = a^{-1}(aPa^{-1})a \subseteq a^{-1}Qa \subsetneq G$  y  $a^{-1}Qa$  es un  $p$ -grupo (si  $q \in a^{-1}Qa$ ,  $g = a^{-1}qa$  con  $q \in Q \implies g^{p^s} = (a^{-1}qa)^{p^s} = a^{-1}q^{p^s}a = a^{-1}ea = e$  si  $p^s$  es el orden de  $q$ , luego  $g$  tiene orden potencia de  $p$ ). Por la maximalidad de  $P$ ,  $P = a^{-1}Qa$ , luego  $aPa^{-1} = Q$ , así  $aPa^{-1}$  es maximal.

Restringiendo  $\tilde{\varphi}$  a  $P$ , se tiene que  $P$  actúa en  $X$ . Sea  $Q \in X$ , entonces  $[P : St_P(Q)] = p^s$  para algún  $s$ . Más aún si  $s = 0$ , entonces  $P = St_P(Q) = \{p \in P \mid pQp^{-1} = Q\} = P \cap St_G(Q)$ , de donde  $P \subseteq St_G(Q)$ . Además  $Q \trianglelefteq St_G(Q) = N_G(Q)$ , luego  $PQ$  es subgrupo de  $St_G(Q)$ , más aún es  $p$ -subgrupo de  $G$  y  $P, Q \leq PQ$ . Como  $P$  es Sylow, luego  $PQ = G$  o  $P = PQ = Q$ . Si  $G = PQ$  entonces  $G = St_G(Q)$ , luego  $Q \trianglelefteq G$ . Pero  $Q = aPa^{-1}$  para algún  $a \in G$ ,  $Q = a^{-1}Qa = P$ .

En cualquier caso entonces  $P = Q$ . Es decir, el único elemento de  $X$  que bajo la acción se queda fijo es  $P$ , por lo tanto

$$|X| = 1 + \sum_{Q \notin X^P} [P : St_P(Q)]$$

En particular  $|X| \equiv 1 \pmod{p}$ .

Sea ahora un  $Q$   $p$ -subgrupo Sylow y suponga que  $Q \notin X$ , entonces restringiendo  $\tilde{\varphi}$  a  $Q$ . Un argumento análogo muestra que

$$|X| \equiv 0 \pmod{p}$$

En efecto, si  $Q_1 \in X$ , entonces  $[Q : St_Q(Q_1)] = p^s$  y  $s = 0$  si y sólo si  $Q = St_Q(Q_1) = St_G(Q_1) \cap Q$ , luego  $Q \subseteq St_G(Q_1)$  y como  $Q_1 \trianglelefteq St_G(Q_1)$  entonces  $QQ_1 \leq St_G(Q_1)$ . Más aún  $QQ_1$  es  $p$ -subgrupo. Así  $Q \subseteq QQ_1 \subseteq G$  de donde  $QQ_1 = G$  o  $Q = QQ_1 = Q_1$ . Si  $QQ_1 = G$ ,  $G = St_G(Q_1)$ , luego  $Q_1 \trianglelefteq G$ , de donde  $Q_1 = P \trianglelefteq G$ . Luego  $P \subsetneq QQ_1$  y  $QQ_1$  es  $p$ -grupo lo cual no puede ser por la maximalidad de  $P$ . Por lo tanto  $Q = Q_1 \# C$  (Contradicción) pues  $Q_1 \in X$  y  $Q \notin X$ , es decir, con la acción  $\tilde{\varphi}|_Q$ , no hay puntos fijos y así

$$|X| = \sum_{Q_1 \notin X^G} [Q : St_Q(Q_1)] \equiv 0 \pmod{p}$$

Lo cual no puede ser pues contradice (i), luego  $Q \in X$ , es decir, es un conjugado de  $P$  y por tanto  $\ell_p = |X|$  y se tiene  $\ell_p \equiv 1 \pmod{p}$ . Más aún

$$X = \{gPg^{-1} \mid g \in G\} = \{g \cdot P \mid g \in G\} = \mathcal{O}_P$$

Así,

$$\ell_p = |X| = |\mathcal{O}_P| = [G : St_G(P)] \mid |G|$$

□

**Teorema 5.2.2** (Primer Teorema de Sylow). *Sea  $G$  un grupo de orden  $|G| = p^s m$  con  $p$  primo,  $(p, m) = 1$  entonces todo  $p$ -grupo Sylow tiene cardinalidad  $p^s$ .*

*Demostración.*

Sea  $P$  un  $p$ -Sylow de  $G$ . Para ver que  $|P| = p^s$  basta probar que  $[G : P] = m$  ( $|G| = [G : P]|P|$ ) y para esto, basta ver que  $([G : P], p) = 1$  pues si esto pasa  $p^s m = |G| = [G : P]|P|$ ,  $([G : P], p) = 1$ , entonces  $p^s \mid |P|$ , además  $|P| \mid |G| = p^s m$ , luego,  $|P| = p^s p^t$  y  $|P| \leq p^s m$  (pues  $P$  es subgrupo), luego,  $p^s p^t \ell = p^s m$  y  $(p, m) = 1$ , de donde  $t = 0$  o  $|P| = p^s$ .

Veamos entonces que  $([G : P], p) = 1$ , tenemos que se sigue del teorema de Lagrange que  $[G : P] = [G : N(P)][N(P) : P]$  así que basta ver  $([G : N(P)], p) = 1$ ,  $([N(P) : P], p) = 1$ .

