

Notas para el curso de Teoría de números

Programa del curso

A lo largo del curso, estudiaremos el problema de representar un número primo de la forma $x^2 + ny^2$ con x e y números enteros. Buscando darle respuesta a esta pregunta, nos encontraremos con dos temas que nos serán de ayuda: leyes de reciprocidad y formas cuadráticas binarias. El curso estará dividido en cinco partes.

Comenzaremos estudiando propiedades básicas de los números enteros, como divisibilidad y la relación de congruencia que se puede derivar de ella, e introduciremos algunas estructuras algebraicas, como anillos conmutativos y grupos finitos; no estudiaremos estas estructuras en profundidad, pero nos servirán para formular y enmarcar varios de los resultados que se presentarán. Específicamente, usaremos las definiciones como nombres, para poder hablar de los anillos de enteros modulares $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$, los anillos $\mathbb{Z}[\sqrt{-1}]$ y $\mathbb{Z}\left[\frac{-1+\sqrt{-3}}{2}\right]$ y sus grupos de unidades (elementos inversibles).

Usando los conceptos introducidos, en una segunda parte, relacionaremos la ecuación $p = x^2 + ny^2$ con la Ley de reciprocidad cuadrática, uno de los resultados fundamentales de Teoría de números. Daremos algunas aplicaciones y veremos las limitaciones de esta herramienta.

Luego de demostrar este resultado, volveremos sobre el problema inicial y lo pondremos en el contexto más general de formas cuadráticas binarias. Estudiaremos, específicamente, formas cuadráticas definidas positivas, introduciendo los conceptos de equivalencia propia, clase y género de una forma cuadrática, composición y grupo de clases. Esta teoría nos permitirá dar una respuesta satisfactoria al problema en algunos casos especiales, pero dejará de manifiesto sus limitaciones.

La última parte del curso estará dedicada a las leyes de reciprocidad cúbica y bicuadrática, las cuales nos permitirán dar un paso más en la dirección de la resolución del problema.

Una respuesta completa a la pregunta de bajo qué condiciones la ecuación $p = x^2 + ny^2$ tiene solución (en \mathbb{Z}) viene dada de la mano de la Teoría de cuerpos de clases. No es el objetivo del curso entrar en ese tema, sino presentar los conceptos básicos para poder encarar temas más avanzados dentro del área.

Estas notas están basadas, principalmente, en dos referencias: los libros *Primes of the form $x^2 + ny^2$* de David A. Cox [Cox22] y *A Classical Introduction to Modern Number Theory* de Kenneth Ireland y Michael Rosen [IR90]. El material que presentamos se puede encontrar en el capítulo 1, secciones 1 a 4 de [Cox22] y los capítulos 1 a 9 de [IR90].

Hemos incluido una gran cantidad de ejercicios, tomados de estas y otras referencias, que exploran en mayor profundidad algunos de los temas que veremos, como también otros temas que se pueden abordar usando los conceptos desarrollados durante el curso.

Salvo talvez algunos puntos de la presentación, no hay, esencialmente, nada novedoso en estas notas. Ojalá las fallas y omisiones de estas notas no constituyan un obstáculo.

Introducción

A mediados del siglo XVII, Pierre de Fermat realizaba observaciones como las siguientes: si p es un primo impar que

- excede en 1 un múltiplo de 4, entonces existen enteros x e y tales que $p = x^2 + y^2$;
- excede en 1 o 3 un múltiplo de 8, entonces existen enteros x e y tales que $p = x^2 + 2y^2$;
- excede en 1 un múltiplo de 3, entonces existen enteros x e y tales que $p = x^2 + 3y^2$.

En un lenguaje un poco más moderno, Fermat afirmaba que,

- si p es congruente con 1 módulo 4, entonces p es de la forma $x^2 + y^2$;
- si p es congruente con 1 o 3 módulo 8, entonces p es de la forma $x^2 + 2y^2$;
- si p es congruente con 1 módulo 3, entonces p es de la forma $x^2 + 3y^2$.

En general, se preguntaba, dado un entero n ¿qué primos p se pueden expresar en la forma $x^2 + ny^2$, con x e y enteros?

La primera persona de la que queda registro que intentó dar demostraciones de las observaciones de Fermat fue Leonhard Euler. Trabajando para alcanzar dicho objetivo, Euler descubrió lo que conocemos por el nombre de Ley de reciprocidad cuadrática. Si bien no logró demostrar este resultado, consiguió demostrar algunas de las afirmaciones de Fermat, como también formular algunas conjeturas similares propias cuando $n > 3$. Euler afirmaba, por ejemplo, que, si p es un primo impar, entonces

- p es de la forma $x^2 + 5y^2$, si y sólo si p es congruente con 1 o 9 módulo 20;
- p es de la forma $x^2 + 27y^2$, si y sólo si p es congruente con 1 módulo 3 y 2 es congruente con un cubo módulo p .

El siguiente avance vino de la mano de Joseph-Louis Lagrange, quien llevó adelante el estudio de formas cuadráticas definidas positivas. Lagrange introdujo los conceptos de forma reducida, número de clases, género de una forma cuadrática. Estas ideas permiten dar respuesta a las conjeturas de Euler para $n = 5$ y otros casos similares. Pero la teoría de géneros tiene sus limitaciones.

Se le atribuye a Adrien-Marie Legendre la introducción de ideas rudimentarias acerca de la composición de formas cuadráticas. Pero es Carl Friedrich Gauss quien establece la relación entre la teoría de géneros y composición de formas cuadráticas. De esta manera, Gauss muestra que en el conjunto de formas cuadráticas existe una estructura algebraica subyacente. En relación con este trabajo, Gauss demuestra la Ley de reciprocidad cuadrática y formula las leyes de reciprocidad cúbica y bicuadrática. Esto último permite dar respuesta a dos de los casos del problema de Fermat que las ideas anteriores no lograban alcanzar: los casos $n = 27$ y $n = 64$. Si bien este avance puede parecer

insignificante, resultó ser de gran relevancia, pues abrió el camino al estudio de leyes de reciprocidad de orden superior.

Para dar una idea del intervalo de tiempo en que ocurrieron estos avances, las observaciones de Fermat se pueden fechar alrededor del año 1640. Las demostraciones por parte de Euler de algunas de dichas afirmaciones consisten en dos partes: por un lado, profundizar una idea de Fermat, *descenso* y, por otro lado, *reciprocidad*. El trabajo de Euler abarca, aproximadamente, el período que va del año 1730 al año 1772; pasaron ya más de 130 años desde que Fermat primero estudió el problema de representar un primo como suma de dos cuadrados. La primera publicación de *Disquisitiones arithmeticae* de Gauss data del año 1801. En el interim, ocurrió el desarrollo de la teoría de formas cuadráticas por Lagrange y Legendre. En este sentido, mencionamos los trabajos *Recherches d'arithmétique*, de Lagrange (publicado entre 1773 y 1775), y *Théorie des nombres*, de Legendre (publicado en 1798 y cuya última versión es de 1830). En este trabajo, Legendre introduce el nombre de “forma cuadrática” para referirse a expresiones del tipo $ax^2 + bxy + cy^2$ y para distingurlas de las “formas lineales”, del tipo $mx + a$.

Las fechas anteriores dan una aproximación del marco temporal en el que ocurrieron estos avances. Para más detalles, referimos a la introducción y la § 1 del libro de Cox [Cox22].

Parte I

Divisibilidad y congruencia

1 Divisibilidad

En el fondo, Teoría de números es el estudio de los números naturales –los números 1, 2, 3, ...– y sus propiedades.

Definición 1.1. Un número natural a *divide* a un número natural b , si existe un número natural c tal que $ac = b$; en tal caso, escribimos $a \mid b$.

Teorema 1.2 (Propiedades básicas de la división). *Sean a, b y c números naturales (en particular $a, b, c > 0$). Entonces,*

- (i) $a \mid b$ implica $a \mid bc$;
- (ii) $a \mid b$ y $b \mid c$ implican $a \mid c$;
- (iii) $a \mid b$ y $a \mid c$ implican $a \mid bx + cy$, para todo par de números naturales x e y ;
- (iv) $a \mid b$ y $b \mid a$ implican $a = b$;
- (v) $a \mid b$ implica $a \leq b$;
- (vi) $a \mid b$ es equivalente a $ma \mid mb$, para todo natural m .

Corolario 1.3. *Si b es un número natural ($\neq 0$), existe otro natural x tal que $x \nmid b$; si a es un natural y $a \neq 1$, existe otro natural x tal que $a \nmid x$.*

Teorema 1.4 (Algoritmo de división). *Dados números naturales a y b , si $b \geq a$, entonces*

- (A) $a \mid b$ y existe un único natural q tal que $b = qa$, o bien
- (B) existen únicos naturales q y r tales que $b = qa + r$ y $1 \leq r < a$.

Demostración. El conjunto $\{b - ta : t \text{ natural}, ta \leq b\}$ es finito. Si $a \nmid b$, este conjunto está contenido en los naturales y, por lo tanto, tiene un primer elemento, r ($\neq 0$). Se cumple $r < a$ y $r = b - qa$ para cierto natural q . Si $b = qa + r = q_1a + r_1$ con $1 \leq r, r_1 < a$, asumiendo $r < r_1$, se ve que $1 \leq r_1 - r < a$ y que $r_1 - r = (q_1 - q)a$ es divisible por a , contradiciendo (v) del Teorema 1.2. \square

Definición 1.5. Dados naturales a, b y c , decimos que a es un *divisor común* de b y de c , si $a \mid b$ y $a \mid c$. El *máximo común divisor* de b y c , es el supremo de los divisores comunes de b y de c ; escribimos (b, c) para denotar el máximo común divisor de b y c .

Observación 1.6. El conjunto de divisores de un natural es un conjunto finito. En particular, es finito el conjunto de divisores comunes de dos naturales y, por lo tanto, debe existir un elemento de valor absoluto máximo dentro de este conjunto; dicho elemento es único y ≥ 1 .

Teorema 1.7 (Identidad de Bézout). Si $g = (b, c)$, existen enteros x e y tales que

$$g = bx + cy.$$

Demostración. Sea \mathcal{C} el conjunto de números enteros de la forma $bx + cy$, donde $x, y \in \mathbb{Z}$. Se cumple que $0 \in \mathcal{C}$ y que existe $l \in \mathcal{C}$ positivo y mínimo entre los elementos positivos de \mathcal{C} (**ejercicio**). Este elemento es un número natural, se escribe como $l = bx + cy$ para ciertos $x, y \in \mathbb{Z}$ y es $l \leq b, c$.

Veamos que $l \mid b$ que $l \mid c$. Si $l \nmid b$, por Algoritmo de división (Teorema 1.4), existirían (únicos) naturales q y r tales que $b = lq + r$, $1 \leq r < l$. Pero, entonces

$$r = b - lq = b - (bx + cy)q = b(1 - qx) + c(-yq)$$

pertenecería a \mathcal{C} , sería positivo y estrictamente menor que l , lo que es absurdo. Por lo tanto, $l \mid b$. Análogamente, $l \mid c$.

Por otro lado, si d es un divisor común de b y de c , entonces $d \mid bx + cy = l$ y $d \leq l$. En consecuencia, el máximo común divisor de b y c debe ser $g = l$. \square

Corolario 1.8. Sean b y c números naturales. Las siguientes propiedades sobre un número natural g son equivalentes:

- (a) g es el menor natural de la forma $bx + cy$ con $x, y \in \mathbb{Z}$;
- (b) g es un divisor común de b y de c y es divisible por cualquier otro divisor común;
- (c) g es el máximo común divisor de b y c .

Teorema 1.9 (Propiedades del máximo común divisor). Sean a, b, c y d números naturales. Entonces,

- (i) $(ma, mb) = m(a, b)$, para todo natural m ;
- (ii) si $d \mid a$ y $d \mid b$, entonces $(a/d, b/d) = (a, b)/d$;
- (iii) $(a, b) = (a, b - ax)$, para todo entero x tal que $ax < b$;
- (iv) $(a, b) = (b, a)$;
- (v) si $c \mid ab$ y $(b, c) = 1$, entonces $c \mid a$.

Ejercicios

Ejercicio 1.1. Extender la relación de divisibilidad a los enteros y demostrar propiedades análogas. En particular, mostrar que existe un algoritmo de división correspondiente; probar que $a \mid b$, si y sólo si $r = 0$.¹

Ejercicio 1.2. Dados naturales a y b , sea $r_a(b)$ el resto de la división de b por a , es decir, a divide a $b - r_a(b)$ y $0 \leq r_a(b) < a$. Probar las siguientes propiedades de $r = r_a$:

¹Hint: Si $a, b \in \mathbb{Z}$ y $a \neq 0$, existe un único par $q, r \in \mathbb{Z}$ tal que $b = qa + r$ y $0 \leq r < |a|$.

- (i) para todo natural b , $r(r(b)) = r(b)$;
- (ii) para todo par de naturales b y c , $r(b + c) = r(r(b) + r(c))$;
- (iii) para todo par de naturales b y c , $r(bc) = r(r(b)r(c))$.

Ejercicio 1.3. Extender la noción de máximo común divisor a los enteros ¿Es cierto que todo par de enteros admite un máximo divisor común? Probar propiedades análogas. En particular, demostrar

- (i) que, si $b, c \in \mathbb{Z}$ y $g = (b, c)$ denota el máximo común divisor, existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $g = bx + cy$;
- (ii) que las caracterizaciones del Corolario 1.8 siguen siendo válidas;
- (iii) que, dados $b, c \in \mathbb{Z}$, siempre que exista, $(b, c) = (b, -c) = (b, c + bx)$, para todo $x \in \mathbb{Z}$.

Ejercicio 1.4. Hallar el máximo común divisor de los siguientes pares de enteros y expresarlo como combinación lineal entera de ellos:

- 7469 y 2464,
- 2689 y 4001,
- 2947 y 3997,
- 1109 y 4999,
- 1819 y 3587.

Ejercicio 1.5 (Algoritmo de Euclides para hallar el máximo común divisor). Dados $b, c \in \mathbb{Z}$, $c > 0$, se definen las sucesiones siguientes:

$$r_{-1} = b, \quad r_0 = c, \quad r_i = r_{i-2} - q_i r_{i-1},$$

si $i \geq 1$, de manera que $r_{i-1} = 0$ o bien $0 \leq r_i < r_{i-1}$, y, luego,

$$\begin{aligned} x_{-1} &= 1, \quad x_0 = 0, \quad x_i = x_{i-2} - q_i x_{i-1} \quad (i \geq 1), \\ y_{-1} &= 0, \quad y_0 = 1, \quad y_i = y_{i-2} - q_i y_{i-1} \quad (i \geq 1). \end{aligned}$$

Entonces, si j es tal que $r_{j+1} = 0$ y $r_j \neq 0$ (último resto no nulo), se cumple que

$$(b, c) = r_j = bx_j + cy_j.$$

Ejercicio 1.6. Hallar, si existen, $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que

- $423x + 198y = 9$,
- $71x - 50y = 1$,

- $43x + 64y = 1$,
- $93x - 81y = 3$,
- $6x + 10y + 15z = 1$.

Ejercicio 1.7. Probar que, dados $b, c \in \mathbb{Z}$, no ambos nulos, la ecuación $bx + cy = k$ tiene solución, si y sólo si $(b, c) \mid k$. Describir el conjunto solución.² Generalizar a una cantidad arbitraria de enteros (ver el Ejercicio 1.8).

Ejercicio 1.8. Extender la noción de máximo común divisor a enteros $b_1, \dots, b_n, n \geq 1$. Probar:

- (i) el análogo del Teorema 1.7;
- (ii) propiedades análogas a las del Teorema 1.9 (en particular, probar que $(b_1, \dots, b_n) = (b_{\sigma 1}, \dots, b_{\sigma n})$, para toda permutación σ de $\{1, \dots, n\}$);
- (iii) que $(b_1, \dots, b_n) = ((b_1, \dots, b_{n-1}), b_n) = ((b_1, \dots, b_j), (b_{j+1}, \dots, b_n))$.

Ejercicio 1.9. En el Algoritmo de Euclides (Ejercicio 1.5), si $j \geq 0$ es tal que $r_{j+1} = 0$ y $r_j \neq 0$, probar que

- (i) si $-1 \leq i \leq j+1$, entonces $(-1)^i x_i \leq 0$ y $(-1)^i y_i \geq 0$;
- (ii) si $0 \leq i \leq j$, entonces $|x_{i+1}| = |x_{i-1}| + q_{i+1}|x_i|$ y que $|y_{i+1}| = |y_{i-1}| + q_{i+1}|y_i|$;
- (iii) si $0 \leq i \leq j+1$, entonces $x_{i-1}y_i - x_iy_{i-1} = (-1)^i$;
- (iv) si $-1 \leq i \leq j+1$, entonces $(x_i, y_i) = 1$;
- (v) si $g = (b, g)$, entonces $|x_{j+1}| = c/g$ y $|y_{j+1}| = b/g$;
- (vi) $|x_j| \leq c/(2g)$ y que se cumple $|x_j| = c/(2g)$, si y sólo si $q_{j+1} = 2$ y $x_{j-1} = 0$; de manera similar, $|y_j| \leq b/(2g)$.

2 Primos

Definición 2.1. Un número natural $n > 1$ se dice *primo*, si no posee *divisores propios*, es decir, no existe número natural d que cumpla simultáneamente que $d \mid n$ y que $1 < d < n$.

Teorema 2.2. *Todo número natural $n > 1$ es producto de números primos.*

Demostración. No existen naturales entre 1 y 2. En particular, 2 es primo. Si $n > 2$, o bien n es primo, o bien posee divisores propios. Si $d \mid n$ y $1 < d < n$ es un divisor propio, el natural $m = n/d$ satisface $1 < m < n$ y $md = n$. Inductivamente, m y d son productos de primos y, por lo tanto, también lo es n . \square

²Hint: si (x, y) y (x_1, y_1) son soluciones, entonces $b'(x - x_1) + c'(y - y_1) = 0$, donde $b' = b/(b, c)$ y $c' = c/(b, c)$; notar que b' y c' son coprimos.

Definición 2.3. Si $n > 1$ no es primo, se dice que es *compuesto* (pues es producto de más de un factor primo).

Observación 2.4. Si a y p son números naturales y p es primo, entonces, o bien $p \mid a$, o bien $(a, p) = 1$, pues $g = (a, p)$, siendo un divisor de p (que es primo), es, o bien $g = 1$, o bien $g = p$.

Lema 2.5. Si a, b y p son números naturales, p es primo y $p \mid ab$, entonces $p \mid a$, o bien $p \mid b$. Más en general, si $p \mid a_1 \cdots a_k$, entonces $p \mid a_i$ para algún i .

Demostración. (ejercicio).³

□

Observación 2.6. Recíprocamente, si un número natural $p > 1$ posee la propiedad siguiente:

para todo par de números naturales a y b , $p \mid ab$ implica que $p \mid a$ o $p \mid b$,

entonces p es primo, pues, si $d \mid p$ es un divisor, se cumple que $1 \leq d \leq p$, luego $p = dm$, con lo que, aplicando la propiedad, o bien $p \mid d$, o bien $p \mid m$ y, por lo tanto,

- $p \mid d$ y $p = d$, por (iv) del Teorema 1.2 (y, así, $m = 1$), o bien
- $p \mid m$ y $m = np$ y, así, $p = dnp$, con lo que, cancelando, $dn = 1$ y $d = n = 1$.

Definición 2.7. Dado un natural $n > 1$, llamamos *factorización de n como producto de primos* a toda escritura de n como producto de factores primos únicamente (o, por abuso, primos a potencias).

Teorema 2.8 (Teorema fundamental de la Aritmética). Si $n > 1$ es un número natural, existe un *única factorización de n como producto de primos*, salvo por el orden de los factores.

Demostración. Que todo natural $n > 1$ se puede expresar como producto de primos es la conclusión del Teorema 2.2. Lo que resta probar es que dicha factorización es única, a menos de intercambiar el orden de los factores. Precisamente, si

$$n = p_1 \cdots p_r \quad \text{y} \quad n = q_1 \cdots q_s$$

son dos factorizaciones de n como producto de primos, entonces $r = s$ y los factores primos distintos que aparecen son los mismos y la cantidad de veces que cada uno de ellos aparece es igual en ambas factorizaciones.

Igualando $p_1 \cdots p_r = q_1 \cdots q_s$ y cancelando factores que aparecen a ambos lados de la igualdad, podemos suponer que ningún p_i está entre los q_j y viceversa. Pero, si t es un primo que divide a n , entonces $t \mid p_{i_0}$ para algún i_0 , con lo que $t = p_{i_0}$. Análogamente, $t = q_{j_0}$ para algún j_0 . Como consecuencia, $p_{i_0} = q_{j_0}$, contradiciendo la suposición. □

³Hint: Si $p \nmid a$, entonces existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $ax + py = 1$.

Ejercicios

Ejercicio 2.1. Consideremos el subconjunto $\mathcal{P} \subset \mathbb{N}$ conformado por los números naturales pares. Dados $a, b \in \mathcal{P}$, el producto ab también pertenece a \mathcal{P} . Podemos, entonces, definir una noción de divisibilidad en \mathcal{P} : decimos que a divide a b en \mathcal{P} , si existe $c \in \mathcal{P}$ talque $ac = b$. Podemos, por lo tanto, hablar de primos en \mathcal{P} : un elemento $p \in \mathcal{P}$ es *primo en \mathcal{P}* , si no posee *divisores propios en \mathcal{P}* , es decir, si no existe $d \in \mathcal{P}$ tal que d divide a p en \mathcal{P} y $d < p$. Con estas definiciones, probar que

- (i) los elementos 2, 6, 10, 14, ... y 30 son primos en \mathcal{P} , pero que 4, 8, 12, 16, ... y 28 no lo son, son *compuestos en \mathcal{P}* ;
- (ii) todo elemento de \mathcal{P} se puede escribir como producto de primos en \mathcal{P} ;
- (iii) existe un elemento de \mathcal{P} que admite más de una factorización en primos de \mathcal{P} (exhibir un ejemplo).

Ejercicio 2.2. Sea $A \subset \mathbb{C}$ el siguiente subconjunto de los números complejos:

$$A = \{x + y\sqrt{-6} : x, y \in \mathbb{Z}\}.$$

Probar que

- (i) $\mathbb{Z} \subset A$;
- (ii) si $\alpha, \beta \in A$, entonces $\alpha + \beta \in A$ y $\alpha\beta \in A$;
- (iii) si $\alpha \in A$, su conjugado, $\bar{\alpha}$, también pertenece a A .

Podemos, entonces, hablar de divisibilidad en A : α divide a β en A , si existe $\gamma \in A$ tal que $\alpha\gamma = \beta$.

Dado $\alpha = x + y\sqrt{-6} \in A$, definimos su *norma* como

$$N(\alpha) = x^2 + 6y^2.$$

Probar que

- (i) si $\alpha \in A$, entonces $N(\alpha) \in \mathbb{Z}$;
- (ii) para todo $\alpha \in A$, $N(\alpha) \geq 0$, $N(\alpha) = 0$, si y sólo si $\alpha = 0$ y $N(\alpha) = 1$, si y sólo si $\alpha = \pm 1$;⁴
- (iii) si $\alpha \in A$, entonces $N(\alpha) = \alpha\bar{\alpha}$;
- (iv) si $\alpha, \beta \in A$, entonces $N(\alpha\beta) = N(\alpha)N(\beta)$.

Con esto podemos definir una noción de divisor propio A : decimos que α divide *propia-mente* a β en A , si α divide a β en A y $N(\alpha) > 1$.

Un elemento $\gamma \in A$ es *primo en A* , si $N(\gamma) > 1$ y γ no posee divisores propios en A . Probar que

⁴ En cualquier otro caso, $N(\alpha) > 1$.

- (i) 2 y 5 son primos en A ;
- (ii) todo elemento de A se puede escribir como producto de primos en A ;
- (iii) existe un elemento de A que admite más de una factorización en primos de A (exhibir un ejemplo);
- (iv) $2 + \sqrt{-6}$ y $2 - \sqrt{-6}$ son primos en A .

Ejercicio 2.3. En este ejercicio veremos otra demostración del Teorema fundamental de la Aritmética (Teorema 2.8). Supongamos que el resultado es falso y sea n el menor natural para el cual existen dos factorizaciones distintas: $n = p_1 \cdots p_r = q_1 \cdots q_s$, donde los factores primos p_i no son los mismos que los q_j . Mostrar que

- (i) r y s son ambos > 1 y *ningún* p_i es igual a un q_j ;⁵
- (ii) si $p_1 < q_1$, entonces $N := (q_1 - p_1)q_2 \cdots q_r$ es $< n$;
- (iii) el número natural N definido en (ii) satisface $N = p_1(p_2 \cdots p_r - q_2 \cdots q_s)$;
- (iv) N admite dos factorizaciones distintas, contradiciendo la minimalidad de n .

Ejercicio 2.4. La cantidad de números primos es infinita.⁶

Ejercicio 2.5. Fijado un entero positivo k , existen k números naturales compuestos consecutivos.⁷

Ejercicio 2.6. La sumatoria sobre los recíprocos de los primos diverge. Específicamente, dado $y \geq 2$, la sumatoria

$$\sum_{p \leq y} \frac{1}{p} > \log \log y - 1. \quad (1)$$

En particular, hay infinitos primos. Separamos la demostración en distintos pasos:

- (i) probar que, si \mathcal{N} denota el conjunto de naturales n en cuya factorización sólo aparecen primos $p \leq y$, entonces⁸

$$\prod_{p \leq y} \left(1 + \frac{1}{p} + \frac{1}{p^2} + \cdots \right) = \sum_{n \in \mathcal{N}} \frac{1}{n};$$

- (ii) probar que, si $n \leq y$, entonces $n \in \mathcal{N}$ y los sumandos de $\sum_{n \leq y} \frac{1}{n}$ son sumandos de $\sum_{n \in \mathcal{N}} \frac{1}{n}$;

⁵Hint: Para esto último, usar la minimalidad de n .

⁶Hint: Tal vez la demostración más común de esto sea: asumir que la cantidad de primos es finita, p_1, \dots, p_k y considerar $n := 1 + p_1 \cdots p_k$.

⁷Hint: Si $2 \leq j \leq k+1$, entonces $j \mid (k+1)! + j$.

⁸ La suma de las potencias de $1/p$, p primo converge absolutamente, con lo que no hay problema en la definición del producto (finito) sobre los primos $p \leq y$.

(iii) probar que, si N es el mayor entero $\leq y$, entonces

$$\sum_{n=1}^N \frac{1}{n} \geq \int_1^{N+1} \frac{dx}{x} = \log(N+1) > \log y ;$$

(iv) deducir de (iii) que

$$\prod_{p \leq y} \left(1 - \frac{1}{p}\right)^{-1} > \log y ;$$

(v) usando la desigualdad $e^{v+v^2} \geq (1-v)^{-1}$, probar que

$$\sum_{p \leq y} \frac{1}{p} + \sum_{p \leq y} \frac{1}{p^2} > \log \log y ;$$

(vi) notar que $\sum_{p \leq y} \frac{1}{p^2} < 1$;⁹

(vii) deducir la desigualdad (1).

