

Trabajo Práctico N° 5.1: Estructuras Algebraicas - Teoría de Grupos.

Ejercicio 1.

Determinar cuáles de las siguientes operaciones están bien definidas sobre el conjunto A dado. Analizar las propiedades en los casos afirmativos:

(a) $A = \mathbb{N}$, $a * b = 3ab$.

Esta operación está bien definida sobre el conjunto A dado, ya que, para cada $a, b \in A$, $3ab \in A$.

Commutatividad: La operación * en A es commutativa porque se cumple que, para cada $a, b \in A$, $a * b = b * a$. En particular, $3ab = 3ba$.

Asociatividad: La operación * en A es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in A$, $(a * b) * c = a * (b * c)$. En particular, $3(3ab)c = 3a(3bc) \Leftrightarrow 9abc = 9abc$.

Elemento neutro: No existe un elemento $e \in A$ tal que, para todo $a \in A$, se cumple que $a * e = e * a = a$. En particular, $3ae = 3ea = a \Leftrightarrow 3e = \frac{a}{a} \Leftrightarrow 3e = 1 \Leftrightarrow e = \frac{1}{3} \notin A$.

Inversos: Un elemento $a \in A$ tiene inverso si existe $a' \in A$ tal que $a * a' = a' * a = e$. En particular, no existe elemento neutro, por lo que no existen inversos.

(b) $A = \mathbb{Z}$, $a * b = \frac{a+b}{3+ab}$.

Esta operación no está bien definida sobre el conjunto A dado, ya que no se cumple que, para cada $a, b \in A$, $\frac{a+b}{3+ab} \in A$.

(c) $A = \mathbb{R}$, $x * y = x + y - xy$.

Esta operación está bien definida sobre el conjunto A dado, ya que, para cada $x, y \in A$, $x + y - xy \in A$.

Commutatividad: La operación * en A es commutativa porque se cumple que, para cada $x, y \in A$, $x * y = y * x$. En particular, $x + y - xy = y + x - yx$.

Asociatividad: La operación * en A es asociativa porque se cumple que, para cada $x, y, z \in A$, $(x * y) * z = x * (y * z)$. En particular, $(x + y - xy) + z - (x + y - xy)z = x + (y + z - yz) - x(y + z - yz) \Leftrightarrow x + y - xy + z - xz - yz + xyz = x + y + z - yz - xy - xz + xyz$.

Elemento neutro: Existe un elemento $e \in A$ tal que, para todo $x \in A$, se cumple que $x * e = e * x = x$. En particular, $x + e - xe = e + x - ex = x \Leftrightarrow e - xe = x - x \Leftrightarrow e(1 - x) = 0 \Leftrightarrow e = \frac{0}{1-x} \Leftrightarrow e = 0 \in A$.

Inversos: Un elemento $x \in A$ tiene inverso si existe $x' \in A$ tal que $x * x' = x' * x = e$. En particular, $x + x' - xx' = x' + x - x'x = 0 \Leftrightarrow x' - xx' = -x \Leftrightarrow x'(1 - x) = -x \Leftrightarrow x' = \frac{-x}{1-x}$, por lo que existe inverso para todo $x \in A \setminus \{1\}$, ya que $x' = \frac{-x}{1-x} \in A$.

(d) $A = \{0, 1, 2, 3\}$,

*	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	0	1	2	3
2	1	2	0	2
3	2	3	1	1

Esta operación está bien definida sobre el conjunto A dado, ya que, para cada $a, b \in A$, $a * b \in A$.

Commutatividad: La operación $*$ en A no es commutativa porque no se cumple que, para cada $a, b \in A$, $a * b = b * a$. En particular, $0 * 2 \neq 2 * 0 \Leftrightarrow 0 \neq 1$.

Asociatividad: La operación $*$ en A no es asociativa porque no se cumple que, para cada $a, b, c \in A$, $(a * b) * c = a * (b * c)$. En particular, para $a = 2, b = 3, c = 2$, $(2 * 3) * 2 \neq 2 * (3 * 2) \Leftrightarrow 2 * 2 \neq 2 * 1 \Leftrightarrow 0 \neq 2$.

Elemento neutro: Existe un elemento $e \in A$ tal que, para todo $a \in A$, se cumple que $a * e = e * a = a$. En particular, 1 es el elemento neutro $\in A$, ya que $0 * 1 = 1 * 0 = 0, 1 * 1 = 1 * 1 = 1, 2 * 1 = 1 * 2 = 2, 3 * 1 = 1 * 3 = 3$.

Inversos: Un elemento $a \in A$ tiene inverso si existe $a' \in A$ tal que $a * a' = a' * a = e$. En particular, esto sólo se cumple para 1 (cuyo inverso es $1 \in A$) y 3 (cuyo inverso es $3 \in A$), ya que $1 * 1 = 1 * 1 = 1$ y $3 * 3 = 3 * 3 = 1$, por lo que no existe inverso para todo $a \in A$.

Ejercicio 2.

Demostrar que:

(a) Dado $M = \{m \in \mathbb{N} : m > 0\}$, $(M, +)$ es un semigrupo pero no es un monoide.

Cerradura: Para cada $a, b \in M$, $a + b \in M$.

Asociatividad La operación $+$ en M es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in M$, $(a + b) + c = a + (b + c)$ (por asociatividad en \mathbb{N}).

Elemento neutro: No existe un elemento $e \in M$ tal que, para todo $m \in M$, se cumple que $m + e = e + m = m$. En particular, 0 es el elemento neutro $\in \mathbb{N}$ pero $\notin M$.

