

Trabajo Práctico N° 5.2: **Aritmética Modular.**

Ejercicio 1.

Hallar los resultados de las siguientes operaciones realizadas entre enteros módulo 4 y 5:

(a) $\bar{3} + \bar{1}$.

$$\begin{aligned}\bar{3} + \bar{1} &= \overline{3 + 1} \\ \bar{3} + \bar{1} &= \bar{4}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{3} + \bar{1} &= 4 \bmod 4 \\ \bar{3} + \bar{1} &= 0.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{3} + \bar{1} &= 4 \bmod 5 \\ \bar{3} + \bar{1} &= 4.\end{aligned}$$

(b) $\bar{5} + \bar{9}$.

$$\begin{aligned}\bar{5} + \bar{9} &= \overline{5 + 9} \\ \bar{5} + \bar{9} &= \overline{14}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{5} + \bar{9} &= 14 \bmod 4 \\ \bar{5} + \bar{9} &= 2.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{5} + \bar{9} &= 14 \bmod 5 \\ \bar{5} + \bar{9} &= 4.\end{aligned}$$

(c) $\overline{40} * \bar{3}$.

$$\begin{aligned}\overline{40} * \bar{3} &= \overline{40 * 3} \\ \overline{40} * \bar{3} &= \overline{120}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{40} * \bar{3} &= 120 \bmod 4 \\ \overline{40} * \bar{3} &= 0.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{40} * \bar{3} &= 120 \bmod 5 \\ \overline{40} * \bar{3} &= 0.\end{aligned}$$

(d) $(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8})$.

$$\begin{aligned}(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8}) &= (\overline{3+2}) * (\overline{6*8}) \\(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8}) &= \overline{5} * \overline{48} \\(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8}) &= \overline{5 * 48} \\(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8}) &= \overline{240}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8}) &= 240 \bmod 4 \\(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8}) &= 0.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8}) &= 240 \bmod 5 \\(\bar{3} + \bar{2}) * (\bar{6} * \bar{8}) &= 0.\end{aligned}$$

Ejercicio 2.

Construir las tablas de sumar y multiplicar de los enteros módulo 2 y 5.

Sea $\mathbb{Z}_2 = \{\bar{0}, \bar{1}\}$.

Tabla de sumar (mod 2):

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{0}$	0	1
$\bar{1}$	1	0

Tabla de multiplicar (mod 2):

*	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{0}$	0	0
$\bar{1}$	0	1

Sea $\mathbb{Z}_5 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}\}$.

Tabla de sumar (mod 5):

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$
$\bar{0}$	0	1	2	3	4
$\bar{1}$	1	2	3	4	0
$\bar{2}$	2	3	4	0	1
$\bar{3}$	3	4	0	1	2
$\bar{4}$	4	0	1	2	3

Tabla de multiplicar (mod 5):

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{3}$	$\bar{4}$
$\bar{0}$	0	0	0	0	0
$\bar{1}$	0	1	2	3	4
$\bar{2}$	0	2	4	1	3
$\bar{3}$	0	3	1	4	2
$\bar{4}$	0	4	3	2	1

Ejercicio 3.

Analizar si las siguientes son estructuras de grupo:

(a) $(\mathbb{Z}_4, +)$ enteros módulo 4 con la suma modular.

$$\mathbb{Z}_4 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\}.$$

Cerradura: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}_4$, $(a + b) \bmod 4 \in \mathbb{Z}_4$.

Asociatividad: La operación $+$ en \mathbb{Z}_4 es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in \mathbb{Z}_4$, $[(a + b) + c] \bmod 4 = [a + (b + c)] \bmod 4$.

Elemento neutro: Existe un elemento $e \in \mathbb{Z}_4$ tal que, para todo $a \in \mathbb{Z}_4$, se cumple que $(a + e) \bmod 4 = (e + a) \bmod 4 = a \bmod 4$. En particular, 0 es el elemento neutro $\in \mathbb{Z}_4$, ya que $(a + 0) \bmod 4 = (0 + a) \bmod 4 = a \bmod 4 \Leftrightarrow a \bmod 4 = a \bmod 4 = a \bmod 4$.

