

Academia Sabatina de Jóvenes Talento

Ecuaciones Diofánticas

Clase #4

Encuentro: 19

Curso: Ecuaciones Diofánticas

Fecha: 31 de agosto de 2024

Nivel: 5

Semestre: II

Instructor: Kenny Jordan Tinoco

Instructor Aux: Gema Tapia

Contenido: Método de Congruencia

En esta sesión de clase se sigue con los métodos básico para la resolución de ecuaciones diofánticas, en concreto con el método de congruencia, el cual nos permite utilizar las propiedades de divisibilidad para hallar posibles soluciones de una ecuación.

1. Desarrollo

La congruencia en enteros es una poderosa herramienta en la solución de ecuaciones diofánticas, usualmente aplicaremos este método para probar que ciertas ecuaciones son insolubles o bien deducir condiciones que las soluciones deben cumplir. Ahora, vemos algunas definiciones.

Definición 1.1 (Divisibilidad). Si a y b son enteros, se dice que a divide a b o que b es múltiplo de a si $b = aq$ para algún entero q , y se denota por $a \mid b$.

Definición 1.2 (Congruencias). Dados dos enteros a , b y un entero positivo m , decimos que a es congruente con b módulo m si $(a - b)$ es múltiplo de m . En este caso escribimos $a \equiv b \pmod{m}$.

Es decir, tenemos $a \equiv b \pmod{m} \iff m \mid (a - b)$. Con esto, podemos deducir y demostrar el siguiente teorema.

Teorema 1.1 (Propiedades de Congruencias). Sean los enteros a, b, c, d y $m \geq 1$.

1. Si $a \equiv c \pmod{m}$ y $c \equiv d \pmod{m}$, entonces $a \equiv d \pmod{m}$.
2. Si $a \equiv c \pmod{m}$ y $b \equiv d \pmod{m}$, entonces $ab \equiv cd \pmod{m}$.
3. Si $a \equiv c \pmod{m}$, entonces $a^n \equiv c^n \pmod{m}$ para todo entero positivo n .
4. Si $ab \equiv bc \pmod{m}$, entonces $a \equiv c \pmod{\frac{m}{d}}$ donde $d = \text{mcd}(b, m)$.

Ejemplo 1.1. Hallar el resto cuando 6^{1987} es dividido por 37.

Solución. Como $6^2 = 36 = 37 - 1$ es claro que $6^2 \equiv -1 \pmod{37}$. Así al considerar $6^{1987} = 6 \cdot 6^{1986} = 6 \cdot (6^2)^{993}$ tenemos que $6^{1987} \equiv 6(-1)^{993} \equiv -6 \equiv 31 \pmod{37}$. Por lo cual, el resto de la división de 6^{1987} por 37 es 31. ■

Definición 1.3 (Función phi de Euler). Para cualquier entero n se denota a $\varphi(n)$ como cantidad de números de coprimos menores a n .

Teorema 1.2 (Teorema de Euler). Si a y n son dos enteros positivos primos relativos entre si, entonces $a^{\varphi(n)} \equiv 1 \pmod{n}$.

Teorema 1.3 (Pequeño teorema de Fermat). Si p es primo y a es un entero primo relativo con p , entonces $a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p}$.

Es claro que el teorema de Fermat es un caso concreto del teorema de Euler, de la propia definición de números primos se deduce que un primo p tiene exactamente $(p-1)$ primos relativos, luego el resultado es evidente.

De estas definiciones y teoremas se obtienen ciertos restos especiales, conocidos como restos potenciales respecto a un módulo, quizás los más famosos serían los restos cuadráticos, veamos algunos de ellos.

$$\begin{array}{lll} x^2 \equiv 0, 1 \pmod{3} & x^2 \equiv 0, 1, 4 \pmod{8} & x^3 \equiv 0, \pm 1 \pmod{7} \\ x^2 \equiv 0, 1 \pmod{4} & x^2 \equiv 0, 1, 4, 9 \pmod{16} & x^4 \equiv 0, 1 \pmod{16} \\ x^2 \equiv 0, \pm 1 \pmod{5} & x^3 \equiv 0, \pm 1 \pmod{9} & x^5 \equiv 0, \pm 1 \pmod{11} \end{array}$$

Estos restos pueden ser probados fácilmente, algunos son resultados inmediatos de teoremas como Fermat o Euler, así mismo, se puede considerar el conjunto de residuos de cada módulo y luego investigar el comportamiento de las potencias. Veamos un ejemplo.

Ejemplo 1.2. Probar que para todo entero x se tiene $x^2 \equiv 0, 1 \pmod{4}$.