Por lo tanto, queda demostrado que $(M, +)$ es un semigrupo pero no es un monoide.

(b) El conjunto de un solo elemento $M = \{e\}$ con la operación definida por $e * e = e$ es un monoide.

Cerradura: Para cada $a, b \in M$, $a * b \in M$. En particular, considerando que e es el único elemento posible, $e * e = e \in M$.

Asociatividad: La operación $*$ en M es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in M$, $(a * b) * c = a * (b * c)$. En particular, considerando que e es el único elemento posible, $(e * e) * e = e * (e * e) \Leftrightarrow e * e = e * e \Leftrightarrow e = e$.

Elemento neutro: Existe un elemento $e \in M$ tal que, para todo $a \in M$, se cumple que $a * e = e * a = a$. En particular, considerando que e es el único elemento posible, e es el elemento neutro $\in M$, ya que $e * e = e * e = e$.

Por lo tanto, queda demostrado que $(M, *)$ es un monoide.

(c) Dado un conjunto no vacío A , el conjunto de las partes de A , $P(A)$, con la operación intersección de conjuntos es un monoide conmutativo.

Cerradura: Para cada $X, Y \in P(A)$, $X \cap Y \in P(A)$.

Asociatividad: La operación \cap en $P(A)$ es asociativa porque se cumple que, para cada $X, Y, Z \in P(A)$, $(X \cap Y) \cap Z = X \cap (Y \cap Z)$ (por asociatividad de \cap en conjuntos).

Elemento neutro: Existe un elemento $E \in P(A)$ tal que, para todo $X \in P(A)$, se cumple que $X \cap E = E \cap X = X$. En particular, A es el elemento neutro $\in P(A)$, ya que $X \cap A = A \cap X = X$.

Commutatividad: La operación \cap en $P(A)$ es commutativa porque se cumple que, para cada $X, Y \in P(A)$, $X \cap Y = Y \cap X$ (por commutatividad de \cap en conjuntos).

Por lo tanto, queda demostrado que $(M, *)$ es un monoide commutativo.

Ejercicio 3.

Demostrar que, si, para una operación asociativa $*$ en A , existe un elemento neutro e y un elemento del conjunto, a , tiene inverso, entonces, éste es único.

Se supone que b y c son dos inversos de a en A , lo que significa que:

$$\begin{aligned} a*b &= b*a = e. \\ a*c &= c*a = e. \end{aligned}$$

Se quiere probar que $b = c$.

Se considera el siguiente producto:

$$b = b*e.$$

Sustituyendo e por $a*c$, se tiene:

$$b = b*(a*c).$$

Usando la propiedad asociativa, se tiene:

$$b = (b*a)*c.$$

Usando que b es un inverso de a , se tiene:

$$b = e*c.$$

Usando la propiedad del neutro, se tiene:

$$b = c.$$

Por lo tanto, queda demostrado que, cuando la operación es asociativa y existe un elemento neutro, el inverso de a es único.

Ejercicio 4.

Sea R una relación de congruencia sobre un semigrupo $(S, *)$, demostrar que $(S/R, \otimes)$ (el conjunto cociente y la operación inducida por $*$ sobre las clases de equivalencia) es un semigrupo llamado Semigrupo Cociente.

Dado que R es una relación de congruencia sobre un semigrupo $(S, *)$, se tiene que:

- R es una relación de equivalencia, es decir, es reflexiva, simétrica y transitiva; y
- Si aRb y cRd , entonces, $(a*c)R(b*d)$.

Se define el conjunto cociente S/R como el conjunto de clases de equivalencia de S bajo la relación R como:

$S/R = \{[a] : a \in S\}$, donde $[a] = \{x \in S : xRa\}$ es la clase de equivalencia de a bajo R .

Para cada $[a], [b] \in S/R$, se define la operación \otimes en S/R como:

$$[a] \otimes [b] = [a*b].$$

Esto es posible porque R es una relación de congruencia y, por lo tanto, la clase de equivalencia de $a*b$ depende sólo de las clases de equivalencia de a y b , independientemente de los representantes que se elijan en cada clase.

Cerradura: Para que la operación \otimes sea cerrada en S/R , se necesita que el resultado de $[a] \otimes [b]$ sólo dependa de las clases de equivalencia de a y b , y no de los representantes específicos seleccionados de estas clases. Es decir, si se toman otros elementos $c \in [a]$ y $d \in [b]$ tales que cRa y dRb , se quiere que $[a*b] = [c*d]$. Dado que R es una relación de congruencia, si aRc y bRd , entonces, $(a*b)R(c*d)$, lo que implica que $[a*b] = [c*d]$.

Asociatividad: Como $(S, *)$ es un semigrupo, se sabe que la operación $*$ en S es asociativa, es decir, se cumple que, para cada $a, b, c \in S$, $(a*b)*c = a*(b*c)$. La operación \otimes en S/R es asociativa porque se cumple que, para cada $[a], [b], [c] \in S/R$, $([a] \otimes [b]) \otimes [c] = [a] \otimes ([b] \otimes [c]) \Leftrightarrow [a*b] \otimes [c] = [a] \otimes [b*c] \Leftrightarrow [(a*b)*c] = [a*(b*c)]$ (por ser $(S, *)$ un semigrupo).

Por lo tanto, queda demostrado que $(S/R, \otimes)$ es un semigrupo (Semigrupo Cociente).

Ejercicio 5.