Inversos: Un elemento $a \in \mathbb{Z}_4$ tiene inverso si existe $a' \in \mathbb{Z}_4$ tal que $(a + a') \bmod 4 = (a' + a) \bmod 4 = e$. En particular, el inverso de 0 es 0 $\in \mathbb{Z}_4$, el inverso de 1 es 3 $\in \mathbb{Z}_4$, el inverso de 2 es $\in \mathbb{Z}_4$ y el inverso de 3 es 1 $\in \mathbb{Z}_4$, por lo que existe inverso para todo $a \in \mathbb{Z}_4$.

Por lo tanto, $(\mathbb{Z}_4, +)$ es un grupo, ya que satisface cerradura, asociatividad, elemento neutro e inversos.

(b) $(\mathbb{Z}_4, *)$ enteros módulo 4 con el producto modular.

$$\mathbb{Z}_4 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\}.$$

Cerradura: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}_4$, $(a * b) \bmod 4 \in \mathbb{Z}_4$.

Asociatividad: La operación $*$ en \mathbb{Z}_4 es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in \mathbb{Z}_4$, $[(a * b) * c] \bmod 4 = [a * (b * c)] \bmod 4$.

Elemento neutro: Existe un elemento $e \in \mathbb{Z}_4$ tal que, para todo $a \in \mathbb{Z}_4$, se cumple que $(a * e) \bmod 4 = (e * a) \bmod 4 = a \bmod 4$. En particular, 1 es el elemento neutro $\in \mathbb{Z}_4$, ya que $(a * 1) \bmod 4 = (1 * a) \bmod 4 = a \bmod 4 \Leftrightarrow a \bmod 4 = a \bmod 4 = a \bmod 4$.

Inversos: Un elemento $a \in \mathbb{Z}_4 \setminus \{0\}$ tiene inverso si existe $a' \in \mathbb{Z}_4$ tal que $(a * a') \bmod 4 = (a' * a) \bmod 4 = e$. En particular, esto sólo se cumple para 1 (cuyo inverso es 1 $\in \mathbb{Z}_4$) y 3 (cuyo inverso es 3 $\in \mathbb{Z}_4$), por lo que no existe inverso para todo $a \in \mathbb{Z}_4 \setminus \{0\}$.

Por lo tanto, $(\mathbb{Z}_3, *)$ no es un grupo, ya que satisface cerradura, asociatividad y elemento neutro, pero no satisface inversos.

(c) $(\mathbb{Z}_3, *)$ enteros módulo 3 con el producto modular.

$$\mathbb{Z}_3 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}\}.$$

Cerradura: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}_3$, $(a * b) \bmod 3 \in \mathbb{Z}_3$.

Asociatividad: La operación $*$ en \mathbb{Z}_3 es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in \mathbb{Z}_3$, $[(a * b) * c] \bmod 3 = [a * (b * c)] \bmod 3$.

Elemento neutro: Existe un elemento $e \in \mathbb{Z}_3$ tal que, para todo $a \in \mathbb{Z}_3$, se cumple que $(a * e) \bmod 3 = (e * a) \bmod 3 = a \bmod 3$. En particular, 1 es el elemento neutro $\in \mathbb{Z}_3$, ya que $(a * 1) \bmod 3 = (1 * a) \bmod 3 = a \bmod 3 \Leftrightarrow a \bmod 3 = a \bmod 3 = a \bmod 3$.

Inversos: Un elemento $a \in \mathbb{Z}_3 \setminus \{0\}$ tiene inverso si existe $a' \in \mathbb{Z}_3$ tal que $(a * a') \bmod 3 = (a' * a) \bmod 3 = e$. En particular, 1 es el inverso de 1 y 2 es el inverso de 2, por lo que existe inverso para todo $a \in \mathbb{Z}_3 \setminus \{0\}$.

Por lo tanto, $(\mathbb{Z}_3, *)$ es un grupo, ya que satisface cerradura, asociatividad, elemento neutro e inversos.

