

1. Analizar en cada caso si  $(G, \oplus)$  es un grupo, un monoide, un semigrupo o ninguno de ellos:
  - a)  $G = \mathbb{Z}$ ,  $a \oplus b = a - b$ .
  - b)  $G = \mathbb{N}_0$ ,  $a \oplus b = a \cdot b$ .
  - c)  $G$  es el conjunto de polinomios de grado menor o igual que  $n$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , con la suma usual.
  - d)  $G$  es el conjunto de polinomios de grado menor o igual que  $n$  y el polinomio nulo,  $n \in \mathbb{N}$ , con la suma usual.
  - e)  $G$  es el conjunto de polinomios de grado igual a  $n$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , con la suma usual.
  - f)  $G = \mathbb{R}^{n \times n}$  con la suma usual.
  - g)  $G = \mathbb{R}^{n \times n}$  con el producto usual.
  - h)  $G = \mathbb{R}^{n \times n}$  con el producto definido por  $(A \circ B)_{ij} = a_{ij} \cdot b_{ij}$ .
  - i)  $G = \mathbb{Z}^+$  con el producto definido por  $n \oplus k = \gcd(n, k)$ .
  - j)  $G = \mathbb{Z}^+$  con el producto definido por  $n \oplus k = \text{lcm}(n, k)$ .
  - k)  $G = \{f \in [0, 1] \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ es función continua}\}$  con el producto definido por  $f \oplus g = f + g$ .

### Soluciones

- a) No es ninguno de ellos pues  $\oplus$  no es asociativa.
- b) No es un grupo pues no existen inversos. Es un monoide (y semigrupo) donde el elemento neutro es 1.
- c) No es grupo ni monoide pues no existe elemento neutro (el polinomio nulo no tiene grado). Es un semigrupo pues la suma de polinomios es asociativa.
- d) Es un grupo (y también monoide y semigrupo) donde el elemento neutro es el polinomio nulo y el elemento inverso de  $P(x)$  es  $-P(x)$ .
- e) No es grupo ni monoide pues no existe elemento neutro (el polinomio nulo no tiene grado). Es un semigrupo pues la suma de polinomios es asociativa.

- f) Es un grupo (y también monoide y semigrupo) donde el elemento neutro es la matriz nula y el inverso de  $M$  es  $-M$ .
  - g) No es un grupo pues en general no todas las matrices son invertibles. Es un monoide (y semigrupo) donde el elemento neutro es la matriz identidad.
  - h) Es un grupo (y también monoide y semigrupo) donde el elemento neutro es la identidad y el inverso de una matriz con entradas  $a_{ij}$  es una matriz con entradas  $\frac{1}{a_{ij}}$ .
  - i) No es grupo ni monoide pues no existe elemento neutro. Supongamos que exista, luego  $\forall x : \gcd(e, x) = x$ ; es decir que  $e$  es múltiplo de cualquier número. Absurdo. Es un semigrupo pues es una operación asociativa.
  - j) No es grupo ni monoide pues no existe elemento neutro. Supongamos que exista, luego  $\forall x : \text{lcm}(e, x) = x$ ; es decir que todos los números son múltiplos de  $e$ . Absurdo. Es un semigrupo pues es una operación asociativa.
  - k) Es un grupo (y también monoide y semigrupo) donde el elemento neutro es la función nula y el inverso de  $f$  es  $-f$ .
2. Sea  $X$  un conjunto cualquiera. Probar que  $(X \rightarrow X, \circ, id_X)$  es un monoide, donde  $X \rightarrow X$  representa el conjunto de funciones de  $X$  en  $X$ .

### Solución

- Clausura: Sean  $f, g \in G$ , luego  $x \in \text{dom}(f \circ g) \Rightarrow x \in X$ . Además  $f(g(x)) \in X$  luego  $\text{cod}(f \circ g) = X$ , es decir  $f \circ g \in X \rightarrow X$ .
- Asociatividad:

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

- Elemento neutro:

$$f \circ id(x) = f(id(x)) = f(x)$$

$$id \circ f(x) = id(f(x)) = f(x)$$

3. Sea  $X$  un conjunto cualquiera. Probar que  $(X \Rightarrow X, \circ, id_X)$  es un grupo, donde  $X \Rightarrow X$  representa el conjunto de funciones biyectivas de  $X$  en  $X$ . A esta clase de grupo le llamaremos grupo de biyecciones.