Analizar si las siguientes son estructuras de grupo:

(a) $(\mathbb{Z}, +)$, los enteros con la suma usual.

Cerradura: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}$, $a + b \in \mathbb{Z}$.

Asociatividad: La operación $+$ en \mathbb{Z} es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in \mathbb{Z}$, $(a + b) + c = a + (b + c)$.

Elemento neutro: Existe un elemento $e \in \mathbb{Z}$ tal que, para todo $a \in \mathbb{Z}$, se cumple que $a + e = e + a = a$. En particular, 0 es el elemento neutro $\in \mathbb{Z}$, ya que $a + 0 = 0 + a = a \Leftrightarrow a = a = a$.

Inversos: Un elemento $a \in \mathbb{Z}$ tiene inverso si existe $a' \in \mathbb{Z}$ tal que $a + a' = a' + a = e$. En particular, $a + (-a) = (-a) + a = 0 \Leftrightarrow a - a = -a + a = 0 \Leftrightarrow 0 = 0 = 0$, por lo que existe inverso para todo $a \in \mathbb{Z}$, ya que $-a \in \mathbb{Z}$.

Por lo tanto, $(\mathbb{Z}, +)$ es un grupo, ya que satisface cerradura, asociatividad, elemento neutro e inversos.

(b) $(\mathbb{Z}, *)$, los enteros con el producto usual.

Cerradura: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}$, $a * b \in \mathbb{Z}$.

Asociatividad: La operación $*$ en \mathbb{Z} es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in \mathbb{Z}$, $(a * b) * c = a * (b * c)$.

Elemento neutro: Existe un elemento $e \in \mathbb{Z}$ tal que, para todo $a \in \mathbb{Z}$, se cumple que $a * e = e * a = a$. En particular, 1 es el elemento neutro $\in \mathbb{Z}$, ya que $a * 1 = 1 * a = a \Leftrightarrow a = a = a$.

Inversos: Un elemento $a \in \mathbb{Z}$ tiene inverso si existe $a' \in \mathbb{Z}$ tal que $a * a' = a' * a = e$. En particular, esto sólo se cumple para 1 (cuyo inverso es $1 \in \mathbb{Z}$) y -1 (cuyo inverso es $-1 \in \mathbb{Z}$), ya que $1 * 1 = 1 * 1 = 1$ y $(-1) * (-1) = (-1) * (-1) = 1$, por lo que no existe inverso para todo $a \in \mathbb{Z}$.

Por lo tanto, $(\mathbb{Z}, +)$ no es un grupo, ya que satisface cerradura, asociatividad y elemento neutro, pero no satisface inversos.

(c) $(\mathbb{R}^2, +)$, los pares ordenados de reales con la suma usual.

Cerradura: Para cada $(a_1, b_1), (a_2, b_2) \in \mathbb{R}^2$, $(a_1, b_1) + (a_2, b_2) = (a_1 + a_2, b_1 + b_2) \in \mathbb{R}^2$.

Asociatividad: La operación $+$ en \mathbb{R}^2 es asociativa porque se cumple que, para cada $(a_1, b_1), (a_2, b_2), (a_3, b_3) \in \mathbb{R}^2$, $[(a_1, b_1) + (a_2, b_2)] + (a_3, b_3) = (a_1, b_1) + [(a_2, b_2) + (a_3, b_3)]$.

$b_3)$. En particular, $(a_1+a_2, b_1+b_2) + (a_3, b_3) = (a_1, b_1) + (a_2+a_3, b_2+b_3) \Leftrightarrow (a_1+a_2+a_3, b_1+b_2+b_3) = (a_1+a_2+a_3, b_1+b_2+b_3)$.

Elemento neutro: Existe un elemento $(e_1, e_2) \in \mathbb{R}^2$ tal que, para todo $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, se cumple que $(a, b) + (e_1, e_2) = (e_1, e_2) + (a, b) = (a, b)$. En particular, $(0, 0)$ es el elemento neutro $\in \mathbb{R}^2$, ya que $(a, b) + (0, 0) = (0, 0) + (a, b) = (a, b) \Leftrightarrow (a+0, b+0) = (0+a, 0+b) = (a, b) \Leftrightarrow (a, b) = (a, b) = (a, b)$.

Inversos: Un elemento $(a, b) \in \mathbb{R}^2$ tiene inverso si existe $(a', b') \in \mathbb{R}^2$ tal que $(a, b) + (a', b') = (a', b') + (a, b) = (e_1, e_2)$. En particular, $(a, b) + (-a, -b) = (-a, -b) + (a, b) = (0, 0) \Leftrightarrow (a-b, b-b) = (-a+a, -b+b) = (0, 0) \Leftrightarrow (0, 0) = (0, 0) = (0, 0)$, por lo que existe inverso para todo $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, ya que $(-a, -b) \in \mathbb{R}^2$.

Por lo tanto, $(\mathbb{R}^2, +)$ es un grupo, ya que satisface cerradura, asociatividad, elemento neutro e inversos.

(d) $(M_{2x2}, +)$, las matrices de $2x2$ con la suma usual de matrices.

Cerradura: Para cada $A, B \in M_{2x2}$, $A + B \in M_{2x2}$. En particular, para $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \in M_{2x2}$, $B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \in M_{2x2}$, con cualesquiera $a_{ij}, b_{ij} \in \mathbb{R}$, $i, j = 1, 2$, $A + B = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} \end{pmatrix}$, por lo que $A + B \in M_{2x2}$.