Ejercicio 2.7. Probar que

- todo entero de la forma $3k+2$ tiene un factor primo del mismo tipo;
- todo entero de la forma $4k+3$ tiene un factor primo del mismo tipo;
- todo entero de la forma $6k+5$ tiene un factor primo del mismo tipo.

Ejercicio 2.8. Dados $a, b, c, d, m, n, u, v \in \mathbb{Z}$ tales que $ad - bc = \pm 1$, $u = am + bn$ y $v = cm + dn$, se cumple que $(m, n) = (u, v)$.

Ejercicio 2.9. Si $n > 4$ es compuesto, entonces $n \mid (n-1)!$.

Ejercicio 2.10. Supongamos que $u, v \in \mathbb{Z}$ son coprimos ($(u, v) = 1$). Para todo $n \in \mathbb{Z}$, si $u \mid n$ y $v \mid n$, entonces $uv \mid n$. Esto no es cierto (existe un n para el cual no es cierto), si $(u, v) > 1$.

Ejercicio 2.11. Si $(u, v) = 1$, entonces $(u+v, u-v) \in \{1, 2\}$.

Ejercicio 2.12. Sea $p > 1$ un primo. Dado $n \in \mathbb{Z}$, $n \neq 0$, el *orden de n en p* es el número entero no negativo $v_p(n) = j$ que cumple $p^j \mid n$ pero $p^{j+1} \nmid n$. Probar que, si $a, b \in \mathbb{Z}$,

- $v_p(a+b) \geq \min\{v_p(a), v_p(b)\}$ y que, si $v_p(a) \neq v_p(b)$, entonces vale $=$;
- $v_p(ab) = v_p(a) + v_p(b)$ y la función v_p se extiende a $\mathbb{Q} \setminus \{0\}$ de una única manera posible de forma que esta igualdad valga para $a, b \in \mathbb{Q} \setminus \{0\}$.

Ejercicio 2.13. Sean $a, b, c, d \in \mathbb{Z}$ tales que $(a, b) = (c, d) = 1$. Si $\frac{a}{b} + \frac{c}{d} \in \mathbb{Z}$, entonces $b = \pm d$.

⁹Hint: Usando el criterio de comparación ($\sum_{n \geq 2} \frac{1}{n}$) y el criterio integral ($\int_1^\infty \frac{dx}{x^2} = 1$), por ejemplo.

3 Congruencias

Ejemplo 3.1. La ecuación $x^2 - 117x + 31 = 0$ no tiene soluciones enteras. Deben haber varias maneras de probar esto. Una de ellas es notar que 31 es primo y que, en consecuencia, si x fuese solución, entonces $x \in \{1, 31\}$, pero ninguno de estos números es una solución ¿Qué hubiese pasado con $x^2 - 117x + 2^{136.279.841} - 1$? ¿Es $2^{136.279.841} - 1$ primo? Si lo es, parece razonable que la ecuación no tenga solución en \mathbb{Z} ¿Si no lo fuese? Veamos una prueba alternativa de que no tiene solución. Calculando algunos valores del polinomio $f(x) = x^2 - 117x + 31$, se puede ver que todos los resultados que se obtienen son impares. Probemos, entonces, que $f(x)$ siempre es impar, si $x \in \mathbb{Z}$ (en particular, $f(x)$ nunca será cero, en ese caso). Para que $f(x)$ sea par, $x^2 - 117x = (x - 117)x$ debería ser impar, porque 31 es impar. En particular, x debería ser impar y $x - 117$ también. Pero, si x es impar, $x - 117$ es par. Absurdo.

Definición 3.2. Dados enteros a, b y $m, m \neq 0$, se dice que a es congruente a b módulo m , si m divide a $b - a$; expresamos esta condición por $a \equiv b \pmod{m}$.

Ejemplo 3.3. -17 y 5 son congruentes módulo 11 , pues $-17 - 5 = -22$, que es múltiplo de 11 . Es decir, $-17 \equiv 5 \pmod{11}$.

Ejemplo 3.4. Se cumple que $-117 \equiv 1 \pmod{2}$, $31 \equiv 1 \pmod{2}$ y $-117 \equiv 31 \pmod{2}$. También es cierto que $-117 \not\equiv 0 \pmod{2}$, $31 \not\equiv 0 \pmod{2}$ y que $1 \not\equiv 0 \pmod{2}$. Por otro lado, $-117 + 31 \equiv 0 \pmod{2}$ y $(-117)31 \equiv 1 \pmod{2}$.

Teorema 3.5. La condición $a \equiv b \pmod{m}$ determina, fijado m , una relación de equivalencia en \mathbb{Z} . Esta relación cumple, además, que

$$a \equiv c \pmod{m} \quad \text{y} \quad b \equiv d \pmod{m}$$

implican

$$ab \equiv cd \pmod{m} \quad \text{y, también,} \quad a + b \equiv c + d \pmod{m}.$$

Definición 3.6. Dado $m \in \mathbb{Z}, m \neq 0$, las clases de equivalencia en \mathbb{Z} determinadas por $a \equiv b \pmod{m}$ se denominan *clases de congruencia módulo m* y, a la relación, *relación de congruencia (módulo m)*.

Ejemplo 3.7. Las clases de congruencia módulo 2 separan a los enteros entre pares, $a \equiv 0 \pmod{2}$, e impares, $a \equiv 1 \pmod{2}$. Los enteros 0 y 1 representan cada una de las clases de congruencia módulo 2 ; los enteros 2 y 3 , también representan ambas clases de congruencia. Mientras que 0 y 3 representan clases distintas (y, por lo tanto, disjuntas), 0 y 2 representan la misma clase.

Ejemplo 3.8. Las clases de congruencia módulo 3 separan a los enteros entre aquellos cuyo resto de dividir por 3 es $0, 1$ o bien 2 : si $a \equiv b \pmod{3}$, entonces 3 divide a la diferencia $a - b$; si $a = 3k + r$ y $b = 3l + s$, entonces $a - b = 3(k - l) + (r - s)$, o sea, 3 divide a $a - b$, si y sólo si 3 divide a $r - s$. Entonces, las clases están representadas por los enteros $0, 1$ y 2 , que además representan clases distintas; también están representadas por $-1, 0$ y 1 , es decir, todo entero es congruente módulo 3 a alguno de ellos (y, en este caso también, a exactamente uno de ellos).

Definición 3.9. Un *sistema de representantes módulo m* (o, también, *sistema completo de representantes*) es un subconjunto $R \subset \mathbb{Z}$ tal que todo entero sea congruente a un único elemento de R , es decir,

- (i) si $x \in \mathbb{Z}$, existe $r \in R$ tal que $x \equiv r \pmod{m}$ y
- (ii) si $r, r' \in R$ y $r \neq r'$, entonces $r \not\equiv r' \pmod{m}$.

Ejemplo 3.10. Con $m = 7$, un sistema completo de representantes es el de restos de la división por 7: $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. Otro sistema completo de representantes es $\{0, 1, 2, 3, -3, -2, -1\}$. Incluso otro puede ser $\{-28, 50, 16, -4, 18, -30, -8\}$. Notemos que en este último ejemplo, todos los enteros del sistema de representantes son pares.¹⁰

Teorema 3.11. Dado $m \in \mathbb{Z}$, $m \neq 0$, la relación de congruencia módulo m divide a \mathbb{Z} en $|m|$ clases. Un sistema de representantes está dado por los $|m|$ restos de la división por m . En particular, todos los sistemas completos de representantes tienen el mismo cardinal, $|m|$.

Demostración. $a \equiv b \pmod{m}$, si y sólo si $r_m(a) = r_m(b)$. □

Ejemplo 3.12. Si $x \in \mathbb{Z}$,

$$x^2 - 117x + 31 \equiv x^2 + x + 1 \pmod{2},$$

que es impar, es decir, congruente con 1 módulo 2, tanto si x es par ($x \equiv 0 \pmod{2}$), como si x es impar ($x \equiv 1 \pmod{2}$). Los polinomios $3x^2 + 3x + 1$ y $3x^3 + x^2 + 3x + 4$ tampoco tienen raíces enteras. En el primer caso, para todo x ,

$$3x^2 + 3x + 1 \equiv 1 \pmod{3}.$$

En el segundo,

$$3x^3 + x^2 + 3x + 4 \equiv x^2 + 1 \pmod{3}.$$

Si $x \equiv 0 \pmod{3}$, entonces $x^2 + 1 \equiv 1 \pmod{3}$. Si, en cambio, $x \equiv 1 \pmod{3}$, entonces $x^2 + 1 \equiv 2 \pmod{3}$. Y, si $x \equiv 2 \pmod{3}$, entonces $x^2 + 1 \equiv 5 \equiv 2 \pmod{3}$. Con lo que el resultado siempre es congruente a 1 o a 2 módulo 3; nunca es congruente a 0.

Definición 3.13. La *cantidad de soluciones módulo m* a una ecuación es la cantidad de clases de congruencia módulo m que hacen que la ecuación se verifique módulo m .

Ejemplo 3.14. La ecuación $f(x) := x^2 - 117x + 31 = 0$ no tiene soluciones módulo 2; tampoco tiene soluciones módulo 3. Pero tiene una solución módulo 5: $f(1) = -115 \equiv 0 \pmod{5}$. De hecho,

$$x^2 - 117x + 31 \equiv x^2 - 2x + 1 \pmod{5},$$

de donde se puede verificar que $x^2 - 2x + 1 \equiv 0 \pmod{5}$, sólo si $x \equiv 1 \pmod{5}$.¹¹ Esto quiere decir que hay una única solución módulo 5.

¹⁰ Ver Ejercicio 3.14.

¹¹ $x^2 - 2x + 1 = (x - 1)^2$.

Definición 3.15. Un *sistema reducido de representantes módulo m* es un subconjunto $R \subset \mathbb{Z}$ cuyos elementos son coprimos con m y tal que todo entero *coprimo con m* sea congruente a un único elemento de R , es decir,

- (i) si $r \in R$, entonces $(r, m) = 1$,
- (ii) si $x \in \mathbb{Z}$ y $(x, m) = 1$, existe $r \in R$ tal que $x \equiv r \pmod{m}$ y
- (iii) si $r, r' \in R$ y $r \neq r'$, entonces $r \not\equiv r' \pmod{m}$.

Ejemplo 3.16. En el Ejemplo 3.10 vimos que $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $\{0, 1, 2, 3, -3, -2, -1\}$ y $\{-28, 50, 16, -4, 18, -30, -8\}$ son sistemas completos de representantes de las clases módulo 7. A partir de ellos, podemos conseguir sistemas reducidos de representantes de las clases quitando aquellos elementos divisibles por 7: los conjuntos $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, $\{1, 2, 3, -3, -2, -1\}$ y $\{50, 16, -4, 18, -30, -8\}$ son sistemas reducidos de representantes módulo 7.

Ejemplo 3.17. Con $m = 21$, un sistema completo de representantes es el de los restos:

$$\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20\} .$$

Un sistema reducido de representantes se obtiene quitando aquellos enteros que no son coprimos con 21, es decir, divisibles por 3 o por 7:

$$\{1, 2, 4, 5, 8, 10, 11, 13, 16, 17, 19, 20\} .$$

Otro sistema reducido de representantes es:

$$\{1, 2, 4, 5, 8, 10, -10, -8, -5, -4, -2, -1\} .$$

El siguiente conjunto también es un sistema reducido de representantes y cumple que todos sus elementos son pares:

$$\{22, 2, 4, 26, 8, 10, -10, -8, 16, -4, -2, 20\} .$$

También el conjunto

$$\{1, -19, 46, 26, -34, 31, 11, -29, 16, -4, 61, 41\}$$

es un sistema reducido de representantes de las clases módulo 21 y cumple que todos sus elementos son $\equiv 1 \pmod{5}$.¹²

Teorema 3.18. *Todos los sistemas reducidos de representantes tienen el mismo cardinal.*

Demostración. Este resultado es consecuencia de las dos propiedades siguientes **(ejercicio)**:

¹² Ver Ejercicio 3.14.

- si $b \equiv c \pmod{m}$, entonces $(b, m) = (c, m)$ y
- todo sistema reducido se puede completar a un sistema completo de representantes.

□

Definición 3.19. El cardinal de un sistema reducido de representantes se denota por $\varphi(m)$; la función $m \in \mathbb{Z} \setminus \{0\} \mapsto \varphi(m) \in \mathbb{N}$ se llama *función de Euler*.

Corolario 3.20. $\varphi(m) = \#\{1 \leq t \leq m : (t, m) = 1\}$.

Ejemplo 3.21. Según lo visto en el Ejemplo 3.16, $\varphi(7) = 6$.

Ejemplo 3.22. Según lo visto en el Ejemplo 3.17, $\varphi(21) = 12$.

Teorema 3.23. Si $(a, m) = 1$, entonces $a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}$.

Demostración. Sea $R = \{r_1, \dots, r_{\varphi(m)}\}$ un sistema reducido módulo m . Entonces, si $(a, m) = 1$, el conjunto $\{ar_1, \dots, ar_{\varphi(m)}\}$ también es un sistema reducido (*). Así, para cada i , $1 \leq i \leq \varphi(m)$, existe un único $j = j(i)$, $1 \leq j \leq \varphi(m)$, tal que $r_i \equiv ar_j \pmod{m}$. Además, si $i \neq i'$, entonces $j(i) \neq j(i')$ (*). En consecuencia,

$$\prod_{j=1}^{\varphi(m)} ar_j \equiv \prod_{i=1}^{\varphi(m)} r_i \pmod{m}. \quad (2)$$

Pero

$$\prod_{j=1}^{\varphi(m)} ar_j = a^{\varphi(m)} \prod_{j=1}^{\varphi(m)} r_j. \quad (3)$$

De (2) y de (3) se deduce que $a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}$ (*). □

En la demostración del Teorema 3.23, las afirmaciones marcadas con (*) son consecuencias del siguiente resultado.

Lema 3.24. Si $(b, m) = 1$ y $bx \equiv by \pmod{m}$, entonces $x \equiv y \pmod{m}$.

Demostración. **(ejercicio)**. □

Ejercicios

Ejercicio 3.1. Si $f \in \mathbb{Z}[X]$ y $f(0) \equiv f(1) \equiv 1 \pmod{2}$, entonces f no tiene raíces enteras. Generalizar.

Ejercicio 3.2. Probar que la ecuación $3x^2 + 2 = y^2$ no tiene soluciones con $x, y \in \mathbb{Z}$.

Ejercicio 3.3. Probar que la ecuación $7x^3 + 2 = y^3$ no tiene soluciones con $x, y \in \mathbb{Z}$.

Ejercicio 3.4. Probar que la ecuación $x^2 - 117x + 31 = 0$ no tiene soluciones módulo 117. Investigar la ecuación módulo m para valores de m hasta ...; confeccionar una tabla. Mirar módulo $m \leq 30$, al menos, módulo 85, 115, 391 y 2713.

Ejercicio 3.5. Si $f \in \mathbb{Z}[X]$ y $a \equiv b \pmod{m}$, entonces $f(a) \equiv f(b) \pmod{m}$.

Ejercicio 3.6. Si $d \mid m$ y $a \equiv b \pmod{m}$, entonces $a \equiv b \pmod{d}$.

Ejercicio 3.7. Sea $g = (a, m)$. La congruencia $ax \equiv b \pmod{m}$ tiene solución $x \in \mathbb{Z}$, si y sólo si $g \mid b$. En tal caso, hay exactamente g soluciones (módulo m): si x e y son soluciones, entonces $x \equiv y \pmod{m/g}$.

Ejercicio 3.8. Dados $a, m \in \mathbb{Z}$, $m \neq 0$, se cumple $ax \equiv ay \pmod{m}$, si y sólo si $x \equiv y \pmod{\frac{m}{(a, m)}}$.

Ejercicio 3.9. Si $d \mid m$ y si $a \equiv b \pmod{d}$, entonces $a \equiv b + kd \pmod{m}$, para un único k en el rango $1 \leq k \leq m/d$.

Ejercicio 3.10. Si p es primo, $(a, p) = 1$ equivale a $a \not\equiv 0 \pmod{p}$.

Ejercicio 3.11. ¿Existen $x \in \mathbb{Z}$ tales que $x^2 \equiv -1 \pmod{17}$? ¿ $x^3 \equiv 2 \pmod{17}$? Hallar un sistema reducido módulo 17 cuyos elementos sean múltiplos de 3.

Ejercicio 3.12. Determinar $\varphi(26)$. Para cada x en el rango $0 \leq x \leq 25$ (un sistema completo), determinar el menor natural k ($k \geq 1$) tal que $x^k \equiv 1 \pmod{26}$. Repetir con 36 en lugar de 26 (y 35 en lugar de 25) ¿Qué relación hay entre estos exponentes y los valores de $\varphi(26)$ y de $\varphi(36)$, respectivamente?

Ejercicio 3.13. Probar que $19 \nmid 4n^2 + 4$ para ningún n natural.

Ejercicio 3.14. Hallar sistemas de representantes de las clases módulo 26 cuyos elementos sean:

- (i) todos divisibles por 7;
- (ii) congruentes con 1 módulo 3 y congruentes con 1 módulo 5

¿Es posible hallar un sistema de representantes que cumpla con las condiciones (i) y (ii)?

Ejercicio 3.15. Sean a y b enteros positivos coprimos y sean A y B sistemas completos de representantes módulo a y módulo b , respectivamente. Probar que el conjunto

$$R := \{ax + by : x \in B, y \in A\}$$

es un sistema completo de representates de las clases módulo ab . Probar que, si A y B son, en cambio, sistemas reducidos, entonces el conjunto R análogo es un sistema reducido de representantes módulo ab .

4 Estructuras algebraicas

Definición 4.1. Llamaremos *anillo* a un conjunto A dotado de:

- operaciones binarias $+, \cdot : A \times A \rightarrow A$, que llamamos *suma* y *producto*,
- elementos distinguidos $0, 1 \in A$, que llamamos *cero* y *uno*,
- una función $- : A \rightarrow A$ (operación unitaria), que escribimos $a \mapsto -a$ y cuya imagen llamamos “menos a ”

que cumplen:

- con respecto a la suma,

$$(a + b) + c = a + (b + c) , \quad 0 + a = a + 0 = a , \\ a + (-a) = (-a) + a = 0 \quad \text{y} \quad a + b = b + a ,$$

- con respecto al producto,

$$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c) \quad \text{y} \quad 1 \cdot a = a \cdot 1 = a ,$$

- con respecto a ambas,

$$(a + b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c \quad \text{y} \quad c \cdot (a + b) = c \cdot a + c \cdot b .$$

Definición 4.2. Si $a \cdot b = b \cdot a$, se dice que a y b *conmutan*; si todo par de elementos conmuta, se dice que el anillo es *conmutativo*.

Observación 4.3. En general, esta estructura se denomina *anillo con unidad* (los anillos sin un 1 también son importantes).

Ejemplo 4.4. Los números enteros \mathbb{Z} constituyen un anillo con la suma, el producto, el cero, el uno y el menos usuales. Los números racionales \mathbb{Q} , reales \mathbb{R} y complejos \mathbb{C} , también. Todos éstos son anillos conmutativos. Los números naturales \mathbb{N} , en cambio, no forman un anillo con la suma y el producto usuales (dependiendo de la convención, no hay cero, pero, en general, $-n$ no es natural, si $n \geq 1$ es natural).

Ejemplo 4.5. El subconjunto $A \subset \mathbb{C}$ del Ejercicio 2.2,

$$A = \{x + y\sqrt{-6} : x, y \in \mathbb{Z}\} ,$$

es un anillo. La suma, el producto, el cero, el uno y el menos son los heredados de \mathbb{C} . En particular, A es un anillo conmutativo (porque \mathbb{C} lo es). Este anillo se suele denotar por $\mathbb{Z}[\sqrt{-6}]$.

Ejemplo 4.6. Si A es un anillo, las matrices *cuadradas* con coeficientes en A constituyen un anillo. Por ejemplo, las matrices de tamaño 2×2 con coeficientes enteros, $\text{Mat}(2 \times 2, \mathbb{Z})$, son un anillo con las operaciones usuales. Pero, en general, estos anillos no son conmutativos, aunque A lo sea.

Nos concentraremos en anillos conmutativos (con uno).

Definición 4.7. Un *dominio íntegro* es un anillo conmutativo (con uno) que tiene la siguiente propiedad:¹³

para todo par de elementos a y b , $ab = 0$ implica $a = 0$ o $b = 0$.

Ejemplo 4.8. Los anillos \mathbb{Z} , \mathbb{Q} , \mathbb{R} , \mathbb{C} , sus anillos de polinomios y $\mathbb{Z}[\sqrt{-6}]$ son dominios íntegros.

Definición 4.9. Un *dominio euclidiano* es un dominio íntegro D que admite una función $N : D \rightarrow \mathbb{Z}$ con las siguientes propiedades:

- $N(x) \geq 0$ para todo $x \in D$ y,
- dados $a, b \in D$, $a \neq 0$, existen $q, r \in D$ tales que $b = qa + r$ y $r = 0$ o bien $N(r) < N(a)$.

Ejemplo 4.10. Los enteros \mathbb{Z} son un dominio euclidiano: la función valor absoluto $N(x) = |x|$ tiene la propiedad que los caracteriza. Los anillos de polinomios $\mathbb{Q}[X]$, $\mathbb{R}[X]$ y $\mathbb{C}[X]$ (o, más en general, polinomios en una indeterminada, sobre un cuerpo) son dominios euclidianos. Sin embargo, $\mathbb{Z}[X]$ no lo es. El dominio $\mathbb{Z}[\sqrt{-6}]$ tampoco es un dominio euclidiano.

Ejemplo 4.11. El anillo $\mathbb{Z}[i]$ es, como conjunto, el subconjunto de \mathbb{C} de elementos de la forma $x + yi$, $x, y \in \mathbb{Z}$. Si $\alpha = a + bi$ y $\beta = c + di$ son elementos de $\mathbb{Z}[i]$ ($a, b, c, d \in \mathbb{Z}$), entonces

$$\begin{aligned}\alpha + \beta &= (a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i \in \mathbb{Z}[i] \quad \text{y} \\ \alpha\beta &= (a + bi)(c + di) = (ac - bd) + (ad + bc)i \in \mathbb{Z}[i].\end{aligned}$$

Además, $0, 1 \in \mathbb{Z}[i]$ (más aun, $\mathbb{Z} \subset \mathbb{Z}[i]$). También se cumple que $-\alpha \in \mathbb{Z}[i]$, si $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$. De esto se deduce que $\mathbb{Z}[i]$ es un dominio íntegro (**ejercicio**).¹⁴

Veamos que $\mathbb{Z}[i]$ es un dominio euclidiano.¹⁵ Dados $x, y \in \mathbb{Q}$, definimos la *norma* de $x + yi$ como

$$N(x + yi) = x^2 + y^2.$$

Esta función cumple $N(\beta\beta') = N(\beta)N(\beta')$ y $N(x + yi) \in \mathbb{Z}$, si $x, y \in \mathbb{Z}$. Dados elementos $\alpha = a + bi$ y $\beta = c + di$ de $\mathbb{Z}[i]$, $\alpha \neq 0$,

- (i) existen $u, v \in \mathbb{Q}$ tales que $(u + vi)\alpha = \beta$;
- (ii) dados $u, v \in \mathbb{Q}$, existen $m, n \in \mathbb{Z}$ tales que $|m - u| \leq 1/2$ y $|n - v| \leq 1/2$;
- (iii) si $q := m + ni$ y $r := \beta - q\alpha$, entonces $N(r) < N(\alpha)$ (o $r = 0$).

¹³ C.f. la propiedad de la Observación 2.6.

¹⁴Hint: Todo ocurre dentro de \mathbb{C} .

¹⁵ Esto sí depende de $\mathbb{Z}[i]$, no es algo “heredado”.

Con respecto a (iii), $N(r) = N((u+vi)-q)N(\alpha)$, pero $N((u+vi)-q) \leq 1/2$. La función norma tiene la propiedad de la Definición 4.9

Definición 4.12. Dado $a \in A$, si existe $b \in A$ tal que $ab = ba = 1$, se dice que a es una *unidad* del anillo o que es *invertible* en el anillo.

Ejemplo 4.13. Las unidades de \mathbb{Z} son ± 1 .

Definición 4.14. Un anillo (conmutativo, con 1) con la propiedad de que todos sus elementos distintos de cero son invertibles se denomina *cuerpo*.

Ejemplo 4.15. Los anillos \mathbb{Q} , \mathbb{R} y \mathbb{C} son cuerpos. El anillo \mathbb{Z} no es un cuerpo.

Ejercicios

Ejercicio 4.1. Sea $\omega \in \mathbb{C}$ tal que $\omega^3 = 1$, pero $\omega \neq 1$.¹⁶

- (i) Probar que $\omega^2 + \omega + 1 = 0$.
- (ii) Probar que $\bar{\omega} \neq \omega$ y que $\bar{\omega}^2 + \bar{\omega} + 1 = 0$, también.
- (iii) Concluir que $X^2 + X + 1 = (X - \omega)(X - \bar{\omega})$ y, en particular, que $\omega + \bar{\omega} = -1$ y que $\omega\bar{\omega} = 1$.

Dados $x, y \in \mathbb{Q}$, definimos

$$N(x + y\omega) := x^2 - xy + y^2.$$

- (i) Como $\{1, \omega\}$ es un conjunto l.i. sobre \mathbb{Q} , esta expresión no es ambigua.
- (ii) Probar que $N(\beta\beta') = N(\beta)N(\beta')$ y que $N(x + y\omega) \in \mathbb{Z}$, si $x, y \in \mathbb{Z}$.

Sea $\mathbb{Z}[\omega] \subset \mathbb{C}$ el subconjunto

$$\mathbb{Z}[\omega] := \{a + b\omega : a, b \in \mathbb{Z}\}.$$

- (i) Probar que, si $\alpha, \beta \in \mathbb{Z}[\omega]$, entonces $\alpha + \beta$, $\alpha\beta$, $-\alpha$ y $\bar{\alpha}$ pertenecen a $\mathbb{Z}[\omega]$, también.
- (ii) Probar que, $\mathbb{Z} \subset \mathbb{Z}[\omega]$.

Emular el argumento del Ejemplo 4.11 para probar que $\mathbb{Z}[\omega]$ es un dominio euclidiano: dados $\alpha = a + b\omega$ y $\beta = c + d\omega$, $\alpha \neq 0$,

- (i) existen $u, v \in \mathbb{Q}$ tales que $(u + v\omega)\alpha = \beta$;
- (ii) dados $u, v \in \mathbb{Q}$, existen $m, n \in \mathbb{Z}$ tales que $|m - u| \leq 1/2$ y $|n - v| \leq 1/2$;
- (iii) si $q := m + n\omega$ y $r := \beta - q\alpha$, entonces $N(r) < N(\alpha)$ (o $r = 0$).

¹⁶ Por ejemplo, $\omega = e^{2\pi i/3} = \frac{-1 + \sqrt{-3}}{2}$.

¿En qué punto falla el argumento para el dominio $\mathbb{Z}[\sqrt{-6}]$?