### Solución

- Clausura: Trivial pues la composición de biyecciones también es biyectiva.
  - Asociatividad: Análogo al grupo  $X \rightarrow X$ .
  - Elemento neutro: Análogo al grupo  $X \rightarrow X$ .
  - Elemento inverso: Para  $f \in X \Rightarrow X$  resulta  $f \circ f^{-1} = id$ .
4. Probar que si  $G$  es un grupo y  $a, b \in G$  entonces  $(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$ .

**Solución** Como  $(b^{-1}a^{-1})(ab) = b(aa^{-1})b^{-1} = bb^{-1} = 1$  entonces  $ab$  es inverso a derecha de  $(b^{-1}a^{-1})$  luego:

$$(b^{-1}a^{-1}) = (b^{-1}a^{-1})e = (b^{-1}a^{-1})\underbrace{(ab)(ab)^{-1}}_e = e(ab)^{-1} = (ab)^{-1}$$

Análogamente para la izquierda.

5. Probar que si  $G$  es un grupo,  $a, b \in \mathbb{Z}$  y  $g \in G$  entonces  $g^{(a+b)} = g^a g^b$ .

**Solución** Lo demostraremos por inducción en  $a \in \mathbb{N}_0$ .

- Caso base  $a = 0$ :  $g^{a+b} = g^{0+b} = g^b = eg^b = g^0 g^b = g^a g^b$ .
- Caso inductivo: Supongamos que  $g^{a+b} = g^a g^b$

$$g^{(a+1)+b} = g^{(a+b)+1} = g^{a+b}g = g^a g^b g = g^a g^{b+1} = g^a (gg^b) = (g^a g)g^b = g^{a+1}g^b$$

Resta ver que sucede si  $a < 0$ . Sea  $a = -k$  con  $k \in \mathbb{N}$ , luego

$$g^a g^b = g^{a+b} \iff (g^a g^b)^{-1} = (g^{-k+b})^{-1} \iff (g^a g^b)^{-1} = (g^{-k} g^b)^{-1} = (g^a g^b)^{-1}$$

lo cual vale.

6. Probar que si  $G$  es un grupo abeliano entonces  $\forall a, b \in G$  y  $\forall n \in \mathbb{Z}$  es  $(a \cdot b)^n = a^n \cdot b^n$ .

**Solución**

- Caso base  $n = 0$ :  $(a \cdot b)^n = e = e \cdot e = a^n \cdot b^n$ .
- Caso inductivo: Supongamos que  $(a \cdot b)^n = a^n \cdot b^n$ .
  - $(a \cdot b)^{n+1} = (a \cdot b)^n \cdot (a \cdot b) = a^n \cdot b^n \cdot a \cdot b = a^n \cdot a \cdot b^n \cdot b = a^{n+1} b^{n+1}$ .
  - $(a \cdot b)^{n-1} = (a \cdot b)^n \cdot (a \cdot b)^{-1} = a^n \cdot b^n \cdot b^{-1} \cdot a^{-1} = a^n \cdot a^{-1} \cdot b^n \cdot b^{-1} = a^{n-1} b^{n-1}$ .

7. Probar que si  $G$  es un grupo y  $g \in G$ , entonces  $(g^a)^b = g^{ab}$  para todos los enteros  $a, b$ .

**Solución** COMPLETAR.

8. DIFFIE-HELLMAN. Alice y Bob desean ponerse de acuerdo en un número secreto. Sin embargo, saben que sus comunicaciones son monitoreadas por Eve, lo cual parece imposibilitar esta tarea.