Ejercicio 4.

Sean $A_1 = \{\bar{0}, \bar{5}\}$ y $A_2 = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6}, \bar{8}\}$ subconjuntos de \mathbb{Z}_{10} .

(a) Probar que A_1 y A_2 son subgrupos de \mathbb{Z}_{10} .

$$A_1 \subset \mathbb{Z}_{10}.$$

Cerradura: Para cada $a, b \in A_1$, $(a + b) \bmod 10 \in A_1$.

Asociatividad: La operación $+$ en A_1 es asociativa porque se hereda del grupo original $(\mathbb{Z}_{10}, +)$.

Elemento neutro: El elemento neutro de $+$ en \mathbb{Z}_{10} también existe en A_1 . En particular, $0 \in A_1$.

Inversos: Un elemento $a \in A_1$ tiene inverso si existe $a' \in A_1$ tal que $(a + a') \bmod 10 = (a' + a) \bmod 10 = e$. En particular, el inverso de 5 es $5 \in A_1$, por lo que existe inverso para todo $a \in A_1 \setminus \{0\}$.

Por lo tanto, queda demostrado que $(A_1, +)$ es un subgrupo del grupo $(\mathbb{Z}_{10}, +)$, ya que satisface cerradura, elemento neutro e inversos.

$$A_2 \subset \mathbb{Z}_{10}.$$

Cerradura: Para cada $a, b \in A_2$, $(a + b) \bmod 10 \in A_2$.

Asociatividad: La operación $+$ en A_2 es asociativa porque se hereda del grupo original $(\mathbb{Z}_{10}, +)$.

Elemento neutro: El elemento neutro de $+$ en \mathbb{Z}_{10} también existe en A_2 . En particular, $0 \in A_2$.

Inversos: Un elemento $a \in A_2$ tiene inverso si existe $a' \in A_2$ tal que $(a + a') \bmod 10 = (a' + a) \bmod 10 = e$. En particular, el inverso de 2 es $8 \in A_2$, el inverso de 4 es $6 \in A_2$, el inverso de 6 es $4 \in A_2$ y el inverso de 8 es $2 \in A_2$, por lo que existe inverso para todo $a \in A_2 \setminus \{0\}$.

Por lo tanto, queda demostrado que $(A_2, +)$ es un subgrupo del grupo $(\mathbb{Z}_{10}, +)$, ya que satisface cerradura, elemento neutro e inversos.

(b) Mostrar que todo elemento de \mathbb{Z}_{10} puede escribirse como suma de elementos de A_1 y A_2 (es decir, para todo x de \mathbb{Z}_{10} , $x = x_1 + x_2$ con $x_1 \in A_1$ y $x_2 \in A_2$).

$$\mathbb{Z}_{10} = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}, \bar{6}, \bar{7}, \bar{8}, \bar{9}\}.$$

Si $x_1 = \bar{0}$, entonces, $x = x_2$. Como A_2 contiene $\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6}, \bar{8}$, los valores posibles de x_2 cubren los elementos pares de \mathbb{Z}_{10} ($\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}, \bar{6}, \bar{8}$).

Si $x_1 = \bar{5}$, entonces, $x = (\bar{5} + x_2) \bmod 10$. Esto genera: $\bar{5} + \bar{0} = \bar{5}$; $\bar{5} + \bar{2} = \bar{7}$; $\bar{5} + \bar{4} = \bar{9}$; $\bar{5} + \bar{6} = \bar{1}$; $\bar{5} + \bar{8} = \bar{3}$. Los valores posibles de x_2 cubren los elementos impares de \mathbb{Z}_{10} ($\bar{1}, \bar{3}, \bar{5}, \bar{7}, \bar{9}$).

Por lo tanto, todo elemento de \mathbb{Z}_{10} puede escribirse como la suma de elementos de A_1 y A_2 .

Ejercicio 5.