Ejercicio 4.2 (Unidades de un anillo). Dado $a \in A$, si existe $b \in A$ tal que $ab = ba = 1$, se dice que a es una *unidad* del anillo o que es *invertible* en el anillo. Por ejemplo, las unidades de \mathbb{Z} son ± 1 .

- En $\mathbb{Z}[i]$, probar que $N(\alpha) = \alpha\bar{\alpha} (= \bar{\alpha}\alpha)$ y concluir que $\alpha \in \mathbb{Z}[i]$ es invertible, si y sólo si $N(\alpha) = \pm 1$ ¿Puede dar -1 ? Hallar todas las unidades, en este caso.
- En $\mathbb{Z}[\omega]$, probar que $N(\alpha) = \alpha\bar{\alpha} (= \bar{\alpha}\alpha)$ y concluir que $\alpha \in \mathbb{Z}[\omega]$ es invertible, si y sólo si $N(\alpha) = \pm 1$ ¿Puede dar -1 ? Hallar todas las unidades, en este caso.
- Hacer lo mismo con $\mathbb{Z}[\sqrt{-6}]$ y con $\mathbb{Z}[\sqrt{-2}]$.¹⁷

Ejercicio 4.3. Repetir el argumento del Ejercicio 4.1 con $\mathbb{Z}[\delta] \subset \mathbb{C}$, el subconjunto de los complejos de la forma $a + b\delta$, donde $\delta \in \mathbb{C}$ es raíz de $X^2 + 2$.

Ejercicio 4.4. Probar que 2 es divisible por $(1 + i)^2$ en $\mathbb{Z}[i]$.

Ejercicio 4.5. Probar que 3 es divisible por $(1 - \omega)^2$ en $\mathbb{Z}[\omega]$.

5 Enteros modulares

Denotaremos el conjunto de clases de congruencia módulo m ($m \in \mathbb{Z}$, $m \neq 0$) por $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$, \mathbb{Z}/m o por \mathbb{Z}_m (talvez): un conjunto finito que podemos representar con los enteros a en el rango $0 \leq a \leq |m| - 1$, o bien $1 \leq a \leq |m|$, por ejemplo. Estudiando la resolubilidad de una ecuación módulo m , obtenemos información acerca de su esolubilidad en \mathbb{Z} ; la ventaja que esto tiene es que la búsqueda de soluciones se lleva a cabo en un conjunto finito. En otras ocasiones, será relevante entender las soluciones a una ecuación de congruencia, sin que esto tenga por objetivo conocer las soluciones de la misma ecuación en \mathbb{Z} . Por esta razón es relevante entender qué estructura tiene el conjunto de clases $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$.

Teorema 5.1. El conjunto $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$, junto con las clases $[0], [1] \in \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ y las operaciones

$$[a] + [c] := [a + c] \quad y \quad [a] [c] := [ac] ,$$

constituye un anillo conmutativo con unidad; el cero es $[0]$ y el uno es $[1]$.

Demostración. **(ejercicio)**. Que las operaciones están bien definidas, es decir, que no dependen de los representantes elegidos, es consecuencia del Teorema 3.5. \square

Simplificaremos la notación y escribiremos “ a ”, en lugar de “[a]” cuando creamos que no hay riesgo de confundir una expresión en $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ por una en \mathbb{Z} . En ocasiones, hablaremos de “buscar soluciones en $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ ”. Con esto querremos decir buscar soluciones a una ecuación de congruencia, es decir, buscar soluciones módulo m .

¹⁷ Ver Ejercicio 4.3.

Ejemplo 5.2. La ecuación $x^2 - 117x + 31 = 0$ no tiene soluciones en $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$, es decir, no tiene soluciones módulo 2.

Ejemplo 5.3. Dados $a, m \in \mathbb{Z}$, $m \neq 0$, si $(a, m) = 1$, entonces la ecuación $ax = b$ tiene soluciones en $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$. De hecho, existe una única solución módulo m . Si $b = 1$, podemos hacer lo siguiente: por la Identidad de Bézout (Teorema 1.7), existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $ax + my = 1$. Pero, entonces, $ax \equiv 1 \pmod{m}$, o sea, $ax = 1$ en $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$. Todo esto es lo mismo que decir que $m \mid ax - 1$.

Corolario 5.4. Si $p \in \mathbb{Z}$ es primo, entonces $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ es un dominio íntegro. Recíprocamente, si $m \neq 0$ y $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ es un dominio íntegro, entonces m es primo. En particular, $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ es un cuerpo, si y sólo si m es primo.

Demostración. Supongamos, primero, que p es primo. Sean $[a], [b] \in \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ tales que $[a][b] = 0$. Como, por definición, $[a][b] = [ab]$, esta suposición implica que $ab \equiv 0 \pmod{p}$, o sea, $p \mid ab$. Como p es primo, por el Lema 2.5, o bien $p \mid a$ o bien $p \mid b$. Pero esto implica que $a \equiv 0$ o $b \equiv 0 \pmod{p}$. En términos de clases, esto se traduce en que, o bien $[a] = 0$, o bien $[b] = 0$ en $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$. O sea, $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$ es un dominio íntegro. Recíprocamente, si $m \neq 0$ es tal que $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ es dominio íntegro, entonces se verifica que m tiene la propiedad de la Observación 2.6 y, por lo tanto, que m es primo. \square

Definición 5.5. Si A es un anillo conmutativo y $a \in A$, decimos que a es una *unidad* de A (o *en* A), si existe $x \in A$ tal que $ax = 1$ ($= xa$).

Corolario 5.6. Dados $a, m \in \mathbb{Z}$, $m \neq 0$, la clase $[a] \in \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ es una unidad en $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$, si y sólo si $(a, m) = 1$. En particular, las unidades de $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ están representadas por los elementos de un sistema reducido.

Definición 5.7. Decimos que a es una *unidad módulo* m , si $[a] \in \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$ es una unidad de $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$.

Observación 5.8. Si $a \in A$ es una unidad, existe un único $x \in A$ tal que $ax = xa = 1$, al que denotamos a^{-1} . Las unidades de un anillo forman un grupo, el *grupo de unidades* del anillo. Escribimos A^\times o bien $U(A)$ para referirnos al grupo de unidades de A . En el caso de $A = \mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$, a veces escribiremos $U(m)$.

Corolario 5.9. $|U(m)| = \varphi(m) = \#\{k \in \mathbb{Z} : 0 \leq k \leq |m| - 1, (k, m) = 1\}$. En particular, si $(a, m) = 1$, entonces $a^{\varphi(m)} = 1$ en $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$.

Demostración. Con respecto a la última afirmación, $U(m)$ es un grupo de orden $\varphi(m)$. Por lo tanto, $a^{\varphi(m)} = 1$ en $U(m)$. Pero esto quiere decir que $a^{\varphi(m)} \equiv 1 \pmod{m}$, o sea que $a^{\varphi(m)} = 1$ en $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$. \square

Ejercicios

Ejercicio 5.1. Probar que, si $(a, m) = 1$, entonces $ax = b$ tiene una única solución en $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z}$, cualquiera sea $b \in \mathbb{Z}$. Describir las soluciones a la ecuación de congruencia $ax \equiv b \pmod{m}$, es decir, el conjunto de $x \in \mathbb{Z}$ tales que $ax \equiv b \pmod{m}$.

Ejercicio 5.2. Hacer una tabla de multiplicación y suma para los anillos $\mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$, $\mathbb{Z}/8\mathbb{Z}$ y $\mathbb{Z}/10\mathbb{Z}$.

Ejercicio 5.3. Sea p un primo impar y sea $k \in \{1, \dots, p-1\}$. Entonces existe un único $b_k \in \{1, \dots, p-1\}$ tal que $kb_k \equiv 1 \pmod{p}$. Además, $k \neq b_k$, excepto en los casos $k = 1$ y $k = p-1$ ¿Son ciertas estas afirmaciones en el caso de un módulo m cualquiera, no necesariamente primo?

Ejercicio 5.4. Si p es primo $(p-1)! \equiv -1 \pmod{p}$. Si $n = 4$, entonces $(4-1)! = 3! = 6 \equiv 2 \pmod{4}$. Si $n > 4$ no es primo, entonces $(n-1)! \equiv 0 \pmod{n}$.

Ejercicio 5.5. Sea $R = \{r_1, \dots, r_{\varphi(m)}\}$ un sistema reducido de representantes de las clases módulo m y sea $N \geq 0$ la cantidad de soluciones a la ecuación de congruencia $x^2 \equiv 1 \pmod{m}$. Probar que¹⁸

$$\prod_{i=1}^{\varphi(m)} r_i \equiv (-1)^{N/2} \pmod{m}.$$

Ejercicio 5.6. Sean p y q primos impares distintos y supongamos, además, que $p-1 \mid q-1$. Si $(n, pq) = 1$, entonces $n^{q-1} \equiv 1 \pmod{pq}$.¹⁹

Ejercicio 5.7. Probar que, si p es primo, entonces p divide al numerador de $1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{p-1}$.

Ejercicio 5.8. Probar que

- (i) si p es un primo impar y $a \geq 1$, las únicas soluciones $x^2 = 1$ en $\mathbb{Z}/p^a\mathbb{Z}$ son ± 1 ;
- (ii) $x^2 = 1$ tiene una única solución en $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$, dos soluciones en $\mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ y cuatro soluciones en $\mathbb{Z}/2^b\mathbb{Z}$, si $b \geq 3$.

Determinar la cantidad de soluciones a $x^2 \equiv 1 \pmod{m}$ para $m \in \mathbb{Z}$, $m \neq 0$.²⁰

Ejercicio 5.9. Si $R = \{r_1, \dots, r_{p-1}\}$ es un sistema reducido módulo p , primo, entonces

$$\prod_{i=1}^{p-1} r_i \equiv -1 \pmod{p}.$$

Ejercicio 5.10. Si $R = \{r_1, \dots, r_p\}$ y $R' = \{r'_1, \dots, r'_p\}$ son dos sistemas completos de representantes módulo un primo $p > 2$, entonces $r_1 r'_1, \dots, r_p r'_p$ no pueden formar un sistema completo de representantes módulo p .

¹⁸Hint: Si $r \in R$, entonces, por un lado, existe $r' \in R$ tal que $rr' \equiv 1$. Por otro, $(-r, m) = 1$ y, si $m > 2$, entonces también $-r \not\equiv r$.

¹⁹Hint: Probar que $n^{q-1} \equiv 1 \pmod{p}$ y que $n^{q-1} \equiv 1 \pmod{q}$.

²⁰Hint: Teorema chino del resto.

6 Polinomios

En esta sección, salvo aclaración, “anillo” querrá decir “anillo conmutativo con unidad”.

Definición 6.1. Si A es un anillo y $B \subset A$ es un subconjunto con las propiedades: $0 \in B$, $B + B \subset B$, $B \cdot B \subset B$ y $1 \in B$, decimos que B es un subanillo de A .

Ejemplo 6.2. El subconjunto $\mathbb{Z} \subset \mathbb{Q}$ es un subanillo del anillo (cuerpo) de números racionales; como subconjuntos de los números complejos, \mathbb{Z} , \mathbb{Q} y \mathbb{R} son subanillos que satisfacen: $\mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$. Los subconjuntos $\mathbb{Z}[i]$, $\mathbb{Z}[\omega]$ y $\mathbb{Z}[\sqrt{-6}]$ también son subanillos de \mathbb{C} , pero ninguno de ellos está contenido en \mathbb{R} . El anillo $\mathbb{Z}[\sqrt{6}]$ –definido de manera análoga a $\mathbb{Z}[\sqrt{-6}]$ – es un subanillo de \mathbb{R} (pero no de \mathbb{Q}).

Observación 6.3. Si $a \in A$ y $B \subset A$ es un subanillo, entonces a, a^2, \dots son elementos de A y también lo son ba, ba^2, \dots , si $b \in B$. Más en general, la expresión

$$b_0 + b_1a + \dots + b_ma^m, \quad (4)$$

donde m es natural o 0 y $b_0, \dots, b_m \in B$, define un elemento de A . El elemento 0 es de este tipo (eligiendo $m = 0$ y $b_0 = 0$, por ejemplo), como también lo son 1 ($m = 0$ y $b_0 = 1$) y a ($m = 1$, $b_0 = 0$ y $b_1 = 1$). Más aun, dados dos elementos del tipo (4), p y q , su suma, $p + q$, y su producto, $p \cdot q$, son también del tipo (4) **(ejercicio)**. En particular, el subconjunto

$$B[a] = \{b_0 + b_1a + \dots + b_ma^m : m \text{ natural o } 0 \text{ y } b_0, \dots, b_m \in B\}$$

de A es un subanillo de A .

Definición 6.4. Sean A un anillo, $a \in A$ un elemento y $B \subset A$ un subanillo. Una expresión polinomial en a con coeficientes en B es un elemento de A del tipo (4). El anillo de expresiones polinomiales en a con coeficientes en B es el subanillo $B[a] \subset A$.

Ejemplo 6.5. Si $\sqrt{-6} \in \mathbb{C}$ es un número complejo que cumple que $\sqrt{-6}^2 = -6$, entonces el subanillo de expresiones polinomiales en $\sqrt{-6}$ con coeficientes en \mathbb{Z} coincide con el anillo $\mathbb{Z}[\sqrt{-6}]$ **(ejercicio)**.

Observación 6.6. En general, no tiene por qué ser cierto *a priori* que $b_0 + b_1a + \dots + b_ma^m = c_0 + c_1a + \dots + c_na^n$ implique $m = n$ y $b_i = c_i$ para cada i . Siguiendo con el Ejemplo 6.5, la igualdad $\sqrt{-6}^2 = -6$ muestra un ejemplo de esto. En particular, podría ocurrir que $b_0 + b_1a + \dots + b_ma^m = 0$, pero que $b_m \neq 0$.

Definición 6.7. Sean B un anillo, A un anillo del cual B es subanillo y $a \in A$ un elemento. Decimos que a es trascendente sobre B , si las únicas expresiones polinomiales en a con coeficientes en B iguales a cero son las expresiones triviales, es decir, aquellas cuyos coeficientes son todos iguales a cero. Expresado de otra manera, $a \in A$ es trascendente sobre B , si

$$b_0 + b_1a + \dots + b_ma^m = 0 \quad \text{implica} \quad b_0 = b_1 = \dots = b_m = 0.$$

Teorema 6.8. Sean B un anillo, A, C anillos del cual B es subanillo y $x \in A$ y $c \in C$ elementos. Si x es trascendente sobre B , existe una única función $f : B[x] \rightarrow C$ tal que

$$f(b) = b \text{ para todo } b \in B \quad \text{y} \quad f(x) = c$$

y tal que

$$f(u+v) = f(u) + f(v) \quad \text{y} \quad f(uv) = f(u)f(v),$$

siempre que $u, v \in B[x]$. La imagen de esta función es igual a $B[c]$.

Demostración. Veamos, primero, que puede existir a lo sumo una función con estas propiedades. Todo elemento de $B[x]$ se puede expresar como $b_0 + b_1x + \cdots + b_mx^m$, donde m es natural o 0 y $b_i \in B$ para cada i . Entonces, si $f : B[x] \rightarrow C$ tiene las propiedades del enunciado y $p = b_0 + b_1x + \cdots + b_mx^m$ es una expresión polinomial en x con coeficientes en B , $f(p)$ es igual a

$$\begin{aligned} f(b_0 + b_1x + \cdots + b_mx^m) &= f(b_0) + f(b_1)f(x) + \cdots + f(b_m)f(x)^m \\ &= b_0 + b_1c + \cdots + b_mc^m. \end{aligned} \quad (5)$$

En palabras, una función $f : B[x] \rightarrow C$ que respeta la suma y el producto y es la identidad en B está determinada por su valor en x . Aun no hemos usado que x es trascendente. El hecho de que $x \in A$ sea trascendente sobre B es equivalente a que cada elemento de $B[x]$ se puede expresar de a lo sumo una única manera como expresión polinomial en x con coeficientes en B . Con esto y la ecuación (5) en mente, definimos la siguiente función: si $p = b_0 + b_1x + \cdots + b_mx^m \in B[x]$,

$$f(p) := b_0 + b_1c + \cdots + b_mc^m.$$

La unicidad de la expresión para p garantiza que la identidad anterior *define una función*. Sólo resta verificar que esta función tiene las propiedades deseadas **(ejercicio)**. \square

Observación 6.9. Sean B un anillo, A, C anillos del cual B es subanillo y $x \in A$ e $y \in C$ elementos trascendentes. Por el Teorema 6.8, existen únicas funciones $f : B[x] \rightarrow B[y]$ y $g : B[y] \rightarrow B[x]$ que respetan la suma y el producto y tales que $f(b) = g(b) = b$ para todo $b \in B$ y $f(x) = y$ y $g(y) = x$. En particular, $fg = \text{id}_{B[y]}$ y $gf = \text{id}_{B[x]}$. Es decir, desde un punto de vista algebraico, los anillos $B[x]$ y $B[y]$ son indistinguibles. Esta estructura común es la de polinomios en una indeterminada con coeficientes en B .

Definición 6.10. Sea B un anillo conmutativo con unidad $1 \neq 0$. Las expresiones polinomiales en un elemento trascendente, perteneciente a un anillo del cual B es subanillo serán *polinomios en una indeterminada con coeficientes en B* .

Observación 6.11. Por el Teorema 6.8, no importa cuál sea el anillo A del cual B es subanillo, ni tampoco el elemento trascendente $x \in A$ elegido para hacer las veces de variable, la estructura algebraica es esencialmente la misma.²¹

²¹ ¿Es cierto que para cualquier anillo (conmutativo con unidad $1 \neq 0$) B existe un anillo $A \supset B$ del cual es subanillo y un elemento $x \in A$ trascendente sobre B ? En el Ejercicio ?? mostramos una manera de responder la pregunta.

Definición 6.12. El *grado* de un polinomio $p \in B[x]$, $p \neq 0$, es el máximo $k \geq 0$ tal que $b_k \neq 0$ en la expresión polinomial $p = b_0 + b_1x + \cdots + b_mx^m$. Al polinomio $0 \in B[x]$, lo llamamos el *polinomio nulo* y no le asignamos grado.

Si $p = b_0 + b_1x + \cdots + b_mx^m$ y $q = c_0 + c_1x + \cdots + c_nx^n$ son polinomios de grados m y n ($b_m \neq 0$, $c_n \neq 0$), respectivamente, entonces

$$pq = d_0 + d_1x + \cdots + d_{m+n}x^{m+n}, \quad \text{donde} \quad d_k = \sum_{i+j=k} b_ic_j.$$

En particular, $d_{m+n} = b_mc_n$ y, si $pq \neq 0$, entonces $\text{gr}(pq) \leq \text{gr}(p) + \text{gr}(q)$; podría ocurrir que $d_{m+n} = 0$.

Ejemplo 6.13. Sean $p, q \in \mathbb{Z}/6\mathbb{Z}[x]$ los polinomios $p = 2x + 1$ y $q = 3x + 5$, entonces

$$pq = (2x + 1)(3x + 5) = (2 \cdot 3)x^2 + (2 \cdot 5 + 1 \cdot 3)x + 1 \cdot 5 = 6x^2 + 13x + 5 = x + 5.$$

En particular, si bien p y q son polinomios de grado 1 con coeficientes en $\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$, el producto pq tiene grado 1, menor estricto que la suma de los grados.

Definición 6.14. Si $p \in B[x]$ es un polinomio distinto del polinomio nulo de grado $\text{gr}(p) = m \geq 0$, su *coeficiente principal* es el coeficiente b_m en la expresión $p = b_0 + b_1x + \cdots + b_mx^m$; su *término independiente* es b_0 . Decimos que un polinomio no nulo es *mónico*, si su coeficiente principal es igual a 1.

Observación 6.15. El coeficiente principal de un polinomio distinto del polinomio nulo es distinto de cero.

Definición 6.16. Un polinomio g *divide* a un polinomio f , si existe un polinomio h tal que $gh = f$; en tal caso, escribimos $g \mid f$.

Teorema 6.17. Sea B un anillo (conmutativo con unidad $1 \neq 0$) y sean $f, g \in B[x]$ polinomios en una indeterminada. Si el coeficiente principal de g es una unidad en B , entonces

(A) $g \mid f$ y existe un único polinomio $q \in B[x]$ tal que $f = qg$, o bien

(B) existen únicos polinomios $q, r \in B[x]$ tales que $f = qg + r$ y $\text{gr}(r) < \text{gr}(g)$.

Demostración. Como el coeficiente principal de g es inversible, el coeficiente principal de qg es igual al coeficiente principal de q (cero, si $q = 0$). En particular, si $f = 0$, se cumple $g \mid f$ y el único polinomio para el cual se verifica $f = qg$ es $q = 0$. Asumamos, entonces, que f no es el polinomio nulo. En ese caso, $\text{gr}(f) = m \geq 0$ y, si $f = a_0 + a_1x + \cdots + a_mx^m$, $a_m \neq 0$. Si $m < \text{gr}(g)$, la única posibilidad es $q = 0$ y $r = f$. Supongamos que $m \geq \text{gr}(g)$. Si $m = 0$, entonces $\text{gr}(g) = 0$, con lo que $g = b_0 \in B$ es una unidad y $g \mid f$; el polinomio q , en este caso, es $q = a_0b_0^{-1}$. Si $m > 0$ y $d = \text{gr}(g) \leq m$, entonces el polinomio

$$f_1 = f - a_mb_d^{-1}x^{m-d}g$$

es, o bien el polinomio nulo, o bien $\text{gr}(f_1) < \text{gr}(f)$. Un argumento inductivo muestra que existen q y r tales que $f = qg + r$, donde $r = 0$ o bien $\text{gr}(r) < \text{gr}(g)$. Resta probar la unicidad **(ejercicio)**. \square

Corolario 6.18. Sea k un cuerpo. Entonces,

- (i) los polinomios en una indeterminada con coeficientes en k forman un dominio euclidiano;
- (ii) si $f \in k[x]$ es un polinomio no nulo y $a \in k$, entonces a es una raíz de f , si y sólo si $x - a$ divide a f en $k[x]$;
- (iii) en particular, si $\text{gr}(f) = m \geq 0$, f tiene, a lo sumo, m raíces distintas en k ;
- (iv) si $U \subset k^\times$ es un subconjunto finito tal que $U \cdot U \subset U$, entonces existe $y \in U$ tal que todo $u \in U$ es de la forma $u = y^r$ para algún entero no negativo r .²²

Ejercicios

Ejercicio 6.1. Probar que $\mathbb{Z}[i]$ y $\mathbb{Z}[\omega]$ son iguales a los subanillos \mathbb{C} de expresiones polinomiales en i y, respectivamente, ω con coeficientes en \mathbb{Z} .

Ejercicio 6.2. Probar que el subanillo $\mathbb{Z}[\sqrt{2}] \subset \mathbb{R}$ de expresiones polinomiales en $\sqrt{2}$ con coeficientes en \mathbb{Z} es, como conjunto, igual al subconjunto de elementos de la forma $a + b\sqrt{2}$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$. Hacer lo análogo con $\mathbb{Z}[\sqrt{3}]$.

Ejercicio 6.3. Mostrar que no existe ninguna función $f : \mathbb{Z}[\sqrt{2}] \rightarrow \mathbb{Z}[\sqrt{3}]$ tal que $f(1) = 1$ y que respete la suma y el producto.

Ejercicio 6.4. Describir los elementos del anillo de expresiones polinomiales $\mathbb{Z}[\frac{1}{2}]$. ¿Es $\frac{1}{2}$ trascendente sobre \mathbb{Z} ? ¿Existe un polinomio mónico (coeficiente principal igual a 1) $p \in \mathbb{Z}[x]$ tal que $p(\frac{1}{2}) = 0$?

Ejercicio 6.5. Sean $p, q \in \mathbb{Z}[x]$ los polinomios $p = 3x^5 - 2x^3 + x^2 - 5x - 1$ y $q = 2x^4 - 3x^2 - x + 5$. Determinar:

- (i) $\text{gr}(p^2 - q^3)$;
- (ii) el coeficiente de x^6 en pq ;
- (iii) $\text{gr}(p + q^3)$;
- (iv) el coeficiente de x^{10} en pq ;
- (v) si existe un polinomio $t \in \mathbb{Z}[x]$ tal que $p = tq$;
- (vi) si existen enteros m, n tales que $p^n = q^m$.

Ejercicio 6.6. Sean $p, q \in \mathbb{Z}[x]$ los polinomios $p = x^3 - 2x + 3$ y $q = 2x^5 - 5x^4 + 3x^3 + 2x^2$. Hallar polinomios $t, r \in \mathbb{Z}[x]$ tales que $q = tp + r$ con $r = 0$ o $\text{gr}(r) < 3$.

Ejercicio 6.7. Sea $\mathbb{Z}/4$ el anillo de enteros módulo 4.

²² Se dice, entonces, que U es un subgrupo *cíclico* de k^\times

- (i) Calcular los grados de p^2 , pq y $q - h$, donde $p, q, h \in \mathbb{Z}/4[x]$ son los polinomios $p = 1 + 2x$, $q = 1 + 2x + 3x^2$ y $h = 2 - x + x^2$.
- (ii) ¿Existen polinomios $t, s \in \mathbb{Z}/4[x]$, ambos no nulos, tales que $ts = 0$?
- (iii) ¿Existen polinomios $t \in \mathbb{Z}/4[x]$ tales que $t^n = 0$ para algún $n \geq 0$, pero $t \neq 0$?
- (iv) ¿Existen en $\mathbb{Z}/4[x]$ polinomios inversibles de grado mayor que 0?

Ejercicio 6.8. Si A es un dominio íntegro y $p, q \in A[x]$ son polinomios distintos del polinomio nulo, entonces $\text{gr}(pq) = \text{gr}(p) + \text{gr}(q)$. Probar que A es un dominio íntegro, si y sólo si $A[x]$ lo es.

Ejercicio 6.9. Si A es un dominio íntegro, entonces los polinomios inversibles en $A[x]$ son exactamente los elementos inversibles en A , es decir, los polinomios de grado 0 que son unidades de A .

Ejercicio 6.10. Determinar los polinomios inversibles en $\mathbb{Z}/4[x]$ y en $\mathbb{Z}/5[x]$.

Ejercicio 6.11. Probar propiedades análogas a las de la relación de divisibilidad en \mathbb{Z} para la relación de divisibilidad en polinomios.

Ejercicio 6.12. Si k es un cuerpo, dar una definición de primo (polinomios irreducibles) en $k[x]$ y enunciar y demostrar algunas de sus propiedades.

Ejercicio 6.13. El *máximo común divisor* entre dos polinomios no nulos $f, g \in k[x]$ con coeficientes en un cuerpo k se define como el polinomio *mónico* (coeficiente principal igual a 1) de grado máximo que divide a ambos.

- (i) Probar la identidad de Bézout: que, si $h = (f, g)$ es el máximo común divisor de f y g , entonces existen polinomios p y q tales que $h = fp + gq$.
- (ii) Probar que las siguientes afirmaciones sobre un polinomio $h \in k[x]$ son equivalentes:
 - (a) h es el polinomio mónico de grado mínimo de la forma $h = fp + gq$ con $p, q \in k[x]$;
 - (b) h es mónico, es divisor común de f y de g y es divisible por cualquier otro divisor común;
 - (c) h es el máximo común divisor de f y g .