Pero por el teorema anterior  $[G : N(P)] = [G : St_G(P)] = |\mathcal{O}_P| = \ell_p \equiv 1 \pmod{p}$ , luego  $([G : N(P)], p) = 1$ .

Ahora, si  $([N(P) : P], p) \neq 1$ ,  $p \mid [N(P) : P]$  y como  $P \trianglelefteq N(P)$ , entonces  $p$  divide el orden del grupo  $N(P)/P$ , luego por el teorema de Cauchy, existe  $\bar{X} = XP \in N(P)/P$  tal que  $\bar{X}^p = \bar{e} = P$ .

Observe que:

$$\begin{array}{ccc} \langle \bar{X} \rangle & = & \frac{\langle X, P \rangle}{P} \leq \frac{N(P)}{P} \quad \text{y} \quad (\bar{X})^p = e \\ & & \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \\ N(P)/P & \text{---} & N(P) \\ & & \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \\ \langle \bar{X} \rangle & \text{---} & \langle X, P \rangle \\ & & \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \\ P = \bar{e} & \text{---} & P \end{array}$$

Por lo tanto,  $\frac{\langle X, P \rangle}{P}$  es  $p$ -grupo, de donde  $\langle X, P \rangle$  es  $p$ -grupo y

$$|\langle X, P \rangle| = [\langle X, P \rangle : P]|P| = \left| \frac{\langle X, P \rangle}{P} \right| |P|$$

Por la maximalidad de  $P \subseteq \langle X, P \rangle$ ,  $P = \langle X, P \rangle$  o  $x \in P$  y  $o(\bar{x}) = 1 \notin C$  (Contradicción), luego  $([N(P) : P], p) = 1$ . De donde se concluye que  $|P| = p^s$ .  $\square$

**Ejemplo 5.6.** Sea  $|G| = pq$  con  $p < q$  números primos. Calculamos la cantidad de  $q$ -subgrupos de Sylow,  $n_q$ :

$$n_q \equiv 1 \pmod{q} \quad \text{y} \quad n_q \mid p$$

Los divisores de  $p$  son  $\{1, p\}$ .

- Si  $n_q = p$ , entonces  $p \equiv 1 \pmod{q}$ , lo cual implica que  $q \mid (p - 1)$ . Esto es imposible pues  $p < q$  (un número mayor no puede dividir a uno menor positivo).

Por lo tanto,  $n_q = 1$ . Sea  $Q$  el único  $q$ -Sylow de  $G$ , entonces  $Q \trianglelefteq G$ .

Ahora analicemos  $n_p$ :

$$n_p \equiv 1 \pmod{p} \quad \text{y} \quad n_p \mid q$$

Los divisores de  $q$  son  $\{1, q\}$ . Así que  $n_p$  puede ser 1 o  $q$ .

Sea  $P$  un  $p$ -Sylow de  $G$ . Como  $Q \trianglelefteq G$  y  $P \leq G$ , y además  $Q \cap P = \{e\}$  (pues  $|Q| = q$ ,  $|P| = p$  y son primos distintos), tenemos que:

$$|QP| = \frac{|Q||P|}{|Q \cap P|} = \frac{qp}{1} = pq = |G|$$

Por lo tanto  $G = QP$ . Como  $Q$  es normal y  $Q \cap P = \{e\}$ ,  $G$  es un producto semidirecto:

$$G \cong Q \rtimes_{\varphi} P$$

donde  $\varphi : P \rightarrow \text{Aut}(Q)$  es un homomorfismo.

Sabemos que  $Q \cong \mathbb{Z}_q$ , por lo que  $\text{Aut}(Q) \cong \text{Aut}(\mathbb{Z}_q) \cong \mathbb{Z}_{q-1}$ . El orden del grupo de automorfismos es  $|\text{Aut}(Q)| = q - 1$ . El homomorfismo  $\varphi$  está determinado por la imagen de un generador de  $P$ . El orden de la imagen debe dividir tanto al orden de  $P$  ( $p$ ) como al orden de  $\text{Aut}(Q)$  ( $q - 1$ ).

**Caso 1:**  $p \nmid (q - 1)$ . En este caso,  $\gcd(p, q - 1) = 1$ . El único elemento de orden que divide a  $p$  en  $\text{Aut}(Q)$  es la identidad. Por lo tanto,  $\varphi$  es el homomorfismo trivial ( $\varphi(g) = \text{Id}_Q$  para todo  $g$ ). Esto implica que el producto es directo:

$$G \cong Q \times P \cong \mathbb{Z}_q \times \mathbb{Z}_p \cong \mathbb{Z}_{pq}$$

Así, si  $p \nmid (q - 1)$ , el único grupo de orden  $pq$  es el cíclico  $\mathbb{Z}_{pq}$ .

**Caso 2:**  $p \mid (q - 1)$ . Por el Teorema de Cauchy, como  $p$  divide al orden de  $\text{Aut}(Q)$ , existe un subgrupo de orden  $p$  en  $\text{Aut}(Q)$ . Esto permite definir un homomorfismo  $\varphi$  no trivial. Por lo tanto, existe un producto semidirecto no abeliano:

$$G \cong Q \rtimes P$$

Este grupo es único salvo isomorfismo (todos los homomorfismos no triviales dan lugar a grupos isomorfos en este caso). **Ejemplo:**  $S_3$  tiene orden  $6 = 2 \cdot 3$ . Aquí  $p = 2$ ,  $q = 3$ . Como  $2 \mid (3 - 1)$ , existe el grupo no abeliano  $S_3 \cong \mathbb{Z}_3 \rtimes \mathbb{Z}_2$ .