Asociatividad: La operación $+$ en M_{2x2} es asociativa porque se cumple que, para cada $A, B, C \in M_{2x2}$, $(A + B) + C = A + (B + C)$. En particular, para $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}$, $C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} \in M_{2x2}$, con cualesquiera $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} \in \mathbb{R}$, $i, j = 1, 2$, $(A + B) + C = A + (B + C) \Leftrightarrow$

$$\left(\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \right) + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} + \left(\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} \right) \Leftrightarrow$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} \\ a_{21} + b_{21} & a_{22} + b_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} + c_{11} & b_{12} + c_{12} \\ b_{21} + c_{21} & b_{22} + c_{22} \end{pmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} + c_{11} & a_{12} + b_{12} + c_{12} \\ a_{21} + b_{21} + c_{21} & a_{22} + b_{22} + c_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} + c_{11} & a_{12} + b_{12} + c_{12} \\ a_{21} + b_{21} + c_{21} & a_{22} + b_{22} + c_{22} \end{pmatrix}.$$

Elemento neutro: Existe un elemento $E \in M_{2x2}$ tal que, para todo $A \in M_{2x2}$, se cumple que $A + E = E + A = A$. En particular, $0_{M_{2x2}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ es el elemento neutro $\in M_{2x2}$, ya que, para $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \in M_{2x2}$, con cualesquiera $a_{ij} \in \mathbb{R}$, $i, j = 1, 2$,

$$A + 0_{M_{2x2}} = 0_{M_{2x2}} + A = A \Leftrightarrow$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} + 0 & a_{12} + 0 \\ a_{21} + 0 & a_{22} + 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 + a_{11} & 0 + a_{12} \\ 0 + a_{21} & 0 + a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}.$$

Inversos: Un elemento $A \in M_{2x2}$ tiene inverso si existe $A' \in M_{2x2}$ tal que $A + A' = A' + A = E$. En particular, para $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \in M_{2x2}$, con cualesquiera $a_{ij} \in \mathbb{R}$, $i, j = 1, 2$,

$$A + (-A) = (-A) + A = 0_{M_{2x2}} \Leftrightarrow$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & -a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & -a_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} - a_{11} & a_{12} - a_{12} \\ a_{21} - a_{21} & a_{22} - a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a_{11} + a_{11} & -a_{12} + a_{12} \\ -a_{21} + a_{21} & -a_{22} + a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \Leftrightarrow$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \text{ por lo que existe inverso para todo } A \in M_{2x2}, \text{ ya que } -A \in M_{2x2}.$$

Por lo tanto, $(\mathbb{R}^2, +)$ es un grupo, ya que satisface cerradura, asociatividad, elemento neutro e inversos.

(e) $(P(A), \cup)$, A cualquier conjunto y $P(A)$ indica el conjunto de partes de A .

Cerradura: Para cada $X, Y \in P(A)$, $X \cup Y \in P(A)$.

Asociatividad: La operación \cup en $P(A)$ es asociativa porque se cumple que, para cada $X, Y, Z \in P(A)$, $(X \cup Y) \cup Z = X \cup (Y \cup Z)$ (por asociatividad de \cup en conjuntos).

Elemento neutro: Existe un elemento $E \in P(A)$ tal que, para todo $X \in P(A)$, se cumple que $X \cup E = E \cup X = X$. En particular, \emptyset es el elemento neutro $\in P(A)$, ya que $X \cup \emptyset = \emptyset \cup X = X \Leftrightarrow X = X$.

Inversos: Un elemento $X \in P(A)$ tiene inverso si existe $X' \in P(A)$ tal que $X \cup X' = X' \cup X = E$. En particular, esto sólo se cumple para \emptyset (cuyo inverso es $\emptyset \in P(A)$), ya que $\emptyset \cup \emptyset = \emptyset \cup \emptyset = \emptyset \Leftrightarrow \emptyset = \emptyset = \emptyset$, por lo que no existe inverso para todo $X \in P(A)$.

Por lo tanto, $(P(A), \cup)$ no es un grupo, ya que satisface cerradura, asociatividad y elemento neutro, pero no satisface inversos.

Ejercicio 6.

Probar que, en todo grupo, el único elemento idempotente es el neutro.

Dado un grupo G con una operación *, se dice que un elemento $e \in G$ es idempotente si cumple que:

$$e * e = e.$$

Se quiere probar que el único elemento idempotente es el elemento neutro.

Sea G un grupo con elemento neutro e, es decir, $e \in G$ tal que, para todo $a \in G$, se cumple que $a * e = e * a = a$.

Se supone que $a \in G$ es un elemento idempotente, es decir, cumple que:

$$a * a = a.$$

Se quiere probar que $a = e$, el elemento neutro.

Pre-multiplicando a ambos lados de la ecuación anterior por el inverso de a (en un grupo, cada elemento tiene inverso), se tiene:

$$a' * (a * a) = a' * a.$$

Usando la propiedad asociativa (en un grupo, la operación es asociativa), se tiene:

$$(a' * a) * a = a' * a.$$

Usando la propiedad de inversos (en un grupo, cada elemento tiene inverso), se tiene:

$$a' * a = e.$$

Usando la propiedad del elemento neutro (en un grupo, existe elemento neutro para la operación), se tiene:

$$a = e.$$

Por lo tanto, queda demostrado que, en todo grupo, el único elemento idempotente es el neutro.

Ejercicio 7.

Mostrar que, en todo grupo, vale la propiedad cancelativa.