Ejercicio 6.14. ¿Cómo se adapta la noción de primo (ver Ejercicio 6.12) al anillo de polinomios con coeficientes enteros $\mathbb{Z}[x]$? ¿Tiene sentido hablar de máximo común divisor en $\mathbb{Z}[x]$? ¿Se verifica la identidad de Bézout?

Parte II

Reciprocidad cuadrática

7 Reciprocidad y descenso

Usando el lenguaje desarrollado en la Parte I, podemos expresar algunas de las conjeturas de Fermat: si p es un primo impar,

$$\begin{aligned} p &= x^2 + y^2, \quad x, y \in \mathbb{Z}, \quad \text{si y sólo si} \quad p \equiv 1 \pmod{4} \\ p &= x^2 + 2y^2, \quad x, y \in \mathbb{Z}, \quad \text{si y sólo si} \quad p \equiv 1 \text{ o } 3 \pmod{8} \\ p &= x^2 + 3y^2, \quad x, y \in \mathbb{Z}, \quad \text{si y sólo si} \quad p = 3 \text{ o } p \equiv 1 \pmod{3}. \end{aligned}$$

También tenemos la siguiente conjetura, un poco distinta de las tres anteriores: si p y q son primos impares distintos,

$$p \text{ y } q \equiv 3 \text{ o } 7 \pmod{20} \quad \text{implica} \quad pq = x^2 + 5y^2, \quad x, y \in \mathbb{Z}.$$

Todas estas afirmaciones están relacionadas con el problema de representar un número en la forma $x^2 + ny^2$. La primera demostración de las primeras tres afirmaciones parece haber sido encontrada por Euler alrededor de cien años después de que Fermat las enunciara. La cuarta fue demostrada más tarde por Lagrange. Ver [Cox22, pp. 7–9].

Ejemplo 7.1. Si $p = x^2 + y^2$ con $x, y \in \mathbb{Z}$, entonces $p \equiv 1 \pmod{4}$, pues $x^2 \equiv 0$ o $x^2 \equiv 1$, dependiendo de si x es par o impar y, si p es un primo impar, x e y deben tener distinta paridad. Análogamente, si $p = x^2 + 2y^2$, entonces $p \equiv 1 \pmod{8}$ o bien $p \equiv 3 \pmod{8}$. Y, si $p = x^2 + 3y^2$, entonces $p = 3$ o bien $p \equiv 1 \pmod{3}$. **(ejercicio)**.

Teorema 7.2. Un primo impar p se escribe como $x^2 + y^2$ con x e y enteros, si y sólo si $p \equiv 1 \pmod{4}$.

Demostración. Vamos a probar que, si $p \equiv 1 \pmod{4}$, entonces existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $p = x^2 + y^2$. La demostración estará dividida en dos pasos:

(Descenso) si p divide a una expresión del tipo $a^2 + b^2$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$, entonces existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $p = x^2 + y^2$;

(Reciprocidad) si $p \equiv 1 \pmod{4}$, entonces p divide a algún natural de la forma $a^2 + b^2$ con $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$.

Probamos cada una de estas afirmaciones, a continuación. □

La idea de Fermat era, aparentemente, la siguiente: si p es primo, $p \equiv 1 \pmod{4}$ y p no se escribe como suma de dos cuadrados, debería existir un primo $p' < p$ que cumpla que es $p' \equiv 1 \pmod{4}$ y que tampoco es suma de dos cuadrados. Eventualmente, llegaríamos a 5 que sí es suma de dos cuadrados. De esta contradicción (de que 5 es y no debería ser suma de dos cuadrados) se deduciría el resultado.

Lema 7.3. Sea N un natural que se puede expresar como suma de dos cuadrados coprimos. Si q es un divisor primo de N que se puede expresar como suma de dos cuadrados, entonces el cociente también se puede expresar como suma de dos cuadrados coprimos.

Demostración. Por hipótesis, existen $a, b \in \mathbb{Z}$ tales que $N = a^2 + b^2$ y $(a, b) = 1$ y existen, además, $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $q = x^2 + y^2$ (x e y son, necesariamente, coprimos). Como $q \mid N$, se cumple que q divide a $(bx - ay)(bx + ay)$, pues

$$Nx^2 - a^2q = b^2x^2 + a^2x^2 - a^2x^2 - a^2y^2 = (bx)^2 - (ay)^2 = (bx - ay)(bx + ay) .$$

Como q es primo, $q \mid bx - ay$, o bien $q \mid bx + ay$. Cambiando el signo de a , podemos suponer que estamos en el primer caso. Esto quiere decir que existe $d \in \mathbb{Z}$ tal que $bx - ay = dq$. Ahora bien,

$$bx - dx^2 = bx - dq + dy^2 = ay + dy^2 = (a + dy)y .$$

Como $x \mid bx - dx^2$, se cumple que $x \mid (a + dy)y$. Pero $(x, y) = 1$, con lo que $x \mid a + dy$. Existe, entonces, $c \in \mathbb{Z}$ tal que $a + dy = cx$. O sea,

$$a = cx - dy \quad y \quad b = dx + cy .$$

Pero, entonces,

$$N = a^2 + b^2 = (cx - dy)^2 + (dx + cy)^2 = (c^2 + d^2)(x^2 + y^2) = (c^2 + d^2)q .$$

Así, $N/q = c^2 + d^2$, pero, además, $(a, b) = 1$ implica que $(c, d) = 1$ **(ejercicio)**. \square

Observación 7.4. En la demostración del Lema 7.3 hicimos uso de la siguiente identidad **(ejercicio)**:

$$(cx - dy)^2 + (dx + cy)^2 = (c^2 + d^2)(x^2 + y^2) . \quad (6)$$

Ahora sí, probamos el paso de Descenso.

Lema 7.5 (Descenso). Sea p un primo impar que divide a una expresión del tipo $a^2 + b^2$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$. Entonces, existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $p = x^2 + y^2$.

Demostración. La hipótesis es que $p \mid N = a^2 + b^2$ y $(a, b) = 1$. Veamos, en primer lugar, que podemos asumir, además, que $|a| < p/2$ y que $|b| < p/2$. Cambiando a por $a - kp$ con algún k conveniente, conseguimos $|a - kp| < p/2$. Pero, $(a - kp)^2 + b^2 = a^2 + b^2 - 2kp + k^2p^2$. Como $p \mid a^2 + b^2$, deducimos que p divide a $(a - kp)^2 + b^2$. Cambiamos a por $a - kp$ y ahora p divide a una expresión $a_1^2 + b^2$, donde $|a_1| < p/2$. De la misma manera, conseguimos que p divida una expresión $N_1 := a_1^2 + b_1^2$ con $|b_1| < p/2$. Pero, al hacer estos cambios, podemos haber introducido divisores comunes entre a_1 y b_1 . Es decir, puede pasar que $(a_1, b_1) > 1$. Sin embargo, dividiendo por (a_1, b_1) , volvemos al caso coprimo. Veamos esto. Sea $d := (a_1, b_1)$. Por cómo fueron elegidos $a_1 = a - kp$ y $b_1 = b - lp$ con $k, l \in \mathbb{Z}$. Como $(a, b) = 1$, en particular, p no es un divisor común de a y de b . Pero, entonces, p tampoco es un divisor común de a_1 y de b_1 . O sea, $(p, d) = 1$. De esta manera,

si $N_2 := N_1/d^2$, $a_2 := a_1/d$ y $b_2 := b_1/d$, entonces $a_2, b_2 \in \mathbb{Z}$, $|a_2| \leq |a_1| < p/2$ y $|b_2| \leq |b_1| < p/2$, $(a_2, b_2) = 1$ y, finalmente, $p \mid N_2$ (aquí usamos que $(p, d) = 1$).

Recapitulando, asumimos que $p \mid N$, donde $N = a^2 + b^2$, $(a, b) = 1$, $|a| < p/2$ y $|b| < p/2$. Bajo estas suposiciones adicionales, $N < p^2/2$. En particular, si $q \neq p$ es un divisor primo de N , debe ser $q < p$. Separamos dos casos: o bien todo tal q es suma de dos cuadrados, o bien existe un divisor primo q de N que no es suma de cuadrados. En el primer caso, por el Lema 7.3, se deduce, eliminando todos los factores primos distintos de p , que p también debe ser suma de cuadrados (notar que $p^2 \nmid N$). Supongamos, para llegar a una contradicción que p no es suma de cuadrados. Entonces, existiría un divisor primo de N , $q < p$, que tampoco es suma de cuadrados. Necesariamente, q debe ser impar ($2 = 1^2 + 1^2$) y, más aun, $q \equiv 1 \pmod{4}$ (ver el Ejemplo 7.1). Pero, entonces, estaríamos en las mismas hipótesis del resultado que queremos probar: q es primo impar que divide a $N = a^2 + b^2$, con la diferencia de que q es estrictamente más chico que p . Eventualmente, deberíamos llegar al menor primo con esta propiedad. Para terminar, notamos que el menor primo impar congruente con 1 módulo 4 es 5 que sí es suma de cuadrados ($5 = 2^2 + 1^2$). Llegamos a la siguiente contradicción 5 es suma de cuadrados, pero, por el proceso por el que *descendimos* hasta este primo, 5 no debería ser suma de cuadrados. Esta contradicción viene de suponer que el primo p del cual partimos no era suma de cuadrados. \square

Lema 7.6 (Reciprocidad). *Si p es un número primo impar y $p \equiv 1 \pmod{4}$, entonces p divide a una expresión del tipo $a^2 + b^2$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$.*

Demostración. Por hipótesis, $p - 1 = 4k$, $k \in \mathbb{Z}$, y, entonces por el Teorema 3.23, como $\varphi(p) = p - 1$, $x^{4k} \equiv 1 \pmod{p}$, para todo $x \in \mathbb{Z}$ coprimo con p (o sea, para todo $x \not\equiv 0 \pmod{p}$), o, lo que es lo mismo, $p \mid x^{4k} - 1$. Pero $x^{4k} - 1 = (x^{2k} - 1)(x^{2k} + 1)$. Como p es primo, $p \mid x^{2k} - 1$ o bien $p \mid x^{2k} + 1$. En términos de congruencias, para todo $x \in \mathbb{Z}$, $(x, p) = 1$,

$$x^{2k} - 1 \equiv 0 \pmod{p} \quad \text{o bien} \quad x^{2k} + 1 \equiv 0 \pmod{p}.$$

Es decir, cada una de las $p - 1$ clases de congruencia $\not\equiv 0$ módulo p es solución de alguna de estas dos ecuaciones de congruencia. Pero, como $2k < p$, existe $x \in \mathbb{Z}$ tal que $x^{2k} - 1 \not\equiv 0 \pmod{p}$ (**ejercicio**).²³ Entonces, debe ser $x^{2k} + 1 \equiv 0 \pmod{p}$. Obtenemos el resultado eligiendo $a = x^k$ y $b = 1$. \square

Ejercicios

Ejercicio 7.1. Verificar las siguientes identidades:

$$(i) \quad (x^2 + y^2)(z^2 + w^2) = (xz \pm yw)^2 + (xw \mp yz)^2;$$

²³ Para dar una prueba de esto, se puede usar el resultado del Ejercicio 7.2. Usando los resultados de la § 6, se puede dar una demostración más algebraica. Más adelante, veremos otra demostración de que la cantidad de soluciones distintas a una ecuación de congruencia $f(x) \equiv 0 \pmod{p}$ está acotada por el grado del polinomio f (Lema ??).

$$(ii) (x^2 + ny^2)(z^2 + nw^2) = (xz \pm nyw)^2 + n(xw \mp yz)^2.$$

Generalizar y hallar una identidad del estilo

$$(ax^2 + cy^2)(az^2 + cw^2) = (i?)^2 + ac(j?)^2.$$

Ejercicio 7.2. Sean p un número primo y

$$f = a_0 + a_1 X + \cdots + a_{d-1} X^{d-1} + X^d$$

un polinomio mónico (coeficiente principal = 1) de grado $d < p$. Una de las conclusiones de este ejercicio será que $f(x) \not\equiv 0 \pmod{p}$ tiene solución, es decir, existe $x \in \mathbb{Z}$ tal que $f(x) \not\equiv 0 \pmod{p}$. Dicho de otra manera, $f(x) \equiv 0 \pmod{p}$, con f de grado $d < p$, no puede tener p soluciones distintas módulo p . Con este objetivo, definimos Δf como el polinomio

$$\Delta f = f(X+1) - f(X);$$

podemos iterar y definir $\Delta^{k+1} f = \Delta(\Delta^k f)$. Probar las siguientes afirmaciones:

- (i) si $k \geq 1$, entonces $\Delta^k f$ es una combinación lineal de $f(X), f(X+1), \dots, f(X+k)$ con coeficientes enteros;
- (ii) si $k = d$, el polinomio $\Delta^d f$ es constante: $\Delta^d f(X) = d!$;
- (iii) existe $x \in \mathbb{Z}$ tal que $f(x) \not\equiv 0 \pmod{p}$.²⁴

Ejercicio 7.3. Probar la siguiente versión análoga del Lema 7.3:

Sea $n > 0$ un número entero positivo y sea N un natural que se puede expresar como $N = a^2 + nb^2$ con $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$. Si q es un divisor primo de N que no divide a n y se puede expresar como $q = x^2 + ny^2$, entonces el cociente N/q también se puede expresar como $c^2 + nd^2$ con $c, d \in \mathbb{Z}$ y $(c, d) = 1$.

Probar, además, que esto es cierto también si $n = 3$ y $q = 4$.

Ejercicio 7.4. Sea q un primo y sea $N = a^2 + mqb^2$ un natural ($n = mq$) donde $a, b, m \in \mathbb{Z}$. Probar que, si q divide a N , entonces $N/q = mc^2 + qd^2$ donde $c, d \in \mathbb{Z}$. Probar, además, que, si $(a, b) = 1$, entonces $(c, d) = 1$.

Ejercicio 7.5. Probar las siguientes versiones análogas del Lema 7.5 para $n = 2, 3$:

Sea p un primo que divide a una expresión del tipo $a^2 + 2b^2$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$. Entonces, existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $p = x^2 + 2y^2$.

Sea p un primo impar que divide a una expresión del tipo $a^2 + 3b^2$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$. Entonces, existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $p = x^2 + 3y^2$.

²⁴Hint: si $f(x) \not\equiv 0 \pmod{p}$ no admitiera soluciones, entonces por (i), $p \mid \Delta^d f$ y, por (ii) (y $d < p$) esto es imposible.

Ejercicio 7.6. Probar la siguiente versión análoga del Lema 7.6:

Si p es primo y $p \equiv 1 \pmod{3}$, entonces p divide a una expresión del tipo $a^2 + 3b^2$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$,

usando, por ejemplo, la siguiente identidad:

$$4(x^{3k} - 1) = 4(x^{2k} + x^k + 1)(x^k - 1) = ((2x^k + 1)^2 + 3)(x^k - 1).$$

Ejercicio 7.7. Probar que si $p \equiv 1 \pmod{8}$ es primo, entonces p divide a una expresión del tipo $a^2 + 2b^2$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$, usando la siguiente identidad:

$$x^{8k} - 1 = ((x^{2k} - 1)^2 + 2x^{2k})(x^{4k} - 1).$$

Mostrar que existen primos $p \equiv 3 \pmod{8}$ que dividen a números de la forma $a^2 + 2b^2$.

Ejercicio 7.8. Para cada primo $p \equiv 1 \pmod{3}$, $p \leq 50$, buscar todos los valores $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $p = x^2 + 3y^2$.

Ejercicio 7.9. En este ejercicio investigaremos condiciones que sirvan para determinar si un primo divide a una expresión de la forma $a^2 + 5b^2$ donde $a, b \in \mathbb{Z}$ y $(a, b) = 1$.

- (i) Calcular que, si p es un primo que divide a un natural de la forma $a^2 + 5b^2$ con $a, b \leq 40$ y $(a, b) = 1$, entonces p puede ser $\equiv 1, 3, 2, 4 \pmod{5}$. O sea, en este caso, mirar congruencia módulo 5 no parece dar información acerca de si un primo divide o no a un natural de la forma $a^2 + 5b^2$.
- (ii) Hallar primos $p \equiv 2, 4 \pmod{5}$ que no dividen a ningún natural de la forma $a^2 + 5b^2$ con $a, b \leq 40$ y $(a, b) = 1$ (dicho de otra manera, que no aparecen entre los divisores de ninguno de estos números).
- (iii) Calcular que, si p es un primo que divide a un natural de la forma $a^2 + 5b^2$ con $a, b \leq 40$ y $(a, b) = 1$, entonces $p \equiv 1, 3, 7, 9 \pmod{20}$.

Ejercicio 7.10. En este ejercicio investigamos otras formas de representar. En las siguientes afirmaciones, $a, b \in \mathbb{Z}$, $(a, b) = 1$ y $|a|, |b| \leq 40$.

- (i) Determinar las posibles clases de congruencia módulo 28 de los primos p que dividen a los enteros $a^2 + 7b^2$.
- (ii) Determinar las posibles clases de congruencia módulo 12 de los primos p que dividen a los enteros $a^2 - 3b^2$.
- (iii) Determinar las posibles clases de congruencia módulo 20 de los primos p que dividen a los enteros $a^2 - 5b^2$.
- (iv) Determinar las posibles clases de congruencia módulo 28 de los primos p que dividen a los enteros $a^2 - 7b^2$.

Notar que en los casos (ii), (iii) y (iv) las clases obtenidas se pueden representar como $\pm\beta^2$ donde β es un número impar.

8 La ecuación $p = x^2 + ny^2$ y Reciprocidad cuadrática

El Teorema 7.2 caracteriza los primos impares que se pueden expresar como suma de dos cuadrados enteros. Nuestro objetivo será entender en qué medida es posible adaptar el método que nos permitió demostrar este resultado para estudiar la ecuación $p = x^2 + ny^2$.

El argumento de la demostración del Teorema 7.2 fue dividido en tres afirmaciones, agrupadas en dos partes: las dos primeras (Lema 7.3 y Lema 7.5) constituyen lo que llamamos “paso de descenso”; a la tercera (Lema 7.6) le dimos el nombre de “paso de reciprocidad”. El Lema 7.3 depende de la identidad (6). Esta identidad se generaliza y, con ella, el resultado del Lema 7.3. Sin embargo, el argumento de la demostración del Lema 7.5 tiene sus limitaciones: depende de una cota que se adapta casi sin cambios a los casos $n = 2$ y $n = 3$, pero que falla para $n \geq 4$. Más aun, la afirmación misma del Lema 7.5 puede ser falsa para $n \geq 4$, si se traduce literalmente. Por ejemplo,

- si $n = 5$, $3 \mid 21 = 1^2 + 5 \cdot 2^2$, pero $3 \neq x^2 + 5y^2$, pues $3 < 5$;
- si $n = 6$, $5 \mid 25 = 1^2 + 6 \cdot 2^2$, pero $5 \neq x^2 + 6y^2$, pues $5 < 6$.

¿Es cierto que si p divide a un natural de la forma $a^2 + nb^2$ con $(a, b) = 1$ entonces p se puede expresar en la forma $x^2 + ny^2$?

¿Qué pasa con $n = 4$ o $n = 7$? Si bien es cierto que, por ejemplo, $3 \neq x^2 + 4y^2$ y que $5 \neq x^2 + 7y^2$ ¿pueden 3 ser un divisor de un natural de la forma $a^2 + 4b^2$ o 5 un divisor de un natural de la forma $a^2 + 7b^2$ con $(a, b) = 1$? Deliberadamente estamos mirando $p < n$, pues, así, nos aseguraríamos de que $p \neq x^2 + ny^2$. Pero ¿si buscáramos $p \geq n$, encontraríamos un p tal que $p \mid a^2 + 4b^2$, pero $p \neq x^2 + 4y^2$, o tal que $p \mid a^2 + 7b^2$, pero $p \neq x^2 + 7y^2$? ¿Si $n \geq 8$? ¿Existen contraejemplos?

- para $n = 8$, se cumple $3 \mid 12 = 2^2 + 8 \cdot 1^2$, pero $3 \neq x^2 + 8y^2$ (ni 5 ni 7 funcionan);
- para $n = 9$, se cumple $5 \mid 10 = 1^2 + 9 \cdot 1^2$, pero $5 \neq x^2 + 9y^2$ (7 no funciona);
- para $n = 10$, se cumple $7 \mid 14 = 2^2 + 10 \cdot 1^2$, pero $7 \neq x^2 + 10y^2$ (3 no funciona);
- para $n = 11$, se cumple $3, 5 \mid 15 = 2^2 + 11 \cdot 1^2$, pero $3, 5 \neq x^2 + 11y^2$ (7 no funciona).

Vamos a poder decir algo más acerca de estas preguntas, una vez que hablemos de formas cuadráticas, reducción, sus clases de equivalencia y los números de clases.

Ya vemos que nos encontramos con algunas dificultades al querer estudiar el problema en general, en relación con el paso de descenso. Por otro lado, con respecto a reciprocidad, el Lema 7.6 nos muestra que una condición de congruencia garantiza que un primo impar divida una suma de cuadrados. Si bien la demostración de este resultado puede parecer *ad hoc*, veremos cómo rescatar la idea del enunciado. Precisamente, vamos a ver que existen condiciones de congruencia sobre un primo impar, $(p, n) = 1$, que garantizan que $p \mid a^2 + nb^2$, $(a, b) = 1$.

Definición 8.1. Dados un entero $a \in \mathbb{Z}$ y un primo impar $p (> 0)$, decimos que a es un residuo cuadrático módulo p , si $p \nmid a$ y si la ecuación $x^2 \equiv a \pmod{p}$ tiene solución módulo p . El símbolo de Legendre (a/p) es:

$$\left(\frac{a}{p}\right) := \begin{cases} 0, & \text{si } p \mid a, \\ 1, & \text{si } p \nmid a \text{ y } a \text{ es residuo cuadrático,} \\ -1, & \text{si } p \nmid a \text{ y } a \text{ no es residuo cuadrático.} \end{cases}$$

Observación 8.2. Los enteros 0, 1 y todos los cuadrados perfectos son residuos cuadráticos módulo cualquier entero. En particular, $(n^2/p) = 1$ para todo primo impar p y todo entero n coprimo con p .

Lema 8.3. Sea $n \in \mathbb{Z}$, $n \neq 0$, y sea p un primo impar que no divide a n . Entonces, existen $a, b \in \mathbb{Z}$ tales que $p \mid a^2 + nb^2$ y $(a, b) = 1$, si y sólo si $(-n/p) = 1$.

Demostración. Supongamos que $a, b \in \mathbb{Z}$ son tales que $p \mid a^2 + nb^2$. Entonces, $x^2 \equiv -ny^2 \pmod{p}$. Si $p \nmid n$, debe ser $p \mid a$, si y sólo si $p \mid b$. Si, además, $(a, b) = 1$, entonces $p \nmid a$ y $p \nmid b$. En particular, $(b^{-1}a)^2 \equiv -n \pmod{p}$ y, así, $(-n/p) = 1$. Completar la demostración (ejercicio). \square

Pregunta 8.4. ¿Existen condiciones de congruencia sobre un primo impar p que garanticen que $(-n/p) = 1$?

Veamos con un poco más de cuidado qué podría querer decir “condiciones de congruencia”. En el caso $n = 1$, suma de dos cuadrados, la condición es $p \equiv 1 \pmod{4}$. Sea $f(x, y) = x^2 + ny^2$. Podemos tratar de entender la situación calculando distintos valores que la función f toma, con $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $(x, y) = 1$, y luego factorizando cada uno de estos valores obtenidos, para buscar sus factores primos. La Tabla 1 y la Tabla 2 muestran los primos obtenidos de esta manera, para distintos valores de n , variando x e y en un cierto rango, agrupados de acuerdo a su clase de congruencia módulo $4|n|$. Dicho de otra manera, la tabla muestra las distintas *clases de congruencia módulo $4|n|$ representadas por primos que se obtienen como factores de enteros de la forma $a^2 + nb^2$ con a y b coprimos*.

Asumiendo que los valores de p que no aparecen son tales que $(-n/p) = -1$ (lo cual no hemos demostrado), se pueden conjeturar algunas propiedades del símbolo. Por ejemplo, de la Tabla 2, mirando las filas para $n = -2$, $n = -3$ y $n = -6$,

$$\left(\frac{6}{p}\right) = 1 \quad \text{si y sólo si} \quad p \equiv 1, 5, 19, 23 \pmod{24},$$

que equivale a

$$\begin{cases} p \equiv 1 \pmod{8} \text{ y } \\ p \equiv 1 \pmod{3}, \end{cases} \quad \begin{cases} p \equiv 5 \pmod{8} \text{ y } \\ p \equiv 2 \pmod{3}, \end{cases} \quad \begin{cases} p \equiv 3 \pmod{8} \text{ y } \\ p \equiv 1 \pmod{3}, \end{cases} \quad \text{o} \quad \begin{cases} p \equiv 7 \pmod{8} \text{ y } \\ p \equiv 2 \pmod{3}. \end{cases}$$

n	$(-n/p) = 1$
2	$p \equiv 1, 3 \pmod{8}$
3	$p \equiv 1, 7 \pmod{12}$
5	$p \equiv 1, 3, 7, 9 \pmod{20}$
7	$p \equiv 1, 9, 11, 15, 23, 25 \pmod{28}$
11	$p \equiv 1, 3, 5, 9, 15, 23, 25, 27, 31, 37 \pmod{44}$
13	$p \equiv 1, 7, 9, 11, 15, 17, 19, 25, 29, 31, 47, 49 \pmod{52}$
17	$p \equiv 1, 3, 7, 9, 11, 13, 21, 23, 25, 27, 31, 33, 39, 49, 53, 63 \pmod{68}$
6	$p \equiv 1, 5, 7, 11 \pmod{24}$
10	$p \equiv 1, 7, 9, 11, 13, 19, 23, 37 \pmod{40}$
14	$p \equiv 1, 3, 5, 9, 13, 15, 19, 23, 25, 27, 39, 45 \pmod{56}$
15	$p \equiv 1, 17, 19, 23, 31, 47, 49, 53 \pmod{60}$
21	$p \equiv 1, 5, 11, 17, 19, 23, 25, 31, 37, 41, 55, 71 \pmod{84}$
1	$p \equiv 1 \pmod{4}$
4	$p \equiv 1, 5, 9, 13 \pmod{16}$

Tabla 1: Divisores primos de $a^2 + nb^2$ con $(a, b) = 1$ y $1 \leq a, b \leq 50$.

n	$(-n/p) = 1$
-2	$p \equiv 1, 7 \pmod{8}$
-3	$p \equiv 1, 11 \pmod{12}$
-5	$p \equiv 1, 9, 11, 19 \pmod{20}$
-7	$p \equiv 1, 3, 9, 19, 25, 27 \pmod{28}$
-11	$p \equiv 1, 5, 7, 9, 19, 25, 35, 37, 39, 43 \pmod{44}$
-13	$p \equiv 1, 3, 9, 17, 23, 25, 27, 29, 35, 43, 49, 51 \pmod{52}$
-17	$p \equiv 1, 9, 13, 15, 19, 21, 25, 33, 35, 43, 47, 49, 53, 55, 59, 67 \pmod{68}$
-6	$p \equiv 1, 5, 19, 23 \pmod{24}$
-10	$p \equiv 1, 3, 9, 13, 27, 31, 37, 39 \pmod{40}$
-14	$p \equiv 1, 5, 9, 11, 13, 25, 31, 43, 45, 47, 51, 55 \pmod{56}$
-15	$p \equiv 1, 7, 11, 17, 43, 49, 53, 59 \pmod{60}$
-21	$p \equiv 1, 5, 17, 25, 37, 41, 43, 47, 59, 67, 79, 83 \pmod{84}$
-1	$p \equiv 1, 3 \pmod{4}$
-4	$p \equiv 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 \pmod{16}$

Tabla 2: Divisores primos de $a^2 + nb^2$ con $(a, b) = 1$ y $1 \leq |a|, |b| \leq 50$.