Utilizando el resultado del ejercicio anterior, y sabiendo que existe un grupo cíclico finito  $G$  y su generador  $g$  para los cuales resulta computacionalmente costoso resolver el problema de Diffie-Hellman (dados  $g^a$  y  $g^b$ , encontrar  $g^{ab}$ ); proponer un protocolo que les permita a Alice y Bob establecer una clave en común y secreta.

**Solución** COMPLETAR.

9. Si  $G$  es un grupo tal que  $(a \cdot b)^2 = a^2 \cdot b^2$  para todo par  $a, b \in G$ , probar que  $G$  es abeliano.

**Solución**

$$\begin{aligned} (ab)^2 = a^2 b^2 &\iff (ab)^2 (ab)^{-1} = a^2 b^2 (ab)^{-1} \iff \\ \iff ab = a^2 b^2 b^{-1} a^{-1} = a^2 b a^{-1} &\iff b = a b a^{-1} \iff ba = ab \end{aligned}$$

10. Sea  $(M, \oplus, e)$  un monoide finito. Probar que si vale la ley de cancelación a derecha  $(a \oplus c = b \oplus c \Rightarrow a = b)$ , entonces  $(M, \oplus, e)$  es en realidad un grupo.

**Solución** Para  $m \in M$  definimos  $f_m : G \rightarrow G$  como  $f_m(x) = x \oplus m$ . Veamos que  $f$  es biyectiva:

- Inyectividad: Sean  $f(x_1) = f(x_2)$ , luego por definición de  $f$  resulta  $x_1 \oplus m = x_2 \oplus m$  y por ley cancelativa  $x_1 = x_2$ .
- Sobreyectividad: Resulta ser consecuencia de que  $f$  es inyectiva y  $G$  es finito.

Ahora consideremos  $m' \in G$  tal que  $f_m(m') = e$ , entonces  $m' \oplus m = e$  por lo que  $m'$  es inverso a izquierda de  $m$ .

Ademas  $m \oplus \underbrace{m' \oplus m}_e = e \oplus m \iff m \oplus m' = e$ , por lo que  $m'$  también es inverso a derecha de  $m$ .

11. Sea  $n \in \mathbb{Z}$ . Definamos la relación  $a \sim b$  si y solo si el resto de dividir  $a$  por  $n$  coincide con el resto de dividir  $b$  por  $n$ .

- a) Probar que  $\sim$  es una relación de equivalencia en  $\mathbb{Z}$ .
- b) Consideremos ahora el conjunto de las clases de equivalencia definidas por  $\sim$  en  $\mathbb{Z}$ , que notaremos  $\mathbb{Z}_n$ , es decir

$$\mathbb{Z}_n = \{\bar{x} / x \in \mathbb{Z}\}$$

donde

$$\bar{x} = \{y \in \mathbb{Z} / x \sim y\}$$

y definamos en  $\mathbb{Z}_n$  la operación

$$\bar{x} + \bar{y} = \overline{x + y}$$

- 1) Verificar que esta operación esta bien definida. *Sugerencia:* probar que  $a \sim b \iff \exists k \in \mathbb{Z} / a - b = nk$ .
- 2) Probar que  $\mathbb{Z}_n$  es un grupo con dicha operación.

## Soluciones

a)

- Reflexividad: Trivial.
- Transitividad: Sean  $x, y, z \in \mathbb{Z}$  tales que  $x \sim y$  y  $y \sim z$ , luego tenemos  $x = an + r$ ,  $y = bn + r$  y  $z = cn + r$  (con  $r < n$ ) por lo que  $x \sim z$ .
- Simetría: Sean  $x, y \in \mathbb{Z}$  tales que  $x \sim y$ , luego tenemos  $x = an + r$  e  $y = bn + r$  por lo que  $y \sim x$ .

b)

1) COMPLETAR.