Dado un grupo G con una operación *, la propiedad cancelativa establece que:

- Por la izquierda: Si $a*b = a*c$, entonces, $b = c$, para cada $a, b, c \in G$.
- Por la derecha: Si $b*a = c*a$, entonces, $b = c$, para cada $a, b, c \in G$.

Por la izquierda:

Se supone que, en el grupo G, se cumple que:

$$a*b = a*c, \text{ para algunos } a, b, c \in G.$$

Se quiere probar que $b = c$.

Pre-multiplicando a ambos lados de la ecuación anterior por el inverso de a (en un grupo, cada elemento tiene inverso), se tiene:

$$a'*(a*b) = a'*(a*c).$$

Usando la propiedad asociativa (en un grupo, la operación es asociativa), se tiene:

$$(a'*a)*b = (a'*a)*c.$$

Usando la propiedad de inversos (en un grupo, cada elemento tiene inverso), se tiene:

$$e*b = e*c.$$

Usando la propiedad del elemento neutro (en un grupo, existe elemento neutro para la operación), se tiene:

$$b = c.$$

Por lo tanto, queda demostrado que, si $a*b = a*c$, entonces, $b = c$, para cada $a, b, c \in G$.

Por la derecha:

Se supone que, en el grupo G, se cumple que:

$$b*a = c*a, \text{ para algunos } a, b, c \in G.$$

Se quiere probar que $b = c$.

Post-multiplicando a ambos lados de la ecuación anterior por el inverso de a (en un grupo, cada elemento tiene su inverso), se tiene:

$$(b*a)*a' = (c*a)*a'.$$

Usando la propiedad asociativa (en un grupo, la operación es asociativa), se tiene:

$$b*(a*a') = c*(a*a').$$

Usando la propiedad de inversos (en un grupo, cada elemento tiene inverso), se tiene:

$$b*e = c*e.$$

Usando la propiedad del elemento neutro (en un grupo, existe elemento neutro para la operación), se tiene:

$$b = c.$$

Por lo tanto, queda demostrado que, si $b*a = c*a$, entonces, $b = c$, para cada $a, b, c \in G$.

Por lo tanto, queda demostrado que, en todo grupo, vale la propiedad cancelativa.

Ejercicio 8.

Sea $(G, *)$ un grupo tal que todo elemento es su propio inverso, probar que G es abeliano.

Dado que, en $(G, *)$, todo elemento es su propio inverso, para todo $a \in G$, se cumple que:

$$a * a = e.$$

Se quiere probar que la operación $*$ en G es conmutativa, es decir, que se cumple que, para cada $a, b \in G$, $a * b = b * a$.

Se considera el siguiente producto:

$$(a * b) * (a * b).$$

Usando que todo elemento en $(G, *)$ es su propio inverso, se tiene:

$$(a * b) * (a * b) = e.$$

Usando la propiedad asociativa (en un grupo, la operación es asociativa), se tiene:

$$a * (b * a) * b = e.$$

Pre-multiplicando por el inverso de a ($a' = a$) y post-multiplicando por el inverso de b ($b' = b$) a ambos lados de la ecuación (en un grupo, cada elemento tiene su inverso), se tiene:

$$a * a * (b * a) * b * b = a * e * b.$$

Usando la propiedad de inversos (en un grupo, cada elemento tiene inverso), se tiene:

$$e * (b * a) * e = a * e * b.$$

Usando la propiedad del elemento neutro (en un grupo, existe elemento neutro para la operación), se tiene:

$$b * a = a * b.$$

Por lo tanto, queda demostrado que, dado $(G, *)$ un grupo tal que todo elemento es su propio inverso, G es abeliano.

Ejercicio 9.

Dado un grupo $(G, *)$, probar que G es abeliano si y sólo si, para cualquier x, y en G , vale que $(x * y)^2 = x^2 * y^2$.

Dado un grupo $(G, *)$, si G es abeliano, entonces, para cada $x, y \in G$, $x * y = y * x$, lo que implica que $(x * y)^2 = (x * y) * (x * y) = x * (y * x) * y$ (por asociatividad) = $x * (x * y) * y$ (por conmutatividad) = $(x * x) * (y * y)$ (por asociatividad) = $x^2 * y^2$. Por lo tanto, dado un grupo $(G, *)$, si G es abeliano, entonces, para cada $x, y \in G$, $(x * y)^2 = x^2 * y^2$.

Dado un grupo $(G, *)$, si, para cada $x, y \in G$, $(x * y)^2 = x^2 * y^2$, entonces, $(x * y) * (x * y) = x^2 * y^2$, lo que implica que $x' * (x * y) * (x * y) * y' = x' * (x * x) * (y * y) * y'$ (pre-multiplicando por x' y post-multiplicando por y') $\Leftrightarrow (x' * x) * (y * x) * (y * y') = (x' * x) * (x * y) * (y * y')$ (por asociatividad) $\Leftrightarrow e * (y * x) * e = e * (x * y) * e$ (por inversos) $\Leftrightarrow y * x = x * y$ (por elemento neutro). Por lo tanto, dado un grupo $(G, *)$, si, para cada $x, y \in G$, $(x * y)^2 = x^2 * y^2$, entonces, G es abeliano.

Por lo tanto, queda demostrado que, dado un grupo $(G, *)$, G es abeliano si y sólo si, para cada $x, y \in G$, $(x * y)^2 = x^2 * y^2$.

Ejercicio 10.

Dados los grupos $(G, *)$ y (F, \sqcap) , se define, en el conjunto GxF , la ley \circ tal que $(x, y) \circ (z, t) = (x * z, y \sqcap t)$. Probar que (GxF, \circ) es Grupo (Grupo Producto).