Mostrar que $\bar{3}$ es un generador del grupo cíclico $(\mathbb{Z}_8, +)$. ¿Cuál es el orden del subgrupo cíclico generado por $\bar{2}$?

$$\mathbb{Z}_8 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}, \bar{6}, \bar{7}\}.$$

Un elemento $g \in \mathbb{Z}_8$ es un generador si y sólo si los múltiplos de g (es decir, $g, 2g, \dots$ módulo 8) generan todos los elementos de \mathbb{Z}_8 .

$$g = \bar{3}: \bar{1} * \bar{3} = \bar{3}; \bar{2} * \bar{3} = \bar{6}; \bar{3} * \bar{3} = \bar{1}; \bar{4} * \bar{3} = \bar{4}; \bar{5} * \bar{3} = \bar{7}; \bar{6} * \bar{3} = \bar{2}; \bar{7} * \bar{3} = \bar{5}; \bar{8} * \bar{3} = \bar{0}.$$

Por lo tanto, $\bar{3}$ es un generador del grupo cíclico $(\mathbb{Z}_8, +)$.

El orden de un elemento en un grupo cíclico es el menor n tal que $ng = \bar{0}$, donde g es el elemento que se está considerando.

$$g = \bar{2}: \bar{1} * \bar{2} = \bar{6}; \bar{2} * \bar{2} = \bar{4}; \bar{3} * \bar{2} = \bar{2}; \bar{4} * \bar{2} = \bar{0}.$$

Por lo tanto, el orden del subgrupo cíclico generado por $\bar{2}$ es 4.

Ejercicio 6.

Encontrar los generadores del grupo cíclico $(\mathbb{Z}_6, +)$.

$$\mathbb{Z}_6 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}\}.$$

Un elemento $g \in \mathbb{Z}_6$ es un generador si y sólo si los múltiplos de g (es decir, $g, 2g, \dots$ módulo 6) generan todos los elementos de \mathbb{Z}_6 .

$g = \bar{0}$: La suma de $\bar{0}$ consigo mismo siempre da 0.

$$g = \bar{1}: \bar{1} * \bar{1} = \bar{1}; \bar{2} * \bar{1} = \bar{2}; \bar{3} * \bar{1} = \bar{3}; \bar{4} * \bar{1} = \bar{4}; \bar{5} * \bar{1} = \bar{5}; \bar{6} * \bar{1} = \bar{0}.$$

$$g = \bar{2}: \bar{1} * \bar{2} = \bar{2}; \bar{2} * \bar{2} = \bar{4}; \bar{3} * \bar{2} = \bar{0}.$$

$$g = \bar{3}: \bar{1} * \bar{3} = \bar{3}; \bar{2} * \bar{3} = \bar{0}.$$

$$g = \bar{4}: \bar{1} * \bar{4} = \bar{4}; \bar{2} * \bar{4} = \bar{2}; \bar{3} * \bar{4} = \bar{0}.$$

$$g = \bar{5}: \bar{1} * \bar{5} = \bar{5}; \bar{2} * \bar{5} = \bar{4}; \bar{3} * \bar{5} = \bar{3}; \bar{4} * \bar{5} = \bar{2}; \bar{5} * \bar{5} = \bar{1}; \bar{6} * \bar{5} = \bar{0}.$$

Por lo tanto, los generadores del grupo cíclico $(\mathbb{Z}_6, +)$ son 1 y 5.

Ejercicio 7.

Si se reparte en partes iguales m caramelos entre 3 personas me sobran 2, mientras que, si se reparten entre 7, me sobran 4. Sabiendo que m está entre 30 y 70. ¿Cuántos caramelos se tienen para repartir? (Usar aritmética modular).