2)

- Asociatividad:

$$\overline{x} + (\overline{y} + \overline{z}) = \overline{x} + \overline{y + z} = \overline{x + (y + z)} = \overline{(x + y) + z} = (\overline{x + y}) + \overline{z} = (\overline{x} + \overline{y}) + \overline{z}$$

- Elemento neutro:  $\overline{0} + \overline{x} = \overline{0 + x} = \overline{x}$  y  $\overline{x} + \overline{0} = \overline{x + 0} = \overline{x}$ .
- Elemento inverso:  $\overline{x} + \overline{(-x)} = \overline{x + (-x)} = \overline{0}$  y  $\overline{(-x)} + \overline{x} = \overline{(-x) + x} = \overline{0}$ .

12. Sean  $(G, \oplus)$  un grupo y  $H \subseteq G$  con  $H \neq \emptyset$ . Probar que  $H$  es un subgrupo de  $G$  si y solo si:

- $a \oplus b \in H$ , para todo par  $a, b \in H$ .
- $a^{-1} \in H$ , para todo  $a \in H$ .

## Soluciones

- $\Rightarrow$ :

- Sean  $a, b \in H$ , luego por ser subgrupo  $a \oplus b^{-1} \in H$  y nuevamente por la misma razón  $a \oplus b \oplus a^{-1} \in H$ . Como  $a \oplus b = (a \oplus b \oplus a^{-1}) \oplus a^{-1}$  y  $H$  es grupo, entonces  $a \oplus b \in H$ .
- Observemos que  $e \in H$  pues para  $x = y$  resulta  $x \oplus y^{-1} \in H$  por ser grupo. Sea  $a \in H$ , luego  $a^{-1} = e \oplus a^{-1}$  y como  $H$  es grupo,  $a^{-1} \in H$ .

- $\Leftarrow$ : Sean  $a, b \in H$  luego  $b^{-1} \in H$ , luego también  $a \oplus b^{-1} \in H$ .

13. Probar que si  $H$  y  $K$  son subgrupos de un grupo  $G$  entonces  $H \cap K$  es subgrupo de  $G$ .

**Solución** Debemos ver que  $H \cap K$  no es vacío y además es cerrado por inversos y productos.

- Por ser grupos  $e \in H$  y  $e \in K$ , luego  $e \in H \cap K$ .
- Sea  $a \in H \cap K$ , luego  $a \in H$  y  $a \in K$  y por ser grupos  $a^{-1} \in H$  y  $a^{-1} \in K$  por lo que  $a^{-1} \in H \cap K$ .
- Análogamente para  $a \oplus b$ .

14. Sean  $a, b \in \mathbb{R}$ , definimos

$$\begin{aligned} \tau_{a,b} &: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \\ x &\mapsto \tau_{a,b}(x) = ax + b \end{aligned}$$

Sea  $G = \{\tau_{a,b}/a \in \mathbb{R} - \{0\}, b \in \mathbb{R}\}$

- a) Probar que  $G$  es un grupo bajo la composición.
- b) Probar que  $H = \{\tau_{a,b} \in G/a \in \mathbb{Q}\}$  es un subgrupo de  $G$ .
- c) Sea  $N = \{\tau_{1,b} \in G\}$ . Probar que  $N$  es un subgrupo de  $G$  y que  $g \in G, n \in N \Rightarrow gng^{-1} \in N$ .

## Soluciones

a)

- Clausura: Observemos que

$$\begin{aligned} \tau_{a,b} \circ \tau_{c,d}(x) &= \tau_{a,b}(\tau_{c,d}(x)) = \tau_{a,b}(cx + d) = a(cx + d) + b = \\ &= acx + ad + b = \tau_{ac, ad+b}(x) \end{aligned}$$

y como  $a \neq 0$  y  $c \neq 0$  entonces  $ac \neq 0$  y por las clausuras de operaciones entre reales  $ac \in \mathbb{R}$  y  $ad + b \in \mathbb{R}$ , por lo que  $\tau_{ac, ad+b} \in G$ .

- Asociatividad: Trivial por ser composición de funciones.

- Elemento neutro: Para  $\tau_{1,0}$  resulta

$$\tau_{1,0} \circ \tau_{a,b}(x) = \tau_{1,0}(ax + b) = ax + b = \tau_{a,b}(x)$$

Análogamente a derecha.