Cerradura: Para cada $(x, y), (z, t) \in GxF$, $(x * z, y \sqcap t) \in GxF$, ya que $x * z \in G$ y $y \sqcap t \in F$ (por $(G, *)$ y (F, \sqcap) grupos).

Asociatividad: La operación \circ en GxF es asociativa porque se cumple que, para cada $(x, y), (z, t), (u, v) \in GxF$, $((x, y) \circ (z, t)) \circ (u, v) = (x, y) \circ ((z, t) \circ (u, v))$. En particular, $(x * z, y \sqcap t) \circ (u, v) = (x, y) \circ (z * u, t \sqcap v) \Leftrightarrow ((x * z) * u, (y \sqcap t) \sqcap v) = (x * (z * u), y \sqcap (t \sqcap v))$ (por $*$ y \sqcap asociativas en G y F , respectivamente).

Elemento neutro: Existe un elemento $(e_G, e_F) \in GxF$ tal que, para todo $(x, y) \in GxF$, se cumple que $(x, y) \circ (e_G, e_F) = (e_G, e_F) \circ (x, y) = (x, y)$. En particular, (e_G, e_F) es el elemento neutro $\in GxF$ (e_G y e_F elementos neutros de G y F , respectivamente), ya que $(x * e_G, y \sqcap e_F) = (e_G * x, e_F \sqcap y) = (x, y) \Leftrightarrow (x, y) = (x, y)$.

Inversos: Un elemento $(x, y) \in GxF$ tiene inverso si existe $(x', y') \in GxF$ tal que $(x, y) \circ (x', y') = (x', y') \circ (x, y) = (e_G, e_F)$. En particular, dado que existe inverso $x' \in G$ ($y' \in F$) para cada $x \in G$ ($y \in F$) (por $(G, *)$ y (F, \sqcap) grupos), $(x, y) \circ (x', y') = (x', y') \circ (x, y) = (e_G, e_F) \Leftrightarrow (x * x', y \sqcap y') = (x' * x, y' \sqcap y) = (e_G, e_F) \Leftrightarrow (e_G, e_F) = (e_G, e_F) = (e_G, e_F)$, por lo que existe inverso para todo $(x, y) \in GxF$, ya que $(x', y') \in GxF$.

Por lo tanto, queda demostrado que (GxF, \circ) es un grupo (Grupo Producto), ya que satisface cerradura, asociatividad, elemento neutro e inversos.

Ejercicio 11.

Estudiar si son subgrupos de los grupos indicados:

(a) Los enteros pares de $(\mathbb{Z}, +)$.

$$\mathbb{Z}_2 = \{x \in \mathbb{Z} : x = 2k, k \in \mathbb{Z}\}.$$

$$\mathbb{Z}_2 \subset \mathbb{Z}.$$

Cerradura: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}_2$, $a + b \in \mathbb{Z}_2$. En particular, para $a = 2m$ y $b = 2n$, con cualesquiera $m, n \in \mathbb{Z}$, $a + b = 2m + 2n = 2(m + n)$, con $m + n \in \mathbb{Z}$, por lo que $a + b \in \mathbb{Z}_2$.

Asociatividad: La operación $+$ en \mathbb{Z}_2 es asociativa porque se hereda del grupo original $(\mathbb{Z}, +)$.

Elemento neutro: El elemento neutro de $+$ en \mathbb{Z} también existe en \mathbb{Z}_2 . En particular, $0 \in \mathbb{Z}_2$, ya que $0 = 2 * 0$, con $k = 0 \in \mathbb{Z}$.

Inversos: Un elemento $a \in \mathbb{Z}_2$ tiene inverso si existe $a' \in \mathbb{Z}_2$ tal que $a + a' = a' + a = e$. En particular, para $a = 2k \in \mathbb{Z}_2$, con cualquier $k \in \mathbb{Z}$, su inverso en \mathbb{Z} es $a' = -a = -2k = 2(-k)$, con $-k \in \mathbb{Z}$, por lo que existe inverso para todo $a \in \mathbb{Z}_2$, ya que $a' \in \mathbb{Z}_2$.

Por lo tanto, $(\mathbb{Z}_2, +)$ es un subgrupo del grupo $(\mathbb{Z}, +)$, ya que satisface cerradura, elemento neutro e inversos.

(b) Las matrices simétricas de 2×2 .

$$S_{2 \times 2} = \left\{ \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix} : a_{ij} \in \mathbb{R}, i, j = 1, 2 \right\}.$$

$$S_{2 \times 2} \subset M_{2 \times 2}.$$

Cerradura: Para cada $A, B \in S_{2 \times 2}$, $A + B \in S_{2 \times 2}$. En particular, para $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{12} & b_{22} \end{pmatrix} \in S_{2 \times 2}$, con cualesquiera $a_{ij}, b_{ij} \in \mathbb{R}$, $i, j = 1, 2$, $A + B = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{12} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & a_{12} + b_{12} \\ a_{12} + b_{12} & a_{22} + b_{22} \end{pmatrix}$, por lo que $A + B \in S_{2 \times 2}$.

Asociatividad: La operación $+$ en $S_{2 \times 2}$ es asociativa porque se hereda del grupo original $(M_{2 \times 2}, +)$.

Elemento neutro: El elemento neutro de $+$ en $M_{2 \times 2}$ también existe en $S_{2 \times 2}$. En particular, $0_{M_{2 \times 2}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \in S_{2 \times 2}$, ya que $a_{12} = a_{21} = 0$.