$$m \equiv_3 2$$

$$m = 3k + 2, \text{ con } k \in \mathbb{Z}.$$

$$m \equiv_7 4.$$

$$3k + 2 \equiv_7 4$$

$$3k \equiv_7 4 - 2$$

$$3k \equiv_7 2$$

$$5 * 3k \equiv_7 5 * 2$$

$$15k \equiv_7 10$$

$$15 \text{ mod } 7 = 10$$

$$15 \text{ mod } 7 * k \text{ mod } 7 = 3$$

$$1 * k \text{ mod } 7 = 3$$

$$k \text{ mod } 7 = 3$$

$$k = 7n + 3, \text{ con } n \in \mathbb{Z}.$$

$$m = 3(7n + 3) + 2$$

$$m = 21n + 9 + 2$$

$$m = 21n + 11.$$

Con $n=1$:

$$m = 21 * 1 + 11$$

$$m = 21 + 11$$

$$m = 32.$$

Con $n=2$:

$$m = 21 * 2 + 11$$

$$m = 42 + 11$$

$$m = 53.$$

Con $n=3$:

$$m = 21 * 3 + 11$$

$$m = 63 + 11$$

$$m = 74.$$

Por lo tanto, se tienen para repartir 32 o 53 caramelos.

Ejercicio 8.

Averiguar qué día de la semana cayó 05/11/1968, fecha de natalicio de Ricardo Fort.

Se utilizará el algoritmo de Zeller, que es una fórmula para calcular el día de la semana de cualquier fecha:

$$h = (q + \left\lfloor \frac{13(m+1)}{5} \right\rfloor + K + \left\lfloor \frac{K}{4} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{J}{4} \right\rfloor - 2J) \bmod 7, \text{ donde:}$$

h: día de la semana (0: sábado, 1: domingo, 2: lunes, 3: martes, 4: miércoles, 5: jueves, 6: viernes),

q: día del mes,

m: mes (los meses de enero y febrero se consideran como los meses 13 y 14 del año anterior),

K: últimos dos dígitos del año,

J: primeros dos dígitos del año.

$$h = (5 + \left\lfloor \frac{13(11+1)}{5} \right\rfloor + 68 + \left\lfloor \frac{68}{4} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{19}{4} \right\rfloor - 2 * 19) \bmod 7$$

$$h = (5 + \left\lfloor \frac{13*12}{5} \right\rfloor + 68 + 17 + 4 - 38) \bmod 7$$

$$h = (5 + \left\lfloor \frac{156}{5} \right\rfloor + 68 + 17 + 4 - 38) \bmod 7$$

$$h = (5 + 31 + 68 + 17 + 4 - 38) \bmod 7$$

$$h = 87 \bmod 7$$

$$h = 3.$$

Por lo tanto, el día de la semana que cayó 05/11/1968 fue martes.

Ejercicio 9.

Mostrar que \mathbb{Z}_m para m natural y las operaciones de suma y producto tiene estructura de anillo.

$$\mathbb{Z}_m = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \dots, \bar{m-1}\}.$$

La terna ordenada $(\mathbb{Z}_m, +, *)$ tiene estructura de anillo si $(\mathbb{Z}_m, +)$ es un grupo conmutativo y si el producto es cerrado, asociativo y se satisface distributividad del producto respecto de la suma.

Cerradura de la suma: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}_m$, $(a + b) \bmod m \in \mathbb{Z}_m$.

Asociatividad de la suma: La operación $+$ en \mathbb{Z}_m es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in \mathbb{Z}_m$, $[(a + b) + c] \bmod m = [a + (b + c)] \bmod m$.

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

Inversos aditivos: Un elemento $a \in \mathbb{Z}_m$ tiene inverso si existe $a' \in \mathbb{Z}_m$ tal que $(a + a') \bmod m = (a' + a) \bmod m = e$. En particular, para todo $a \in \mathbb{Z}_m$, su inverso es $a' = (m - a) \in \mathbb{Z}_m$, por lo que existe inverso para todo $a \in \mathbb{Z}_m$.

Commutatividad de la suma: La operación $+$ en \mathbb{Z}_m es conmutativa porque se cumple que, para cada $a, b \in \mathbb{Z}_m$, $(a + b) \bmod m = (b + a) \bmod m$.

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

Cerradura del producto: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}_m$, $(a * b) \bmod m \in \mathbb{Z}_m$.