**Ejemplo 5.7.** Sea  $|G| = 30 = 2 \cdot 3 \cdot 5$ . Analicemos los subgrupos de Sylow:

- $n_5 \equiv 1 \pmod{5}$  y  $n_5 \mid 6 \implies n_5 \in \{1, 6\}$ .
- $n_3 \equiv 1 \pmod{3}$  y  $n_3 \mid 10 \implies n_3 \in \{1, 10\}$ .

Supongamos que  $G$  es simple (es decir, no tiene subgrupos normales propios). Entonces tendríamos  $n_5 = 6$  y  $n_3 = 10$  (pues si alguno fuera 1, ese Sylow sería normal).

Contemos los elementos:

- Si  $n_5 = 6$ , tenemos 6 subgrupos de orden 5. La intersección de cualesquiera dos de ellos es trivial (orden 1). Cada uno tiene  $5 - 1 = 4$  elementos de orden 5. Total de elementos de orden 5:  $6 \times 4 = 24$ .
- Si  $n_3 = 10$ , tenemos 10 subgrupos de orden 3. Cada uno tiene  $3 - 1 = 2$  elementos de orden 3. Total de elementos de orden 3:  $10 \times 2 = 20$ .

Sumando los elementos:

$$24 \text{ (orden 5)} + 20 \text{ (orden 3)} = 44 \text{ elementos}$$

*Esto es imposible pues  $|G| = 30$ . Por lo tanto, nuestra suposición es falsa. Debe ocurrir que  $n_5 = 1$  o  $n_3 = 1$ . Conclusión: Un grupo de orden 30 no puede ser simple (siempre tiene un subgrupo normal de orden 5 o de orden 3).*

**Ejemplo 5.8.** Sea  $|G| = 12 = 2^2 \cdot 3$ .

- $n_3 \equiv 1 \pmod{3}$  y  $n_3 \mid 4 \implies n_3 \in \{1, 4\}$ .
- $n_2 \equiv 1 \pmod{2}$  y  $n_2 \mid 3 \implies n_2 \in \{1, 3\}$ .

*Supongamos que  $G$  no es simple. Si  $n_3 = 1$ , ya terminamos ( $P_3 \trianglelefteq G$ ). Supongamos entonces que  $n_3 = 4$ . El número de elementos de orden 3 es:*

$$4 \times (3 - 1) = 8 \text{ elementos.}$$

*Los elementos restantes son  $12 - 8 = 4$ . Estos 4 elementos deben formar el único 2-Sylow de  $G$  (que tiene orden 4). Por lo tanto, si  $n_3 \neq 1$ , obligatoriamente  $n_2 = 1$ .*

*En cualquier caso,  $G$  tiene un subgrupo normal (ya sea el 3-Sylow o el 2-Sylow).*

**Ejemplo 5.9.** Sea  $|G| = p^2q$  con  $p, q$  primos distintos. (El análisis suele ser similar: mostrar que no es simple contando elementos. Por ejemplo, si  $p > q$ ,  $n_p = 1$ ).





# CAPÍTULO 6

## Automorfismos de Grupos

---

### 6.1. Automorfismos de Grupos

**Definición 6.1.1.** Un **automorfismo** de un grupo  $G$  es un isomorfismo de  $G$  en sí mismo. Al conjunto de automorfismos se le denota por  $\text{Aut}(G)$ . Así:

$$\text{Aut}(G) = \{f : G \rightarrow G \mid f \text{ es un isomorfismo}\}$$

**Observación 6.1.** Si  $G$  es finito y  $f : G \rightarrow G$  es un homomorfismo, entonces  $f$  es inyectivo si y solo si  $f$  es suprayectivo.

*Demostración.*

Como  $G$  es un grupo finito, denotemos su orden por  $|G| = n < \infty$ .

$\Rightarrow$ ) Supongamos que  $f$  es inyectiva. Dado que  $f$  es una función inyectiva, la cantidad de elementos en su imagen es igual a la cantidad de elementos en su dominio. Es decir,  $|\text{Im}(f)| = |G| = n$ . Sabemos que  $\text{Im}(f) \subseteq G$ . Dado que  $\text{Im}(f)$  es un subconjunto de  $G$  y tiene la misma cardinalidad finita que  $G$ , necesariamente  $\text{Im}(f) = G$ . Por lo tanto,  $f$  es suprayectiva.

$\Leftarrow$ ) Supongamos que  $f$  es suprayectiva. Consideremos el núcleo de  $f$ ,  $\ker(f)$ . Por el Primer Teorema de Isomorfía, sabemos que:

$$G/\ker(f) \cong \text{Im}(f)$$

Tomando cardinalidades:

$$\frac{|G|}{|\ker(f)|} = |\text{Im}(f)|$$

Como  $f$  es suprayectiva,  $\text{Im}(f) = G$ , por lo que  $|\text{Im}(f)| = |G|$ . Sustituyendo en la ecuación:

$$\frac{|G|}{|\ker(f)|} = |G|$$

Como  $|G|$  es finito y no nulo, podemos dividir ambos lados por  $|G|$ , obteniendo:

$$\frac{1}{|\ker(f)|} = 1 \implies |\ker(f)| = 1$$

El único subgrupo de orden 1 es el trivial, por lo tanto  $\ker(f) = \{e\}$ . Sabemos que un homomorfismo es inyectivo si y solo si su núcleo es trivial. Concluimos que  $f$  es inyectiva.  $\square$

**Proposición 6.1.1.** *Sea  $G$  un grupo y  $a \in G$ . Definimos  $f_a : G \rightarrow G$  por  $f_a(g) = aga^{-1}$ . Se verifica que  $f_a$  es un isomorfismo.*