Pero esto es lo mismo que

$$\left\{ \begin{array}{l} p \equiv 1 \pmod{8} \text{ y} \\ p \equiv 1 \pmod{12} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} p \equiv 5 \pmod{8} \text{ y} \\ p \equiv 5 \pmod{12} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} p \equiv 3 \pmod{8} \text{ y} \\ p \equiv 7 \pmod{12} \end{array} \right\} \quad \text{o} \quad \left\{ \begin{array}{l} p \equiv 7 \pmod{8} \text{ y} \\ p \equiv 11 \pmod{12} \end{array} \right\},$$

que equivale a

$$\left\{ \begin{array}{l} (2/p) = 1 \text{ y} \\ (3/p) = 1 \end{array} \right\} \quad \text{o} \quad \left\{ \begin{array}{l} (2/p) = -1 \text{ y} \\ (3/p) = -1 \end{array} \right\}.$$

Expresado de otra manera,

$$\left(\frac{6}{p}\right) = \left(\frac{2}{p}\right) \left(\frac{3}{p}\right).$$

Otra cosa que se puede observar es que, en la Tabla 2, en los casos en que $n = -q$ con q primo, las clases representadas son equivalentes a $\pm\beta^2$ con β impar, $\beta < q$. Sin embargo, esta observación deja de ser válida si n es compuesto. Por ejemplo, si $n = -6$, las clases módulo 24 representadas por factores primos p tales que $(6/p) = 1$ son, de acuerdo con la tabla, 1, 5, 19 y 23. Por otro lado, los cuadrados módulo 24 son 1, 4, 9, 12 y 16. En particular, sólo 1 y 23 son de la forma $\pm\beta^2$ con β impar (y coprimo con 24).

Teorema 8.5. *Si $p, q > 0$ son primos impares distintos, entonces*

$$\left(\frac{q}{p}\right) = 1, \text{ si y sólo si } p \equiv \pm\beta^2 \pmod{4q},$$

para cierto $\beta \in \mathbb{Z}$ impar.

El Teorema 8.5 relaciona residuos cuadráticos módulo p con residuos módulo $4q$, si p y q son primos positivos, impares y distintos: q es cuadrado módulo p , si y sólo si $\pm p$ es cuadrado módulo $4q$. ¿Qué se puede decir si n es compuesto? ¿Qué pasa si $n > 0$? ¿Hay relación entre $(-n/p)$ y (n/p) ? En la § 3, vimos que las ecuaciones de congruencia $ax \equiv b \pmod{m}$ tienen solución exactamente cuando $(a, m) \mid b$. ¿Hay alguna manera de saber si $x^2 \equiv D \pmod{4k}$ tiene soluciones? Antes de pasar a estudiar el símbolo de Legendre, veamos cómo podemos usarlo para dar respuesta a la Pregunta 8.4.

En primer lugar, con respecto al Teorema 8.5, ¿podemos precisar, en la congruencia $p \equiv \pm\beta^2$, en qué casos el signo debería ser $+$ y en qué casos debería ser $-$? De la Tabla 2, a partir de la cual formulamos el Teorema 8.5, vemos que $p \equiv +\beta^2 \pmod{4q}$, si $p \equiv 1 \pmod{4}$, y que $p \equiv -\beta^2 \pmod{4q}$, si $p \equiv 3 \pmod{4}$. Esto tiene sentido: los únicos cuadrados módulo 4 son los $\equiv 1 \pmod{4}$. Pero, entonces, el signo debería ser

$$\pm = (-1)^{\frac{p-1}{2}}.$$

En definitiva, $p \equiv \pm\beta^2 \pmod{4q}$ quiere decir

$$p \equiv (-1)^{\frac{p-1}{2}} \beta^2 \pmod{4q};$$

no hay ambigüedad en el signo. Si escribimos $p^* := (-1)^{\frac{p-1}{2}} p$, entonces $p^* \equiv 1 \pmod{4}$ y, en particular **(ejercicio)**, las siguientes afirmaciones son equivalentes:

- $p \equiv \pm \beta^2 \pmod{4q}$,
- $p^* \equiv \beta^2 \pmod{4q}$,
- $p^* \equiv \beta^2 \pmod{q}$,
- $(p^*/q) = 1$.

Lema 8.6. *El Teorema 8.5 es equivalente a la afirmación: para todo par de primos positivos, impares y distintos, p y q ,*

$$\left(\frac{q}{p}\right) = \left(\frac{p^*}{q}\right).$$

Demostración. De lo anterior, $p \equiv \pm \beta^2 \pmod{4q}$, si y sólo si $(p^*/q) = 1$. Por lo tanto, el Teorema 8.5 es equivalente a $(q/p) = 1$, si y sólo si $(p^*/q) = 1$, para todo par de primos positivos, impares y distintos. Pero (q/p) y (p^*/q) son ± 1 , con lo que la afirmación “ $(q/p) = 1$, si y sólo si $(p^*/q) = 1$ ” equivale a $(q/p) = (p^*/q)$. \square

El Teorema 8.7 resume algunas de las propiedades del símbolo de Legendre; su demostración la dejamos para la § 9.

Teorema 8.7. *Sea $p > 0$ un primo impar. Entonces, se cumple*

- (i) $(n/p) = (n'/p)$, si $n \equiv n' \pmod{p}$;
- (ii) $(ab/p) = (a/p)(b/p)$, para todo par $a, b \in \mathbb{Z}$;
- (iii) $(-1/p) = (-1)^{\frac{p-1}{2}}$ y, más en general, $(n/p) \equiv n^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}$, para todo $n \in \mathbb{Z}$;
- (iv) $(2/p) = (-1)^{\frac{p^2-1}{8}}$;
- (v) $(q/p) = (p^*/q)$, si q es un primo positivo, impar y distinto de p .

Observación 8.8. El ítem (iii) es equivalente a

$$\left(\frac{-1}{p}\right) = \begin{cases} 1, & \text{si } p \equiv 1 \pmod{4} \text{ y} \\ -1, & \text{si } p \equiv 3 \pmod{4}. \end{cases}$$

El ítem (iv) equivale a

$$\left(\frac{2}{p}\right) = \begin{cases} 1, & \text{si } p \equiv 1, 7 \pmod{8} \text{ y} \\ -1, & \text{si } p \equiv 3, 5 \pmod{8}. \end{cases}$$

El ítem (v) lo podemos reescribir como

$$\left(\frac{q}{p}\right) = (-1)^{\frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2}} \left(\frac{p}{q}\right),$$

o bien como

$$\left(\frac{q}{p}\right) \left(\frac{p}{q}\right) = (-1)^{\frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2}}.$$

Este último es, de acuerdo con el Lema 8.6, equivalente al Teorema 8.5.

El Lema 8.6 nos permitió reinterpretar el problema de encontrar condiciones de congruencia que garanticen que un primo impar divida a una expresión de la forma $a^2 + nb^2$ con $(a, b) = 1$ en términos del símbolo de Legendre. El Lema 8.9 nos permitirá reinterpretar el problema en términos más algebraicos (Teorema 8.10).

Lema 8.9. *Si $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D \neq 0$, existe una única función $\chi(m)$, $m \in \mathbb{Z}$, que cumple que:*

- (1) $\chi(m) = \chi(m')$, si $m \equiv m' \pmod{D}$,
- (2) $\chi(mn) = \chi(m)\chi(n)$, para todo par $m, n \in \mathbb{Z}$,
- (3) $\chi(p) = (D/p)$, si p es un primo (positivo) impar que no divide a D y
- (4) $\chi(m) = 0$, si $(m, D) > 1$.

Juntando el Lema 8.9 con el Lema 8.3 obtenemos la siguiente consecuencia.

Teorema 8.10. *Sean $n \in \mathbb{Z}$, $n \neq 0$, y χ la función del Lema 8.9 ($D = -4n$). Entonces, si p es un primo positivo impar que no divide a n , las siguientes afirmaciones son equivalentes:*

- (a) existen $a, b \in \mathbb{Z}$ tales que $p \mid a^2 + nb^2$ y $(a, b) = 1$;
- (b) $(-n/p) = 1$;
- (c) $\chi(p) = 1$.

De esta manera, obtenemos lo que buscábamos (o, por lo menos, en teoría). Si p es un primo impar que no divide a n , existen $a, b \in \mathbb{Z}$ tales que $p \mid a^2 + nb^2$ y $(a, b) = 1$, si y sólo si p pertenece a determinadas clases de congruencia: aquellas clases módulo $4|n|$ en las que χ toma el valor 1.²⁵

A continuación, demostramos el Lema 8.9 asumiendo las propiedades del símbolo de Legendre enunciadas en el Teorema 8.7.

Demostración del Lema 8.9. Esencialmente, tanto existencia, como unicidad de la función χ , dependen del hecho de que todo número entero coprimo con D es congruente, módulo D , a un entero positivo, impar y coprimo con D .²⁶

Con respecto a la unicidad, supongamos que χ posee las propiedades deseadas. Entonces, cuando $m \in \mathbb{Z}$,

- si $(m, D) > 1$, $\chi(m) = 0$;
- si $(m, D) = 1$,

²⁵ Para hacer las cosas explícitas deberíamos poder calcular esta función χ .

²⁶ Más aun, el teorema de Dirichlet sobre primos en progresiones aritméticas garantiza que toda clase de congruencia módulo D coprime con D contiene algún número primo positivo impar.

- si $m < 0$, se cumple que $m + kD > 0$ para algún $k \in \mathbb{Z}$, $m + kD \equiv m \pmod{D}$ y $\chi(m + kD) = \chi(m)$;
- si m es par, debía ser $D \equiv 1 \pmod{4}$ y, en consecuencia, $m + |D|$ es impar, $m + |D| \equiv m \pmod{D}$ y $\chi(m + |D|) = \chi(m)$;
- si m es impar y positivo, se escribe como producto de primos positivos impares, $m = p_1 \cdots p_r$ (posiblemente, con repeticiones), con lo que

$$\chi(m) = \chi(p_1) \cdots \chi(p_r) = \left(\frac{D}{p_1}\right) \cdots \left(\frac{D}{p_r}\right).$$

En cualquier caso, al ser $\chi(mn) = \chi(m)\chi(n)$, χ queda determinada por su valor en los primos impares que no dividen a D y por la condición $\chi(m) = 0$, si $(m, D) > 1$.

Para probar la existencia, introducimos el símbolo de Jacobi, que se puede interpretar como una extensión del símbolo de Legendre. Dados $M, m \in \mathbb{Z}$, $m > 0$, si $m = p_1 \cdots p_r$ es la factorización de m en producto de primos (posiblemente, con repeticiones), el *símbolo de Jacobi* $\left(\frac{M}{m}\right)$ es

$$\left(\frac{M}{m}\right) = \left(\frac{M}{p_1}\right) \cdots \left(\frac{M}{p_r}\right),$$

donde, del lado derecho, (M/p_i) denota el símbolo de Legendre. El símbolo de Jacobi tiene propiedades análogas a las del símbolo de Legendre **(ejercicio)**:

- (I) $(N/m) = (N'/m)$, si $N \equiv N' \pmod{m}$,
- (II) $(AB/m) = (A/m)(B/m)$, para todo par $A, B \in \mathbb{Z}$,
- (III) $(-1/m) = (-1)^{\frac{m-1}{2}}$,
- (IV) $(2/m) = (-1)^{\frac{m^2-1}{8}}$,
- (V) $(M/m) = (m^*/M)$, si M es positivo, impar y $(M, m) = 1$, donde $m^* = (-1)^{\frac{m-1}{2}}m$.

En particular, en (V), si $M \equiv 1 \pmod{4}$, entonces $(M/m) = (m/M)$.

El símbolo de Jacobi tiene también la propiedad multiplicativa:

$$\left(\frac{M}{mn}\right) = \left(\frac{M}{m}\right) \left(\frac{M}{n}\right), \quad (7)$$

si $m, n > 0$. Pero, además, el símbolo de Jacobi tiene la siguiente propiedad adicional: si $D \in \mathbb{Z}$, $D \neq 0$ y $D \equiv 1 \pmod{4}$, entonces

$$\left(\frac{D}{m}\right) = \left(\frac{D}{n}\right), \quad (8)$$

si $m, n \in \mathbb{Z}$, $m, n > 0$, impares y $m \equiv n \pmod{D}$. Aceptando las propiedades (7) y (8), definimos la siguiente función $\chi(m)$, dado $m \in \mathbb{Z}$:

- si $(m, D) > 1$, $\chi(m) := 0$;
- si $(m, D) = 1$,
 - si $m < 0$, se cumple que $m + kD > 0$ para algún $k \in \mathbb{Z}$, $m + kD \equiv m \pmod{D}$ y $\chi(m + kD) := \chi(m)$;
 - si m es par, debía ser $D \equiv 1 \pmod{4}$ y, en consecuencia, $m + |D|$ es impar, $m + |D| \equiv m \pmod{D}$ y $\chi(m + |D|) := \chi(m)$;
 - si m es impar y positivo, $\chi(m) := (D/m)$.

La propiedad (8) muestra que χ está bien definida y, junto con (7) y las propiedades del símbolo de Jacobi, se deducen las propiedades mencionadas en el enunciado. \square

Lema 8.11. *El símbolo de Jacobi tiene las propiedades (7) y (8).*

Demostración. En cuanto a (7), si $m = p_1 \cdots p_r$ y $n = q_1 \cdots q_s$, entonces $mn = p_1 \cdots p_r q_1 \cdots q_s$ es la factorización de mn y

$$\left(\frac{M}{mn}\right) = \left(\frac{M}{p_1}\right) \cdots \left(\frac{M}{p_r}\right) \left(\frac{M}{q_1}\right) \cdots \left(\frac{M}{q_s}\right) = \left(\frac{M}{m}\right) \left(\frac{M}{n}\right).$$

En cuanto a (8), sean $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D \neq 0$ y sean $m, n > 0$ impares tales que $m \equiv n \pmod{D}$. Queremos ver que $(D/m) = (D/n)$. Notemos que $(m, D) = (n, D)$, con lo cual $(D/m) = 0$, si y sólo si $(D/n) = 0$. En particular, si m y n no son coprimos con D , $(D/m) = (D/n)$ (ambos siendo iguales a 0). En lo que queda, asumiremos que $(m, D) = (n, D) = 1$.

Supongamos, en primer lugar, que $D \equiv 1 \pmod{4}$ y $D > 0$. Entonces, por (V),

$$\left(\frac{D}{m}\right) = \left(\frac{m^*}{D}\right) = \left(\frac{m}{D}\right) = \left(\frac{n}{D}\right) = \left(\frac{n^*}{D}\right) = \left(\frac{D}{n}\right).$$

Manteniendo la hipótesis $D \equiv 1 \pmod{4}$, supongamos, en segundo lugar, que $D < 0$. Entonces, $|D| \equiv 3 \pmod{4}$, con lo cual,

$$\left(\frac{D}{m}\right) = \left(\frac{|D|}{m}\right) \left(\frac{-1}{m}\right) = \left(\frac{m^*}{|D|}\right) \left(\frac{-1}{|D|}\right) = \left(\frac{m}{|D|}\right).$$

Como lo mismo es cierto para n , y $(n/|D|) = (m/|D|)$, se deduce que $(D/m) = \left(\frac{D}{n}\right)$, en este caso.

Supongamos, ahora, que $D \equiv 0 \pmod{4}$ y que $D = 2^{2k+\delta} D_0$, donde $k \geq 1$, $\delta \in \{0, 1\}$ y D_0 es impar. Entonces, vale que

$$\left(\frac{D}{m}\right) = \left(\frac{2}{m}\right)^\delta \left(\frac{D_0}{m}\right)$$

y lo mismo para n en lugar de m . Además, como $4 \mid D$, debe ser $m \equiv n \pmod{4}$ y, por lo tanto,

$$\left(\frac{-1}{m}\right) = (-1)^{\frac{m-1}{2}} = (-1)^{\frac{n-1}{2}} = \left(\frac{-1}{n}\right).$$

Para terminar, vamos a ver que $(2/m) = (2/n)$, si $\delta \neq 0$, y que $(D_0/m) = (D_0/n)$. Primero, si $\delta \neq 0$, en particular vale que $8 \mid D$ y, en consecuencia, $m \equiv n \pmod{8}$. Pero, entonces,

$$\left(\frac{2}{m}\right) = (-1)^{\frac{m^2-1}{8}} = (-1)^{\frac{n^2-1}{8}} = \left(\frac{2}{n}\right).$$

Por último, $D_0 \equiv 1, 3 \pmod{4}$. En el caso en que $D_0 \equiv 1 \pmod{4}$ (sea positivo o negativo), por el caso anterior (el caso $D \equiv 1 \pmod{4}$), sabemos que $(D_0/m) = (D_0/n)$. Si, en el otro caso, $D_0 \equiv 3 \pmod{4}$, entonces, para $D_0 > 0$,

$$\left(\frac{D_0}{m}\right) = \left(\frac{m^*}{D_0}\right) = \left(\frac{m}{D_0}\right) \left(\frac{(-1)^{\frac{m-1}{2}}}{D_0}\right) = \left(\frac{n}{D_0}\right) \left(\frac{(-1)^{\frac{n-1}{2}}}{D_0}\right) = \left(\frac{n^*}{D_0}\right) = \left(\frac{D_0}{n}\right),$$

y, para $D_0 < 0$, $|D_0| \equiv 1 \pmod{4}$, con lo que,

$$\left(\frac{D_0}{m}\right) = \left(\frac{|D_0|}{m}\right) \left(\frac{-1}{m}\right) = \left(\frac{|D_0|}{n}\right) \left(\frac{-1}{n}\right) = \left(\frac{D_0}{n}\right).$$

□

Observación 8.12. Tanto en la demostración del Lema 8.9, como en la demostración del Lema 8.11, hicimos uso de las propiedades (I), (II), (III), (IV) y (V), que, a su vez, dependen de las propiedades análogas del símbolo de Legendre. Por otro lado, la función χ del Lema 8.9 *no es* el símbolo de Jacobi: el símbolo de Jacobi (M/m) sólo está definido para valores impares y positivos de m . Sin embargo, χ está definida en todo \mathbb{Z} .

Apéndice

El Lema 8.9 tiene una versión equivalente expresada en el lenguaje de grupos:

Lema 8.13. *Si $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D \neq 0$, existe un único morfismo de grupos $\chi : U(D) \rightarrow \{\pm 1\}$ tal que $\chi[p] = (D/p)$, si p es un primo (positivo) impar que no divide a D .*

De la misma manera, el ítem (c) del Teorema 8.10 se traduce en que la clase del primo pertenezca al núcleo del morfismo: $[p] \in \ker \chi \leq U(4|n|)$.

Observación 8.14. Se puede probar, conociendo la estructura de los grupos abelianos finitos $U(q)$ (q primo impar), $U(4)$ y $U(8)$, que el Lema 8.13 (o, equivalentemente, el Lema 8.9) y el Teorema 8.7 son equivalentes: asumiendo la existencia de los morfismos $\chi : U(D) \rightarrow \{\pm 1\}$, se pueden deducir las propiedades del símbolo de Legendre.

Ejercicios

Ejercicio 8.1. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D \neq 0$, y sea $\chi : \mathbb{Z} \rightarrow \{\pm 1\}$ la función del Lema 8.9 (o, equivalentemente, el morfismo del Lema 8.13).

(i) Probar que

$$\chi(-1) = \begin{cases} 1, & \text{si } D > 0 \text{ y} \\ -1, & \text{si } D < 0. \end{cases}$$

(ii) Probar que, si $D \equiv 1 \pmod{4}$, entonces

$$\chi(2) = \begin{cases} 1, & \text{si } D \equiv 1 \pmod{8} \text{ y} \\ -1, & \text{si } D \equiv 5 \pmod{8}. \end{cases}$$

Ejercicio 8.2. Sea $a \in \mathbb{Z}$ no un cuadrado perfecto. Probar que existen infinitos primos para los cuales a no es un residuo cuadrático:

- (i) reducir al caso en que a es libre de cuadrados, o sea $a = 2^e q_1 \cdots q_r$, donde q_i son primos impares distintos, $r \geq 0$ y $e \in \{0, 1\}$;
- (ii) suponer que a es divisible por algún primo impar (es decir, $a \neq 2$ y $r \geq 1$) y probar que, dado un conjunto finito de primos $\{l_1, \dots, l_k\}$ que excluye a 2 y los q_i , existe $b \in \mathbb{Z}$ que satisface:

$$\begin{aligned} b &\equiv 1 \pmod{l_j}, \\ b &\equiv 1 \pmod{8}, \\ b &\equiv 1 \pmod{q_i} \quad , \text{ si } i \neq r \text{ y} \\ b &\equiv s \pmod{q_r}, \end{aligned}$$

donde s es un no residuo cuadrático módulo q_r y mostrar que $(a/b) = -1$ y que, por lo tanto, existe un primo $p \notin \{2, q_1, \dots, q_r, l_1, \dots, l_k\}$ tal que $(a/p) = -1$;

- (iii) suponer que $a = 2$ y, dado un conjunto finito de primos $\{l_1, \dots, l_k\}$ que excluye a 3, definir $b := 8l_1 \cdots l_k + 3$ y probar que $(2/b) = -1$ y que, por lo tanto, existe un primo $p \notin \{2, 3, l_1, \dots, l_k\}$ tal que $(2/p) = -1$.

Ejercicio 8.3. Calcular el símbolo de Jacobi en los siguientes casos:

- $(113/997)$
- $(215/761)$
- $(514/1093)$
- $(401/757)$

Ejercicio 8.4. Determinar las clases en $\mathbb{Z}/84\mathbb{Z}$ para las cuales $(-21/p) = 1$, usando reciprocidad cuadrática.

9 Residuos cuadráticos y una demostración del Teorema 8.7

En esta sección estudiaremos la resolubilidad de $x^2 \equiv n \pmod{m}$ especialmente en el caso $m = p$ un primo impar. Recordemos que $n \in \mathbb{Z}$ es un *residuo (cuadrático) módulo m* , si la ecuación tiene solución y un *no residuo*, en caso contrario. Nuestro objetivo ahora será demostrar las propiedades del Teorema 8.7:

Teorema 8.7. *Sea $p > 0$ un primo impar. Entonces, se cumple*

- (i) $(n/p) = (n'/p)$, si $n \equiv n' \pmod{p}$;
- (ii) $(ab/p) = (a/p)(b/p)$, para todo par $a, b \in \mathbb{Z}$;
- (iii) $(-1/p) = (-1)^{\frac{p-1}{2}}$ y, más en general, $(n/p) \equiv n^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}$, para todo $n \in \mathbb{Z}$;
- (iv) $(2/p) = (-1)^{\frac{p^2-1}{8}}$;
- (v) $(q/p) = (p^*/q)$, si q es un primo positivo, impar y distinto de p .

La propiedad (i) es casi inmediata: si $n \equiv n' \pmod{p}$, entonces $(n, p) = (n', p)$, con lo que $(n/p) = 0$, si y sólo si $(n'/p) = 0$, si y sólo si p divide a n y a n' ; en otro caso, si x es solución de $x^2 \equiv n$, entonces $x^2 \equiv n'$, y viceversa, con lo que $(n/p) = 1$, si y sólo si $(n'/p) = 1$. Como el símbolo de Legendre toma valores 0, 1 o -1 (como $x^2 \equiv n$ tiene solución o no la tiene), concluimos que $(n/p) = (n'/p)$, si $n \equiv n' \pmod{p}$.

Empezamos por el siguiente resultado general acerca de la cantidad de soluciones a una ecuación polinomial módulo un primo.

Lema 9.1. *Sea p un primo y sea $f \in \mathbb{Z}[X]$, $f = c_0 + c_1X + \cdots + c_nX^n$, $n \geq 0$ y $p \nmid c_n$.²⁷ Entonces, la congruencia $f(x) \equiv 0 \pmod{p}$ tiene, a lo sumo, n soluciones distintas.*

Demostración. Si $n = 0$, $c_0 \not\equiv 0$ y $f(x) \equiv 0$ no tiene soluciones. Si $n > 0$ y $x_0 \in \mathbb{Z}$ cumple $f(x_0) \equiv 0$, entonces

$$f(x) - f(x_0) \equiv (x - x_0)g(x),$$

para cierto polinomio $g \in \mathbb{Z}[X]$, $g = b_0 + b_1X + \cdots + b_{n-1}X^{n-1}$, donde $b_{n-1} = c_n \not\equiv 0$, es decir, no es divisible por p **(ejercicio)**.²⁸ Pero, inductivamente, g no posee más de $n - 1$ raíces distintas módulo p , con lo que f no puede poseer más de n raíces distintas módulo p . \square

Lema 9.2. *Sea p un primo positivo impar. Entonces,*

²⁷ El Lema 9.1 se puede omitir, teniendo en cuenta los resultados de la § 6, específicamente, el Corolario 6.18, ítem (iii). Es, sin embargo, una versión elemental, en el sentido de que no hace uso de los conceptos desarrollados en la § 6. Esencialmente, la hipótesis sobre f es que el polinomio en $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}[X]$ que se obtiene reduciendo sus coeficientes módulo p tiene grado $n \geq 0$.

²⁸Hint: Usar que $x^t - x_0^t = (x - x_0)(x^{t-1} + x^{t-2}x_0 + \cdots + x_0^{t-1})$.

- (i) excluyendo 0, existen exactamente $\frac{p-1}{2}$ residuos cuadráticos módulo p y, por lo tanto, $\frac{p-1}{2}$ no residuos en cualquier sistema reducido de representantes de las clases módulo p ;
- (ii) las clases módulo p de los enteros $1^2, 2^2, \dots, (\frac{p-1}{2})^2$ son distintas;
- (iii) en particular, exceptuando 0, los residuos módulo p están representados por las $\frac{p-1}{2}$ clases del ítem (ii).