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

Distributividad del producto respecto de la suma: La operación $*$ en \mathbb{Z}_m es distributiva respecto de la operación $+$ porque se cumple que, para cada $a, b, c \in \mathbb{Z}_m$, $[a * (b + c)] \bmod m = (a * b + a * c) \bmod m$ y $[(a + b) * c] \bmod m = (a * c + b * c) \bmod m$.

Por lo tanto, queda demostrado que $(\mathbb{Z}_m, +, *)$ tiene estructura de anillo.

Ejercicio 10.

Dar todos los elementos invertibles de \mathbb{Z}_6 .

$$\mathbb{Z}_6 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}\}.$$

Un elemento $a \in \mathbb{Z}_6$ es invertible si existe $b \in \mathbb{Z}_6$ tal que $(a * b) \bmod 6 = 1$.

Un elemento $a \in \mathbb{Z}_6$ es invertible si y sólo si $\text{mcd}(a, m) = 1$ (es coprimo con m).

$a=0$: $\text{mcd}(0, 6) = 6$.

$a=1$: $\text{mcd}(1, 6) = 1$.

$a=2$: $\text{mcd}(2, 6) = 2$.

$a=3$: $\text{mcd}(3, 6) = 3$.

$a=4$: $\text{mcd}(4, 6) = 2$.

$a=5$: $\text{mcd}(5, 6) = 1$.

En particular, los inversos de $\bar{1}$ y $\bar{5}$ son $\bar{1}$ y $\bar{5}$, respectivamente.

Por lo tanto, todos los elementos invertibles de \mathbb{Z}_6 son $\{\bar{1}, \bar{5}\}$.

Ejercicio 11.

Sea m un entero impar, probar que $m^2 \equiv_4 1$.

Si m es un entero impar, entonces:

$$m = 2k + 1, \text{ con } k \in \mathbb{Z}.$$

Elevando al cuadrado ambos lados de la ecuación anterior, se tiene:

$$\begin{aligned} m^2 &= (2k + 1)^2 \\ m^2 &= 4k^2 + 4k + 1 \\ m^2 &= 4(k^2 + k) + 1. \end{aligned}$$

Tomando la congruencia módulo 4, se tiene:

$$\begin{aligned} m^2 \bmod 4 &= [4(k^2 + k) + 1] \bmod 4 \\ m^2 \bmod 4 &= [4(k^2 + k)] \bmod 4 + 1 \bmod 4 \\ m^2 \bmod 4 &= 4 \bmod 4 * (k^2 + k) \bmod 4 + 1 \\ m^2 \bmod 4 &= 0 * (k^2 + k) \bmod 4 + 1 \\ m^2 \bmod 4 &= 0 + 1 \\ m^2 \bmod 4 &= 1 \\ m^2 &\equiv_4 1. \end{aligned}$$

Por lo tanto, queda demostrado que, dado un número impar m , $m^2 \equiv_4 1$.

Ejercicio 12.

Si \bar{a} es invertible, entonces, no es divisor de cero.

Si \bar{a} es invertible, entonces, existe $\bar{b} \in \mathbb{Z}_m$ tal que:

$$\bar{a} * \bar{b} = \bar{1}.$$

Ahora, se supone, por contradicción, que \bar{a} también es divisor de 0. Entonces, existe $\bar{c} \neq 0 \in \mathbb{Z}_m$ tal que:

$$\bar{a} * \bar{c} = \bar{0}.$$

Pre-multiplicando a ambos lados de la ecuación anterior por el inverso de \bar{a} (\bar{b}), se tiene:

$$\bar{b} * (\bar{a} * \bar{c}) = \bar{b} * \bar{0}.$$

Usando la propiedad asociativa, se tiene:

$$\begin{aligned}(\bar{b} * \bar{a}) * \bar{c} &= \bar{0} \\(\bar{a} * \bar{b}) * \bar{c} &= \bar{0}.\end{aligned}$$

Usando que \bar{b} es el inverso de \bar{a} , se tiene:

$$\begin{aligned}\bar{1} * \bar{c} &= \bar{0} \\\bar{c} &= \bar{0}.\end{aligned}$$

Lo cual contradice la suposición de que $\bar{c} \neq 0$.