*Demostración.*

i)  $f_a$  es homomorfismo: Sean  $g_1, g_2 \in G$ .

$$f_a(g_1g_2) = a(g_1g_2)a^{-1} = ag_1(a^{-1}a)g_2a^{-1} = (ag_1a^{-1})(ag_2a^{-1}) = f_a(g_1)f_a(g_2)$$

ii)  $f_a$  es inyectiva:

$$f_a(g) = f_a(g_1) \iff aga^{-1} = ag_1a^{-1} \iff g = g_1$$

iii)  $f_a$  es sobreyectiva: Dado  $y \in G$ , existe  $x = a^{-1}ya \in G$  tal que:

$$f_a(x) = f_a(a^{-1}ya) = a(a^{-1}ya)a^{-1} = (aa^{-1})y(aa^{-1}) = eye = y$$

Por lo tanto,  $f_a$  es un isomorfismo de  $G$  en sí mismo (un automorfismo).  $\square$

**Definición 6.1.2.** *Al conjunto de los automorfismos de la forma  $f_a$  se les llama automorfismos internos de  $G$ , y se denota por  $\text{Im}(G)$ .*

$$\text{Im}(G) = \{f_a : G \rightarrow G \mid f_a(g) = aga^{-1}, \text{ para algún } a \in G\}$$

**Observación 6.2.**  *$\text{Aut}(G)$ , con la operación de composición de funciones, es un grupo.*

*Demostración.*

Sabemos que la composición de biyecciones es una biyección y la composición de homomorfismos es un homomorfismo. Sean  $f, g \in \text{Aut}(G)$ . Entonces  $f \circ g$  es biyectiva y es homomorfismo, luego  $f \circ g \in \text{Aut}(G)$ . La asociatividad se hereda de la composición de funciones. La identidad es  $\text{Id}_G(x) = x$ , que trivialmente es un automorfismo. Si  $f \in \text{Aut}(G)$ , su función inversa  $f^{-1}$  también es un isomorfismo, por lo que  $f^{-1} \in \text{Aut}(G)$ .  $\square$

**Ejemplo 6.1.** *Si  $G$  es un grupo, definamos  $\varphi : G \rightarrow \text{Aut}(G)$  como  $\varphi(g) = f_g$ , donde  $f_g : G \rightarrow G$  está dado por  $f_g(a) = gag^{-1}$ . Entonces  $\varphi$  es un homomorfismo.*

*En efecto:*

$$f_{gg_1}(a) = (gg_1)a(gg_1)^{-1} = g(g_1ag_1^{-1})g^{-1} = gf_{g_1}(a)g^{-1} = f_g(f_{g_1}(a)) = (f_g \circ f_{g_1})(a)$$

Por lo tanto:

$$\varphi(gg_1) = f_{gg_1} = f_g \circ f_{g_1} = \varphi(g) \circ \varphi(g_1)$$

La imagen de  $\varphi$  es justamente  $\text{Im}(G)$ .

**Teorema 6.1.1.** Sea  $G$  un grupo, entonces  $\text{Im}(G) \trianglelefteq \text{Aut}(G)$  y

$$G/Z(G) \cong \text{Im}(G)$$

*Demostración.*

Sea  $\varphi : G \rightarrow \text{Aut}(G)$  dada por  $\varphi(g) = f_g$  (como en el ejemplo anterior). Entonces,  $\varphi$  es un homomorfismo con imagen  $\text{Im}(G)$ . Además:

$$\begin{aligned} g \in \ker \varphi &\iff \varphi(g) = \text{Id}_G \iff f_g(a) = a, \forall a \in G \\ &\iff gag^{-1} = a, \forall a \in G \iff ga = ag, \forall a \in G \iff g \in Z(G) \end{aligned}$$

Por lo tanto,  $\ker \varphi = Z(G)$ . Por el Primer Teorema de Isomorfía:

$$G/\ker \varphi = G/Z(G) \cong \text{Im}(\varphi) = \text{Im}(G)$$

Ahora, para ver la normalidad ( $\text{Im}(G) \trianglelefteq \text{Aut}(G)$ ), sea  $f_g \in \text{Im}(G)$  y  $h \in \text{Aut}(G)$ . Para  $a \in G$ :

$$(h \circ f_g \circ h^{-1})(a) = h(f_g(h^{-1}(a))) = h(gh^{-1}(a)g^{-1})$$

Como  $h$  es un homomorfismo:

$$= h(g)h(h^{-1}(a))h(g^{-1}) = h(g)ah(g)^{-1} = f_{h(g)}(a)$$

Luego,  $h \circ f_g \circ h^{-1} = f_{h(g)}$ . Como  $h(g) \in G$ , entonces  $f_{h(g)} \in \text{Im}(G)$ . De donde concluimos que  $\text{Im}(G) \trianglelefteq \text{Aut}(G)$ .  $\square$

**Observación 6.3.** Si  $G \cong G_1$ , entonces  $\text{Aut}(G) \cong \text{Aut}(G_1)$ .

*Demostración.*

Sea  $\psi : G \rightarrow G_1$  un isomorfismo. Definamos  $\Psi : \text{Aut}(G) \rightarrow \text{Aut}(G_1)$  dada por:

$$f \mapsto h_f = \psi \circ f \circ \psi^{-1}$$

Es decir,  $\Psi(f) = \psi \circ f \circ \psi^{-1}$ . Demostraremos que  $\Psi$  es un isomorfismo, en efecto:

1.  $\Psi$  está bien definida: Es decir,  $\psi \circ f \circ \psi^{-1} \in \text{Aut}(G_1)$ . En efecto, claramente  $\psi \circ f \circ \psi^{-1}$  es biyectiva (composición de biyecciones). Además, para  $g_1, g_2 \in G_1$ :

$$\begin{aligned} h_f(g_1g_2) &= (\psi \circ f \circ \psi^{-1})(g_1g_2) = \psi(f(\psi^{-1}(g_1g_2))) \\ &= \psi(f(\psi^{-1}(g_1)\psi^{-1}(g_2))) \quad (\text{pues } \psi^{-1} \text{ es hom.}) \\ &= \psi(f(\psi^{-1}(g_1)) \cdot f(\psi^{-1}(g_2))) \quad (\text{pues } f \text{ es hom.}) \\ &= \psi(f(\psi^{-1}(g_1))) \cdot \psi(f(\psi^{-1}(g_2))) \quad (\text{pues } \psi \text{ es hom.}) \\ &= h_f(g_1)h_f(g_2) \end{aligned}$$

Por lo tanto,  $h_f \in \text{Aut}(G_1)$ .

2.  $\Psi$  es homomorfismo: Sean  $f, \rho \in \text{Aut}(G)$ .

$$\Psi(f \circ \rho) = h_{f \circ \rho} = \psi \circ (f \circ \rho) \circ \psi^{-1}$$

Por otro lado:

$$\Psi(f) \circ \Psi(\rho) = (\psi \circ f \circ \psi^{-1}) \circ (\psi \circ \rho \circ \psi^{-1}) = \psi \circ f \circ (\psi^{-1} \circ \psi) \circ \rho \circ \psi^{-1}$$

Como  $\psi^{-1} \circ \psi = \text{Id}_G$ , esto se reduce a:

$$= \psi \circ f \circ \rho \circ \psi^{-1} = h_{f \circ \rho}$$

Luego,  $\Psi(f \circ \rho) = \Psi(f) \circ \Psi(\rho)$ .

3.  $\Psi$  es inyectiva:

$$\Psi(f) = \Psi(\rho) \iff \psi \circ f \circ \psi^{-1} = \psi \circ \rho \circ \psi^{-1}$$

Componiendo con  $\psi^{-1}$  a la izquierda y  $\psi$  a la derecha:

$$\iff \psi^{-1}(\psi \circ f \circ \psi^{-1})\psi = \psi^{-1}(\psi \circ \rho \circ \psi^{-1})\psi \iff f = \rho$$

4.  $\Psi$  es sobreyectiva: Sea  $g \in \text{Aut}(G_1)$ . Existe  $f = \psi^{-1} \circ g \circ \psi \in \text{Aut}(G)$  tal que:

$$\Psi(f) = \psi \circ (\psi^{-1} \circ g \circ \psi) \circ \psi^{-1} = (\psi \circ \psi^{-1}) \circ g \circ (\psi \circ \psi^{-1}) = g$$

Por lo tanto,  $\text{Aut}(G) \cong \text{Aut}(G_1)$ . □

**Observación 6.4.** *El recíproco es falso.*

*Demostración.*

Sea  $G = S_3$ . Sus elementos son:

$$S_3 = \{e, \theta = (123), \theta^2 = (132), \sigma = (12), \tau = (13), \rho = (23)\}$$

Sabemos que  $S_3$  es generado por  $\theta$  y  $\sigma$  ( $\langle \theta, \sigma \rangle = S_3$ ) con las relaciones  $\theta^3 = e, \sigma^2 = e, \sigma\theta = \theta^2\sigma$ . Cualquier automorfismo  $f \in \text{Aut}(S_3)$  queda determinado por sus valores en los generadores. Además, un isomorfismo preserva el orden de los elementos.

Los elementos de orden 3 son  $\{\theta, \theta^2\}$ . Los elementos de orden 2 son  $\{\sigma, \tau, \rho\}$ . Por lo tanto, para  $f(\theta)$  tenemos 2 opciones ( $\theta$  ó  $\theta^2$ ) y para  $f(\sigma)$  tenemos 3 opciones ( $\sigma, \tau$  ó  $\rho$ ). En total hay a lo más  $2 \times 3 = 6$  automorfismos.

Sabemos que  $\text{Im}(S_3) \cong S_3/Z(S_3)$ . Como  $Z(S_3) = \{e\}$ , entonces  $\text{Im}(S_3) \cong S_3$ , por lo que  $|\text{Im}(S_3)| = 6$ . Como  $\text{Im}(S_3) \leq \text{Aut}(S_3)$  y  $|\text{Aut}(S_3)| \leq 6$ , concluimos que:

$$\text{Aut}(S_3) = \text{Im}(S_3) \cong S_3$$

(Nota: Existen grupos no isomorfos a  $S_3$ , como  $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ , cuyo grupo de automorfismos es isomorfo a  $S_3$ , mostrando que el recíproco falla). □

**Teorema 6.1.2.** Sean  $H_1$  y  $H_2$  grupos finitos tales que  $\gcd(|H_1|, |H_2|) = 1$ . Entonces:

$$\text{Aut}(H_1 \times H_2) \cong \text{Aut}(H_1) \times \text{Aut}(H_2)$$

*Demostración.*

Identificamos a  $H_1$  con el subgrupo  $H_1 \times \{e_2\}$  y a  $H_2$  con  $\{e_1\} \times H_2$  dentro de  $G = H_1 \times H_2$ .

Sea  $f \in \text{Aut}(H_1 \times H_2)$ . Probemos que  $f(H_1) = H_1$  y  $f(H_2) = H_2$ .