Inversos: Un elemento $A \in S_{2 \times 2}$ tiene inverso si existe $A' \in S_{2 \times 2}$ tal que $A + A' = A' + A = E$. En particular, para $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{12} & a_{22} \end{pmatrix} \in S_{2 \times 2}$, con cualesquiera $a_{ij} \in \mathbb{R}$, $i, j = 1, 2$, su

inverso en M_{2x2} es $A' = -A = \begin{pmatrix} -a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & -a_{22} \end{pmatrix}$, por lo que existe inverso para todo $A \in S_{2x2}$, ya que $A' \in S_{2x2}$.

Por lo tanto, $(S_{2x2}, +)$ es un subgrupo del grupo $(M_{2x2}, +)$, ya que satisface cerradura, elemento neutro e inversos.

Ejercicio 12.

*Demostrar que, si H y K son subgrupos de (G, *), entonces, H ∩ K es un subgrupo de (G, *).*

$$H \cap K = \{a \in G : a \in H \wedge a \in K\}.$$

$$H \cap K \subset G.$$

Cerradura: Para cada $a, b \in H \cap K$, $a * b \in H \cap K$, ya que $a, b \in H$, $a, b \in K$ y $a * b \in H$, $a * b \in K$ (por $(H, *)$ y $(K, *)$ subgrupos).

Asociatividad: La operación $*$ en $H \cap K$ es asociativa porque se hereda del grupo original $(G, *)$.

Elemento neutro: El elemento neutro de $*$ en G también existe en $H \cap K$. En particular, $e \in H \cap K$, ya que $e \in H$ y $e \in K$ (por $(H, *)$ y $(K, *)$ subgrupos de G , con elemento neutro e).

Inversos: Un elemento $a \in H \cap K$ tiene inverso si existe $a' \in H \cap K$ tal que $a * a' = a' * a = e$. En particular, para cada $a \in H \cap K$, $a \in H$ y $a \in K$ y, además, $a' \in H$ y $a' \in K$ (por $(H, *)$ y $(K, *)$ subgrupos), por lo que existe inverso para todo $a \in H \cap K$, ya que $a' \in H \cap K$.

Por lo tanto, queda demostrado que $(H \cap K, *)$ es un subgrupo del grupo $(G, *)$, ya que satisface cerradura, elemento neutro e inversos.

Ejercicio 13.

Sea $(G, *)$ un grupo, sea $a \in G$ y sea H un subgrupo de G . Demostrar que el conjunto $aHa^{+1} = \{a*h*a^{-1}: h \in H\}$ es un subgrupo de G .

$$aHa^{+1} = \{a*h*a^{-1}: h \in H\}.$$

$$aHa^{+1} \subset G.$$

Elemento neutro: El elemento neutro de $*$ en G también existe en aHa^{+1} . En particular, $e \in aHa^{+1}$, ya que $e \in H$ (por $(H, *)$ subgrupo de G , con elemento neutro e), lo que implica que $aea^{-1} = aa^{-1}$ (por $(G, *)$ grupo) = e (por $(G, *)$ grupo).

Asociatividad: La operación $*$ en aHa^{+1} es asociativa porque se hereda del grupo original $(G, *)$.

Cerradura: Para cada $x, y \in aHa^{+1}$, $x*y \in aHa^{+1}$. En particular, para $x = ah_1a^{-1} \in aHa^{+1}$ y $y = ah_2a^{-1} \in aHa^{+1}$, con cualesquiera $h_1, h_2 \in H$, $x*y = (ah_1a^{-1})*(ah_2a^{-1}) = ah_1(a^{-1}a)h_2a^{-1}$ (por asociatividad) = $ah_1eh_2a^{-1}$ (por $(G, *)$ grupo) = $ah_1h_2a^{-1}$ (por elemento neutro), con $h_1*h_2 \in H$ (por $(H, *)$ subgrupo), por lo que $x*y \in aHa^{+1}$.

Inversos: Un elemento $x \in aHa^{+1}$ tiene inverso si existe $x' \in aHa^{+1}$ tal que $x*x' = x'*x = e$. En particular, para $x = aha^{-1} \in aHa^{+1}$, con cualquier $h \in H$, su inverso en G es $x' = (aha^{-1})^{-1} = (a^{-1})^{-1}h^{-1}a^{-1} = ah^{-1}a^{-1}$ (por $(G, *)$ grupo), con $h^{-1} \in H$ (por $(H, *)$ subgrupo), por lo que existe inverso para todo $x \in aHa^{+1}$, ya que $x' \in aHa^{+1}$.

Por lo tanto, queda demostrado que el conjunto $aHa^{+1} = \{a*h*a^{-1}: h \in H\}$ es un subgrupo de G , ya que satisface cerradura, elemento neutro e inversos.

Ejercicio 14.

Probar que todo grupo cíclico es abeliano.

Sea $(G, *)$ un grupo cíclico con generador $g \in G$, es decir:

$$G = \langle g \rangle = \{g^n : n \in \mathbb{Z}\}.$$

Esto significa que cualquier elemento de G se puede expresar como una potencia de g .

Se quiere probar que la operación $*$ en G es conmutativa, es decir, que se cumple que, para cada $a, b \in G$, $a * b = b * a$.