Por lo tanto, queda demostrado que, si \bar{a} es invertible, entonces, no es divisor de cero.

Ejercicio 13.

Probar que $(t, m) = 1$ si y sólo si t es invertible módulo m .

Si $\text{mcd}(t, m) = 1$, entonces, por el teorema de Bézout, existen enteros x e y tales que $tx + my = 1$. Tomando la congruencia módulo m , se tiene:

$$\begin{aligned} tx + my &\equiv_m 1 \\ (tx + my) \bmod m &= 1 \\ tx \bmod m + my \bmod m &= 1 \\ tx \bmod m + m \bmod m * y \bmod m &= 1 \\ tx \bmod m + 0 * y \bmod m &= 1 \\ tx \bmod m + 0 &= 1 \\ tx \bmod m &= 1 \\ tx &\equiv_m 1. \end{aligned}$$

Por lo tanto, t es invertible módulo m .

Si t es invertible módulo m , entonces, existe $t' \in \mathbb{Z}_m$ tal que $tt' \equiv_m 1$, lo que implica que $tt' = mk + 1$, para algún $k \in \mathbb{Z}$. La ecuación $tt' - mk = 1$ es una combinación lineal de t y m que da como resultado 1. Por lo tanto, por el teorema de Bézout, $\text{mcd}(t, m) = 1$.

Por lo tanto, queda demostrado que $(t, m) = 1$ si y sólo si t es invertible módulo m .

Ejercicio 14.

Si p es primo, entonces, \mathbb{Z}_p es un cuerpo.

$$\mathbb{Z}_p = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \dots, \bar{p-1}\}.$$

La terna ordenada $(\mathbb{Z}_p, +, *)$ tiene estructura de cuerpo si $(\mathbb{Z}_p, +)$ es un grupo conmutativo, si el producto es cerrado, asociativo, tiene un elemento neutro y es conmutativo y si todo elemento no nulo tiene un inverso multiplicativo.

Cerradura de la suma: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}_p$, $(a + b) \bmod p \in \mathbb{Z}_p$.

Asociatividad de la suma: La operación $+$ en \mathbb{Z}_p es asociativa porque se cumple que, para cada $a, b, c \in \mathbb{Z}_p$, $[(a + b) + c] \bmod p = [a + (b + c)] \bmod p$.

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

Inversos aditivos: Un elemento $a \in \mathbb{Z}_p$ tiene inverso si existe $a' \in \mathbb{Z}_p$ tal que $(a + a') \bmod p = (a' + a) \bmod p = e$. En particular, para todo $a \in \mathbb{Z}_p$, su inverso es $a' = (p - a) \in \mathbb{Z}_p$, por lo que existe inverso para todo $a \in \mathbb{Z}_p$.

Comutatividad de la suma: La operación $+$ en \mathbb{Z}_p es conmutativa porque se cumple que, para cada $a, b \in \mathbb{Z}_p$, $(a + b) \bmod p = (b + a) \bmod p$.

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

Cerradura del producto: Para cada $a, b \in \mathbb{Z}_p$, $(a * b) \bmod p \in \mathbb{Z}_p$.

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

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

Comutatividad del producto: La operación $*$ en \mathbb{Z}_p es conmutativa porque se cumple que, para cada $a, b \in \mathbb{Z}_p$, $(a * b) \bmod p = (b * a) \bmod p$.

Inversos multiplicativos: Como p es primo, para todo $a \in \mathbb{Z}_p \setminus \{0\}$, $\text{mcd}(a, p) = 1$. Por el teorema de Bézout, existen enteros x e y tales que $ax + py = 1$. Tomando la congruencia módulo p , se tiene que $ax + py \equiv_p 1 \Leftrightarrow ax \equiv_p 1$, lo que implica que x es el inverso multiplicativo de a módulo p . Por lo tanto, todo elemento no nulo de \mathbb{Z}_p tiene un inverso multiplicativo.

Por lo tanto, queda demostrado que, si p es primo, entonces, $(\mathbb{Z}_p, +, *)$ es un cuerpo.