Sea  $(h, e_2) \in H_1$ . Su orden  $k$  divide a  $|H_1|$ . Aplicando  $f$ , el elemento  $f(h, e_2)$  debe tener el mismo orden  $k$ . Sea  $f(h, e_2) = (x, y) \in H_1 \times H_2$ . Entonces el orden de  $(x, y)$  es  $(|x|, |y|) = k$ . Esto implica que  $|y|$  divide a  $k$ , y por tanto  $|y|$  divide a  $|H_1|$ . Pero  $y \in H_2$ , por lo que  $|y|$  divide a  $|H_2|$ . Como  $(|H_1|, |H_2|) = 1$ , la única posibilidad es que  $|y| = 1$ , es decir,  $y = e_2$ . Por lo tanto,  $f(h, e_2) = (x, e_2) \in H_1$ .

Esto demuestra que  $f(H_1) \subseteq H_1$ . Por ser  $f$  inyectiva y  $H_1$  finito,  $f(H_1) = H_1$ . Análogamente se demuestra que  $f(H_2) = H_2$ .

Dado que  $f$  preserva los subgrupos  $H_1$  y  $H_2$ , podemos definir las restricciones:  $f|_{H_1} : H_1 \rightarrow H_1$  y  $f|_{H_2} : H_2 \rightarrow H_2$ . Estas restricciones son automorfismos de  $H_1$  y  $H_2$  respectivamente.

Definimos la función  $\Psi : \text{Aut}(H_1 \times H_2) \rightarrow \text{Aut}(H_1) \times \text{Aut}(H_2)$  dada por:

$$\Psi(f) = (f|_{H_1}, f|_{H_2})$$

$\Psi$  es un homomorfismo. En efecto:

Sean  $f, g \in \text{Aut}(H_1 \times H_2)$ .

$$\Psi(f \circ g) = ((f \circ g)|_{H_1}, (f \circ g)|_{H_2}) = (f|_{H_1} \circ g|_{H_1}, f|_{H_2} \circ g|_{H_2})$$

(Esto es válido porque  $g(H_1) = H_1$ , así que la composición se restringe bien).

$$= (f|_{H_1}, f|_{H_2}) \cdot (g|_{H_1}, g|_{H_2}) = \Psi(f) \cdot \Psi(g)$$

$\Psi$  es biyectiva. En efecto:

- **Inyectiva:** Si  $\Psi(f) = (Id_{H_1}, Id_{H_2})$ , entonces  $f(h, e_2) = (h, e_2)$  y  $f(e_1, k) = (e_1, k)$ . Para un elemento arbitrario  $(h, k) \in H_1 \times H_2$ :

$$f(h, k) = f((h, e_2)(e_1, k)) = f(h, e_2)f(e_1, k) = (h, e_2)(e_1, k) = (h, k)$$

Luego  $f = Id_{H_1 \times H_2}$ , así que  $\ker \Psi$  es trivial.

- **Sobreyectiva:** Dado  $(\alpha, \beta) \in \text{Aut}(H_1) \times \text{Aut}(H_2)$ , definimos  $f : H_1 \times H_2 \rightarrow H_1 \times H_2$  como  $f(h, k) = (\alpha(h), \beta(k))$ . Es fácil verificar que  $f$  es un automorfismo y que  $\Psi(f) = (\alpha, \beta)$ .

Por lo tanto,  $\text{Aut}(H_1 \times H_2) \cong \text{Aut}(H_1) \times \text{Aut}(H_2)$ . □

**Teorema 6.1.3.** *Sea  $G$  un grupo cíclico de orden  $n$ . Entonces:*

$$\text{Aut}(G) \cong (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$$

*Donde  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$  es el grupo multiplicativo de las unidades módulo  $n$ . En particular,  $|\text{Aut}(G)| = \varphi(n)$ , donde  $\varphi$  es la función de Euler.*

*Demostración.*

Sea  $G = \langle g \rangle$  un grupo cíclico de orden  $n$ . Sea  $f \in \text{Aut}(G)$ . Como  $G$  es cíclico,  $f$  queda completamente determinado por la imagen del generador  $g$ . Sea  $f(g) = g^{c_f}$  para algún entero  $c_f$ . Como  $f$  es un automorfismo,  $f(g)$  debe ser otro generador de  $G$ . Sabemos que  $g^k$  es un generador de  $G$  si y solo si  $\gcd(k, n) = 1$ . Por lo tanto,  $\gcd(c_f, n) = 1$ , lo que implica que la clase  $\overline{c_f}$  pertenece a  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ .

Definimos la función  $\Psi : \text{Aut}(G) \rightarrow (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$  dada por:

$$\Psi(f) = \overline{c_f} \quad \text{donde } f(g) = g^{c_f}$$

**1.  $\Psi$  es un homomorfismo:** Sean  $f_1, f_2 \in \text{Aut}(G)$  con  $f_1(g) = g^{c_{f_1}}$  y  $f_2(g) = g^{c_{f_2}}$ .

$$(f_1 \circ f_2)(g) = f_1(f_2(g)) = f_1(g^{c_{f_2}}) = (f_1(g))^{c_{f_2}} = (g^{c_{f_1}})^{c_{f_2}} = g^{c_{f_1}c_{f_2}}$$

Por lo tanto, el exponente asociado a la composición es el producto de los exponentes:

$$\Psi(f_1 \circ f_2) = \overline{c_{f_1}c_{f_2}} = \overline{c_{f_1}} \cdot \overline{c_{f_2}} = \Psi(f_1)\Psi(f_2)$$

**2.  $\Psi$  es inyectiva:**

$$\Psi(f) = \overline{1} \implies c_f \equiv 1 \pmod{n} \implies f(g) = g^1 = g$$

Como el automorfismo fija al generador, fija a todo el grupo. Luego  $f = \text{Id}_G$ .