Solución. Cuando $x = 2x_1$, entonces $x^2 = 4x_1^2 \equiv 0 \pmod{4}$. Ahora, es claro que $\varphi(4) = 2$, aplicando Euler tenemos $x^2 \equiv 1 \pmod{4}$. ■

Se deja como ejercicio al lector probar los demás restos potenciales.

Ejemplo 1.3. Hallar todos los enteros x, y tal que $15x^2 - 7y^2 = 9$.

Solución 1. Analizando la ecuación en módulo 3 tenemos que $-7y^2 \equiv 0 \pmod{3}$, es claro que y es múltiplo de 3, es decir $y = 3y_1$. Por tanto,

$$15x^2 - 7(9y_1^2) = 9 \iff 5x^2 - 7(3y_1^2) = 3$$

donde en módulo 3 obtenemos que x también es múltiplo 3, es decir $x = 3x_1$. Esto es,

$$5(9x_1^2) - 7(3y_1^2) = 3 \iff 5(3x_1^2) - 7y_1^2 = 1 \iff 15x_1^2 - 7y_1^2 = 1.$$

Al analizar la última ecuación en módulo 3 obtenemos que $y_1^2 \equiv -1 \pmod{3}$, lo cual no es resto cuadrático en módulo 3. Luego, la ecuación no tiene soluciones. ■

Solución 2. Analizando en módulo 5 tenemos que $-7y^2 \equiv 1 \pmod{5}$ por lo cual¹ $y^2 \equiv 3 \pmod{5}$, este resto no es posible en módulo 5. Luego, la ecuación no tiene soluciones enteras. ■

¹¿Podés justificar el porqué?

1.1. Ejercicios y problemas

Ejercicios y problemas para el autoestudio.

Ejercicio 1. Hallar los restos cuadráticos en módulo 13.

Ejercicio 2. Hallar los enteros positivos a, b tales que $a^2 - 3b^2 = 8$.

Ejercicio 3. ¿Existen enteros positivos x, y tal que $x^3 = 2^y + 15$?

Ejercicio 4. Probar que la ecuación $x^2 + 3xy - 2y^2 = 122$ no tiene soluciones enteras

Ejercicio 5. Demostrar que la ecuación $x^2 - 7y = 3$ no tiene soluciones enteras.

Ejercicio 6. Demostrar que no hay enteros para los cuales $800000007 = x^2 + y^2 + z^2$.

Ejercicio 7. Hallar las soluciones enteras de la ecuación $x^2 - 5y^2 = 2$.

Ejercicio 8. Hallar las soluciones de enteros positivos tal que $a^3 + 2b^3 + 4c^3 = 9d^3$.

Ejercicio 9. Probar que la ecuación $x^3 + 3y^3 + 9z^3 - 9xyz = 0$ solo tiene la solución entera $(x, y, z) = (0, 0, 0)$.

Ejercicio 10. Probar que las ecuaciones

1. $6x^3 + 3 = y^6$

2. $x^3 + y^3 + 4 = z^3$

no tiene soluciones para enteros positivos x, y, z .

Ejercicio 11. Encontrar todas las soluciones (p, q) de números primos tales que

$$p^3 - q^5 = (p + q)^2.$$

Ejercicio 12. Demostrar que 7 divide a $3^{2n+1} + 2^{n+2}$ para todo natural n .

Ejercicio 13. Hallar un número infinito de enteros n tal que $7 \mid 2^n + 27$.

Ejercicio 14. Si $r_k = 8^k + 6^k$, hallar el resto de la división de a_{83} entre 49.

Problema 1.1. Probar que la ecuación $(x+1)^2 + (x+2)^2 + \cdots + (x+99)^2 = y^z$ no tiene soluciones enteras (x, y, z) con $z > 1$.

Problema 1.2. Determinar todos los primos p para los cuales el sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} p + 1 = 2x^2 \\ p^2 + 1 = 2y^2 \end{cases}$$

tiene soluciones enteras (x, y) .

Problema 1.3. Probar que la ecuación $x^5 - y^2 = 4$ es insoluble en los enteros.

Problema 1.4. Si n es un entero positivo tal que la ecuación $x^3 - 3xy^2 + y^3 = n$ tiene tres soluciones enteras (x, y) . Probar que la ecuación es insoluble cuando $n = 2891$.

Problema 1.5. Determinar las posibles soluciones enteras no negativas $(x_1, x_2, \dots, x_{14})$ de la ecuación $x_1^4 + x_2^4 + \cdots + x_{14}^4 = 15999$.

2. Problemas propuestos

Se asigna como **tarea** los problemas de esta sección. El estudiante debe entregar sus soluciones en la siguiente sesión de clase (también se pueden entregar borradores). Recordar realizar un trabajo claro, ordenado y limpio.