- Elemento inverso: Sea  $\tau_{a,b} \in G$ , luego para  $\tau_{\frac{1}{a}, -\frac{b}{a}}$  resulta

$$\tau_{a,b} \circ \tau_{\frac{1}{a}, -\frac{b}{a}}(x) = \tau_{a,b}\left(\frac{1}{a}x - \frac{b}{a}\right) = a\left(\frac{1}{a}x - \frac{b}{a}\right) + b = x - b + b = x = \tau_{1,0}(x)$$

Análogamente a izquierda.

b)

- $\tau_{1,0} \in H$ .
- $\tau_{a,b} \circ \tau_{c,d}(x) = \tau_{ac, ad+b}(x)$  y por las clausuras de operaciones entre racionales  $\tau_{ac, ad+b}(x) \in H$ .
- Sea  $\tau_{a,b} \in H$  luego  $\tau_{\frac{1}{a}, -\frac{b}{a}} \in H$  por clausura de operaciones entre racionales.

c)

- Veamos que  $N$  es subgrupo de  $G$ :
  - $\tau_{1,0} \in N$ .
  - $\tau_{1,a} \circ \tau_{1,b}(x) = x + b + a = \tau_{1, a+b}(x) \in N$ .
  - Sea  $\tau_{1,b} \in H$  luego  $\tau_{\frac{1}{1}, -\frac{b}{1}} \in N$ .
- Veamos que es normal:

$$\begin{aligned} \tau_{a,b} \circ \tau_{1,c} \circ \tau_{\frac{1}{a}, -\frac{b}{a}}(x) &= \tau_{a,b} \circ \tau_{1,c}\left(\frac{1}{a}x - \frac{b}{a}\right) = \tau_{a,b}\left(\frac{1}{a}x - \frac{b}{a} + c\right) = \\ &= x - b + ca + b = x + ca = \tau_{1, ca}(x) \in N \end{aligned}$$

15. Sea  $(G, \oplus)$  un grupo y  $\varphi : G \rightarrow G/\varphi(a) = a^{-1}$ .

- Probar que  $\varphi$  es biyectiva.
- ¿Que relación hay entre  $\varphi$  y  $\varphi^{-1}$ ?



## Soluciones

a)

- Inyectividad: Supongamos existen  $x, y \in G$  tales  $x \neq y$  y  $\varphi(x) = \varphi(y)$ , luego  $x^{-1} = y^{-1}$  pero entonces  $(x^{-1})^{-1} = x$  y también  $(x^{-1})^{-1} = (y^{-1})^{-1} = y$ . Esto no es posible pues el inverso de un elemento es único. Contradicción.
- Sobreyectividad: Sea  $x$  en el codominio, para  $x^{-1}$  resulta  $\varphi(x^{-1}) = (x^{-1})^{-1} = x$ .

b)  $\varphi = \varphi^{-1}$ .

16. Probar que para todo monoide  $(M, \otimes, e)$  existe un homomorfismo inyectivo  $\text{emb}: (M, \otimes, e) \rightarrow (M \rightarrow M, \circ, \text{id}_M)$ .

**Solución** Para  $m \in M$  definimos  $f_m: M \rightarrow M$  como  $f_m(x) = m \otimes x$ . Ahora definimos  $\text{emb}(m) = f_m$ . Veamos que es homomorfismo:

- $\text{emb}(m \otimes m') = f_{m \otimes m'}. f_{m \otimes m'}(x) = (m \otimes m') \otimes x$ .
- $\text{emb}(m) \circ \text{emb}(m') = f_m \circ f_{m'}. f_m \circ f_{m'}(x) = m \otimes (m' \otimes x) = f_{m \otimes m'}(x)$ .