**3.  $\Psi$  es sobreyectiva:** Sea  $\overline{k} \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ . Entonces  $\gcd(k, n) = 1$ . Definimos  $f : G \rightarrow G$  por  $f(x) = x^k$ . Como  $\gcd(k, n) = 1$ , la aplicación  $x \mapsto x^k$  es una biyección en el grupo cíclico finito y es un homomorfismo ( $f(xy) = (xy)^k = x^k y^k$  pues  $G$  es abeliano). Así,  $f \in \text{Aut}(G)$  y  $\Psi(f) = \overline{k}$ .

Por lo tanto,  $\text{Aut}(G) \cong (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ . □

**Corolario 6.1.1.** *Si  $p$  es un número primo, entonces:*

$$\text{Aut}(\mathbb{Z}_p) \cong \mathbb{Z}_{p-1}$$

*Demostración.*

Aplicando el teorema anterior con  $G = \mathbb{Z}_p$  (cíclico de orden  $p$ ), tenemos:

$$\text{Aut}(\mathbb{Z}_p) \cong (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$$

El orden de este grupo es  $\varphi(p) = p - 1$ . Sabemos por la teoría de grupos finitos (específicamente por la existencia de raíces primitivas módulo  $p$ ) que el grupo multiplicativo de un cuerpo finito  $\mathbb{Z}_p$  es siempre cíclico. Por lo tanto:

$$(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^* \cong C_{p-1} \cong \mathbb{Z}_{p-1}$$

Así concluimos que  $\text{Aut}(\mathbb{Z}_p)$  es isomorfo al grupo cíclico de orden  $p - 1$ . □

**Teorema 6.1.4.** *Sea  $G$  un grupo cíclico de orden  $n$ . Entonces:*

$$\text{Aut}(G) \cong (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$$

*Donde  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$  es el grupo multiplicativo de las unidades módulo  $n$ . En particular,  $|\text{Aut}(G)| = \varphi(n)$ , donde  $\varphi$  es la función de Euler.*

*Demostración.*

Sea  $G = \langle g \rangle$  un grupo cíclico de orden  $n$ . Sea  $f \in \text{Aut}(G)$ . Como  $G$  es cíclico,  $f$  queda completamente determinado por la imagen del generador  $g$ . Sea  $f(g) = g^{c_f}$  para algún entero  $c_f$ . Como  $f$  es un automorfismo,  $f(g)$  debe ser otro generador de  $G$ . Sabemos que  $g^k$  es un generador de  $G$  si y solo si  $\gcd(k, n) = 1$ . Por lo tanto,  $\gcd(c_f, n) = 1$ , lo que implica que la clase  $\overline{c_f}$  pertenece a  $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ .

Definimos la función  $\Psi : \text{Aut}(G) \rightarrow (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$  dada por:

$$\Psi(f) = \overline{c_f} \quad \text{donde } f(g) = g^{c_f}$$

**1.  $\Psi$  es un homomorfismo:** Sean  $f_1, f_2 \in \text{Aut}(G)$  con  $f_1(g) = g^{c_{f_1}}$  y  $f_2(g) = g^{c_{f_2}}$ .

$$(f_1 \circ f_2)(g) = f_1(f_2(g)) = f_1(g^{c_{f_2}}) = (f_1(g))^{c_{f_2}} = (g^{c_{f_1}})^{c_{f_2}} = g^{c_{f_1}c_{f_2}}$$

Por lo tanto, el exponente asociado a la composición es el producto de los exponentes:

$$\Psi(f_1 \circ f_2) = \overline{c_{f_1}c_{f_2}} = \overline{c_{f_1}} \cdot \overline{c_{f_2}} = \Psi(f_1)\Psi(f_2)$$

**2.  $\Psi$  es inyectiva:**

$$\Psi(f) = \overline{1} \implies c_f \equiv 1 \pmod{n} \implies f(g) = g^1 = g$$

Como el automorfismo fija al generador, fija a todo el grupo. Luego  $f = \text{Id}_G$ .

**3.  $\Psi$  es sobreyectiva:** Sea  $\overline{k} \in (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ . Entonces  $\gcd(k, n) = 1$ . Definimos  $f : G \rightarrow G$  por  $f(x) = x^k$ . Como  $\gcd(k, n) = 1$ , la aplicación  $x \mapsto x^k$  es una biyección en el grupo cíclico finito y es un homomorfismo ( $f(xy) = (xy)^k = x^k y^k$  pues  $G$  es abeliano). Así,  $f \in \text{Aut}(G)$  y  $\Psi(f) = \overline{k}$ .

Por lo tanto,  $\text{Aut}(G) \cong (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ . □

**Corolario 6.1.2.** *Si  $p$  es un número primo, entonces:*

$$\text{Aut}(\mathbb{Z}_p) \cong \mathbb{Z}_{p-1}$$

*Demostración.*

Aplicando el teorema anterior con  $G = \mathbb{Z}_p$  (cíclico de orden  $p$ ), tenemos:

$$\text{Aut}(\mathbb{Z}_p) \cong (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$$

El orden de este grupo es  $\varphi(p) = p - 1$ . Sabemos por la teoría de grupos finitos (específicamente por la existencia de raíces primitivas módulo  $p$ ) que el grupo multiplicativo de un cuerpo finito  $\mathbb{Z}_p$  es siempre cíclico. Por lo tanto:

$$(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^* \cong C_{p-1} \cong \mathbb{Z}_{p-1}$$

Así concluimos que  $\text{Aut}(\mathbb{Z}_p)$  es isomorfo al grupo cíclico de orden  $p - 1$ .  $\square$

**Ejemplo 6.2.** Sea  $G$  un grupo y hagamos actuar  $G$  en sí mismo por conjugación. Entonces esta es una acción como grupo.