Ejercicio 15. Probar que para todo entero x se tiene $x^5 \equiv 0, \pm 1 \pmod{11}$.

Problema 2.1. Si se cumple que $n \equiv 4 \pmod{9}$, probar que la ecuación

$$x^3 + y^3 + z^3 = n$$

no tiene soluciones enteras.

Problema 2.2. Probar que la ecuación

$$(a + 2023)^2 + (a + 2022)^2 + \cdots + (a + 1)^2 = b^2$$

no es soluble en enteros a, b .

3. Extra

Problemas para **puntos extras en la nota final** del curso. Los problemas extras se califican de manera distinta a los problemas propuestos.

Problema 3.1. Hallar los pares (a, b) de enteros positivos tales que satisfacen la ecuación $a^{b^2} = b^a$.

Referencias

- [BDMS98] Hugo Barrantes, Pedro Díaz, Manuel Murillo, and Alberto Soto. *Introducción a la Teoría de Números*. Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica, 1998.
- [Tin22] Kenny Tinoco. Ecuaciones diofánticas. Clase 6. Método de congruencias de números enteros. *Academia Sabatina de Jóvenes Talento*. Nicaragua, Septiembre 2022.

En caso de consultas

Instructor: Kenny J. Tinoco
Teléfono: +505 7836 3102 (*Tigo*)
Correo: kenny.tinoco10@gmail.com

Instructor: Gema Tapia
Teléfono: +505 8825 1565 (*Claro*)
Correo: gematapia97@gmail.com

4. Plan de clase

4.1. ¿Qué?

Mostrar el uso de congruencias en enteros para la solución de ecuaciones diofánticas, dando énfasis en cómo las congruencias nos permiten probar que algunas ecuaciones son insolubles. También, su utilidad para obtener información de las soluciones, por medio de condiciones que deben cumplirse.

4.2. ¿Cómo?

Problema para motivar el tema.

Act. 1 [Ejercicio 2][10 min]. Hallar los enteros positivos a, b tales que $a^2 - 3b^2 = 8$. *Primero dar tiempo para intentar resolverlo por medio de los métodos factorización, desigualdades y parametrización. Dar énfasis en la dificultad que esto conlleva. Para resolverlo, solo basta analizar la ecuación en módulo 3.*

Dar una pequeña introducción a congruencias. Explicar qué son las congruencias potenciales.

Act. 2 [Prop. 6][10 min]. Probar que para todo entero x se tiene $x^3 \equiv 0, \pm 1 \pmod{9}$. *Probarlo utilizando un análisis de cada cubo en módulo 9. Señalar que aquí no se puede usar los teoremas de Euler o Fermat*

Act. 3 [Ejercicio 1][15 min]. Ejercicio para los estudiantes. *Pasar a la pizarra.*

Act. 4 [Ejercicio 7][8 min]. Ejercicio para los estudiantes. *Este también se resuelve con un análisis en módulo 3.*

Act. 5 [Ejercicio 3][15 min]. Ejemplo. *Se señala como usar los retos cúbicos, dar una comparación del uso en módulo 9 y en módulo 7. Para resolverlo, solo basta analizar en módulo 7 y notar que las potencias de 2 tienen un patrón de 1, 2 y 4 en módulo 7, lo cual hace imposible que x^3 sea resto cúbico en módulo 7. Luego, no hay soluciones.*

Act. 6 [Ejercicio 8][10 min]. Ejercicio para los estudiantes. *Se analiza la ecuación en módulo 9, obteniendo $a^3 + 2b^3 + 4c^3 \equiv 0 \pmod{9}$ lo cual no es posible porque no se puede formar una combinación con 0, -1 y 1 (que son los restos cúbico módulo 9) de tal manera que se obtenga cero.*

Act. 7 [Problema 1][20 min]. Ejemplo. *Se hace la sustitución $x = w - 49$, con lo cual la ecuación se reduce a una cuadrática con ciertos coeficientes. Notar que la ecuación debe ser múltiplo de 3 y por tanto múltiplo de una potencia de 3, luego señalar que una parte de la ecuación no cumple esto, por tanto, no hay soluciones.*

Act. 8 [Ejercicio 9][8 min]. Ejercicio para los estudiantes (para finalizar la clase). *Se resuelve con un análisis en módulo 9.*

Preguntas claves: ¿me entendieron? ¿me salté algún tema? ¿se dio tiempo suficiente para pensar los problemas? ¿participaron? ¿problemas muy fáciles o muy difíciles, demasiados o muy pocos? ¿mis explicaciones/ejemplos fueron suficientes o buenos?

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.