Demostración. Busquemos soluciones a la ecuación de congruencia

$$x^2 \equiv n \pmod{p} . \quad (9)$$

Si $n \equiv 0$, entonces la única solución es $x \equiv 0$. Supongamos que $n \not\equiv 0$ y que (9) admite una solución. Tomando resto de división por p , existe al menos una solución en el rango $0 \leq x \leq p-1$; como n no es divisible por p , $x = 0$ no es una de ellas. Si $x > p/2$, cambiando x por $p-x$, existe al menos una solución en el rango $1 \leq x \leq \frac{p-1}{2}$. Por lo tanto, (9) admite solución, si y sólo si n es congruente a alguna de las clases

$$1^2, 2^2, \dots, (\frac{p-1}{2})^2 . \quad (10)$$

En particular, exceptuando 0, hay a lo sumo $\frac{p-1}{2}$ residuos cuadráticos módulo p . Pero las clases (10) son todas distintas (ejercicio)²⁹ y, en consecuencia, hay $\frac{p-1}{2}$ residuos cuadráticos módulo p (exceptuando 0). \square

Lema 9.3 (Criterio de Euler). *Si p es un primo positivo impar, entonces*

$$\left(\frac{n}{p}\right) \equiv n^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p} .$$

Demostración. Si $n \equiv 0$, no hay nada que probar. Supongamos que $n \not\equiv 0$. El Teorema 3.23 implica que $n^{p-1} \equiv 1$. En particular,

$$(n^{\frac{p-1}{2}} - 1)(n^{\frac{p-1}{2}} + 1) \equiv 0 ,$$

o sea que $n^{\frac{p-1}{2}} \equiv \pm 1$. La afirmación es que este signo coincide con (n/p) . Notamos que no pueden darse simultáneamente ambas posibilidades.

Por un lado, si $(n/p) = 1$, existe $x \in \mathbb{Z}$ tal que $n \equiv x^2$ y, entonces

$$n^{\frac{p-1}{2}} \equiv x^{p-1} \equiv 1 .$$

Por otro lado, por el Lema 9.1, la congruencia $n^{\frac{p-1}{2}} \equiv 1$ tiene, a lo sumo, $\frac{p-1}{2}$ soluciones distintas módulo p . Pero, por el Lema 9.2, los enteros $1^2, 2^2, \dots, (\frac{p-1}{2})^2$ representan $\frac{p-1}{2}$

²⁹Hint: Si x e y son soluciones a (9), entonces $x \equiv y$, o bien $x \equiv -y$, y estas posibilidades se excluyen mutuamente, si $n \not\equiv 0$. Si $1 \leq x, y \leq \frac{p-1}{2}$ e $y \neq x$, entonces tendríamos cuatro soluciones distintas módulo p , contradiciendo el Lema 9.1.

clases distintas y son, por lo tanto, $\frac{p-1}{2}$ soluciones distintas (módulo p) a dicha ecuación. Así, si $(n/p) = -1$, $n \not\equiv x^2$ para ningún $1 \leq x \leq \frac{p-1}{2}$ y, en consecuencia, $n^{\frac{p-1}{2}} - 1 \not\equiv 0$. Como p es primo, debe cumplirse, en este caso,

$$n^{\frac{p-1}{2}} \equiv -1 .$$

□

Del Lema 9.3, deducimos, eligiendo $a = -1$ que $(-1/p) \equiv (-1)^{\frac{p-1}{2}} \pmod{p}$. Pero, dado que ambos lados de esta congruencia son iguales a ± 1 y que p es impar, concluimos que, en realidad, $(-1/p) = (-1)^{\frac{p-1}{2}}$. Esto prueba el ítem (iii).

De manera similar, usando el Lema 9.3, también podemos probar el ítem (ii):

$$\left(\frac{ab}{p}\right) \equiv (ab)^{\frac{p-1}{2}} = a^{\frac{p-1}{2}} b^{\frac{p-1}{2}} \equiv \left(\frac{a}{p}\right) \left(\frac{b}{p}\right) \pmod{p} ,$$

o sea que $(ab/p) \equiv (a/p)(b/p) \pmod{p}$. Pero, al igual que antes, ambos lados de la congruencia son iguales a ± 1 y p es impar, con lo cual, $(ab/p) = (a/p)(b/p)$.

Antes de pasar a la demostración del Teorema 8.7, demostramos un último resultado preliminar.

Lema 9.4 (Lema de Gauss). *Dado un primo positivo impar p y un número entero n coprimo con p , de los $\frac{p-1}{2}$ restos de división por p provenientes de los enteros $n, 2n, \dots, \frac{p-1}{2}n$, sea $m \geq 0$ la cantidad de los mismos que pertenecen al rango $p/2 < r < p$. Entonces,*

$$\left(\frac{n}{p}\right) = (-1)^m .$$

Ejemplo 9.5. Si $p = 7$, $n = 10 \equiv 3 \pmod{7}$, entonces $3 \equiv x^2 \pmod{7}$ no tiene solución —los cuadrados son 1, 4 y 2. Por otro lado, 10, 20 y 30 tienen restos 3, 6 y 2, respectivamente, al dividir por 7, con lo que $m = 1$ y se verifica que $(10/7) = (3/7) = -1 = (-1)^m$.

Ejemplo 9.6. Si $n = 1$, $m = 0$ y, entonces $(1/p) = 1 = (-1)^m$ también en este caso.

Demostración. En primer lugar, como $(n, p) = 1$, los enteros $n, 2n, \dots, \frac{p-1}{2}n$ pertenecen a clases distintas módulo p y, en particular, sus restos de dividir por p son distintos (y son $\frac{p-1}{2}$ en cantidad). Sea, ahora, $m \geq 0$ como en el enunciado y sea $l = \frac{p-1}{2} - m$. Sea $r(k) = r_p(k)$ el resto de dividir $k \in \mathbb{Z}$ por p ; si $k \not\equiv 0$, entonces $0 < r(k) < p$. Sea $\{a_1, \dots, a_l\}$ el subconjunto de restos $r(nx) < p/2$ y sea $\{b_1, \dots, b_m\}$ el subconjunto de restos $r(nx) > p/2$ con x variando en el rango $1 \leq x \leq \frac{p-1}{2}$. Multiplicando,

$$\prod_{i=1}^l a_i \prod_{j=1}^m b_j \equiv \prod_{x=1}^{(p-1)/2} nx = n^{\frac{p-1}{2}} \left(\frac{p-1}{2}\right)! .$$

Por otro lado, para cada j , $p - b_j$ pertenece al intervalo $0 < p - b_j < p/2$, pues $p/2 < b_j < p$; los a_i también pertenecen a dicho intervalo, pero deben ser distintos de los $p - b_j$ **(ejercicio)**³⁰ Así, porque $l + m = \frac{p-1}{2}$, vale que los conjuntos siguientes son iguales:

$$\{a_1, \dots, a_l\} \cup \{p - b_1, \dots, p - b_m\} = \left\{1, 2, \dots, \frac{p-1}{2}\right\}.$$

Multiplicando,

$$\left(\frac{p-1}{2}\right)! = \prod_{i=1}^l a_i \prod_{j=1}^m (p - b_j) \equiv (-1)^m \prod_{i=1}^l a_i \prod_{j=1}^m b_j.$$

En definitiva,

$$\left(\frac{p-1}{2}\right)! \equiv (-1)^m n^{\frac{p-1}{2}} \left(\frac{p-1}{2}\right)!$$

y, $1 \equiv (-1)^m n^{\frac{p-1}{2}}$, o, lo que es lo mismo, $(-1)^m \equiv n^{\frac{p-1}{2}}$. Pero, por el Criterio de Euler (Lema 9.3), $n^{\frac{p-1}{2}} \equiv (n/p)$. \square

Demostración del Teorema 8.7. Sólo resta demostrar las partes (iv) y (v). Sea q un primo positivo impar distinto de p , o bien $q = 2$. Primero, probamos una congruencia válida para ambos casos (ver (11)), que luego usamos para deducir los resultados.

Para cada $x \in \mathbb{Z}$ en el rango $1 \leq x \leq \frac{p-1}{2}$, como en la demostración del Lema 9.4, con $n = q$, sea $r_p(xq)$ el resto de la división por p . En particular, se cumple que

$$xq = \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor p + r_p(xq),$$

donde $\lfloor \cdot \rfloor$ denota la parte entera.³¹ Sabemos que estos restos son todos distintos y, como $q \neq p$, distintos de cero y que se separan en dos subconjuntos disjuntos $\{a_1, \dots, a_l\}$ y $\{b_1, \dots, b_m\}$, donde $a_i < p/2$, $b_j > p/2$ y $l + m = \frac{p-1}{2}$. Además, sabemos que

$$\{a_1, \dots, a_l\} \cup \{p - b_1, \dots, p - b_m\} = \left\{1, 2, \dots, \frac{p-1}{2}\right\}.$$

De esto, deducimos que

$$\sum_{x=1}^{(p-1)/2} x = \sum_{i=1}^l a_i + \sum_{j=1}^m (p - b_j) = a + mp - b,$$

donde $a := \sum_{i=1}^l a_i$ y $b := \sum_{j=1}^m b_j$. Por otra parte,

$$\sum_{x=1}^{(p-1)/2} r_p(xq) = a + b \quad \text{y también} \quad \sum_{x=1}^{(p-1)/2} x = \frac{\frac{p-1}{2} \frac{p+1}{2}}{2} = \frac{p^2 - 1}{8}.$$

³⁰Hint: Una igualdad $a_i = p - b_j$ implicaría $nx = p - ny$ con $1 \leq x, y \leq \frac{p-1}{2}$, lo que es absurdo, pues sería $n(x + y) \equiv 0$ y, por lo tanto, $x + y \equiv 0$ pero $2 \leq x + y \leq p - 1$.

³¹ $\lfloor z \rfloor \in \mathbb{Z}$ y $\lfloor z \rfloor \leq z < \lfloor z \rfloor + 1$.

Con esto,

$$\begin{aligned}
\frac{p^2-1}{8}(q-1) &= \sum_x (xq) - \sum_x x = \sum_x \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor p + \sum_x r_p(xq) - \sum_x x \\
&= \left(\sum_x \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor \right) p + a + b - (a + mp - b) \\
&= \left(\sum_x \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor - m \right) p + 2b
\end{aligned}$$

y, en particular,

$$\frac{p^2-1}{8}(q-1) \equiv \sum_{x=1}^{(p-1)/2} \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor + m \pmod{2}. \quad (11)$$

Ahora bien, si $q = 2$, del lado izquierdo de (11) queda $\frac{p^2-1}{8}$ y del lado derecho sólo m , pues $\left\lfloor \frac{x2}{p} \right\rfloor = 0$ para $1 \leq x \leq \frac{p-1}{2}$. Usando el Lema 9.4 y esta congruencia módulo 2, se deduce (iv):

$$\left(\frac{2}{p} \right) = (-1)^m = (-1)^{\frac{p^2-1}{8}}.$$

Si, en cambio, q es un primo positivo impar distinto de p , el lado izquierdo de (11) es par y, de nuevo, usando el Lema 9.4 y esta congruencia módulo 2,

$$\left(\frac{q}{p} \right) = (-1)^m = (-1)^{\sum_x \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor},$$

donde $1 \leq x \leq \frac{p-1}{2}$. Análogamente (porque q es primo impar y $p \neq q$), se cumple que $(p/q) = (-1)^{\sum_y \left\lfloor \frac{yp}{q} \right\rfloor}$, donde $1 \leq y \leq \frac{q-1}{2}$. En particular,

$$\left(\frac{q}{p} \right) \left(\frac{p}{q} \right) = (-1)^{\sum_x + \sum_y}.$$

Afirmamos que (y esto es suficiente para probar (v))

$$\sum_{x=1}^{(p-1)/2} \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor + \sum_{y=1}^{(q-1)/2} \left\lfloor \frac{yp}{q} \right\rfloor \equiv \frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2} \pmod{2}. \quad (12)$$

De hecho, mostraremos que vale una igualdad.

Para probar (12), recurrimos al siguiente artificio. Sea f la función³²

$$f : \left[\left[1, \frac{p-1}{2} \right] \right] \times \left[\left[1, \frac{q-1}{2} \right] \right] \rightarrow \mathbb{Z} \quad \text{dada por} \quad f(x, y) = -xq + yp;$$

³² Si $a, b \in \mathbb{Z}$, $\llbracket a, b \rrbracket = \{a, a+1, \dots, b\}$.

como $q \neq p$ son primos, $f(x, y) \neq 0$. Ahora, el dominio de f tiene cardinal $\frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2}$. Vamos a expresar el dominio de f como la unión disjunta $\{f < 0\} \cup \{f > 0\}$ y determinar el cardinal de cada parte. Notemos, primero, que $\frac{yp}{q} \notin \mathbb{Z}$, si $1 \leq y \leq \frac{q-1}{2}$. Por otro lado, $f(x, y) > 0$, si y sólo si $\frac{yp}{q} > x$, o sea, teniendo en cuenta la observación inmediata anterior, $f(x, y) > 0$ equivale a $1 \leq x \leq \left\lfloor \frac{yp}{q} \right\rfloor$. Pero, fijado y en el rango $q \leq y \leq \frac{q-1}{2}$, todo x en el rango $1 \leq x < \frac{yp}{q}$ cumple $1 \leq x \leq \frac{p-1}{2}$, con lo que (x, y) pertenece al dominio de f . Entonces, fijado y , hay $\left\lfloor \frac{yp}{q} \right\rfloor$ pares (x, y) tales que $f(x, y) > 0$. Así,

$$\#\{f > 0\} = \sum_{y=1}^{(q-1)/2} \left\lfloor \frac{yp}{q} \right\rfloor.$$

Análogamente, $\#\{f < 0\} = \sum_{x=1}^{(p-1)/2} \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor$. En definitiva,

$$\frac{p-1}{2} \frac{q-1}{2} = \#\{f < 0\} + \#\{f > 0\} = \sum_{x=1}^{(p-1)/2} \left\lfloor \frac{xq}{p} \right\rfloor + \sum_{y=1}^{(q-1)/2} \left\lfloor \frac{yp}{q} \right\rfloor.$$

□

Ejercicios

Ejercicio 9.1. Sean $N \in \mathbb{Z}$, p un primo que no divide a N y $l \geq 1$. La cantidad de soluciones a la ecuación de congruencia

$$x^2 \equiv N \pmod{p^l} \tag{13}$$

es igual a:

- 1, si $p = 2$ y $l = 1$,
- 0, si $p = 2$, $l = 2$ y $N \equiv 3 \pmod{4}$,
- 2, si $p = 2$, $l = 2$ y $N \equiv 1 \pmod{4}$,
- 0, si $p = 2$, $l \geq 3$ y $N \not\equiv 1 \pmod{8}$,
- 4, si $p = 2$, $l \geq 3$ y $N \equiv 1 \pmod{8}$ y
- $1 + (N/p)$, si p es impar (l arbitrario).

Ejercicio 9.2. Sean $k, d \in \mathbb{Z}$, $k \geq 1$ y $(d, k) = 1$. Entonces, la cantidad de soluciones a la ecuación de congruencia

$$x^2 \equiv d \pmod{4k} \tag{14}$$

es igual a

$$2 \sum_{f|k} \left(\frac{d}{f} \right),$$

donde f recorre los divisores positivos libres de cuadrados ($f = 1$ inclusive) y (d/f) denota el símbolo de Jacobi. Concluir de $(x + 2k)^2 \equiv x^2 \pmod{4k}$ que la sumatoria $\sum_{f|k} (d/f)$ es igual a la cantidad de enteros x en el rango $0 \leq x < 2k$ que satisfacen (14).

Ejercicio 9.3. Un entero a se dice *residuo bicuadrático módulo p* , si existe $x \in \mathbb{Z}$ tal que $a \equiv x^4 \pmod{p}$. Probar que -4 es residuo bicuadrático módulo p , si y sólo si $p \equiv 1 \pmod{4}$.³³

Ejercicio 9.4. Probar que, si m y n son enteros coprimos, entonces

$$\frac{m-1}{2} \frac{n-1}{2} = \sum_{x=1}^{(m-1)/2} \left\lfloor \frac{xn}{m} \right\rfloor + \sum_{y=1}^{(n-1)/2} \left\lfloor \frac{ym}{n} \right\rfloor.$$

10 Los límites de Reciprocidad cuadrática

Volvamos al problema de determinar si un primo impar p se puede, o no, expresar en la forma $p = x^2 + ny^2$. La condición $(-n/p) = 1$ garantiza que p divide un entero $N = a^2 + nb^2$, $(a, b) = 1$. Pero no es cierto en general que $(-n/p) = 1$ implique que p sea de esa forma. Por ejemplo, con $n = 5$, si $p \neq 5$ es un primo impar y existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $p = x^2 + 5y^2$, entonces $p \equiv 1 \pmod{4}$ y $p \equiv 1, 4 \pmod{5}$, o sea

$$p = x^2 + 5y^2 \quad \text{implica} \quad p \equiv 1, 9 \pmod{20}.$$

Pero,

$$(-5/p) = 1 \quad \text{si y sólo si} \quad p \equiv 1, 3, 7, 9 \pmod{20}.$$

Al respecto, Euler conjeturó lo siguiente:

$$\begin{aligned} p &= x^2 + 5y^2, & \text{si y sólo si} & \quad p \equiv 1, 9 \pmod{20} \quad \text{y} \\ 2p &= x^2 + 5y^2, & \text{si y sólo si} & \quad p \equiv 3, 7 \pmod{20}. \end{aligned}$$

Algo similar, pero, como veremos más adelante, con una dificultad adicional, ocurre en el caso $n = 14$. Si $p \neq 7$ es un primo impar, Euler conjeturó que:

$$\begin{aligned} p &= \begin{cases} x^2 + 14y^2 & \text{o} \\ 2x^2 + 7y^2 & \end{cases}, & \text{si y sólo si} & \quad p \equiv 1, 9, 15, 23, 25, 39 \pmod{56} \quad \text{y} \\ 3p &= x^2 + 14y^2, & \text{si y sólo si} & \quad p \equiv 3, 5, 13, 19, 27, 45 \pmod{56}. \end{aligned}$$

Nuevamente, sabiendo únicamente que $(-14/p) = 1$, no podemos determinar si p cae en el primer grupo o en el segundo. E incluso si supiésemos que p pertenece al primero, ¿cómo podríamos distinguir entre los primos de la forma $x^2 + 14y^2$ y aquellos de la forma $2x^2 + 7y^2$? Saber su clase de congruencia módulo 56 no es suficiente. En definitiva, lo

³³Hint: $x^4 + 4 = ((x+1)^2 + 1)((x-1)^2 + 1)$.

que se puede observar en el caso general es que las clases de congruencia para las cuales $(-n/p) = 1$ se agrupan en lo que llamaremos “géneros”, cada uno de los cuales tendrá distintas propiedades de representabilidad. Para precisar y poder explicar este fenómeno, introduciremos las formas cuadráticas.

Por último, mencionamos otras dos conjeturas de Euler que motivaron a Gauss a estudiar leyes de reciprocidad similares a las del símbolo de Legendre, de las cuales hablaremos en la Parte V. Sea p un primo impar. Entonces,

$$p = x^2 + 27y^2, \quad \text{si y sólo si} \quad \begin{cases} p \equiv 1 \pmod{3} \text{ y} \\ 2 \equiv x^3 \pmod{p} \text{ tiene solución, y} \end{cases}$$

$$p = x^2 + 64y^2, \quad \text{si y sólo si} \quad \begin{cases} p \equiv 1 \pmod{4} \text{ y} \\ 2 \equiv x^4 \pmod{p} \text{ tiene solución.} \end{cases}$$

Estas afirmaciones caracterizan los primos p que se pueden expresar en la forma $p = x^2 + 27y^2$ y aquellos que se pueden expresar en la forma $p = x^2 + 64y^2$. Sin embargo, además de una condición de congruencia ($p \equiv 1 \pmod{3}$ y $p \equiv 1 \pmod{4}$, respectivamente), estas caracterizaciones involucran los conceptos de residuos cúbicos y bicuadráticos.

Ejercicios

Ejercicio 10.1. Probar que, si $p \neq 5$ es un primo impar y existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $2p = x^2 + 5y^2$, entonces $p \equiv 3, 7 \pmod{20}$.³⁴

³⁴Hint: Si $2p = x^2 + 5y^2$, entonces x e y son impares. Luego, mirar módulo 8.

Parte III

Formas cuadráticas

11 Definiciones y primeras propiedades

Empecemos con la definición de forma cuadrática.

Definición 11.1. Por *forma cuadrática binaria* entenderemos un polinomio en dos variables, homogéneo de grado 2:

$$ax^2 + bxy + cy^2 .$$

Los coeficientes del polinomio, a , b y c , son los *coeficientes* de la forma cuadrática binaria. Usaremos la notación

$$\{a, b, c\} := ax^2 + bxy + cy^2 .$$

Definición 11.2. Decimos que una forma cuadrática es *entera*, si sus coeficientes son números enteros. El *contenido* de una forma es el máximo común divisor de sus coeficientes. Una forma *primitiva* es una forma cuadrática entera cuyos coeficientes son coprimos, es decir, si su contenido es igual a 1.

Ejemplo 11.3. La forma $\{1, 0, 1\} = x^2 + y^2$ es primitiva. La forma $\{2, 2, 3\} = 2x^2 + 2xy + 3y^2$, también.

Definición 11.4. Dado $m \in \mathbb{Z}$ y una forma f , decimos que m es representado por f (o que f representa m), si existen $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que

$$f(x, y) = m ;$$

el par (x, y) solución de esta ecuación, o bien la expresión $f(x, y) = m$ es una *representación de m por la forma f* . Dicha representación se dice *propia*, si x e y son coprimos. Decimos que f *representa propiamente a m* (o que m es *propiamente representado por f*), si existe una representación propia de m por f .

Ejemplo 11.5. La forma $f(x, y) = \{1, 0, 1\}$ representa $m = 1$, pues $f(1, 0) = 1$; esta representación de 1 es propia. La forma f también representa $m = 5$: $f(2, 1) = 5$; la representación es propia. También representa propiamente a $m = 10$, pues $f(3, 1) = 10$. Pero f no representa a $m = 7$. De hecho, si f representa m , entonces $m \equiv 0, 1, 2 \pmod{4}$, y, si f representa propiamente a m , entonces $m \equiv 1, 2 \pmod{4}$.

Definición 11.6. Dada una forma cuadrática $f(x, y) = \{a, b, c\} = ax^2 + bxy + cy^2$, llamaremos *discriminante* a

$$\text{disc}(f) = b^2 - 4ac .$$

Observación 11.7. El discriminante de una forma cuadrática entera es un número entero y congruente con 0 o 1 módulo 4; además, $D \equiv 0 \pmod{4}$, si y sólo si $b \equiv 0 \pmod{2}$. Recíprocamente, si $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$ existe una forma cuadrática entera de discriminante D : si $D \equiv 0$, la forma $\{1, 0, \frac{-D}{4}\}$ tiene discriminante D , si $D \equiv 1$, la forma $\{1, 1, \frac{1-D}{4}\}$ tiene discriminante D .

Lema 11.8. Sea $f = \{a, b, c\}$ una forma cuadrática entera y sea $D := \text{disc}(f)$ su discriminante. Si $D \neq 0$ no es un cuadrado perfecto, entonces $a \neq 0$, $c \neq 0$ y la única solución de $f(x, y) = 0$ con $x, y \in \mathbb{Z}$ es $x = y = 0$.

Demostración. Si $a = 0$ o $c = 0$, entonces $D = b^2$ es cuadrado, con lo que asumimos que ni a ni c son nulos. En ese caso, sean $x, y \in \mathbb{Z}$ tales que $f(x, y) = 0$. Si $x = 0$, entonces $cy^2 = 0$ e $y = 0$. Análogamente, si $y = 0$, entonces $ax^2 = 0$ y $x = 0$. Podemos suponer, entonces, que $x \neq 0$ e $y \neq 0$. Ahora, en general,

$$4af(x, y) = (2ax + by)^2 - Dy^2, \quad (15)$$

con lo que, $f(x, y) = 0$ implica $(2ax + by)^2 = Dy^2$. Pero, como $y \neq 0$, por factorización única, D debe ser un cuadrado. \square

Definición 11.9. Decimos que una forma es *indefinida*, si toma valores tanto positivos como negativos. Si una forma toma valores no negativos decimos que es *semidefinida positiva*; si no toma valores positivos, *semidefinida negativa*. Una forma semidefinida que sólo toma el valor 0 en el origen se dice *definida*.

Teorema 11.10. Sea f una forma cuadrática y sea $D := \text{disc}(f)$, su discriminante. Entonces,

- (A) si $D > 0$, f es indefinida;
- (B) si $D = 0$, f es semidefinida, pero no definida;
- (C) si $D < 0$, f es definida.

Además, si $f = \{a, b, c\}$ y $D < 0$, entonces a y c tienen igual signo y son distintos de cero y f es positiva, si $a > 0$, y negativa, si $a < 0$.

Demostración. Supongamos que $D < 0$ (entonces, a y c deben tener el mismo signo y ser no nulos). Por (15) y el Lema 11.8, $4af(x, y) > 0$ para todo par $x, y \in \mathbb{Z}$, excepto $x = y = 0$. En particular, f es definida (positiva o negativa). Dado que

$$a = f(1, 0) \quad \text{y} \quad c = f(0, 1),$$

vemos que a y c tienen igual signo y que este signo concuerda con el “signo” de f . \square

Definición 11.11. Dos formas f y g son *equivalentes*, si existen $p, q, r, s \in \mathbb{Z}$ tales que

$$f(x, y) = g(px + qy, rx + sy) \quad \text{y} \quad ps - qr = \pm 1;$$

si $ps - qr = 1$, entonces decimos que son *estrictamente equivalentes*.

Ejemplo 11.12. Las formas $\{2, -1, 3\}$ y $\{2, 1, 3\}$ son equivalentes, pero, con los resultados de la § 13, podremos probar que no pueden ser estrictamente equivalentes. En particular, las clases de equivalencia estricta no coinciden, en general, con clases a secas.

Ejemplo 11.13. Sea $f = \{1, 2, 4\}$. Su discriminante es $2^2 - 4 \cdot 4 = -12$. ¿Qué formas son estrictamente equivalentes a f ? Otra forma de discriminante -12 con la que ya nos hemos encontrado es $\{1, 0, 3\} = x^2 + 3y^2$. Ambas son equivalentes:

$$f(x - y, y) = (x - y)^2 + 2(x - y)y + 4y^2 = x^2 + (-2 + 2)xy + (1 - 2 + 4)y^2 = x^2 + 3y^2.$$

Más aun, en este caso, $p = 1$, $q = -1$, $r = 0$, $s = 1$, con lo que $ps - qr = 1$ y las formas son estrictamente equivalentes.