17. CAYLEY. Probar que todo grupo  $(G, \otimes, e)$  es isomorfo a un subgrupo de un grupo de biyecciones.

**Solución** COMPLETAR.

18. Sea  $G$  un grupo cíclico. Probar que  $G$  es isomorfo a  $\mathbb{Z}$  o a  $\mathbb{Z}_n$  para algún  $n$ .

## Solución

- Si  $G$  es infinito definimos  $f(g^x) = x$ , luego:

$$f(g^x g^y) = f(g^{x+y}) = x + y = f(g^x) + f(g^y)$$

- Inyectividad:  $f(g^x) = f(g^y) \iff x = y$ .
- Sobreyectividad: Sea  $y \in \mathbb{Z}$ , luego  $f(g^y) = y$ .

- Si  $|G| = n$  definimos  $f(g^x) = \bar{x}$ , luego:

$$f(g^x g^y) = f(g^{x+y}) = \overline{x+y} = \bar{x} + \bar{y} = f(g^x) f(g^y)$$

- Biyectividad: Análogo.

19. Verificar en cada uno de los siguientes casos si  $\phi : G \rightarrow H$  es un homomorfismo de grupo:

- $G = H = \mathbb{R} - \{0\}$  bajo la multiplicación usual,  $\phi(x) = x^2$ .
- $G = H = \mathbb{R} - \{0\}$  bajo la multiplicación usual,  $\phi(x) = 2^x$ .
- $G = H = (\mathbb{R}, +)$ ,  $\phi(x) = x + 1$ .
- $G = H = (\mathbb{R}, +)$ ,  $\phi(x) = 13x$ .

### Soluciones

- Verdadero pues:  $\phi(xy) = (xy)^2 = x^2 y^2 = \phi(x) \phi(y)$ .
- Falso pues  $\phi(1 \cdot 2) = 4 \neq 8 = 2 \cdot 4 = \phi(1) \cdot \phi(2)$ .
- Falso pues  $\phi(0 + 1) = 2 \neq 3 = 1 + 2 = \phi(0) + \phi(1)$ .
- Verdadero pues:  $\phi(x + y) = 13(x + y) = 13x + 13y = \phi(x) + \phi(y)$ .

20. Sean  $(G, \oplus)$  y  $(H, \ominus)$  grupos y  $h : (G, \oplus) \rightarrow (H, \ominus)$  un homomorfismo. Probar que:

- $h(e_G) = e_H$ , donde  $e_G$  es el neutro de  $G$  y  $e_H$  el neutro de  $H$ .
- Si  $a \in G$  es  $h(a^{-1}) = h(a)^{-1}$ .
- Si  $h$  es sobreyectiva y  $G$  es abeliano, entonces  $H$  es abeliano.

### Soluciones

- Supongamos lo contrario, luego  $h(xe_G) = h(x)h(e_G) \neq h(x)$  pero  $h(xe_G) = h(x)$ . Contradicción.
- Supongamos lo contrario, luego  $h(aa^{-1}) = h(a)h(a^{-1}) \neq h(a)h(a)^{-1} = e_H$  pero  $h(aa^{-1}) = h(e_G) = e_H$ . Contradicción.

- c) Sean  $a, b \in H$  luego como  $h$  es sobreyectiva existen  $x, y \in G$  tales que  $h(x) = a$  y  $h(y) = b$ . Ahora:

$$ab = h(x)h(y) = h(xy) = h(yx) = h(y)h(x) = ba$$

21. Sean  $f : G \rightarrow G'$  un homomorfismo de grupos,  $G'$  abeliano. Probar que si  $H$  es un subgrupo de  $G$  que contiene a  $\ker(f)$  entonces  $H \triangleleft G$ .

**Solución** COMPLETAR.

22. Sean  $(G, \cdot)$  y  $(H, \cdot')$  grupos, entonces definiendo  $(g_1, h_1) \oplus (g_2, h_2) = (g_1 \cdot g_2, h_1 \cdot' h_2)$  resulta  $(G \times H, \oplus)$  un grupo.