Definimos  $\tilde{\varphi} : G \times G \rightarrow G$  por  $\tilde{\varphi}(g, g_1) = gg_1g^{-1}$ . Ya se tiene que es una acción (visto en el capítulo anterior). Veamos que actúa por automorfismos:

$$\begin{aligned} (k_1k_2)^g &= \tilde{\varphi}(g, k_1k_2) = g(k_1k_2)g^{-1} = gk_1(g^{-1}g)k_2g^{-1} \\ &= (gk_1g^{-1})(gk_2g^{-1}) = \tilde{\varphi}(g, k_1)\tilde{\varphi}(g, k_2) = k_1^gk_2^g \end{aligned}$$

Por lo tanto, la conjugación preserva el producto.

**Observación 6.5.** Sean  $H$  y  $K$  grupos. Entonces  $H$  actúa en  $K$  como grupo si y solo si  $\varphi : H \rightarrow \text{Aut}(K)$  es un homomorfismo. (Nota:  $\text{Aut}(K) \leq S_K$ ).

En efecto,  $\Rightarrow$ ) Si  $H$  actúa como grupo en  $K$ , existe  $\tilde{\varphi} : H \times K \rightarrow K$  que cumple las condiciones i), ii) de acción y la condición de compatibilidad iii). Definamos  $\varphi : H \rightarrow \text{Aut}(K)$  por  $\varphi(h) = f_h$ , donde  $f_h : K \rightarrow K$  está dada por  $f_h(k) = \tilde{\varphi}(h, k)$ .

**1.  $\varphi$  está bien definida:** Como  $\tilde{\varphi}$  es acción, la función  $\varphi : H \rightarrow S_K$  dada por  $h \mapsto f_h$  es un homomorfismo de grupos (propiedad general de acciones). Basta ver que la imagen cae en  $\text{Aut}(K)$ , es decir, que  $f_h \in \text{Aut}(K)$  para todo  $h$ . Sabemos que  $f_h$  es biyectiva (por ser acción). Además:

$$\begin{aligned} f_h(k_1k_2) &= \tilde{\varphi}(h, k_1k_2) = (k_1k_2)^h = k_1^hk_2^h \\ &= \tilde{\varphi}(h, k_1)\tilde{\varphi}(h, k_2) = f_h(k_1)f_h(k_2) \end{aligned}$$

Luego,  $f_h$  es homomorfismo y por tanto  $f_h \in \text{Aut}(K)$ . Así  $\varphi$  está bien definida.

$\Leftarrow$ ) Recíprocamente, sea  $\varphi : H \rightarrow \text{Aut}(K)$  un homomorfismo. Definamos  $\tilde{\varphi} : H \times K \rightarrow K$  por  $\tilde{\varphi}(h, k) = (\varphi(h))(k)$ . Notemos que como  $\varphi(h) \in \text{Aut}(K)$ , denotemos  $f_h = \varphi(h)$ , entonces  $\tilde{\varphi}(h, k) = f_h(k)$ .

Verifiquemos que es acción como grupo:

- $k^e = \tilde{\varphi}(e, k) = (\varphi(e))(k) = \text{Id}_K(k) = k$ . (Pues  $\varphi$  es homomorfismo,  $\varphi(e) = \text{Id}$ ).
- $(k^{h_1})^{h_2} = \tilde{\varphi}(h_2, k^{h_1}) = f_{h_2}(f_{h_1}(k)) = (f_{h_2} \circ f_{h_1})(k)$ . Como  $\varphi$  es homomorfismo,  $f_{h_2} \circ f_{h_1} = \varphi(h_2) \circ \varphi(h_1) = \varphi(h_2h_1) = f_{h_2h_1}$ . Luego,  $= f_{h_2h_1}(k) = k^{h_2h_1}$ .



$$\blacksquare (k_1 k_2)^h = f_h(k_1 k_2) = f_h(k_1) f_h(k_2) \text{ (pues } f_h \in \text{Aut}(K)). = k_1^h k_2^h.$$

□

**Ejemplo 6.3.** Sea  $G$  un grupo y  $K \trianglelefteq G$ . Entonces  $G$  **no** actúa necesariamente en  $K$  como grupo por multiplicación a la izquierda. Es decir, sea  $\tilde{\varphi}(g, k) = gk$ .

Aunque  $\tilde{\varphi}(e, k) = ek = k$  y  $\tilde{\varphi}(g_1 g_2, k) = (g_1 g_2)k = g_1(g_2 k)$ , la propiedad de automorfismo falla:

$$(k_1 k_2)^g = g(k_1 k_2)$$

mientras que:

$$k_1^g k_2^g = (gk_1)(gk_2) = gk_1 gk_2$$

En general  $gk_1 k_2 \neq gk_1 gk_2$  (esto implicaría  $e = g$ , lo cual no es cierto para todo  $g$ ). Además,  $gk$  no necesariamente está en  $K$  si  $K$  no es el grupo total (aunque si tomamos  $K = G$ , falla la condición de homomorfismo a menos que  $G$  sea trivial).