Observación 11.14. (ejercicio). Si $p, q, r, s \in \mathbb{Z}$ y f y f_1 son formas relacionadas por

$$f_1(x, y) = f(px + qy, rx + sy), \quad (16)$$

entonces los enteros representados por f_1 también son representados por f . Por otro lado, los coeficientes de f y de f_1 están relacionados de la siguiente manera: si $f = \{a, b, c\}$ y $f_1 = \{a_1, b_1, c_1\}$,

$$\begin{aligned} a_1 &= ap^2 + bpr + cr^2 = f(p, r), \\ b_1 &= 2apq + b(ps + qr) + 2crs \quad \text{y} \\ c_1 &= aq^2 + bqs + cs^2 = f(q, s). \end{aligned} \quad (17)$$

En particular, sus discriminantes, $D = \text{disc}(f)$ y $D_1 = \text{disc}(f_1)$, están relacionados por:

$$D_1 = (ps - qr)^2 D. \quad (18)$$

Teorema 11.15. *La relación de equivalencia de formas cuadráticas y la relación de equivalencia estricta son relaciones de equivalencia en el conjunto de formas cuadráticas. Sean f y g formas cuadráticas equivalentes. Entonces,*

- (i) *un entero es representado por g , si y sólo si es representado por f ;*
- (ii) *un entero es propiamente representado por g , si y sólo si es propiamente representado por f ;*
- (iii) $\text{disc}(g) = \text{disc}(f)$;
- (iv) *el contenido de g es igual al contenido de f ; en particular, g es primitiva, si y sólo si f es primitiva.*

Demostración. Son consecuencias de la Observación 11.14 (ejercicio). □

Ejercicios

Ejercicio 11.1. Si $f(x, y) = m$ es una representación de m por f y $g = (x, y)$, entonces $g^2 \mid m$ y f representa propiamente a m/g^2 . En particular, si m es libre de cuadrados (por ejemplo, si m es primo o $m = \pm 1$), sólo tiene sentido hablar de representaciones propias de m .

Las partes (iii) y (iv) del Teorema 11.15 se pueden expresar de la siguiente manera: el discriminante y el contenido de una forma cuadrática son invariantes de la clase de equivalencia de la forma cuadrática (todas las formas en la misma clase tienen igual discriminante e igual contenido). Sea $C(D)$ el conjunto de clases de formas cuadráticas de discriminante D y sea $C_g(D)$ el subconjunto de clases de discriminante D y contenido g . En particular, con esta notación $C_1(D)$ denota el conjunto de clases de formas cuadráticas primitivas de discriminante D .

Ejercicio 11.2. Mostrar que, si f es una forma de contenido g y discriminante D , entonces $g^2 \mid D$. Concluir que

$$C(D) = \bigsqcup_{\substack{g>0 \\ g^2 \mid D}} C_g(D) = \bigsqcup_{\substack{g>0 \\ g^2 \mid D}} C_1(D/g^2) .$$

Un *discriminante fundamental* es un entero D que cumple

- $D \equiv 1 \pmod{4}$ y es libre de cuadrados, o bien
- $D = 4m$, donde $m \equiv 2, 3 \pmod{4}$ y es libre de cuadrados.

Ejercicio 11.3. Probar que un entero $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$ es un discriminante fundamental, si y sólo si toda forma de discriminante D es primitiva.

El producto de formas lineales da lugar a formas cuadráticas:

$$(kx + ly)(mx + ny) = kmx^2 + (kn + lm)xy + lny^2 \quad (19)$$

es una forma cuadrática. Veremos que éstas son muy especiales dentro del conjunto de todas las formas cuadráticas. Desde el punto de vista del problema de representabilidad, determinar si una forma como en (19) representa un entero $z \in \mathbb{Z}$ se reduce a descomponerlo como producto de enteros de alguna manera, $z = mn$, $m, n \in \mathbb{Z}$, y determinar si es posible representar los factores m y n por cada uno de los factores lineales de la forma.

Ejercicio 11.4. Una forma cuadrática es un producto de formas lineales, si y sólo si su discriminante es un cuadrado perfecto.

- (i) Probar que el discriminante de la forma (19) es igual a $(kn - lm)^2$, o sea, un cuadrado perfecto.
- (ii) Probar que, si $f = \{a, b, c\}$ y $\text{disc}(f) = h^2$ es un cuadrado, entonces

$$4af = (2ax + (b + h)y)(2ax + (b - h)y) ;$$

en particular, sobre \mathbb{Q} , f se descompone como producto de factores lineales.

(iii) Si $f = \{a, b, c\}$ es una forma cuadrática con coeficientes enteros y existe una factorización

$$f = (\kappa x + \lambda y)(\mu x + \nu y)$$

con $\kappa, \lambda, \mu, \nu \in \mathbb{Q}$, entonces existe una factorización

$$f = (kx + ly)(mx + ny)$$

con $k, l, m, n \in \mathbb{Z}$.³⁵

A toda forma cuadrática le podemos asociar una matriz, definida a partir de los coeficientes de la forma: si $f = \{a, b, c\}$, su *matriz asociada* es³⁶

$$\begin{bmatrix} a & b/2 \\ b/2 & c \end{bmatrix}. \quad (20)$$

La matriz asociada a una forma cuadrática es una matriz simétrica. Si f es entera, los coeficientes de su matriz asociada serán enteros en la diagonal y medio enteros fuera de la diagonal. Recíprocamente, toda matriz simétrica como (20), con $a, b, c \in \mathbb{Z}$ determina una forma cuadrática entera:

$$f(x, y) = {}^t \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b/2 \\ b/2 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (21)$$

donde ${}^t v$ denota la matriz v transpuesta. En definitiva, hay una correspondencia entre formas cuadráticas binarias con coeficientes enteros y matrices “medio enteras”. El discriminante de una forma se expresa de manera sencilla en términos del determinante de su matriz asociada: dada una forma f con matriz asociada F ,

$$\text{disc}(f) = -4\det(F).$$

Ejercicio 11.5. Sea $f = \{a, b, c\}$ una forma cuadrática. Probar que la matriz asociada a $f(px + qy, rx + sy)$ es igual a

$${}^t \begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b/2 \\ b/2 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix}.$$

Ejercicio 11.6. Probar que el grupo $\text{GL}(2, \mathbb{Z})$ de matrices de tamaño 2×2 inversibles con coeficientes enteros actúa en el conjunto de matrices medio enteras vía $X \mapsto {}^t A X A$ (la acción es a derecha). Concluir que dos formas cuadráticas, f y f_1 , son equivalentes, si y sólo si sus matrices asociadas, F y F_1 , cumplen que existe $A \in \text{GL}(2, \mathbb{Z})$ tal que $F_1 = {}^t A F A$. Probar que f y f_1 son estrictamente equivalentes si existe $A \in \text{SL}(2, \mathbb{Z})$ tal que $F_1 = {}^t A F A$. Demostrar que las relaciones de equivalencia y de equivalencia estricta entre formas cuadráticas son, efectivamente, relaciones de equivalencia.

³⁵Hint: Escribir $\tilde{n}f = (kx + ly)(mx + ny)$ con $k, l, m, n, \tilde{n} \in \mathbb{Z}$; dividir por el máximo común divisor entre k, l y \tilde{n} ; dividir por el máximo común divisor entre m, n y (el nuevo) \tilde{n} ; comparar coeficientes: $\tilde{n}a = km$, $\tilde{n}b = kn + lm$ y $\tilde{n}c = ln$; concluir que $\tilde{n} = 1$.

³⁶ A veces se llama “matriz asociada” a la matriz $\begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix}$.

Si f es una forma cuadrática y $\gamma = \begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix}$, $f \cdot \gamma$ denota la forma

$$(f \cdot \gamma)(x, y) = f(px + qy, rx + sy) .$$

Dos formas, f y f_1 , son equivalentes, si y sólo si existe $A \in \text{GL}(2, \mathbb{Z})$ tal que $f_1 = f \cdot A$; si $A \in \text{SL}(2, \mathbb{Z})$, entonces son estrictamente equivalentes.

Dada una forma f , su *grupo de isotropía* es

$$\text{Stab}(f)^+ = \{ \gamma \in \text{SL}(2, \mathbb{Z}) : f \cdot \gamma = f \} .$$

Ejercicio 11.7. Probar que $\text{Stab}(f)^+$ es un subgrupo de $\text{SL}(2, \mathbb{Z})$ y que, si $\gamma \in \text{SL}(2, \mathbb{Z})$, entonces

$$\text{Stab}(f \cdot \gamma)^+ = \gamma^{-1} \text{Stab}(f)^+ \gamma .$$

Ejercicio 11.8. Dada una forma cuadrática $f = \{a, b, c\}$ de discriminante $D = b^2 - 4ac$, el grupo $\text{Stab}(f)^+$ contiene todas las matrices de la forma

$$\begin{bmatrix} \frac{u-bv}{2} & -cv \\ av & \frac{u+bv}{2} \end{bmatrix} , \quad (22)$$

donde el par $u, v \in \mathbb{Z}$ satisface

$$u^2 - Dv^2 = 4 . \quad (23)$$

Si f es primitiva, entonces éstas son todas las matrices $\gamma \in \text{SL}(2, \mathbb{Z})$ tales que $f \cdot \gamma = f$.³⁷

12 Representaciones, equivalencia y residuos

Lema 12.1. Una forma f representa propiamente un entero m , si y sólo si f es estrictamente equivalente a una forma del tipo $\{m, B, C\}$, $B, C \in \mathbb{Z}$.

Demostración. Sean $p, r \in \mathbb{Z}$ tales que $f(p, r) = m$ y $(p, r) = 1$. Por la identidad de Bézout (Teorema 1.7), existen $q, s \in \mathbb{Z}$ tales que $ps - qr = 1$. Si f_1 es la forma $f_1(x, y) := f(px + qy, rx + sy)$, entonces sus coeficientes están dados por las fórmulas (16). En particular, $a_1 = f(p, r) = m$. Recíprocamente, notamos que cualquier forma del tipo $\{m, B, C\}$, $B, C \in \mathbb{Z}$, representa propiamente a m vía $(1, 0)$. \square

³⁷Hint: Se puede corroborar que las matrices de la forma (22) preservan f , a partir de las fórmulas (16) para los coeficientes de $f \cdot \gamma$. Sea $\gamma = \begin{bmatrix} p & q \\ r & s \end{bmatrix} \in \text{Stab}(f)^+$. Entonces,

$$\begin{aligned} a &= ap^2 + bpr + cr^2 \quad \text{y} \\ b &= 2apq + b(ps + qr) + 2crs = 2apq + b(1 + 2qr) + 2crs . \end{aligned}$$

De estas ecuaciones,

$$0 = apq + bqr + crs , \quad aq = -cr \quad \text{y} \quad as = ap + br .$$

O sea, $aq = -cr$ y $a(s - p) = br$. En particular, $a \mid cr$ y $a \mid br$. Ahora, asumiendo $(a, b, c) = 1$, se deduce que $a \mid r$. Si escribimos $r = av$, entonces $q = -cv$ y $s - p = bv$. De esto y de $ps - qr = 1$, se puede ver que $(p + s)^2 = Dv^2 + 4$. Elegir, entonces, $u = p + s$.

Lema 12.2. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$ y sea $m \in \mathbb{Z}$, $(m, 2D) = 1$. Entonces, m es representado propiamente por alguna forma primitiva de discriminante D , si y sólo si D es un residuo cuadrático módulo m .

Demostración. Supongamos, primero, que D es residuo cuadrático módulo m , o sea, existe $b \in \mathbb{Z}$ tal que $D \equiv b^2 \pmod{m}$. Como m es impar, cambiando b por $b + m$ de ser necesario, podemos suponer que $D \equiv b \pmod{2}$. En ese caso, $D \equiv b^2 \pmod{4}$ (porque $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$) y, en particular, $D \equiv b^2 \pmod{4m}$ (porque m es impar; $(m, 4) = 1$). Esto quiere decir que existe $c \in \mathbb{Z}$ tal que $D = b^2 - 4mc$. Ahora, la forma $f = \{m, b, c\}$ representa propiamente a m (vía $(1, 0)$) y su discriminante es igual a D . Recíprocamente, si m es representado propiamente por una forma f de discriminante D , por el Lema 12.1, f es (estrictamente) equivalente a una forma del tipo $f_1 = \{m, B, C\}$, $B, C \in \mathbb{Z}$. Pero, entonces, $D = \text{disc}(f) = \text{disc}(f_1) = B^2 - 4mC$, con lo que D es residuo cuadrático módulo m . \square

Teorema 12.3. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$ y sea p un primo positivo impar que no divide a D . Entonces, p es representado (propiamente) por alguna forma cuadrática (primitiva) de discriminante D , si y sólo si $\chi(p) = 1$, donde χ es la función del Lema 8.9.

Demostración. $\chi(p) = 1$, si y sólo si $(D/p) = 1$, si y sólo si D es un residuo cuadrático módulo p , si y sólo si (Lema 12.2) p es representado por una forma de discriminante D . \square

Corolario 12.4. Sea $n \in \mathbb{Z}$, $n \neq 0$, y sea p un primo positivo impar que no divide a n . Entonces, p es representado (propiamente) por una forma (primitiva) de discriminante $-4n$, si y sólo si p es un divisor primo de $x^2 + ny^2$, $(x, y) = 1$.

13 Formas reducidas y número de clases

El objetivo de esta sección es describir una manera de determinar si dos formas cuadráticas definidas positivas son estrictamente equivalentes. La idea es, en primer lugar, definir una noción de representante “canónico” para cada clase de equivalencia estricta; éstos serán las “formas reducidas”. Cada clase de equivalencia estricta contiene exactamente una forma reducida. Luego, necesitamos una manera de “conectar”, de pasar de una forma cuadrática definida positiva al representante canónico de su clase; diremos que “reducimos” la forma cuadrática. Finalmente, para poder comparar dos formas, determinar si son equivalentes estrictamente, o no, bastará con reducirlas y compararlas: la clase será la misma, si y sólo si tienen la misma forma reducida.

Lema 13.1. Cada clase de equivalencia estricta de formas cuadráticas de discriminante no cuadrado contiene, al menos, un representante $\{a, b, c\}$ que cumple $|b| \leq |a| \leq |c|$.

Demostración. Sea $f_0 = \{a_0, b_0, c_0\}$ una forma cuadrática arbitraria y sea $a \in \mathbb{Z}$ tal que:

- $a \neq 0$,

- a es representado por f_0 y
- $|a|$ es mínimo entre los enteros representados por f_0

Por minimalidad, si $a = f_0(p, r)$, entonces $(p, r) = 1$ (**ejercicio**) y existen $q, s \in \mathbb{Z}$ tales que $ps - qr = 1$. Sea f' la forma

$$f'(x, y) = f_0(px + qy, rx + sy) .$$

Por las fórmulas (16), el primer coeficiente de f' es $a = f_0(p, r)$, es decir, $f' = \{a, b', c'\}$ para ciertos $b', c' \in \mathbb{Z}$. Si, ahora, dado $h \in \mathbb{Z}$, definimos

$$f(x, y) = f'(x + hy, y) ,$$

entonces la forma f cumple:

- es estrictamente equivalente a f' y, por lo tanto, a f_0 ,
- su primer coeficiente sigue siendo a , es decir, $f = \{a, b, c\}$ para ciertos $b, c \in \mathbb{Z}$, y
- $b = 2ah + b'$.

Eligiendo h convenientemente, $|b| \leq |a|$. Finalmente, si $c \neq 0$, entonces debe cumplirse $|a| \leq |c|$, por minimalidad de a . Pero $c \neq 0$ pues, por (16), $c = f'(h, 1)$ y, como $\text{disc}(f') = \text{disc}(f_0)$ no es un cuadrado perfecto, por el Lema 11.8, $f'(x, y) = 0$ sólo si $x = y = 0$. \square

Lema 13.2. *Cada clase de equivalencia estricta de formas cuadráticas definidas positivas contiene, al menos, un representante que cumple*

$$-a < b \leq a < c \quad \text{o bien} \quad 0 \leq b \leq a = c .$$

Demostración. En primer lugar, como el discriminante de una forma definida positiva es negativo, estamos en la situación del Lema 13.1. Sea $\{a_0, b_0, c_0\}$ una forma cuadrática definida positiva. Entonces, $a_0, c_0 > 0$. Podemos suponer, por el Lema 13.1, que $|b_0| \leq a_0 \leq c_0$. Ahora, si $a_0 = c_0$ pero $b_0 < 0$, obtenemos una forma estrictamente equivalente con $a = a_0 = c = c_0$ y $b = |b_0| \geq 0$ definiendo:

$$f_0(y, -x) = a_0 y^2 + b_0 y(-x) + c_0 (-x)^2 = c_0 x^2 + (-b_0) xy + a_0 y^2 .$$

Si $b_0 = -a_0$, obtenemos una forma estrictamente equivalente con $a = b = a_0$ y $c = c_0$ definiendo:

$$\begin{aligned} f_0(x + y, y) &= a_0 (x + y)^2 + b_0 (x + y)y + c_0 y^2 \\ &= a_0 x^2 + (2a_0 + b_0)xy + (a_0 + b_0 + c_0)y^2 \\ &= a_0 x^2 + a_0 xy + c_0 y^2 . \end{aligned}$$

\square

Definición 13.3. Una forma cuadrática definida positiva $f = \{a, b, c\}$ *está reducida* (o es una forma reducida), si sus coeficientes cumplen las condiciones del Lema 13.2

Observación 13.4. Equivalentemente, $f = \{a, b, c\}$ (definida positiva) está reducida, si sus coeficientes cumplen:

$$|b| \leq a \leq c \quad \text{y, si} \quad |b| = a \quad \text{o} \quad a = c, \quad \text{entonces} \quad b \geq 0.$$

Teorema 13.5. Toda forma cuadrática primitiva definida positiva es estrictamente equivalente a una única forma reducida.

Demostración. Lo único que falta probar es que cada clase de equivalencia estricta contiene a lo sumo una forma reducida. Sean, entonces, $f = \{a, b, c\}$ y $f_1 = \{a_1, b_1, c_1\}$ dos formas cuadráticas de discriminante $D < 0$, ambas reducidas en el sentido de la Definición 13.3. Probaremos que, si f y f_1 son estrictamente equivalentes, entonces deben ser iguales. Sin pérdida de generalidad, podemos asumir que $a \geq a_1$.

Veamos, primero, que $a = a_1$. Supongamos que $p, q, r, s \in \mathbb{Z}$ cumplen que $f_1(x, y) = f(px + qy, rx + sy)$. De las fórmulas (16), como $a \leq c$ y $|b| \leq a$, vale que

$$a_1 = ap^2 + bpr + cr^2 \geq ap^2 - a|pr| + ar^2 \geq a|pr|.$$

La última desigualdad es consecuencia de que $x^2 + y^2 \geq 2|xy|$ para todo par x e y . En consecuencia, $|pr| \leq 1$. Asumiendo que $ps - qr = 1$, vemos que $p, r \in \{-1, 0, 1\}$ y no son ambos nulos. Entonces, $p^2 - |pr| + r^2 = 1$ y $a \geq a_1 \geq a$, es decir, $a = a_1$.

Para terminar, distinguimos dos casos: $c = a$ y $c_1 = a_1$, o bien se cumple alguna de $c > a$ o $c_1 > a_1$. En el primer caso, $c = c_1$ y $D = b^2 - 4ac = b_1^2 - 4a_1c_1$ muestra que $b = \pm b_1$. Pero, como f y f_1 están reducidas, en esta situación $b, b_1 \geq 0$. En particular, $b = b_1$, con lo que $f = f_1$. Supongamos, finalmente, que estamos en el segundo caso y que es $c > a$. Sean $p, q, r, s \in \mathbb{Z}$ tales que $f_1(x, y) = f(px + qy, rx + sy)$ y que $ps - qr = 1$. Como antes, deducimos que $p^2 - |pr| + r^2 = 1$. Si fuese $r \neq 0$, entonces sería $cr^2 > ar^2$ y

$$a = a_1 ap^2 + bpr + cr^2 > a(p^2 - |pr| + r^2) = a,$$

lo que es absurdo. Así, debe ser $r = 0$. Pero, ahora, $ps - qr = 1$ implica $ps = 1$ y, por lo tanto, de (16),

$$b_1 = 2apq + b(ps + qr) + 2crs \equiv b \pmod{2a}.$$

Pero b y b_1 están ambos en el rango $-a = -a_1 < b, b_1 \leq a = a_1$, lo que implica, junto con $b_1 \equiv b \pmod{2a}$, que $b = b_1$. Por último, $D = b^2 - 4ac = b_1^2 - 4a_1c_1$ implica que $c = c_1$ también. \square

Como consecuencia del Teorema 13.5, podemos deducir versiones un poco más refinadas de los resultados de la § 12.

Teorema 13.6. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D < 0$ y sea p un primo positivo impar que no divide a D . Entonces, p es representado por una forma reducida de discriminante D , si y sólo si $\chi(p) = 1$, donde χ es la función del Lema 8.9.

Demostración. La diferencia con el Teorema 12.3 está en que aquí agregamos que la forma que representa p debe ser reducida. Pero si p es representado por una forma definida positiva de discriminante D , entonces, cambiando dicha forma por una (la) forma reducida y (estrictamente) equivalente a ella, vemos que p es representado por una forma reducida. \square

El siguiente resultado refina el Corolario 12.4.

Corolario 13.7. Sea $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$, y sea p un primo positivo impar que no divide a n . Entonces, p es representado por una forma reducida de discriminante $-4n$, si y sólo si p es un divisor de $x^2 + ny^2$, $(x, y) = 1$.

Definición 13.8. Denominaremos *clases* de formas cuadráticas a las clases de equivalencia estricta en el conjunto de formas cuadráticas binarias enteras. Dado $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, el *número de clases* de formas de discriminante D es la cantidad de clases de formas cuadráticas *primitivas*³⁸ de discriminante D ; lo denotamos $h(D)$.

Observación 13.9. Si $D < 0$, el número de clases $h(D)$ coincide con la cantidad de formas reducidas de discriminante D (Teorema 13.5). Las formas primitivas $x^2 + ny^2$ con $n > 0$ son formas reducidas. Pero eso no quiere decir que cada una sea la única forma primitiva reducida de discriminante $-4n$. Si $h(-4n) = 1$, entonces la condición $(-n/p) = 1$ caracteriza aquellos primos que pueden ser expresados en la forma $p = x^2 + ny^2$ (Corolario 13.7) y esta condición puede ser formulada como una serie de condiciones de congruencia sobre p , módulo $4n$.

Ejemplo 13.10. Veamos que $x^2 + 7y^2$ es la única forma cuadrática reducida de discriminante -28 . Si $f = \{a, b, c\}$ tiene discriminante -28 , entonces b es par. Si está reducida, entonces $|b| \leq a \leq c$. Como $-28 = b^2 - 4ac$, se deduce que $-28 \leq -3a^2$ y, por lo tanto, que $a \in \{1, 2, 3\}$. Por otro lado, debe ser $-a < b \leq a$. Si $a = 3$, entonces $b \in \{-2, 0, 2\}$. Pero $-28 \equiv 2 \pmod{3}$, mientras que $b^2 \equiv 0, 1 \pmod{3}$. Así que debe ser $a \in \{1, 2\}$. Si $a = 2$, la única posibilidad sería $b = 0$, pero $-28 \equiv 4 \pmod{8}$, mientras que $b^2 \equiv 0 \pmod{8}$. Finalmente, la única posibilidad restante es $a = 1$. Entonces, $b = 0$ y $c = 7$. Así, $h(-28) = 1$.

En particular, como $x^2 + 7y^2$ es la única forma cuadrática reducida de discriminante -28 , por el Corolario 13.7, $(-7/p) = 1$, si y sólo si $p = x^2 + 7y^2$. Si ahora logramos describir qué primos p satisfacen $(-7/p) = 1$, habremos encontrado condiciones que garantizan que p se pueda expresar en la forma $p = x^2 + 7y^2$. Ahora, $(-7/p) = 1$, si y sólo si $(-1/p)(7/p) = 1$. Equivalentemente, $(-1/p) = (7/p) = 1$, o bien $(-1/p) = (7/p) = -1$. Es decir,

$$\begin{aligned} p &\equiv 1 \pmod{4} \quad \text{y} \quad p \equiv 1, 2, 4 \pmod{7}, \quad \text{o bien} \\ p &\equiv 3 \pmod{4} \quad \text{y} \quad p \equiv 1, 2, 4 \pmod{7}. \end{aligned}$$

O sea, un primo impar p se expresa en la forma $p = x^2 + 7y^2$, si y sólo si $p \equiv 1, 2, 4 \pmod{7}$.

³⁸ Ver el Ejercicio 11.2 para una justificación de por qué sólo consideramos clases de formas primitivas.

Teorema 13.11 (Landau). Para $n \in \mathbb{Z}$, $n > 0$, se cumple $h(-4n) = 1$, si y sólo si $n \in \{1, 2, 3, 4, 7\}$.

Demostración. Si $n \in \{1, 2, 3, 4, 7\}$, entonces $x^2 + ny^2$ es la única forma primitiva reducida de discriminante $-4n$ (**ejercicio**).³⁹ Recíprocamente, si $n \notin \{1, 2, 3, 4, 7\}$, encontraremos una segunda forma reducida, primitiva y de discriminante $-4n$.

Supongamos, primero, que n no es una potencia de un número primo y que $n = ac$ con $1 < a < c$, $(a, c) = 1$. Entonces, la forma $ax^2 + cy^2$ es una forma primitiva, reducida y de discriminante $-4ac = -4n$.

Supongamos, ahora, que $n = 2^r$. Si $r \in \{0, 1, 2\}$, entonces $n \in \{1, 2, 4\}$. Si $r = 3$, entonces $n = 8$ y se verifica que $h(-4 \cdot 8) = 2$ (**ejercicio**). Si $r \geq 4$, la forma

$$4x^2 + 4xy + (2^{r-2} + 1)y^2$$

es primitiva, reducida y de discriminante $4^2 - 4 \cdot 4 \cdot (2^{r-2} + 1) = -4 \cdot 2^r = -4n$.

Supongamos, por último, que $n = p^r$, p primo impar. Si $n + 1$ no es potencia de primo, entonces $n + 1 = ac$, donde $1 < a < c$, $(a, c) = 1$ y la forma $ax^2 + 2xy + cy^2$ es primitiva, reducida y de discriminante $4 - 4ac = -4n$. Si $n + 1$ es potencia de primo, entonces, como es par, $n + 1 = 2^s$. Si $s \in \{1, 2, 3\}$, entonces $n \in \{1, 3, 7\}$. Si $s = 4$, $n = 15$ no es potencia de primo. Si $s = 5$, entonces $n = 31$ y se verifica que $h(-4 \cdot 31) = 3$ (**ejercicio**). Si $s \geq 6$, entonces a forma

$$8x^2 + 6xy + (2^{s-3} + 1)y^2$$

es primitiva, reducida y de discriminante $6^2 - 4 \cdot 8 \cdot (2^{s-3} + 1) = 4 - 2^{s+2} = -4 \cdot (2^s - 1) = -4n$. \square

Ejercicios

Ejercicio 13.1. Sea $\{a, b, c\}$ una forma cuadrática que verifica $|b| \leq |a| \leq |c|$ y sea $D = b^2 - 4ac$ su discriminante. Probar que,⁴⁰

(A) si $D > 0$, entonces $0 \leq |a| \leq \sqrt{D/4}$ y que,

(B) si $D < 0$, entonces $0 < a \leq \sqrt{|D|/3}$.

Concluir, como consecuencia del Lema 13.1, que el número de clases de formas cuadráticas de discriminante no cuadrado es finito.