Sean $a, b \in G$. Dado que G es cíclico, se tiene:

$$a = g^n, \text{ con } n \in \mathbb{Z}.$$

$$b = g^m, \text{ con } m \in \mathbb{Z}.$$

Considerando las operaciones $a * b$ y $b * a$, se tiene:

$$a * b = g^n * g^m = g^{n+m}.$$

$$b * a = g^m * g^n = g^{m+n}.$$

Dado que $g^{n+m} = g^{m+n}$, se tiene:

$$a * b = b * a.$$

Por lo tanto, queda demostrado que todo grupo cíclico es abeliano.

Ejercicio 15.

Sea G un grupo cíclico de orden n , si m es divisor de n , entonces, el elemento a^m y sus potencias generan un subgrupo.

Sea G un grupo cíclico de orden n con generador $a \in G$, es decir:

$$G = \langle a \rangle = \{a^x : x \in \mathbb{Z}, 0 \leq x < n\} = \{e, a, a^2, \dots, a^{n-1}\}.$$

Esto implica que $a^n = e$, donde e es el elemento neutro de G .

Se supone que m es divisor de n , lo cual implica que existe un entero k tal que $n = mk$.

Se quiere probar que el elemento a^m y sus potencias generan un subgrupo de G .

Sea H el conjunto que contiene todas las potencias de a^m , es decir:

$$\begin{aligned} H &= \langle a^m \rangle = \{(a^m)^y : y \in \mathbb{Z}\} \\ H &= \{a^{my} : y \in \mathbb{Z}\}. \end{aligned}$$

Si $a^{my} = e$ para algún $y \in \mathbb{Z}$, entonces, $a^{my} = a^n = e$, lo que implica que my es múltiplo de n y, como mk también lo es, se tiene:

$$\begin{aligned} my &= mk \\ y &= k. \end{aligned}$$

Esto muestra que el menor entero positivo y para el cual $a^{my} = e$ es $y = k$, por lo que el orden de a^m es k .

Entonces, H tiene, exactamente, $k = \frac{n}{m} (< n)$ elementos:

$$H = \langle a^m \rangle = \{a^{my} : y \in \mathbb{Z}, 0 \leq y < k = \frac{n}{m} < n\}.$$

$$H \subset G.$$

Cerradura: Para cada $a, b \in H$, $a * b \in H$. En particular, para $a = a^{mx} \in H$ y $b = a^{my} \in H$, con cualesquiera $x, y \in \mathbb{Z}$, $a * b = a^{mx} * a^{my} = a^{mx+my} = a^{m(x+y)}$, con $x + y \in \mathbb{Z}$, por lo que $a * b \in H$.

Asociatividad: La operación $*$ en H es asociativa porque se hereda del grupo original $(G, *)$.

Elemento neutro: El elemento neutro de $*$ en G también existe en H . En particular, $e \in H$, ya que $a^{m*0} = a^0 = e$, con $y = 0 \in \mathbb{Z}$.

Inversos: Un elemento $a \in H$ tiene inverso si existe $a' \in H$ tal que $a * a' = a' * a = e$. En particular, para $a = a^{my} \in H$, con cualquier $y \in \mathbb{Z}$, su inverso en G es $a' = (a^{my})^{-1} = a^{-my} = a^{m(-y)}$, con $-y \in \mathbb{Z}$, por lo que existe inverso para todo $a \in H$, ya que $a' \in H$.

Por lo tanto, queda demostrado que, dado un grupo cíclico G de orden n , si m es divisor de n , entonces, el elemento a^m y sus potencias generan un subgrupo de G , ya que el conjunto formado por estos elementos (H) satisface cerradura, elemento neutro e inversos.

Ejercicio 16.

Sea $(G, *)$ un grupo, sea $a \in G$ y sea H un subgrupo de G . Si $a, b \in G$, probar que la relación dada por $a \equiv b \pmod{H}$ si $a * b^{-1} \in H$ es una relación de equivalencia.

\equiv_H es reflexiva porque se cumple que, para todo $a \in G$, $(a, a) \in \equiv_H$. En particular, $aa^{-1} = e \in H$ (por $(H, *)$ subgrupo de G , con elemento neutro e), lo que implica que $(a, a) \in \equiv_H$.

\equiv_H es simétrica porque se cumple que, para cada $a, b \in G$, si $(a, b) \in \equiv_H$, entonces, $(b, a) \in \equiv_H$. En particular, si $ab^{-1} \in H$, entonces, $(ab^{-1})^{-1} \in H$ (por $(H, *)$ subgrupo) y es igual a $(b^{-1})^{-1}a^{-1} = ba^{-1}$, lo que implica que, si $(a, b) \in \equiv_H$, entonces, $(b, a) \in \equiv_H$.

\equiv_H es transitiva porque se cumple que, para cada $a, b, c \in G$, si $(a, b) \in \equiv_H$ y $(b, c) \in \equiv_H$, entonces, $(a, c) \in \equiv_H$. En particular, si $ab^{-1} \in H$ y $bc^{-1} \in H$, entonces, $(ab^{-1}) * (bc^{-1}) \in H$ (por cerradura) y es igual a $a(b^{-1}b)c^{-1}$ (por asociatividad) = aec^{-1} (por inversos) = ac^{-1} (por elemento neutro), lo que implica que, si $(a, b) \in \equiv_H$ y $(b, c) \in \equiv_H$, entonces, $(a, c) \in \equiv_H$.

Por lo tanto, queda demostrado que la relación dada por $a \equiv b \pmod{H}$ si $a * b^{-1} \in H$ es una relación de equivalencia, ya que es reflexiva, simétrica y transitiva.