**Solución**

- Asociatividad:

$$\begin{aligned} (g_1, h_1) \oplus [(g_2, h_2) \oplus (g_3, h_3)] &= (g_1, h_1) \oplus (g_2 \cdot g_3, h_2 \cdot' h_3) = \\ &= (g_1 \cdot (g_2 \cdot g_3), h_1 \cdot' (h_2 \cdot' h_3)) = ((g_1 \cdot g_2) \cdot g_3, (h_1 \cdot' h_2) \cdot' h_3) = \\ &= (g_1 \cdot g_2, h_1 \cdot' h_2) \oplus (g_3, h_3) = [(g_1, h_1) \oplus (g_2, h_2)] \oplus (g_3, h_3) \end{aligned}$$

- Elemento neutro: COMPLETAR.
- Elemento inverso: COMPLETAR.

23. Sea  $G$  un grupo y  $M, N$  subgrupos normales de  $G$  tales que  $G = M \cdot N$ . Probar  $G/(M \cap N) \cong G/M \times G/N$ .

**Solución** COMPLETAR.

24. Sea  $G$  un grupo. Si definimos  $L$  como el conjunto de los subgrupos normales de  $G$ , entonces  $(L, \cdot, \cap)$  es un retículo modular.

**Solución** COMPLETAR.

25. Hacer un diagrama de Hasse de los subgrupos normales del grupo de Klein ( $V = \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ ). ¿El retículo  $L$  del apartado anterior es distributivo?

**Solución** COMPLETAR.

26. Sean  $G, H$  grupos. Si  $A \triangleleft G$  y  $B \triangleleft H$ , entonces  $(G \times H) / (A \times B) \cong (G/A) \times (H/B)$ .

**Solución** COMPLETAR.

27. Probar que existen sólo dos grupos distintos de orden 4 (salvo isomorfismo). Ayuda: utilizar el teorema de Lagrange para probar que un grupo de orden 4 que no es cíclico debe consistir de la identidad y tres elementos de orden 2.

**Solución** Probaremos que los únicos grupos de orden 4 que existen son  $\mathbb{Z}_4$  (cíclico) y el grupo de Klein (abeliano). Sea  $G$  tal que  $|G| = 4$ , luego:

- Si  $G$  es cíclico ya hemos visto que es isomorfo a  $\mathbb{Z}_4$ .
- De lo contrario como  $G$  es finito, por corolario del teorema de Lagrange cada elemento de  $G$  tiene orden 1, 2 o 4 (divisores de 4) pero sabemos que no pueden tener orden 4 pues en dicho caso sería cíclico.

Como  $|G| = 4$  entonces  $G = \{1, a, b, ab\}$  con  $|\langle a \rangle| = |\langle b \rangle| = |\langle ab \rangle| = 2$  y puesto que  $a, 1, a^{-1} \in \langle a \rangle$  entonces  $a = a^{-1}$ . Análogamente  $b = b^{-1}$  y por descarte  $ab = (ab)^{-1}$ .

Finalmente  $ab = (ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1} = ba$ , por lo que  $G$  es el grupo de Klein.

28. Probar que todo subgrupo de  $\mathbb{Z}$  es de la forma  $n\mathbb{Z} = \{nk | k \in \mathbb{Z}\}$  para algún  $n \in \mathbb{N}$ . Mostrar que  $\mathbb{Z}_n \cong \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ .

**Solución** COMPLETAR.

29. Probar que si  $N$  es un subgrupo de índice 2 en un grupo  $G$ , entonces  $N$  es normal en  $G$ .

**Solución** COMPLETAR.

30. En la práctica de relaciones se definió al kernel de una función  $f : A \rightarrow B$  como la relación:

$$\ker(f) = \{(a, a') \mid a, a' \in A, f(a) = f(a')\}$$

Explicar la relación entre el kernel de un homomorfismo definido para grupos, y el kernel de la función que plantea el homomorfismo.

**Solución**

$$\begin{aligned} (a, a') \in \overline{\ker}(\phi) &\iff \phi(a) = \phi(a') \iff \phi(a) \phi(a')^{-1} = e \iff \\ &\iff \phi(aa'^{-1}) = e \iff aa'^{-1} \in \ker(\phi) \iff a \equiv_i a' \quad \text{mód } \ker(\phi) \end{aligned}$$