Ejercicio 13.2. Probar que $\{a, b, c\}$ es estrictamente equivalente a las formas:

$$\{c, -b, a\} \quad \text{y} \quad \{a, 2ah + b, ah^2 + bh + c\}.$$

Mostrar que $\{a, b, c\}$ y $\{a, -b, c\}$ son equivalentes, pero no necesariamente estrictamente equivalentes (asumir que $D < 0$).

³⁹Hint: Argumentar como en el Ejemplo 13.10.

⁴⁰Hint: Ver el Ejemplo 13.10.

Ejercicio 13.3. Probar que $\{a, -a, c\}$ y $\{a, a, c\}$ son estrictamente equivalentes.

Ejercicio 13.4. Sea $f = \{a, b, c\}$ una forma cuadrática. Probar que

(i) si $|b| \leq a \leq c$, entonces

$$|f(x, y)| \geq (a - |b| + c) \min\{|x|^2, |y|^2\} \quad \text{y que}$$

(ii) si $|b| < a < c$, las únicas representaciones propias $f(x, y) = a$ son $(x, y) = (\pm 1, 0)$ y las únicas representaciones propias $f(x, y) = c$ son $(x, y) = (0, \pm 1)$

(iii) ¿Qué se puede decir en los casos $|b| = a < c$ y $|b| < a = c$?

Ejercicio 13.5. Hallar condiciones sobre un primo impar p que garantizan que $p = x^2 + ny^2$, para $n \in \{1, 2, 3, 4, 7\}$ (el caso $n = 7$ lo hicimos en el Ejemplo 13.10).

Ejercicio 13.6. Hallar la forma reducida estrictamente equivalente a $\{126, 74, 13\}$.

Ejercicio 13.7. Determinar las formas primitivas reducidas de discriminantes $-20, -56, -3, -15, -24, -31, -52$.

Ejercicio 13.8. Sea p un número primo y sean f y f_1 formas cuadráticas de igual discriminante que representan, ambas, p . Probar que f y f_1 son equivalentes (pero no necesariamente estrictamente equivalentes).

Ejercicio 13.9. Probar que, si $f = ax^2 + cy^2$ y f_1 es una forma equivalente a f , entonces f_1 es estrictamente equivalente a f . Concluir que, si $f = x^2 + ny^2$ y f_1 es una forma reducida equivalente a f , entonces $f_1 = f$.

14 Géneros A

En esta sección, introduciremos la noción de *género* de una forma cuadrática (binaria, definida positiva y primitiva), que nos permitirá subdividir las formas cuadráticas teniendo en cuenta sus propiedades de representación. Sabemos que formas equivalentes representan los mismos enteros (el conjunto de enteros representados es un invariante de la clase de equivalencia de una forma). Con lo cual, la subdivisión del conjunto de formas de acuerdo con su género terminará siendo una subdivisión más gruesa que la subdivisión por clases de equivalencia o clases de equivalencia estricta; cada género de formas cuadráticas estará conformado por (posiblemente) varias clases de equivalencia.

El Teorema 13.11 nos muestra que, salvo muy pocos casos, si queremos caracterizar los primos representados en la forma $p = x^2 + ny^2$, las ideas introducidas hasta esta parte no son suficientes. Dado un discriminante D , el Teorema 12.3 nos permite decidir si un primo p es representado por *alguna* forma de discriminante D . Más aun, como toda forma es equivalente a una forma reducida, podemos decidir si p es representado por alguna forma reducida de discriminante D . Si el número de clases $h(D) = 1$, entonces la condición $\chi(p) = 1$ es suficiente para saber cuál es dicha forma, pues hay, en ese caso, una única forma reducida; si $D = -4n$, dicha forma es $\{1, 0, n\}$. Pero, cuando el número de clases $h(D) > 1$, la condición $\chi(p) = 1$ no da información acerca de cuál de todas las formas reducidas (o cuáles) representan p .

Ejemplo 14.1. Hay dos clases de formas de discriminante -20 . El argumento es similar al del Ejemplo 13.10. Si $f = \{a, b, c\}$ es una forma cuadrática primitiva, reducida y de discriminante -20 , entonces $1 \leq a \leq \sqrt{20/3} < 7$, o sea $a \in \{1, 2\}$. Además, como $D \equiv 0 \pmod{4}$, debe ser $b \equiv 0 \pmod{2}$. Si $a = 1$, entonces $b = 0$ y $c = 5$ es la única posibilidad. Si $a = 2$, entonces $b \in \{0, 2\}$, pero $-20 = b^2 - 4ac$ con $c \in \mathbb{Z}$ fuerza que $b = 2$ y, así, $c = 3$. O sea, $h(-20) = 2$ y las clases están representadas por las formas primitivas reducidas

$$x^2 + 5y^2 \quad \text{y} \quad 2x^2 + 2xy + 3y^2.$$

Por el Corolario 13.7, un primo impar $p \neq 5$ está representado por una forma reducida de discriminante -20 , si y sólo si $(-5/p) = 1$. Pero

$$(-5/p) = 1, \quad \text{si y sólo si} \quad p \equiv 1, 9, 7, 3 \pmod{20}.$$

En definitiva, un primo impar $p \neq 5$ es representado por una forma reducida de discriminante -20 , si y sólo si

$$p \equiv 1, 9, 7, 3 \pmod{20} \quad \text{si y sólo si} \quad \begin{cases} p = x^2 + 5y^2 & \text{o} \\ p = 2x^2 + 2xy + 3y^2. \end{cases}$$

Hasta este punto, la teoría general no nos permite decidir si $p = x^2 + 5y^2$ o no. Ahora, si $p = x^2 + 5y^2$, entonces $p \equiv 1, 4 \pmod{5}$ y, en particular,

$$p \equiv 1, 9 \pmod{20} \quad \text{si y sólo si} \quad p = x^2 + 5y^2.$$

Análogamente, si $(x, y) = 1$, entonces $2x^2 + 2xy + 3y^2 \equiv 2, 3 \pmod{5}$, con lo que

$$p \equiv 7, 3 \pmod{20} \quad \text{si y sólo si} \quad p = 2x^2 + 2xy + 3y^2.$$

Ejemplo 14.2. Hay cuatro clases de formas de discriminante -56 . Las formas reducidas correspondientes son

$$\{1, 0, 14\}, \quad \{2, 0, 7\}, \quad \{3, -2, 5\} \quad \text{y} \quad \{3, 2, 5\}.$$

Por el Corolario 13.7, un primo impar $p \neq 7$ está representado por alguna de estas formas cuadráticas, si y sólo si $(-14/p) = 1$. Pero **(ejercicio)**,

- si $p = x^2 + 14y^2$ o $p = 2x^2 + 7y^2$, entonces $p \equiv 1, 7 \pmod{8}$ y $p \equiv 1, 2, 4 \pmod{7}$, y,
- si $p = 3x^2 \pm 2xy + 5y^2$, entonces debe ser $p \equiv 3, 5 \pmod{8}$ y $p \equiv 3, 5, 6 \pmod{7}$.

La condición módulo 7 la podemos deducir, por ejemplo, de la condición módulo 8 y de que, por Reciprocidad cuadrática,

$$(-14/p) = (-7/p)(2/p) = (p/7)(2/p).$$

Notamos, además, que $\{1, 0, 14\}$ y $\{2, 0, 7\}$ ambas representan primos en todas las clases $p \equiv 1, 25, 9, 15, 39, 23 \pmod{56}$, y que $\{3, \pm 2, 5\}$ representan exactamente los mismos enteros.

Observación 14.3. Fijado un discriminante D , la clase de congruencia de un primo p módulo D nos permite decir, en primera instancia, si p es representable por alguna forma de discriminante D . Como se ve en el Ejemplo 14.1 y en el Ejemplo 14.2, por la clase de congruencia de p también podemos precisar mejor las formas que posiblemente lo representen; podemos eliminar formas que no lo pueden representar, de acuerdo con la clase de congruencia. En el Ejemplo 14.1, podemos ver que la clase de congruencia de un primo p módulo 20 determina la forma reducida que lo representa. En el Ejemplo 14.2, no es posible distinguir exactamente cuál es la clase que lo representa. En particular, no podemos decir, dado $p \equiv 1, 25, 9, 15, 39, 23 \pmod{56}$, si p es de la forma $x^2 + 14y^2$. Más aun, p podría estar representado por más de una forma reducida. En definitiva, hay un límite a lo que podemos deducir a partir de (estas) congruencias.

Definición 14.4. Dados $D \in \mathbb{Z}$, una clase de congruencia $c \in \mathbb{Z}/D\mathbb{Z}$ y una forma f , decimos que *la clase c es representada por f* (o que *f representa la clase c*), si existe $m \in c$, perteneciente a la clase, tal que m es representado por f .

Ejemplo 14.5. La forma $\{1, 0, 14\}$ representa las clases

$$[1] , \quad [25] , \quad [9] , \quad [15] , \quad [39] \quad \text{y} \quad [23]$$

módulo 56, porque, por ejemplo, representa *los enteros* 1, 25, 9, 15, 39 y 23. Sin embargo, la forma $\{2, 0, 7\}$ también representa estas clases: representa

$$9 = 2 \cdot 1^2 + 7 , \quad 15 = 2 \cdot 2^2 + 7 , \quad 25 = 2 \cdot 3^2 + 7 \quad \text{y} \quad 39 = 2 \cdot 4^2 + 7 ;$$

pero también representa

$$57 = 2 \cdot 5^2 + 7 \equiv 1 \pmod{56} \quad \text{y} \quad 79 = 2 \cdot 6^2 + 7 \equiv 23 \pmod{56} .$$

Definición 14.6. Dos formas cuadráticas de discriminante D *pertenecen al mismo género*, si representan las mismas clases en $U(D)$.

Ejemplo 14.7. Para $D = -20$, hay dos formas reducidas y, por lo tanto, dos clases de formas de discriminante -20 . De acuerdo con el Ejemplo 14.1, las dos formas reducidas no pertenecen al mismo género. En particular, en este caso, el género de una forma coincide con su clase de equivalencia (estricta). Las clases de congruencia módulo 20 también se dividen en dos, aquellas representadas por $\{1, 0, 5\}$ y aquellas representadas por $\{2, 2, 3\}$:

$$\{1, 9\} \quad \text{y} \quad \{7, 3\} .$$

Para $D = -56$, sin embargo, encontramos cuatro clases de formas cuadráticas de discriminante -56 ; hay cuatro formas reducidas. De acuerdo con el Ejemplo 14.2, las formas se agrupan en dos géneros:

$$\{ \{1, 0, 14\} , \{2, 0, 7\} \} \quad \text{y} \quad \{ \{3, -2, 5\} , \{3, 2, 5\} \} .$$

Las clases de congruencia módulo 56 se dividen en dos, aquellas representadas por uno y otro género:

$$\{1, 25, 9, 15, 39, 23\} \quad \text{y} \quad \{3, 19, 27, 45, 5, 13\} .$$

15 El Teorema de Dirichlet

Con la Definición 14.6, parece que estamos dejando de lado el problema de representar primos por formas cuadráticas, porque, en lugar de responder qué primos representa cada una de las formas reducidas, el género de una forma parece responder qué clases de congruencia módulo el discriminante representa dicha forma; en particular, pareciera que nos hemos olvidado del problema de clasificar primos de la forma $p = x^2 + ny^2$. ¿Cómo podemos determinar si una clase de congruencia módulo D es representada por alguna forma de discriminante D ?

En esta sección hacemos una digresión por el Teorema de Dirichlet sobre primos en progresiones aritméticas y lo relacionaremos con el estudio de la representabilidad por formas cuadráticas.

Teorema 15.1 (Dirichlet). *Dados números enteros coprimos m y D , la sucesión*

$$m, \quad m + D, \quad m + 2D, \quad \dots$$

contiene infinitos números primos.

Una consecuencia del Teorema 15.1 es que toda clase de congruencia módulo D contiene algún número primo. Veamos cómo se relaciona esto con el problema de representabilidad por formas cuadráticas.

Por el Lema 12.2, fijado un entero m (impar), podemos decidir fácilmente qué discriminantes (coprimos con m) lo representan: son aquellos que pertenecen al subgrupo de cuadrados,

$$\{x^2 : x \in U(m)\} \leq U(m).$$

Si $m = p$ es primo (impar), entonces

$$\{x^2 : x \in U(p)\} = \{y \in U(p) : (y/p) = 1\}.$$

Recíprocamente, fijado un discriminante D , ¿existen condiciones sobre las clases de congruencia módulo D para determinar qué enteros m se pueden representar por formas de discriminante D ? El Teorema 12.3 nos da un criterio sencillo para determinar qué *primos* podemos representar por formas de discriminante D : son aquellos que pertenecen al núcleo de la función χ del Lema 8.9,

$$\ker(\chi) = \{c \in U(D) : \chi(c) = 1\} \leq U(D).$$

Si $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D < 0$, es un discriminante y $c \in U(D)$, existe, por el Teorema 15.1, al menos un primo $p \in c$ ($[p] = c$). Ahora, por el Teorema 12.3, si $c \in \ker(\chi)$, entonces $\chi(p) = 1$ y p está representado por alguna forma de discriminante D . En particular, deducimos lo siguiente: si $c \in \ker(\chi)$, entonces algún elemento $m \in c$ de la clase es representado (propia) por alguna forma (primitiva) de discriminante D .

Corolario 15.2. *Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$ y sea $c \in U(D)$. Entonces, la clase c es representada (propia) por alguna forma (primitiva) de discriminante D , si $c \in \ker(\chi)$.*

Observación 15.3. Recíprocamente, el Lema 16.5 muestra, entre otras cosas, que, si c es representada por una forma de discriminante D , entonces $c \in \ker(\chi)$.

En definitiva, tenemos una condición necesaria (y suficiente) para determinar qué *clases de congruencia* son representadas por *alguna* forma de discriminante D . Como vimos en la § 14, no es posible, en general, representar cualquier clase de congruencia (detro de las clases representables) por cualquier forma cuadrática. El género agrupa formas de acuerdo con las clases de congruencia que cada una puede representar y clases de congruencia de acuerdo con las formas que las representan.

Terminamos esta sección con algunos ejemplos que ilustran el uso del Teorema 15.1 en este contexto.

Ejemplo 15.4. El grupo $U(3)$ consta de dos clases de congruencia:

$$[1] \quad \text{y} \quad [2] .$$

La clase $[1]$ contiene al primo 7 y la clase $[2]$ contiene a 5. Para decidir qué clases se pueden representar por formas de discriminante -3 , necesitamos conocer el valor de χ en ellas. Ahora,

$$\chi(1) = \chi(7) = \left(\frac{-3}{7} \right) = 1 ,$$

mientras que

$$\chi(2) = \chi(5) = \left(\frac{-3}{5} \right) = -1 .$$

De hecho, podríamos deducir, usando las propiedades del símbolo de Legendre, que $(-3/p) = 1$, si sólo si $p \equiv 1 \pmod{3}$. Hay, por otro lado, sólo una forma reducida de discriminante -3 :

$$x^2 + xy + y^2 .$$

Por el Corolario 15.2, la clase de congruencia módulo 3 $[1]$ es representable por esta forma cuadrática. Efectivamente,

$$7 = 1^2 + 1 \cdot (-3) + (-3)^2 .$$

Ahora bien, nuevamente por el Corolario 15.2, los primos pertenecientes a la clase $[2]$ no pueden ser representados por la forma $\{1, 1, 1\}$ (y, por lo tanto, por ninguna forma de discriminante -3). Pero cabe, aun, la posibilidad de que la clase sí sea representable, es decir, que exista algún entero $m \equiv 2 \pmod{3}$ (no primo) que sí sea representado en la forma $\{1, 1, 1\}$. La recíproca del Corolario 15.2 garantiza que esto no puede pasar en general. De hecho, si no nos olvidamos de que la forma es $x^2 + xy + y^2$, podemos ver que, si $(x, y) = 1$, entonces

$$x^2 + xy + y^2 \equiv 0, 1 \pmod{3} ,$$

con lo cual, la clase $[2]$ no es representable por formas de discriminante -3 .

c	1	2	4	7	8	11	13	14
$p \in c$	31	17	19	37	23	41	43	29
$\chi(p)$	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
$p = f(x, y)$	$\{1, 1, 4\}$	$\{2, 1, 2\}$	$\{1, 1, 4\}$	$\{2, 1, 2\}$				

Tabla 3: Valores de χ para $D = -15$ y la forma reducida f que representa cada clase.

Ejemplo 15.5. Las clases de congruencia módulo 15 en $U(15)$ son:

$$[1] , \quad [2] , \quad [4] , \quad [7] , \quad [8] , \quad [11] , \quad [13] \quad \text{y} \quad [14] .$$

Queremos decidir cuáles de estas clases son representadas por alguna forma de discriminante -15 y, dentro de lo posible, determinar, dada una clase representable, cuál de las dos formas la representa. Empezamos calculando la función χ . Para eso necesitamos evaluarla en cada una de las clases en $U(15)$ (en las clases módulo 15 que no pertenecen a $U(15)$, su valor es 0). Pero, según el Lema 8.9, los únicos enteros en los que conocemos (más o menos) explícitamente la función χ es en los primos (que, en este caso, no dividen a 15). Dada una clase $c \in U(15)$, si $p \in c$ es primo perteneciente a la clase, entonces,

$$\chi(c) = \chi(p) = \left(\frac{-15}{p} \right) .$$

Pero, por propiedades del símbolo de Legendre,

$$\left(\frac{-15}{p} \right) = \left(\frac{-3}{p} \right) \left(\frac{5}{p} \right) .$$

Entonces,

$$\left(\frac{-15}{p} \right) = 1 \quad \text{si y sólo si} \quad \begin{cases} p \equiv 1 \pmod{3} & \text{y} & p \equiv \pm 1 \pmod{5} \\ p \equiv 2 \pmod{3} & \text{y} & p \equiv \pm 3 \pmod{5} \end{cases} .$$

O sea, $\chi(p) = 1$, si y sólo si $p \equiv 1, 4, 2, 8 \pmod{15}$. La Tabla 3 muestra, para cada clase $c \in U(15)$, un primo p perteneciente a c y el valor de $\chi(p)$. Por otro lado, hay dos formas reducidas de discriminante $D = -15$; ellas son:

$$x^2 + xy + 4y^2 \quad \text{y} \quad 2x^2 + xy + 2y^2 .$$

Notamos que, si $(x, y) = 1$, entonces

$$x^2 + xy + 4y^2 \equiv 1 \pmod{3} \quad \text{y} \quad 2x^2 + xy + 2y^2 \equiv 2 \pmod{3} .$$

En particular, no hay posibilidad de que ambas formas representen las mismas clases módulo 15. Complementando esta última observación, si $(x, y) = 1$,

$$x^2 + xy + 4y^2 \equiv 1, 4 \pmod{5} \quad \text{y} \quad 2x^2 + xy + 2y^2 \equiv 2, 3 \pmod{5} .$$

De hecho, para los primos de la Tabla 3,

$$\begin{aligned} 31 &= 3^2 + 3 \cdot 2 + 4 \cdot 2^2 \\ 17 &= 2 \cdot 1^2 + 1 \cdot (-3) + 2 \cdot (-3)^2 \\ 19 &= 1^2 + 1 \cdot 2 + 4 \cdot 2^2 \\ 23 &= 2 \cdot 1^2 + 1 \cdot 3 + 2 \cdot 3^2 . \end{aligned}$$

No demostraremos en el curso el Teorema 15.1. Un desarrollo de este tema y otros relacionados se puede encontrar en [Dav80]. No lo usaremos, tampoco, en ninguna de las demostraciones. De todas maneras, es una ventaja *saber* que este resultado es cierto. Convencerse aunque sea experimentalmente es suficiente. El desarrollo de la teoría de formas cuadráticas y los primeros intentos de Dirichlet de demostrar este resultado se solapan en el tiempo y las ideas de uno y otro lado se entrelazan.

Ejercicios

Ejercicio 15.1. Para $D \in \{-24, -31, -52\}$, describir los géneros de formas cuadráticas de discriminante D . Para cada valor de D , hallar

- el subconjunto $U(D) \subset \mathbb{Z}/D\mathbb{Z}$,
- el subgrupo $\ker(\chi) \leq U(D)$,
- las formas reducidas (Ejercicio 13.7),
- las clases de congruencia módulo D representadas por la *forma principal*, es decir, por $\{1, 0, -D/4\}$, si $D \equiv 0 \pmod{4}$, y por $\{1, 1, (1-D)/4\}$, si $D \equiv 1 \pmod{4}$

y agrupar

- las formas reducidas por género y
- las clases de congruencia módulo D de acuerdo con el género que las representa.

Verificar, en cada caso, que

$$H = \{c \in U(D) : c \text{ es representada por la forma principal}\}$$

es un subgrupo de $\ker(\chi)$ (de $U(D)$).

16 Géneros B

Observación 16.1. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D < 0$, y sean f, g formas de discriminante D pertenecientes al mismo género. Si $c \in U(D)$ es representada por f , entonces es representada por g . Dicho de otra manera, si $m \in c$ y $m = f(x, y)$ para ciertos $x, y \in \mathbb{Z}$, entonces existen $n \in c$ y $x', y' \in \mathbb{Z}$ tales que $n = g(x', y')$.

Definición 16.2. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D < 0$, y sea f una forma de discriminante D . Si $c \in U(D)$ es representada por f , decimos también que la clase c es representada por el género de f .

Definición 16.3. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D < 0$. Llamamos *forma principal* (de discriminante D) a la forma

- $\{1, 0, -D/4\}$, si $D \equiv 0$, y a la forma
- $\{1, 1, (1 - D)/4\}$, si $D \equiv 1$.

El *género principal* (de discriminante D) es el género al que pertenece la forma principal.

Observación 16.4. Dado un discriminante, la forma principal de dicho discriminante es una forma primitiva reducida.

Lema 16.5. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D < 0$, y sea f una forma de discriminante D . Entonces,

- (i) los valores en $U(D)$ representados por el género principal constituyen un subgrupo $H \leq \ker(\chi)$;
- (ii) los valores en $U(D)$ representados por el género de f constituyen una coclase de H en $\ker(\chi)$.

Teorema 16.6. Sea $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$, $D < 0$, y sea $H \leq \ker(\chi)$ como en el Lema 16.5. Si $H' \subset \ker(\chi)$ es una coclase de H en $\ker(\chi)$ y p es un primo impar que no divide a D , entonces su clase de congruencia $[p] \in H'$, si y sólo si p es representado por una forma de discriminante D perteneciente al género correspondiente a H' .

Observación 16.7. Dada una coclase H' de H en $\ker(\chi)$, las clases de congruencia contenidas en H' son representadas por formas de discriminante D (pues $H' \subset \ker(\chi)$; ver el Corolario 15.2). Dada una forma (primitiva) de discriminante D , f , las clases en $U(D)$ representadas por f constituyen una coclase de H en $\ker(\chi)$ (Lema 16.5 (ii)). Existe, entonces, una biyección

$$(\text{coclases de } H \text{ en } \ker(\chi)) \simeq (\text{géneros de formas primitivas de discriminante } D)$$

dada por asignar, a una forma (primitiva de discriminante D) f , el conjunto de enteros que ella representa y, a cada entero m coprimo con D , el conjunto de formas (primitivas de discriminante D) que lo representan.

Ejercicios

Ejercicio 16.1. Para $D \in \{-40, -60, -84, -88, -92, -120\}$, describir los géneros de formas cuadráticas de discriminante D .⁴¹

17 Resumen

⁴¹Hint: Recordar que dos coclases distintas son disjuntas, tiene todas el mismo cardinal y su unión es todo.

Parte IV

Composición de formas cuadráticas

Parte V

Reciprocidad cúbica y bicuadrática

Referencias

- [Cox22] D. A. Cox. *Primes of the Form $x^2 + ny^2$. Fermat, Class Field Theory, and Complex Multiplication*. Third edition with solutions. With contributions by Roger Lipsett. 3rd edition. Vol. 387. AMS Chelsea Publ. Providence, RI: American Mathematical Society (AMS), 2022.
- [Dav80] H. Davenport. *Multiplicative Number Theory*. 2nd. ed. Vol. 74. Grad. Texts Math. Springer, Cham, 1980.
- [Dav08] H. Davenport. *The Higher Arithmetic. An Introduction to the Theory of Numbers*. Editing and additional material by James H. Davenport. 8th revised ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [Gau86] C. F. Gauß. *Disquisitiones arithmeticae*. Transl. from the Latin by Arthur A. Clarke, Rev. by William C. Waterhouse, with the help of Cornelius Greither and A. W. Grootendorst. (Reprint of the 1966 ed.) New York etc.: Springer-Verlag. xx, 472 p. DM 148.00 (1986). 1986.
- [Gen84] E. R. Gentile. *Notas de Álgebra I*. 3rd corrected and augmented ed. Ediciones Previas. Buenos Aires: EUDEBA, 1984.
- [HW08] G. H. Hardy and E. M. Wright. *An Introduction to the Theory of Numbers*. Edited and revised by D. R. Heath-Brown and J. H. Silverman. With a foreword by Andrew Wiles. Ed. by D. R. Heath-Brown and J. H. Silverman. 6th ed. Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [IR90] K. Ireland and M. Rosen. *A Classical Introduction to Modern Number Theory*. 2nd ed. Vol. 84. Grad. Texts Math. New York etc.: Springer-Verlag, 1990.
- [KKS00] K. Kato, N. Kurokawa, and T. Saito. *Number Theory 1. Fermat's Dream*. Transl. from the Japanese by Masato Kuwata. Vol. 186. Transl. Math. Monogr. Providence, RI: American Mathematical Society, 2000.
- [Lan99] E. Landau. *Elementary Number Theory*. Translated from the German by J. E. Goodman. With added exercises by P. T. Bateman and Eugene Kohlbecker. Reprint of the 1966 2nd edition. Providence, RI: American Mathematical Society (AMS), 1999.
- [Lan02] S. Lang. *Algebra*. 3rd revised ed. Vol. 211. Grad. Texts Math. New York, NY: Springer, 2002.
- [NZM91] I. Niven, H. S. Zuckerman, and H. L. Montgomery. *An Introduction to the Theory of Numbers*. 5th ed. New York etc.: John Wiley &— Sons, Inc., 1991.

Índice de contenidos

I	Divisibilidad y congruencia	5
1	Divisibilidad	5
2	Primos	8
3	Congruencias	13
4	Estructuras algebraicas	18
5	Enteros modulares	21
6	Polinomios	24
II	Reciprocidad cuadrática	29
7	Reciprocidad y descenso	29
8	La ecuación $p = x^2 + ny^2$ y Reciprocidad cuadrática	34
9	Residuos cuadráticos y una demostración del Teorema 8.7	44
10	Los límites de Reciprocidad cuadrática	50
III	Formas cuadráticas	52
11	Definiciones y primeras propiedades	52
12	Representaciones, equivalencia y residuos	57
13	Formas reducidas y número de clases	58
14	Géneros A	63
15	El Teorema de Dirichlet	66
16	Géneros B	69
17	Resumen	70
IV	Composición de formas cuadráticas	71

V	Reciprocidad cúbica y bicuadrática	72
	Referencias	73